



MAREK IWAŃSKI<sup>1)</sup>  
 GRZEGORZ MAZUREK<sup>2)</sup>  
 ANNA CHOMICZ-KOWALSKA<sup>3)</sup>  
 PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI<sup>4)</sup>  
 MAŁGORZATA CHOLEWIŃSKA<sup>5)</sup>  
 MATEUSZ MAREK IWAŃSKI<sup>6)</sup>  
 KRZYSZTOF MACIEJEWSKI<sup>7)</sup>  
 PIOTR RAMIĄCZEK<sup>8)</sup>

## INFLUENCE OF MIXED HYDRAULIC BINDER ON THE PROPERTIES OF RECYCLED ASPHALT MIXTURES WITH FOAMED BITUMEN<sup>9)</sup>

## WPŁYW SPOIWA MIESZANEGO NA WŁAŚCIWOŚCI RECYKLOWANEJ MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ Z ASFALTEM SPIENIONYM<sup>9)</sup>

**STRESZCZENIE.** Rozwój prac modernizacyjnych dróg różnych kategorii, od autostrad po drogi samorządowe, przyczynia się do powstawania dużej ilości destruktu asfaltowego (RAP) o zróżnicowanej jakości i uziarnieniu. W ramach gospodarki zrównoważonej niezbędne jest jego ponowne wykorzystanie. Obecnie w większości przeznaczony jest on do wytworzenia recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych w budowywanych w warstwą podbudowy. Zróżnicowana jakość destruktu wymaga zastosowania odpowiedniego rodzaju spoiwa, tak aby można było go wykorzystać w optymalny sposób. W związku z tym zaistniała potrzeba opracowania spoiwa hydraulicznego mieszanego, które składa się z cementu CEM I 32.R, wapna hydratyzowanego  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz ubocznych cementowych produktów pylastych (UCPP) dobieranych w odpowiednich proporcjach. Badano wpływ składu spoiwa hydraulicznego mieszanego na następujące właściwości mieszanki wytwarzanej z zastosowaniem asfaltu spienionego: zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, wytrzymałość na osiowe ściskanie, odporność na oddziaływanie wilgoci i mrozu wg czterech różnych parametrów oraz moduł sztywności w temperaturze  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$  i  $+40^\circ\text{C}$  wg metody IT-CY. Na podstawie wykonanych badań ustalono rekomendowany skład spoiwa zapewniający wymagane właściwości recyklowanej mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym i asfaltem spienionym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** asfalt spieniony, destruktu asfaltowy, mieszanka mineralno-asfaltowa recyklowana na zimno, spoiwo mieszane.

**ABSTRACT.** Developments in reconstruction of roads of all categories – from motorways to local roads – result in production of large quantities of reclaimed asphalt pavement (RAP) material of various quality and grading. In a sustainable economy, it is necessary to recycle such materials. Currently RAP is primarily reused in recycled mixtures dedicated for road base courses. Variable quality of RAP material requires application of appropriate binding agents to optimize the performance of the obtained mixtures. There is a need for dedicated three-component hydraulic binder, consisting of CEM I 32.R cement, hydrated lime  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and cement by-pass dust (CBPD), whose proportions should be adopted adequately to the intended use. The influence of hydraulic binder composition was investigated for the following parameters of the obtained mixture with foamed bitumen: air voids, indirect tensile strength, uniaxial compressive strength, resistance to water and frost (according to four different parameters) and stiffness moduli at  $-10^\circ\text{C}$ ,  $+13^\circ\text{C}$ ,  $+25^\circ\text{C}$  and  $+40^\circ\text{C}$  in accordance with the IT-CY method. The recommended composition of the three-component binder providing the required properties of cold-recycled mixture with hydraulic binder and foamed bitumen was determined based on the obtained test results.

DOI: 10.7409/rabdim.023.005

**KEYWORDS:** cold-recycled asphalt mixture, foamed bitumen, mixed hydraulic binder, reclaimed asphalt pavement.

<sup>1)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce; miwanski@tu.kielce.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; gmazurek@tu.kielce.pl

<sup>3)</sup> Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, al. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa; a.kowalska@tu.kielce.pl

<sup>4)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; p.buczynski@tu.kielce.pl

<sup>5)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; mcholewinska@tu.kielce.pl

<sup>6)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; matiawanski@tu.kielce.pl

<sup>7)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; kmaciejewski@tu.kielce.pl

<sup>8)</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; piotrr@tu.kielce.pl

<sup>9)</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 Paises, 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. WSTĘP

Wzrost wymagań użytkowników dróg w zakresie bezpieczeństwa i komfortu jazdy wymaga od administracji drogowej ciągłego prowadzenia prac modernizacyjnych i odnowy sieci drogowej. Na drogach krajowych bardzo istotnym działaniem jest zapewnienie wymaganej szorstkości i równości warstwy ścieralnej nawierzchni. W tym celu wykonywany jest zabieg precyzyjnego jej frezowania. Pozyskiwany jest destrukc asfaltowy o drobnym uziarnieniu, bardzo często nieprzekraczającym 10 mm. Znacząca ilość dróg niższych kategorii wymaga natomiast kompleksowej modernizacji całej konstrukcji nawierzchni. W czasie tych prac pozyskiwany jest destrukc, który wykorzystywany jest do wyprodukowania recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii na zimno. Jest ona przeznaczona do wykonywania dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Destrukc asfaltowy uzyskiwany w czasie takich prac drogowych jest zróżnicowanej jakości.

Zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju destrukc asfaltowy, bez względu na jego jakość, powinien być zagospodarowany w sposób optymalny, aby można było wykorzystać jego właściwości, a zwłaszcza zawarty w nim potencjał energetyczny. W tym celu stosowane są różnego rodzaju technologie recyklingu [1-3]. Jedną z najpowszechniej stosowanych technologii umożliwiających zagospodarowanie tego rodzaju materiału jest technologia recyklingu głębokiego na zimno. Początkowo jako lepsze stosowano emulsję asfaltową [4, 5], natomiast na początku XXI wieku wykonane przez Jenkinsa badania wykazały możliwość zastosowania jako lepsza asfaltu spienianego wodą [2]. Od tamtego czasu technologia ta rozwija się bardzo dynamicznie. Prowadzone są liczne badania dotyczące możliwości uzyskania lepsza o bardzo wysokich parametrach spieniana w wyniku dozowania do niego różnego rodzaju modyfikatorów i dodatków [6-9]. Istotną zaletą technologii recyklingu z asfaltem spienionym jest możliwość stosowania materiału mineralnego niższej jakości oraz tendencja asfaltu spienionego do łączenia się z drobnym kruszywem, a nawet pyłami mineralnymi [10-12]. Mieszanka mineralna charakteryzuje się możliwością zastosowania w jej składzie aż do 20% (m/m) materiału mineralnego o uziarnieniu poniżej 0,063 mm [13, 14], co nie jest możliwe w przypadku stosowania emulsji asfaltowej [13, 15, 16]. Bardzo istotną zaletą jest również możliwość znacznie szybszego obciążania ruchem warstwy konstrukcyjnej wykonanej z tego rodzaju recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej [12, 17]. Dodatkowym atutem rozwoju technologii asfaltu spienionego jest możliwość stosowania lepsza w tej formie do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na górne warstwy asfaltowe konstrukcji nawierzchni w technologii na „ciepło” lub „półciepło” [18-20].

## 1. INTRODUCTION

Growing user expectations regarding road safety and ride quality make it necessary for road administrators to perform constant rehabilitation and reconstruction works. On national roads, maintenance of low roughness and high friction is of great importance. Therefore, micro-milling procedures are often performed, producing fine RAP material with typical particle sizes below 10 mm. A considerable proportion of roads of lower categories requires reconstruction of the entire pavement structure. RAP material obtained during such works is used in production of cold-recycled asphalt mixtures dedicated for lower pavement courses. The reclaimed material displays variable quality.

According to the principles of sustainable development, RAP material of any quality should be reused in the optimum manner to make the most of its properties and energetic potential. Various recycling technologies are used to that end [1-3]. One of the most common technologies enabling reuse of RAP material is the deep cold recycling technology. Initially, bituminous binder was added to the mixture only in the form of emulsion [4, 5], but in early 2000s research by Jenkins indicated that it was also possible to use foamed bitumen [2]. The technology has been developing dynamically since then. Many research works are devoted to improvement of foaming parameters of bitumen by using various additives and modifying agents [6-9]. A significant advantage of recycling with foamed bitumen lies in the possibility of usage of mineral material of lower quality and the tendency of foamed bitumen towards bonding with fine aggregate, even with mineral dust [10-12]. When using foamed bitumen, it is possible to use mineral mixture with as much as 20% (m/m) of material with particle size below 0.063 mm [13, 14], which is impossible in the case of mixtures with bituminous emulsion [13, 15, 16]. Another major advantage is the fact that pavement courses incorporating cold-recycled mixtures with foamed bitumen may be opened to traffic much earlier [12, 17]. Moreover, development of the foamed bitumen technology enables usage of foamed bitumen in production of asphalt mixtures dedicated for upper asphalt layers in “warm” or “half-warm” technology [18-20].

Deep cold recycling technologies – regardless of the form of binder used – are widely applied in road reconstruction, in Poland as well as internationally [15, 20-25]. In Poland, when cold recycling is performed in-plant, it is allowable to use the obtained mixture in base courses of roads subjected to traffic category KR3 or lower [26]. When cold

Technologie recyklingu głębokiego na zimno, niezależnie od rodzaju zastosowanego lepiszcza, obecnie są stosowane na szeroką skalę do przebudów dróg zarówno w Polsce, jak i na całym świecie [15, 20-25]. W kraju metodą „in plant” można wykonywać z recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych warstwy podbudowy nawierzchni obciążonych ruchem do KR3 [26]. Natomiast nie ma takich formalnych ograniczeń w przypadku wytwarzania tego rodzaju mieszanek w technologii „in situ” i wykonywaniu z nich dolnych warstw przebudowywanych konstrukcji nawierzchni drogowych.

W składzie recyklowanych mieszanek przede wszystkim jako spoiwo hydrauliczne stosowany jest cement [17, 27, 28]. Niestety dość często obserwuje się w wyniku jego zastosowania znaczne przesztywnienie wykonanej warstwy konstrukcyjnej, wskutek czego występują spękania podbudowy, które przenoszą się na wyższe warstwy konstrukcyjne nawierzchni [17].

W celu racjonalnego wykorzystania destruktu asfaltowego pozyskiwanego podczas różnych prac drogowych – charakteryzującego się zmiennymi właściwościami oraz zróżnicowanym uziarnieniem – niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego rodzaju spoiwa, które umożliwi optymalne wykorzystanie takiego właśnie materiału do wytwarzania recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych. W związku z tym istnieje potrzeba opracowania takiego spoiwa, które będzie można stosować indywidualnie dla danego rodzaju destruktu asfaltowego [29]. Oprócz cementu niezbędne jest zastosowanie wapna hydratyzowanego, które spełnia rolę stabilizującą wilgoć oraz jest swoistym wielofunkcyjnym dodatkiem o szerokim spektrum działania wykorzystywanym do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych w różnych technologiach [29-34]. Wapno hydratyzowane wpływa na poprawę ich adhezji, zapewnia odpowiedni poziom wodoodporności oraz wzrost parametrów mechanicznych zarówno tradycyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych, jak również mieszanek produkowanych w technologiach obniżonej temperatury wytwarzania i wbudowywania [28, 35]. Pyły cementowe natomiast spełniają rolę swoistego regulatora czasu wiązania i twardnienia stabilizowanej recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej [7, 36].

W związku z tym w ramach projektu TECHMATSTRATEG I podjęto badania mające na celu opracowanie spoiwa mieszane go składającego się z trzech składników: cementu CEM I 32.5R, wapna hydratyzowanego  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz ubocznych cementowych produktów pylistych (UCPP), które dozowano w odpowiednich proporcjach. Ważnym założeniem podjętych prac badawczych jest idea, aby opracowany środek wiążący mógł być komponowany w zależności od jakości i uziarnienia destruktu asfaltowego celem zapewnienia optymalnych

recycling is performed in-place, there are no formal limitations regarding the nature of the road whose reconstructed pavement is to incorporate cold-recycled base course.

The primary hydraulic binder used in cold-recycled mixtures is cement [17, 27, 28]. However, its use frequently leads to excess stiffening of the obtained structural layer and occurrence of cracks that propagate upwards through the pavement [17].

In order to rationally reuse RAP obtained during various road works – with material displaying variable properties and grading – it is necessary to use adequate binding agents that will enable optimum use of such material in recycled asphalt mixtures. Therefore, there is a need for hydraulic binder whose exact composition will be individually adjusted to particular RAP material [29]. Apart from cement, it is necessary to use hydrated lime, which acts as moisture stabilizer and multi-purpose additive in various asphalt mixture technologies [29-34]. Hydrated lime improves adhesion, provides adequate moisture resistance and increases mechanical parameters both in traditional asphalt mixtures and in mixtures with reduced production and placement temperatures [28, 35]. Cement by-pass dust acts as setting and hardening rate regulator in the obtained recycled mixture [7, 36].

Due to the observed need, research effort was undertaken within the TECHMATSTRATEG I project to develop a three-component hydraulic binder consisting of: CEM I 32.5R cement, hydrated lime  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and cement by-pass dusts (CBPD) mixed in appropriate proportions. A significant premise adopted in the research is the idea that the composition of the developed hydraulic binder should be adjustable to the quality and grading of the RAP material in order to provide optimum properties of the obtained cold-recycled mixtures. Mixtures will be produced using foamed bitumen (mixtures designated as MCAS) or, alternatively, bituminous emulsion (MCE). This article is focused exclusively on tests performed on cold-recycled mixtures with foamed bitumen.

## 2. METHODOLOGY AND MATERIALS

### 2.1. BITUMINOUS BINDER

The part of the TECHMATSTRATEG I [17] research presented herein used foamed bitumen produced from neat road bitumen 70/100. The following foaming parameters were determined for the foamed bitumen: expansion ratio *ER* and half-life *HL* according to [6]. The results are

właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych powstałych w technologii recyklingu głębokiego na zimno. W ich składzie jako lepiszcze zastosowany zostanie asfalt spieniony (MCAS) oraz, alternatywnie, emulsja asfaltowa (MCE). W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyłącznie badania recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym.

## 2. METODOLOGIA I MATERIAŁY

### 2.1. LEPI SZCZE ASFALTOWE

W prezentowanym zakresie badań projektu zatytułowanego TECHMATSTRATEG I [17] jako lepiszcze zastosowano asfalt spieniony, który został wyprodukowany z asfaltu drogowego 70/100. Dla asfaltu spienionego określono charakterystykę spieniania w zakresie: wskaźnika ekspansji  $ER$  oraz czasu połowicznego rozpadu  $HL$  wg [6]. Wyniki przedstawiono na Rys. 1. Rezultaty badań podstawowych właściwości asfaltu drogowego przed i po procesie spieniania przedstawiono natomiast w Tabl. 1 [38].

shown in Fig. 1. Basic properties of bitumen determined before and after foaming are given in Table 1 [38].

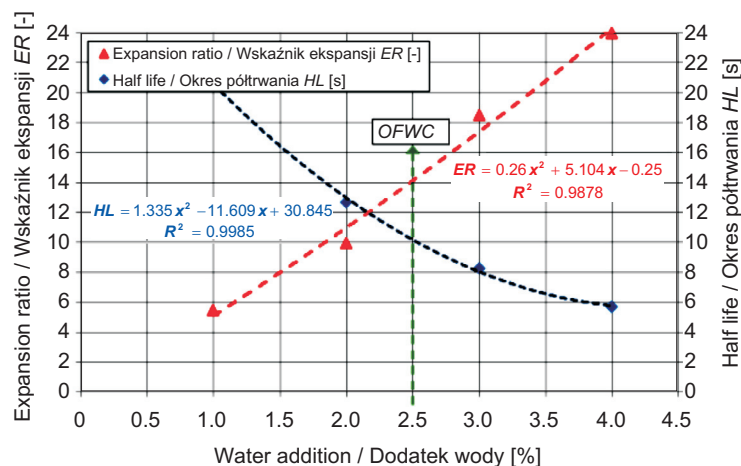


Fig. 1. Determination of the optimum water addition during foaming of the 70/100 bitumen

Rys. 1. Wyznaczenie optymalnej zawartości wody do spieniania asfaltu 70/100

Table 1. Properties of the 70/100 bitumen before and after foaming

Tablica 1. Wyniki oznaczeń właściwości lepiszcza asfaltowego 70/100 przed i po procesie spieniania

Binder Lepiszczce	Penetration [0.1 mm] Penetracja [0,1 mm]		Softening point Temperatura mięknięcia $T_{PIK}$ [°C]		Breaking point Temperatura łamliwości $T_{Fraass}$ [°C]	
	Mean / Średnia	SD	Mean / Średnia	SD	Mean / Średnia	SD
70/100	70.2	2.3	46.8	0.1	-17.8	1.0
F-70/100	68.0	3.7	46.3	0.2	-17.5	0.6

*SD* – standard deviation / odchylenie standardowe

Wyniki badań wykazały, że badane lepiszcze asfaltowe przed procesem spieniania charakteryzowało się penetracją równą  $70,2 \cdot 0,1$  mm, temperaturą mięknięcia  $46,8^{\circ}\text{C}$  oraz temperaturą łamliwości  $-17,8^{\circ}\text{C}$ , spełniając tym samym wymagania określone w załączniku krajowym NA do normy PN-EN 12591. Analizując średnie wartości dokonanych oznaczeń stwierdzić można, że poddanie lepiszcza asfaltowego 70/100 procesowi spieniania spowodowało spadek jego penetracji średnio o  $2,2 \cdot 0,1$  mm, obniżenie temperatury mięknięcia o  $0,5^{\circ}\text{C}$  oraz wzrost temperatury łamliwości o  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Należy wskazać na zwiększenie wartości odchylenia standardowych charakteryzujących wyniki oznaczeń penetracji oraz temperatury mięknięcia lepiszcza asfaltowego poddanego procesowi spieniania.

Kolejnym bardzo istotnym badaniem było określenie charakterystyk lepiszcza w niskiej temperaturze, które oznaczono z wykorzystaniem reometru BBR. Wykonano je zgodnie z PN-EN 14771, stosując cztery oznaczenia przy jednej tem-

Test results indicated that the tested bitumen before foaming displayed penetration of  $70.2 \cdot 0.1$  mm, softening point of  $46.8^{\circ}\text{C}$  and breaking point of  $-17.8^{\circ}\text{C}$ . Therefore, it met the requirements established in the national annex NA to the PN-EN 12591 standard. As visible from the obtained mean values, foaming of the 70/100 bitumen resulted in an average decrease in penetration by  $2.2 \cdot 0.1$  mm, a decrease of the softening point by  $0.5^{\circ}\text{C}$  and an increase of the breaking point by  $0.3^{\circ}\text{C}$ . It should be noted that standard deviations of the determined results of penetration and softening point increased after foaming of the bitumen.

Another important test consisted in determination of low-temperature characteristics of the bitumen using a BBR rheometer. It was performed in accordance with PN-EN 14771, with four measurements per each test temperature. Low-temperature properties were analyzed based on the  $S(60)$  and  $m(60)$  parameters. The highest

peraturze pomiaru. Rezultat oceny właściwości niskotemperaturowej ustalono na podstawie oznaczenia parametru  $S(60)$  oraz  $m(60)$ . Najwyższa temperatura z oznaczania  $S(60)$  oraz  $m(60)$  określa krytyczną temperaturę lepszczą. Rezultaty oznaczenia właściwości niskotemperaturowych asfaltu 70/100 przedstawiono w Tabl. 2.

Table 2. Comparison of stiffness modulus  $S$ ,  $m$ -value and critical temperature of the 70/100 bitumen before and after foaming

Tablica 2. Zestawienie wartości modułu sztywności  $S$ , parametru  $m$  oraz temperatury krytycznej asfaltu 70/100 przed i po spienieniu

Bitumen type / Rodzaj asfaltu	$S(60) = 300$ MPa $T(S)_{60}$ [°C]	$m(60) = 0.3$ $T(m)_{60}$ [°C]	$S(T)_{-16}$ [MPa]
70/100 Ref / Przed spienieniem	-19.2	-17.9	262
70/100 Foamed / Po spienieniu	-21.3	-19.8	215

Należy zwrócić uwagę, że niższą temperaturą krytyczną odznaczał się asfalt po procesie spieniania: „70/100 Foamed”. Również napężenie  $S(T)_{-16}$  odczytane w temperaturze  $-16^{\circ}\text{C}$  według EN 14023 było niższe dla asfaltu „70/100 Foamed” niż „70/100 Ref”. W przypadku asfaltu „70/100 Foamed” temperatura krytyczna wynosiła  $-19,8^{\circ}\text{C}$ , natomiast w przypadku „70/100 Ref” wynosiła  $-17,9^{\circ}\text{C}$ . W związku z tym obecność asfaltu 70/100 po procesie spieniania w mieszance MCAS zapewni jej zwiększoną i jednocześnie korzystną podatność w zakresie niskich temperatur.

W recyklowanych mieszankach mineralno-asfaltowych zastosowano asfalt spieniony w ilości 3%. Zawartość ta została ustalona na podstawie badań wstępnych w ramach projektu [17].

## 2.2. MIESZANE SPOIWO HYDRAULICZNE

Ocenę wpływu kompozycji spoiwa mieszanego na właściwości recyklowanych mieszank mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym wykonano zgodnie z przyjętym planem eksperymentu sympleksowo-centroidowego, przedstawionym na Rys. 2.

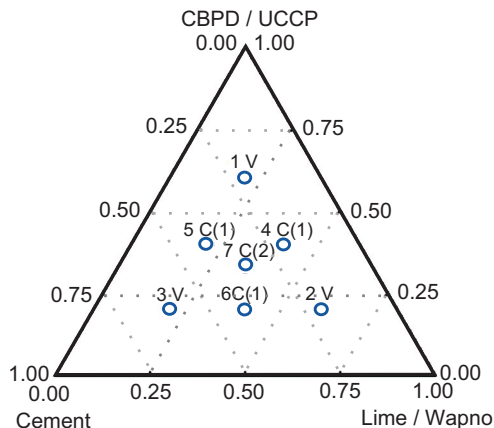


Fig. 2. Plan of the simplex-centroid experiment

Rys. 2. Plan eksperymentu sympleksowo-centroidowego

temperature from  $S(60)$  and  $m(60)$  determination reflects the critical temperature for the bitumen. The results of low-temperature characteristics of the 70/100 bitumen are given in Table 2.

It should be noted that lower critical temperature was displayed by the bitumen after foaming: “70/100 Foamed”. The stress  $S(T)_{-16}$  determined at  $-16^{\circ}\text{C}$  in accordance with EN 14023 was also lower for the “70/100 Foamed” bitumen than for “70/100 Ref”. In the case of “70/100 Foamed” the critical temperature equaled  $-19.8^{\circ}\text{C}$ , while in the case of “70/100 Ref” it equaled  $-17.9^{\circ}\text{C}$ . Therefore, presence of the 70/100 bitumen after foaming in the MCAS mixture will provide its greater (and more advantageous) flexibility at low temperatures.

Foamed bitumen content of 3% was used in the tested cold-recycled mixtures. This content was adopted based on preliminary investigations performed within the project [17].

## 2.2. MIXED HYDRAULIC BINDER

Assessment of the influence of three-component hydraulic binder composition on the properties of cold-recycled mixtures with foamed bitumen was performed according to the adopted simplex-centroid experiment plan, which is shown in Fig. 2.

Assessment was based on 14 composition variants (7 combinations for the fine-graded mixture MCAS-D and 7 for the coarse-graded mixture MCAS-G) resulting from the adopted experiment plan. Hydraulic binder compositions are presented in Table 3.

Hydraulic binder content of 3% was used in the tested cold-recycled mixtures. This content was adopted based on the analysis of research results presented earlier [12, 24, 35].

Ocenę wykonano dla łącznie 14 wariantów składu (7 kombinacji dla mieszanki drobnoziarnistej MCAS-D oraz 7 dla mieszanki gruboziarnistej MCAS-G) wynikających z przyjętego układu planu eksperymentu. Składy spoiwa hydraulicznego zostały przedstawione w Tabl. 3.

Spoivo hydrauliczne w recyklowanych mieszankach mineralno-asfaltowych zastosowano w ilości 3%. Zawartość ta została ustalona na podstawie analizy prezentowanych wyników badań [12, 24, 35].

### 2.3. PROJEKT SKŁADU RECYKLOWANEJ MIESZANKI NA ZIMNO

Recyklowane mieszanki mineralno-asfaltowe opracowane zostały z wykorzystaniem destruktu asfaltowego o uziarnieniu 0/10 mm i 0/31,5 mm oraz kruszywa naturalnego o uziarnieniu 0/2 mm i 0/31,5 mm, których skład granulometryczny zestawiono w Tabl. 4.

Udział procentowy składników w opracowanych referencyjnych recyklowanych mieszankach mineralno-asfaltowych przedstawiono natomiast w Tabl. 5 oraz graficznie na Rys. 3. Dla zaprojektowanych mieszanek mineralnych określono udział procentowy poszczególnych grup frakcji, a rezultaty zestawiono w Tabl. 6.

Table 4. Particle size distribution of RAP and mineral materials

Tablica 4. Skład granulometryczny destruktu asfaltowego i materiałów mineralnych

Component Składnik		Sieve size / Rozmiar sita [mm]									
		31.5	16.0	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.125	0.063	< 0.063
RAP 0/31.5	[%]	3.9	42.4	33.3	10.7	3.4	2.7	1.8	1.3	0.3	0.3
RAP 0/10	[%]	–	–	2.6	30.9	26.6	21.6	11.3	6.6	0.3	0.2
0/31.5	[%]	5.9	30.5	20.3	7.3	7.0	9.3	6.2	6.4	1.5	5.6
0/2.0	[%]	–	–	–	–	6.1	31.4	19.3	19.1	5.6	18.5

Table 5. Percentage of components in reference recycled mixtures

Tablica 5. Udział procentowy składników w referencyjnych recyklowanych mieszankach mineralno-asfaltowych

Mixture Mieszanka	Foamed bitumen 70/100 Asfalt spieniony [%]	CEM I 32.5R [%]	0/2 natural aggregate 0/2 kruszywo naturalne [%]	0/31.5 natural aggregate 0/31.5 kruszywo naturalne [%]	RAP 0/10 [%]	RAP 0/31.5 [%]
MCAS-G-Ref	3.0	3.0	18.8	37.6	–	37.6
MCAS-D-Ref	3.0	3.0	9.4	47.0	37.6	–

Table 6. Percentage of fraction groups in reference mineral mixtures

Tablica 6. Udział procentowy składników grupowych w referencyjnych mieszankach mineralnych

Mixture Mieszanka	Filler range Zakres uziarnienia wypełniacza ≤ 0.063 mm [%]	Sand fraction range Zakres frakcji piaskowej 0.063-2.0 mm [%]	Gravel fraction range Zakres frakcji grysowej ≥ 2.0 mm [%]
MCAS-G-Ref	6.1	26.9	67.0
MCAS-D-Ref	5.3	36.7	58.0

Table 3. Percentage of components in the hydraulic binder  
Tablica 3. Procentowy udział składników spoiwa hydraulicznego

Mixture type – Binder no. Typ mieszanki – Nr spoiwa	CEM [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	CBPD / UCPP [%]
MCAS – Ref	100	–	–
MCAS – 1 V	20	20	60
MCAS – 2 V	20	60	20
MCAS – 3 V	60	20	20
MCAS – 4 C	20	40	40
MCAS – 5 C	40	20	40
MCAS – 6 C	40	40	20
MCAS – 7 C	33.33	33.33	33.33

### 2.3. DESIGN OF THE COLD-RECYCLED MIXTURES

Cold-recycled asphalt mixtures were designed using RAP material with grading of 0/10 mm and 0/31.5 mm and natural aggregate with grading of 0/2 mm and 0/31.5 mm, whose particle size distribution is presented in Table 4.

Percentage of components used in the designed reference cold-recycled mixtures is given in Table 5 and shown in Fig. 3. Proportion of three particle size groups in the designed mineral mixtures is given in Table 6.

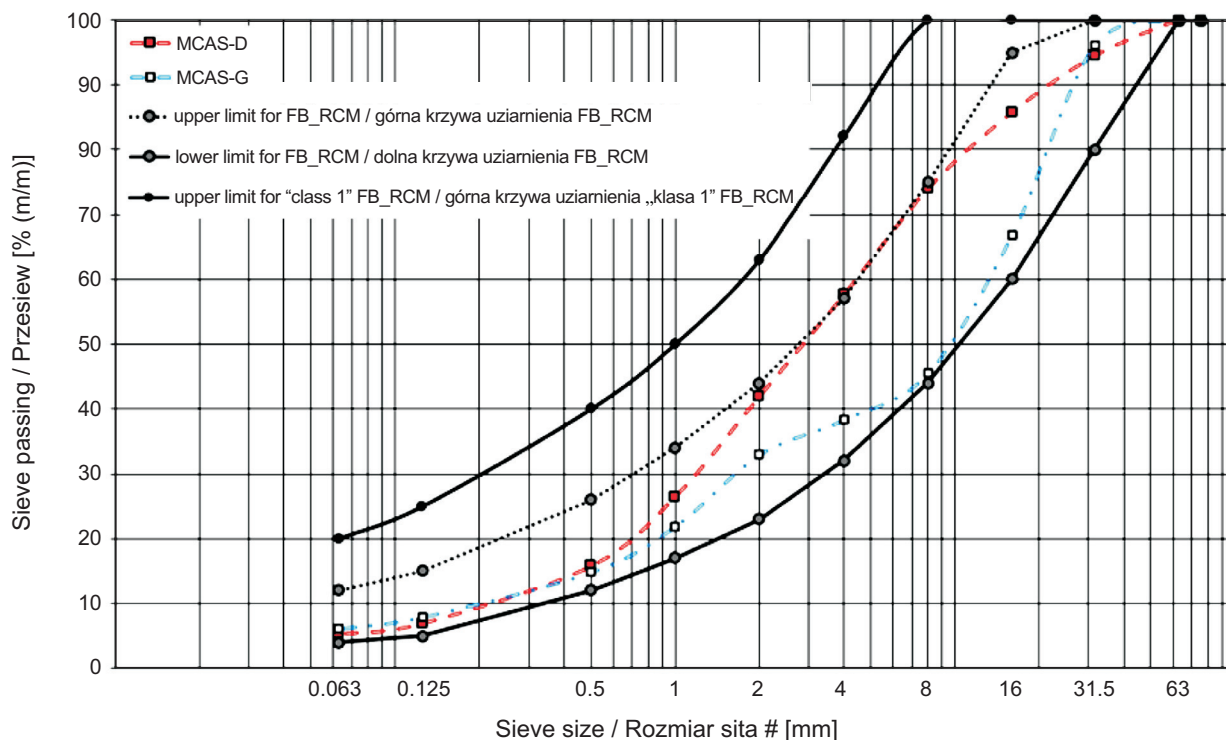


Fig. 3. Grading curves for the designed mineral-cement mixtures: fine-graded MCAS-D–Ref and coarse-graded MCAS-G–Ref  
Rys. 3. Krzywa uziarnienia projektowanej mieszanki mineralno-cementowej; drobnoziarnistej MCAS-D–Ref i gruboziarnistej MCAS-G–Ref

W wyniku projektowania składu recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej ze spoiwem hydraulicznym i asfaltem spienionym uzyskano założony efekt, tj. różną zawartość poszczególnych grup frakcji. Największe zróżnicowanie (równe 9,1%) uzyskano dla przedziału frakcji piaskowej 0,063–2,0 mm, najmniejsze natomiast dla frakcji wypełniaczowej. Uzyskane zróżnicowanie jest zgodne ze zmiennością, jaka występuje przy projektowaniu skrajnie odmiennych mieszanek, tj. drobnoziarnistej i gruboziarnistej. Wynika to z granicznych przedziałów proporcji poszczególnych składników dopuszczalnych w doborze krzywej uziarnienia. Uzyskany rezultat jest zadowolający i umożliwi zaobserwowanie zmiennego wpływu innowacyjnego środka wiążącego na właściwości fizyczne i mechaniczne recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym.

## 2.4. METODOLOGIA

Plan eksperymentu zawierał 7 przypadków (Tabl. 3) spoiwa mieszanego, będących zmiennymi niezależnymi kontrolującymi zmienność cech zależnych i oparty jest na planie mieszaniny (plan sympleksowo-centroidalny). Zmienne zależne reprezentują właściwości fizyczne i mechaniczne recyklowanej podbudowy wykonanej z drobnoziarnistej i gruboziarnistej mieszanki mineralno-asfaltowej ze spoiwem hydraulicznym

Design of the cold-recycled mixtures with hydraulic binder and foamed bitumen provided the assumed effect, i.e. differences in content of the three particle size groups between fine and coarse mixtures. The greatest difference (9.1%) was obtained in the sand fraction (0.063–2.0 mm), with the least difference observed in the filler fraction. The obtained differences are in agreement with the variability observed in the design of coarse and fine mixtures due to the allowable ranges for particle size distribution curves. The obtained differences in compositions are desirable and will enable observation of changes in the influence of the innovative hydraulic binder on differently graded cold-recycled mixtures with foamed bitumen.

## 2.4. METHODOLOGY

The experiment plan encompassed 7 compositions of the three-component hydraulic binder (Table 3). Content of the three components served as independent variables that influenced the dependent variables. The experiment was based on a simplex-centroid plan. Dependent variables represent physical and mechanical properties of cold-recycled base courses of coarse and fine mixtures with hydraulic binder and foamed bitumen (MCAS mixtures). Recycled mixture compositions included mixed

i asfaltem spienionym MCAS. W ich składzie zastosowano spoiwo hydrauliczne mieszane zgodnie z wyżej wymienionymi przypadkami (kombinacjami) spoiw (Tabl. 3). Analizowane cechy obejmowały następujące badania:

- 1) Zawartość wolnej przestrzeni w mieszance  $V_m$  według PN-EN 12697-8;
- 2) Badanie wytrzymałości na ściskanie osiowe w temperaturze  $+25^{\circ}\text{C}$  UCS według PN-EN 13286-41;
- 3) Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS według PN-EN 12697-23;
- 4) Określenie odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR (Wirtgen); ITS (PN-EN 12697-12:2008);  $WR_{W+M}$  (wg AASHTO T283),  $Rr_{-2^{\circ}\text{C}}$  według PANK 4302;
- 5) Moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu IT-CY w temperaturach  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$  według PN-EN 12697-26.

Bardzo istotnym kryterium trwałości recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych ze względu na ich usytuowanie w konstrukcji nawierzchni jest odporność na oddziaływanie wody i mrozu. W badaniach zastosowano kilka metod badawczych dotyczących analizy tego kryterium, ze względu na to, że każda z nich charakteryzuje się innym zakresem pielęgnacji, który w większym lub mniejszym stopniu w warunkach laboratoryjnych symuluje (odzwierciedla) stan rzeczywisty na drodze.

Metodyka badania odporności na oddziaływanie wody i mrozu wg wskaźnika TSR w sposób dość łagodny odwzorowuje warunki rzeczywiste. Wskaźnik ten określony jest na podstawie spadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek poddanych 24-godzinnemu kondycjonowaniu w wodzie w temperaturze  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) w stosunku do próbek kondycjonowanych w warunkach powietrzno-suchych w  $25^{\circ}\text{C}$ . W warunkach rzeczywistych oddziaływanie wody występuje znacznie częściej i w dłuższych okresach.

Metodyka badania odporności na oddziaływanie wody i mrozu wg wskaźnika ITS również w sposób dość łagodny odwzorowuje warunki rzeczywiste. Wskaźnik ten oznaczany jest w oparciu o obniżenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek poddanych 24-godzinnemu kondycjonowaniu w wodzie w temperaturze  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) i jednemu cyklowi zamrażania w stosunku do próbek kondycjonowanych w warunkach powietrzno-suchych w  $25^{\circ}\text{C}$ . Kryterium to jest już bardziej zbliżone do warunków rzeczywistych niż poprzednie, lecz odbiega od warunków rzeczywistych, w których warstwy konstrukcyjne poddane są wielokrotnym cyklem zamrażania-rozmrażania.

hydraulic binders with the component proportions (combinations) given in Table 3. The analyzed dependent variables included the following properties:

- 1) Air voids in the recycled mixture  $V_m$ , according to PN-EN 12697-8;
- 2) Uniaxial compressive strength at  $+25^{\circ}\text{C}$  UCS, according to PN-EN 13286-41;
- 3) Indirect tensile strength ITS according to PN-EN 12697-23;
- 4) Water and frost resistance reflected by TSR (Wirtgen), ITS (according to PN-EN 12697-12:2008),  $WR_{W+M}$  (according to AASHTO T283) and  $Rr_{-2^{\circ}\text{C}}$  (according to PANK 4302), parameters;
- 5) Indirect tensile stiffness modulus IT-CY at the temperatures of  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  and  $+40^{\circ}\text{C}$ , according to PN-EN 12697-26.

Due to the location of recycled mixtures in the pavement structure, resistance to water and frost damage is a crucial factor affecting their service life. Several test methods were used in this research to analyze this criterion, since each method assumes a different manner of conditioning, which may reflect real conditions to a greater or lesser extent.

Methodology of determination of resistance to moisture damage using the TSR ratio reflects relatively moderate conditions. The parameter is determined based on the change in indirect tensile strength of specimens subjected to 24 hours of conditioning in water at the temperature of  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), as compared to specimens conditioned in air at  $25^{\circ}\text{C}$ . In real conditions, water action occurs more frequently and over longer periods.

Methodology of determination of resistance to moisture and frost damage using the ITS ratio also reflects relatively moderate conditions. The parameter is determined based on the change in indirect tensile strength of specimens subjected to 24 hours of conditioning in water at the temperature of  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) and one freezing cycle, as compared to specimens conditioned in air at  $25^{\circ}\text{C}$ . This criterion is slightly closer to real conditions, but still does not reflect the fact that pavement structures may be subjected to multiple freeze-thaw cycles.

In order to determine the ITS ratio, specimens were conditioned in water and subjected to one freezing cycle. The parameter was determined 28 days after compaction at the test temperature of  $25^{\circ}\text{C}$ .



W celu oznaczenia wskaźnika *ITSR* próbki poddano kondycjonowaniu w wodzie oraz jednemu cyklowi zamrażania. Wskaźnik oznaczono na próbkach po 28 dniach od zagęszczenia, wykonując badania wytrzymałościowe w temperaturze 25°C.

Natomiast ocena odporności na oddziaływanie wody i mrozu wg metodyki AASHTO T283 polega na bardziej złożonym procesie pielęgnacji próbek niż w przypadku wcześniej przedstawionych badań. Na wstępie próbki poddane są nasączeniu w wodzie w podciśnieniu 200 kPa przez 25 minut (minimalny stopień nasączenia to 55-80%). Następnie poddaje się je 18 cyklom zamrażania (-18°C przez 4 godziny) i odmrażania (20°C przez 4 godziny). Kolejnym etapem jest termostatowanie w łaźni wodnej w temperaturze 60°C przez 24 godziny. Bezpośrednio przed badaniem próbki są doprowadzone do 25°C poprzez zastosowanie kąpieli wodnej przez czas 4 godzin. Proces pielęgnacji jest dość złożony i bardziej zbliżony do warunków rzeczywistych występujących na drodze. Tym samym uzyskane wyniki badań w sposób bardziej obiektywny pozwalają dokonać oceny odporności na oddziaływanie wody i mrozu recyklnych mieszanek w aspekcie ich trwałości w konstrukcji nawierzchni.

W przypadku oceny odporności na oddziaływanie mrozu zgodnie z metodyką PANK 4308, próbki mieszanki mineralno-asfaltowej po 28 dniach pielęgnacji w warunkach powietrzno-suchych poddawane są kondycjonowaniu przez 16 godzin w temperaturze -2°C, po czym bezpośrednio wykonywane jest badanie niszczące polegające na ocenie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie. Przyjmuje się, że mieszanka mineralno-asfaltowa jest odporna na oddziaływanie mrozu (powstawanie spękań), jeśli wytrzymałość ta jest mniejsza od 4,8 MPa.

Analizy wyników badań dokonywano, stosując wielomian jako funkcję aproksymującą. Stopień wielomianu uzależniony był od istotności wkładu, jaki wносиła jego postać do wyjaśnienia zmienności wyników badań. Analiza była testem typu „lack of fit” i miała wskazać, czy wyjaśnienie zmienności dostarczonej przez model jest większe niż rozstęp błędu przypadkowego estymacji. W tym celu posłużono się procedurą ANOVA [39-40].

Kolejnym etapem analizy była estymacja współczynników wielomianu o stopniu ustalonym na podstawie analizy wariancji. Aproksymacja parametrów oparta była na metodzie najmniejszych kwadratów (MKN). Model ogólny regresji był następujący:

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

gdzie:

$b_{ijk}$  – parametry regresji,

Evaluation of moisture and frost resistance according to the AASHTO T283 method encompasses a more complex conditioning process than the aforementioned test methods. The specimens are submerged in water and subjected to a vacuum of 200 kPa for 25 minutes (minimum saturation degree of 55-80%). They are subsequently subjected to 18 cycles of freezing (-18°C for 4 h) and thawing (20°C for 4 h). The next stage consists in placing the specimens in a water bath for 24 h at the constant temperature of 60°C. Directly before testing, the specimens are brought to the temperature of 25°C by submersion in a water bath for 4h. The conditioning process is relatively complex and more similar to the conditions actually occurring during service. Therefore, the obtained results enable a more objective evaluation of recycled mixtures in terms of their service life in real pavement structures.

In the case of assessment of moisture and frost resistance according to the PANK 4308 method, specimens after 28 days of air-dry conditioning are subjected to 16 h of conditioning at -2°C and tested immediately afterwards. The test consists in determination of indirect tensile strength. An asphalt mixture is considered resistant to frost damage (cracking) if its strength is lesser than 4.8 MPa.

Test results were approximated with a polynomial function. The degree of the polynomial was chosen based on the significance of the influence of its form on the estimation of the dependent variables. It was analyzed using a “lack of fit” test to determine whether variability of predictions given by the model was greater than the range of random error. The ANOVA procedure was used to that end [39-40].

The following stage of the analysis consisted in estimation of the coefficients of the polynomial of the adopted degree. Approximation of the parameters was based on the least squares method. Regression model was based on the following general equation:

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

where:

$b_{ijk}$  – regression parameters,

$x_i$  –  $i^{\text{th}}$  independent variable,

$y$  – dependent variable.

$x_i$  –  $i$ -ta zmienna niezależna,

$y$  – zmienna zależna.

### 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

#### 3.1. WPŁYW SKŁADU SPOIWA MIESZANEGO NA ZAWARTOŚĆ WOLNYCH PRZESTRZENI $V_m$ W RECYKLOWANEJ MIESZANCE Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ UZIARNIENIA

Zawartość wolnych przestrzeni odgrywa bardzo istotną rolę w prognozowaniu jakości mieszanki mineralno-asfaltowej. Parametr ten determinuje między innymi jej odporność na oddziaływanie wody i mrozu oraz powstawanie deformacji trwałych.

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych mieszanki drobnoziarnistej MCAS-D przedstawiono w Tabl. 7, a gruboziarnistej MCAS-G – w Tabl. 8.

### 3. ANALYSIS OF TEST RESULTS

#### 3.1. INFLUENCE OF MIXED HYDRAULIC BINDER COMPOSITION ON AIR VOIDS $V_m$ IN RECYCLED MIXTURES OF DIFFERENT GRADING

Air voids content is a very significant factor in prediction of quality of asphalt mixtures. Characteristics influenced by this parameter include susceptibility to water/frost damage and permanent deformations.

Assessment of fit of the regression model parameters to the test results is presented in Table 7 for the fine mixture MCAS-D and in Table 8 for the coarse mixture MCAS-G.

Table 7. Regression model fitting parameters for air void content  $V_m$  in MCAS-D mixtures

Tablica 7. Parametry dopasowania modelu regresji względem zawartości wolnych przestrzeni  $V_m$  mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	$V_m$ [%]; $R^2 = 0.824$ ; $R_{adj}^2 = 0.749$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.078$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	13.957	0.162	< 0.001	13.609	14.305
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	14.640	0.162	< 0.001	14.293	14.988
(C) CBPD / UCPP	13.280	0.162	< 0.001	12.933	13.628
AB	-1.719	0.794	0.048	-3.422	-0.015
AC	-1.479	0.794	0.083	-3.182	0.224
BC	-3.350	0.794	< 0.001	-5.053	-1.646
ABC	17.968	5.588	< 0.001	5.982	29.954

Table 8. Regression model fitting parameters for air void content  $V_m$  in MCAS-G mixtures

Tablica 8. Parametry dopasowania modelu regresji względem zawartości wolnych przestrzeni  $V_m$  mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	$V_m$ [%]; $R^2 = 0.919$ ; $R_{adj}^2 = 0.885$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.093$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	11.608	0.175	< 0.001	11.231	11.985
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	11.609	0.175	< 0.001	11.232	11.986
(C) CBPD / UCPP	10.907	0.175	< 0.001	10.530	11.284
AB	-1.852	0.861	0.049	-3.700	-0.004
AC	-0.109	0.861	0.906	-1.950	1.744
BC	4.624	0.861	< 0.001	2.777	6.472
ABC	-59.823	6.060	< 0.001	-72.822	-46.824

Analiza danych przedstawionych w Tabl. 7 i 8 wskazuje, że zarówno cement portlandzki, jak i wapno hydratyzowane oraz uboczne cementowe produkty pyłaste mają istotny wpływ na zawartości wolnych przestrzeni  $V_m$  recyklowanych mieszanek, niezależnie od ich uziarnienia. Należy podkreślić występowanie efektu interakcji wszystkich składników w zakresie analizowanej cechy recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Modele regresyjne analizowanej zależności  $V_m$  o wysokim poziomie zmodyfikowanego współczynnika determinacji  $R^2$  w aspekcie rodzaju spoiwa oraz uziarnienia recyklowanej mieszanki uzyskały następujące postacie:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (2), o  $R^2 = 0,824$ :

$$V_m^{MCAS-D} = 13,957 \cdot CEM + 14,640 \cdot Ca(OH)_2 + 13,280 \cdot UCPP - 1,719 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 1,479 \cdot CEM \cdot UCPP - 3,350 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 17,968 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP, \quad (2)$$

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (3), o  $R^2 = 0,919$ :

$$V_m^{MCAS-G} = 11,608 \cdot CEM + 11,609 \cdot Ca(OH)_2 + 10,907 \cdot UCPP - 1,852 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 0,109 \cdot CEM \cdot UCPP + 4,624 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP - 59,823 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP. \quad (3)$$

Analizę siły wpływu zawartości składników spoiwa mieszanego oraz interakcji między nimi na zmienność cechy  $V_m$  w aspekcie uziarnienia mieszanki mineralno-asfaltowej w opracowanych modelach regresyjnych przedstawiono na Rys. 4 w postaci powierzchni odpowiedzi.

Analysis of the data presented in Tables 7 and 8 indicates that Portland cement, hydrated lime and cement by-pass dusts all display significant individual influence on air voids  $V_m$  in cold-recycled mixtures, regardless of their grading. The observed effect of interaction of the three components should also be emphasized.

Regression models (with high adjusted  $R^2$ ) of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and  $V_m$  of differently graded recycled mixtures assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (2), with  $R^2 = 0.824$ :

$$V_m^{MCAS-D} = 13.957 \cdot CEM + 14.640 \cdot Ca(OH)_2 + 13.280 \cdot CBPD - 1.719 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 1.479 \cdot CEM \cdot CBPD - 3.350 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 17.968 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD, \quad (2)$$

- for the coarse-graded mixture (3), with  $R^2 = 0.919$ :

$$V_m^{MCAS-G} = 11.608 \cdot CEM + 11.609 \cdot Ca(OH)_2 + 10.907 \cdot CBPD - 1.852 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 0.109 \cdot CEM \cdot CBPD + 4.624 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD - 59.823 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD. \quad (3)$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on  $V_m$  of differently graded recycled mixtures in the developed regression models is shown in Fig. 4.

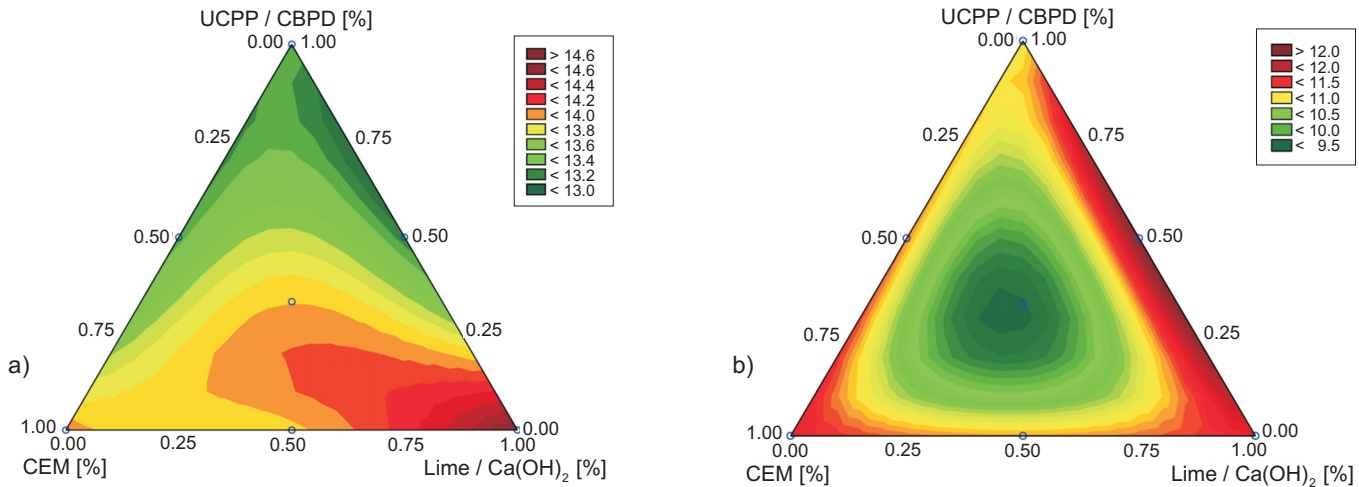


Fig. 4. Response charts for air void content  $V_m$  of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 4. Powierzchnia odpowiedzi dla zawartości wolnych przestrzeni  $V_m$  recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej w aspekcie składu spoiwa i uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że przyjęty skład granulometryczny zastosowany dla mieszanki drobno- oraz gruboziarnistej w znacznym stopniu wpływa na osiągnięte zawartości wolnych przestrzeni recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. Dla mieszanki drobnoziarnistej MCAS-D średnia wartość  $V_m$  dla wszystkich spoiw wynosiła 13,6%, podczas gdy dla gruboziarnistej średnia dla wszystkich spoiw wynosiła 11,2%. Mieszanka drobnoziarnista z zastosowaniem spoiwa referencyjnego oraz spoiwa 2V (20% CEM, 60%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 20% UCPP) charakteryzowały się największą zawartością wolnych przestrzeni, najmniejszą natomiast uzyskała mieszanka ze spoiwem 1V (20% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz 60% UCPP). Ta zależność nie powtórzyła się dla mieszanki gruboziarnistej, która uzyskała największą zawartość wolnych przestrzeni przy zastosowaniu spoiwa 4C (20% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz 40% UCPP), a najmniejszą ze spoiwem 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz 33.33% UCPP) oraz ze spoiwem 5C i 6C, które w swoim składzie zawierają po 40% cementu. Generalnie cement jako składnik spoiwa wpływał w sposób zasadniczy na zawartość wolnych przestrzeni w badanych recyklowanych mieszankach mineralno-asfaltowych.

Istotny jest również fakt, że mieszanka MCAS-D – chociaż jest gruboziarnista – w całym zakresie stosowania spoiwa uzyskała mniejsze zawartości wolnych przestrzeni niż mieszanka drobnoziarnista.

### 3.2. WPŁYW SKŁADU SPOIWA MIESZANEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE OSIOWE UCS RECYKLOWANEJ MIESZANKI Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ UZIARNIENIA

Badanie wytrzymałości na ściskanie osiowe UCS recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano w temperaturze  $+25^\circ\text{C}$ . Na jego podstawie można wnioskować o ewentualnym ich przesztywnieniu i potencjalnej możliwości powstania spękań warstwy konstrukcyjnej, co w znaczącym stopniu może przyczynić się do obniżenia trwałości eksploatacyjnej nawierzchni.

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D przedstawiono w Tabl. 9, a gruboziarnistej MCAS-G – w Tabl. 10.

Na podstawie danych przedstawionych w Tabl. 9 i 10 można stwierdzić, że – podobnie jak w przypadku zawartości wolnych przestrzeni – wszystkie składniki spoiwa mieszanego mają istotny wpływ na wytrzymałość na osiowe ściskanie w temperaturze  $+25^\circ\text{C}$  recyklowanych mieszanek, niezależnie od ich uziarnienia. Nie zaobserwowano natomiast wystąpienia efektu interakcji oddziaływania wszystkich składników na analizowaną cechę recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej

The obtained results indicate that the particle size distributions adopted for the fine and coarse mixtures considerably affect the air void content in the produced recycled mixtures. For the fine-graded mixture (MCAS-D) the average value of  $V_m$  across all hydraulic binder compositions equaled 13.6%. The same average for the coarse-graded mixture equaled 11.2%. Among the fine-graded mixtures, the highest air void content was displayed by the mixture with reference binder and the mixture with 2V binder (20% CEM, 60%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 20% CBPD). The lowest air void content was displayed by the mixture with 1V (20% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 60% CBPD). The results were different in the case of coarse mixtures – the highest air void content was displayed by the mixture with 4C binder (20% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 40% CBPD) and the lowest air void content – by the mixtures with binders 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 33.33% CBPD) as well as 5C and 6C, which contained 40% of cement. In general, cement – as one of the components of the hydraulic binder – displayed considerable influence on air void content in the obtained recycled mixtures.

It is also noteworthy that the MACS-D mixtures – despite their coarse grading – displayed lower air voids content across all the tested binder compositions than the fine mixtures.

### 3.2. INFLUENCE OF MIXED HYDRAULIC BINDER COMPOSITION ON UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH UCS OF RECYCLED MIXTURES OF DIFFERENT GRADING

Testing of uniaxial compressive strength UCS of recycled mixtures was conducted at the temperature of  $+25^\circ\text{C}$ . Based on the results it is possible to draw conclusions regarding the possible excess stiffness of the mixtures and the potential for cracking of the obtained structural layer, which may considerably reduce the service life of the pavement.

Assessment of fit of the regression model parameters to the test results is presented in Table 9 for the fine mixture MCAS-D and in Table 10 for the coarse mixture MCAS-G.

Analysis of the data presented in Tables 9 and 10 indicates that – like in the case of air voids – the three hydraulic binder components display significant individual influence on uniaxial compressive strength of recycled mixtures at  $+25^\circ\text{C}$ , regardless of their grading. However, influence of interaction of the three components on the

niezależnie od jej uziarnienia, jak to miało miejsce w przypadku zwartości wolnych przestrzeni.

value of the analyzed parameter was not observed in this case (regardless of mixture grading).

Table 9. Regression model fitting parameters for uniaxial compressive strength at +25°C UCS for MCAS-D mixtures  
Tablica 9. Parametry dopasowania modelu regresji względem wytrzymałości na ściskanie osiowe w temperaturze +25°C UCS mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	UCS [MPa]; $R^2 = 0.364$ ; $R_{adj}^2 = 0.092$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.053$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	2.333	0.132	< 0.001	2.048	2.618
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	2.200	0.132	< 0.001	1.915	2.484
(C) CBPD / UCPP	1.966	0.132	< 0.001	1.681	2.251
AB	-0.933	0.650	0.173	-2.328	0.461
AC	-0.333	0.650	0.612	-1.728	1.061
BC	0.600	0.655	0.371	-0.794	1.994
ABC	7.400	4.575	0.128	-2.412	17.212

Table 10. Regression model fitting parameters for uniaxial compressive strength at +25°C UCS for MCAS-G mixtures  
Tablica 10. Parametry dopasowania modelu regresji względem wytrzymałości na ściskanie osiowe w temperaturze +25°C UCS mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	UCS [MPa]; $R^2 = 0.275$ ; $R_{adj}^2 = 0.035$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.059$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	2.633	0.140	< 0.001	2.332	2.934
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	2.633	0.140	< 0.001	2.332	2.934
(C) CBPD / UCPP	2.700	0.140	< 0.001	2.399	3.000
AB	-0.533	0.687	0.450	-2.007	0.940
AC	-0.266	0.687	0.703	-1.740	1.207
BC	-1.200	0.687	0.102	-2.674	0.274
ABC	9.000	4.835	0.083	-1.371	19.371

Modele regresyjne analizowanej zależności UCS od składu spoiwa, z podziałem według uziarnienia, uzyskały postać:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (4), o  $R^2 = 0,364$ :

$$\begin{aligned}
 UCS_{MCAS-D} = & 2,333 \cdot CEM + 2,2 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 1,966 \cdot UCPP - 0,933 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & - 0,333 \cdot CEM \cdot UCPP + 0,6 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + \\
 & + 7,4 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP,
 \end{aligned} \quad (4)$$

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (5), o  $R^2 = 0,275$ :

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and UCS of differently graded recycled mixtures assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (4), with  $R^2 = 0.364$ :
 
$$\begin{aligned}
 UCS_{MCAS-D} = & 2.333 \cdot CEM + 2.2 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 1.966 \cdot CBPD - 0.933 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & - 0.333 \cdot CEM \cdot CBPD + 0.6 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + \\
 & + 7.4 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD,
 \end{aligned} \quad (4)$$
- for the coarse-graded mixture (5), with  $R^2 = 0.275$ :

$$\begin{aligned}
 UCS_{MCAS-G} = & 2,633 \cdot CEM + 2,633 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 2,7 \cdot UCPP - 0,533 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & - 0,266 \cdot CEM \cdot UCPP - 1,2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + \\
 & + 9 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP.
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

Oddziaływanie zawartości składników spoiwa mieszanego oraz interakcji między nimi na zmienność cechy  $UCS$  w aspekcie uziarnienia mieszanki mineralno-asfaltowej w opracowanych modelach regresyjnych przedstawiono na Rys. 5 w postaci powierzchni odpowiedzi.

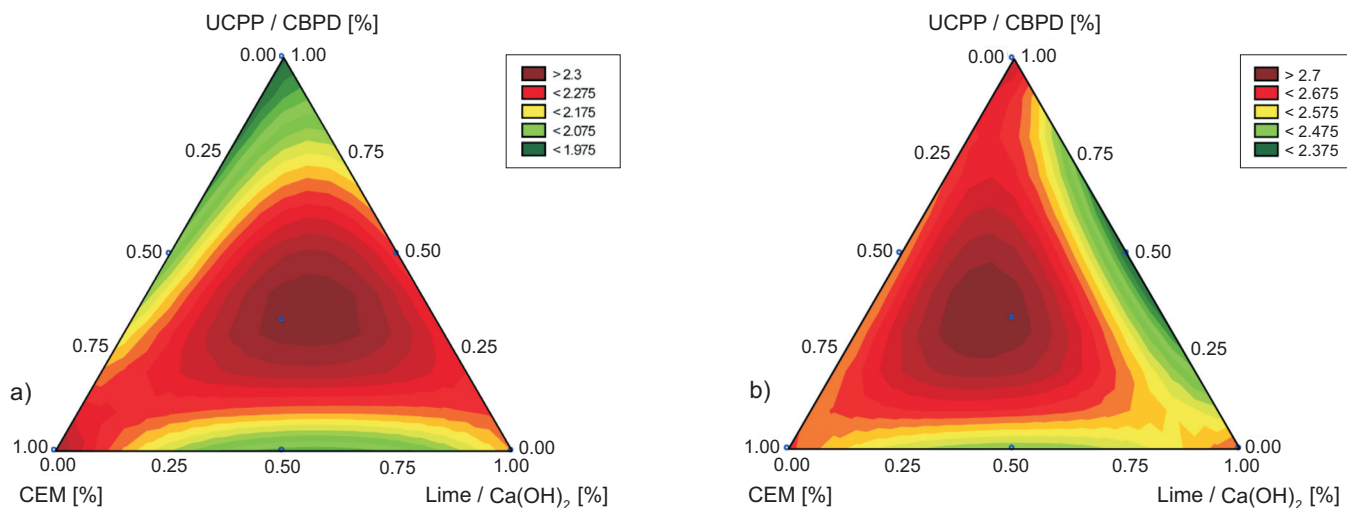


Fig. 5. Response charts for uniaxial compressive strength at +25°C  $UCS$  of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 5. Powierzchnia odpowiedzi dla wytrzymałości na ściskanie osiowe w temperaturze +25°C  $UCS$  recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rezultaty badania wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe wskazują, że rodzaj uziarnienia mieszanki (drobno-, gruboziarnistej) w znaczny sposób wpływał na wartość osiaganej siły niszczącej. Szkielet mineralny mieszanki gruboziarnistej pozwala na uzyskanie większych wytrzymałości na ściskanie osiowe niż w przypadku mieszanki drobnoziarnistej. Dla obu mieszanek największą wartość siły osiągnięto dla recyklowanej mieszanki zawierającej w charakterze spoiwa hydraulicznego 100% cementu. Wśród mieszanek zawierających analizowane spoiwa wieloskładnikowe, największą wytrzymałość uzyskały próbki ze spoiwem 7C (33,33% CEM, 33,33%  $Ca(OH)_2$  oraz 33,33% UCPP) dla mieszanki zarówno drobno-, jak i gruboziarnistej. Najmniejsze wartości siły niszczącej dla mieszanek drobnoziarnistych uzyskały mieszanki ze spoiwem 1V (20% CEM, 20%  $Ca(OH)_2$  oraz 60% UCPP) oraz 6C (40% CEM, 40%  $Ca(OH)_2$  oraz 20% UCPP). Natomiast wśród mieszanek gruboziarnistych najniższą wartość tego parametru uzyskała mieszanka ze spoiwem 4C (20% CEM, 40%  $Ca(OH)_2$  oraz 40% UCPP). Należy podkreślić, że w ramach

$$\begin{aligned}
 UCS_{MCAS-G} = & 2,633 \cdot CEM + 2,633 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 2,7 \cdot CBPD - 0,533 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & - 0,266 \cdot CEM \cdot CBPD - 1,2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + \\
 & + 9 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD.
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on  $UCS$  of differently graded recycled mixtures in the developed regression models is shown in Fig. 5.

The obtained results indicate that the type of grading (fine or coarse) mixtures considerably affected the uniaxial compressive strength. In the coarse-graded mixture, the mineral skeleton provides greater compressive strength than in the case of fine-graded mixture. For both types of grading, the greatest values of strength were obtained for recycled mixtures with hydraulic binder consisting of 100% of cement. Among the mixtures with the investigated three-component hydraulic binders, the greatest strength was displayed by mixtures with 7C binder (33.33% CEM, 33.33%  $Ca(OH)_2$  and 33.33% CBPD) – both for fine and coarse grading. Among fine-graded mixtures, the lowest values of strength were exhibited by the mixtures with binders 1V (20% CEM, 20%  $Ca(OH)_2$  and 60% CBPD) and 6C (40% CEM, 40%  $Ca(OH)_2$  and 20% CBPD). Among coarse-graded mixtures, the lowest value of strength was noted for the mixture with binder 4C (20% CEM, 40%  $Ca(OH)_2$  and 40% CBPD). It should be emphasized that for a given type (grading) of the recycled

tego samego rodzaju (uziarnienia) recyklowanej mieszanki, niezależnie od zastosowanego spoiwa, uzyskano wyniki na zbliżonym poziomie siły niszczącej.

### 3.3. WPŁYW SKŁADU SPOIWA MIESZANEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA POŚREDNIE ROZCIĄGANIE ITS RECYKLOWANEJ MIESZANKI Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ UZIARNIENIA

Warstwy konstrukcyjne nawierzchni asfaltowej w czasie ruchu pojazdów pracują w schemacie rozciągania przy zginaniu. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie jest zatem bardzo istotna w kontekście prognozowania trwałości warstwy podbudowy wykonanej z recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej.

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D przedstawiono w Tabl. 11, a gruboziarnistej MCAS-G – w Tabl. 12.

mixture, the obtained strength values were similar, regardless of the hydraulic binder used.

### 3.3. INFLUENCE OF MIXED HYDRAULIC BINDER COMPOSITION ON INDIRECT TENSILE STRENGTH ITS OF RECYCLED MIXTURES OF DIFFERENT GRADING

Layers of an asphalt pavement structure under traffic are subjected to tensile stress due to bending. Therefore, indirect tensile strength is a very important factor in predictions of service life of cold-recycled base courses.

Assessment of fit of the regression model parameters to the test results is presented in Table 11 for the fine mixture MCAS-D and in Table 12 for the coarse mixture MCAS-G.

Table 11. Regression model fitting parameters for indirect tensile strength ITS for MCAS-D mixtures  
Tablica 11. Parametry dopasowania modelu regresji względem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	ITS [kPa]; $R^2 = 0.968$ ; $R_{adj}^2 = 0.954$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 274.285$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	493.666	9.561	< 0.001	473.158	514.175
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	587.333	9.561	< 0.001	566.825	607.841
(C) CBPD / UCPP	592.666	9.561	< 0.001	572.158	613.175
AB	394.000	46.843	< 0.001	293.531	494.469
AC	708.666	46.843	< 0.001	608.198	809.135
BC	70.666	46.843	0.153	-29.802	171.135
ABC	893.000	329.5711	0.017	186.140	1599.860

Table 12. Regression model fitting parameters for indirect tensile strength ITS for MCAS-G mixtures  
Tablica 12. Parametry dopasowania modelu regresji względem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	ITS [kPa]; $R^2 = 0.949$ ; $R_{adj}^2 = 0.928$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 617.714$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	728.000	14.349	< 0.001	697.224	758.776
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	578.667	14.349	< 0.001	547.890	609.443
(C) CBPD / UCPP	691.333	14.349	< 0.001	660.557	722.110
AB	-112.000	70.297	0.133	-262.773	38.773
AC	4.000	70.297	0.955	-146.773	154.773
BC	-233.333	70.297	0.005	-384.106	-82.561
ABC	5812.000	494.585	< 0.001	4751.220	6872.780

Dokonując oceny danych przedstawionych w Tabl. 11 i 12 można stwierdzić, że wszystkie składniki spoiwa mieszanego (CEM,  $\text{Ca(OH)}_2$ , UCPP) wykazują istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie recyklowanych mieszanek, niezależnie od ich uziarnienia. W przypadku mieszanki drobnoziarnistej można zaobserwować też efekt interakcji pomiędzy niektórymi składnikami spoiwa (w parach). W przypadku mieszanki gruboziarnistej wystąpił natomiast efekt interakcji pomiędzy wszystkimi składnikami spoiwa (ABC).

Reasumując, można stwierdzić, że rodzaj recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej odgrywa znaczącą rolę w kontekście zapewnienia jej odpowiedniej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie *ITS*, co jest najprawdopodobniej związane z granulometrią zastosowanej mieszanki mineralnej.

Model regresyjny wpływu składu spoiwa na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie *ITS*, charakteryzujący się wysokim poziomem zmodyfikowanego współczynnika determinacji  $R_{adj}^2 = 0,954$  dla mieszanki MCAS-D oraz  $R_{adj}^2 = 0,928$  dla mieszanki MCAS-G, uzyskał postać:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (6), o  $R^2 = 0,968$ :  

$$ITS_{MCAS-D} = 493,666 \cdot \text{CEM} + 587,333 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 592,666 \cdot \text{UCPP} - 394 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 708,666 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} + 70,666 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 893 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (6)$$
- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (7), o  $R^2 = 0,949$ :  

$$ITS_{MCAS-G} = 728 \cdot \text{CEM} + 578,667 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 691,333 \cdot \text{UCPP} - 112 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 4 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 233,333 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 5812 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}. \quad (7)$$

Oddziaływanie zawartości składników spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nimi na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie *ITS* w opracowanych modelach regresyjnych przedstawiono jako powierzchnie odpowiedzi na Rys. 6.

Wyniki oznaczenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie *ITS*, w przeciwieństwie do pozostałych dotychczas analizowanych parametrów, nie wykazują jednoznacznej zależności między składem granulometrycznym mieszanki MCAS a wartością tego parametru. Dla mieszanki drobnoziarnistej największą wartość *ITS* osiągnęła mieszanka referencyjna, natomiast najmniejszą – mieszanka ze spoiwem 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz 20% UCPP). Wśród mieszanek gruboziarnistych najwyższy wynik uzyskała mieszanka 7C (33% CEM, 33%  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz 33% UCPP), natomiast najmniejszą wartość tego parametru stwierdzono dla mieszanki ze spoiwem 4C (20% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz 40% UCPP). Należy podkreślić, że rodzaj zastosowanego spoiwa ma różny wpływ, zależnie od rodzaju badanej mieszanki MCAS.

Analysis of the data presented in Tables 11 and 12 indicates that the three hydraulic binder components (CEM,  $\text{Ca(OH)}_2$ , CBPD) display significant individual influence on indirect tensile strength of recycled mixtures, regardless of their grading. In the case of fine-graded mixtures, the effect of interaction between chosen hydraulic binder component pairs may also be observed. In the case of coarse-graded mixture, the effect of interaction between the three components (ABC) is observable.

In conclusion, it may be stated that the type of recycled mixture significantly affects its level of indirect tensile strength *ITS*, most probably due to the differences in particle size distribution in the mineral mixture.

Regression models (with high adjusted coefficient of determination  $R_{adj}^2 = 0.954$  for MCAS-D and  $R_{adj}^2 = 0.928$  for MCAS-G) of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and *ITS* assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (6), with  $R^2 = 0.968$ :  

$$ITS_{MCAS-D} = 493.666 \cdot \text{CEM} + 587.333 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 592.666 \cdot \text{CBPD} - 394 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 708.666 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} + 70.666 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 893 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (6)$$
- for the coarse-graded mixture (7), with  $R^2 = 0.949$ :  

$$ITS_{MCAS-G} = 728 \cdot \text{CEM} + 578.667 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 691.333 \cdot \text{UCPP} - 112 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 4 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 233.333 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 5812 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}. \quad (7)$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on *ITS* in the developed regression models is shown in Fig. 6.

In contrast with the parameters analyzed above, indirect tensile strength results do not display any distinct relationship between the grading of the MCAS mixture and the value of the parameter. Among the fine-graded mixtures, the greatest *ITS* value was displayed by the reference mixture; the lowest *ITS* value was displayed by the mixture with 3V binder (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD). Among the coarse-graded mixtures, the greatest *ITS* value was displayed by the mixture with 7C (33% CEM, 33%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 33% CBPD); the lowest value was displayed by the mixture with 4C (20% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD). It should be emphasized that the influence of hydraulic binder varies depending on the type of MCAS mixture.



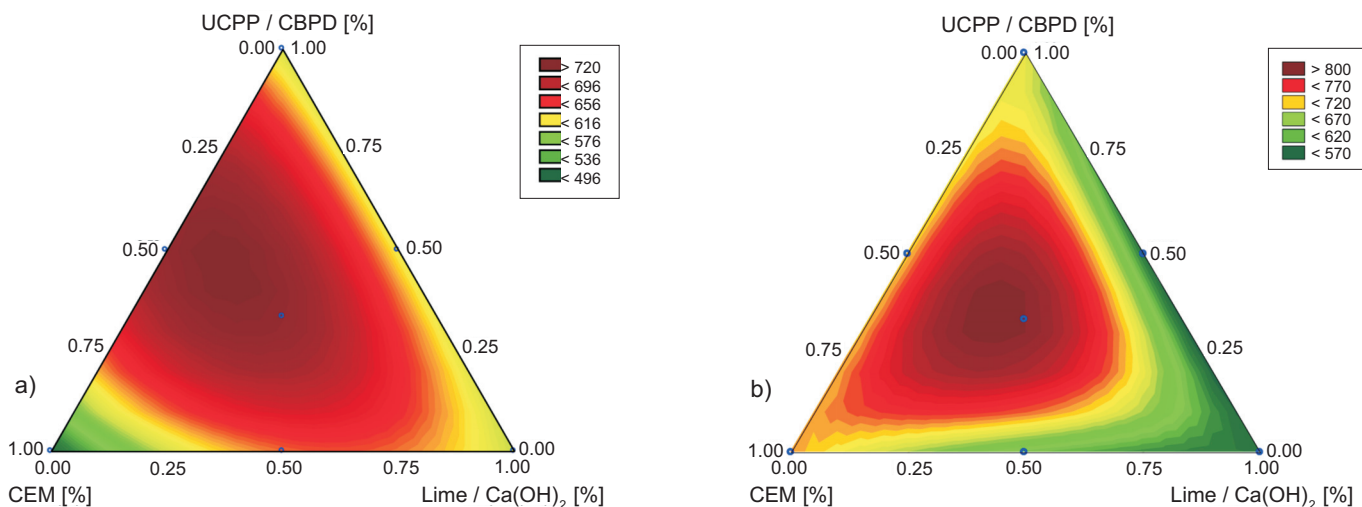


Fig. 6. Response charts for indirect tensile strength *ITS* of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 6. Powierzchnia odpowiedzi dla wytrzymałości na pośrednie rozciąganie *ITS* recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Niezależnie od rodzaju zastosowanego spoiwa, każda z recyklowanych mieszanek gruboziarnistych MCAS-G charakteryzuje się wyższym poziomem wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie niż odpowiadający jej skład recyklowanej mieszanki drobnoziarnistej.

### 3.4. WPŁYW SKŁADU SPOIWA MIESZANEGO NA ODPORNOŚĆ NA ODDZIAŁYWANIE WODY I MROZU RECYKLOWANEJ MIESZANKI Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ UZIARNIENIA

#### 3.4.1. Odporność na oddziaływanie wody wg metodyki TSR

Ocenę odporności na oddziaływanie wody i mrozu wg wskaźnika *TSR* oraz dopasowanie parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych przedstawiono w Tabl. 13 dla drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D oraz w Tabl. 14 dla gruboziarnistej MCAS-G.

Analiza danych przedstawionych w Tabl. 13 i 14 wskazuje, że zarówno cement portlandzki, jak i wapno hydratyzowane oraz uboczne cementowe produkty pyłaste mają istotny wpływ na odporność na oddziaływanie wody charakteryzowaną przez wskaźnik *TSR* recyklowanych mieszanek, niezależnie od ich uziarnienia. W przypadku recyklowanej mieszanki gruboziarnistej wystąpił dodatkowo efekt interakcji wszystkich składników spoiwa. W związku z tym można stwierdzić, że uziarnienie recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej może odgrywać rolę w zapewnieniu wymaganej charakterystyki badanego parametru.

For every hydraulic binder used, the coarse mixture MCAS-G exhibited greater indirect tensile strength than the corresponding fine mixture with the given hydraulic binder composition.

### 3.4. INFLUENCE OF MIXED HYDRAULIC BINDER COMPOSITION ON WATER AND FROST RESISTANCE OF RECYCLED MIXTURES OF DIFFERENT GRADING

#### 3.4.1. Resistance to moisture damage according to the TSR methodology

Assessment of the resistance to moisture damage according to *TSR* and the fit of the regression model parameters to the test results is presented in Table 13 for the fine mixture MCAS-D and in Table 14 for the coarse mixture MCAS-G.

Analysis of the data presented in Tables 13 and 14 indicates that the three hydraulic binder components display significant individual influence on the *TSR* ratio of recycled mixtures, regardless of their grading. Additionally, in the case of coarse-graded mixture, the effect of interaction between the three components may be observed. Therefore, it may be stated that mixture grading may play a significant role in ensuring the required value of the tested parameter.

Table 13. Regression model fitting parameters for resistance to moisture damage TSR for MCAS-D mixtures  
 Tablica 13. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	TSR [%]; $R^2 = 0.807$ ; $R_{adj}^2 = 0.725$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy MS = 13.272				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	78.115	2.103	< 0.001	73.604	82.626
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	64.979	2.103	< 0.001	60.468	69.490
(C) CBPD / UCPP	74.047	2.103	< 0.001	69.536	78.558
AB	36.883	10.304	0.003	14.783	58.984
AC	28.975	10.304	0.013	6,875	51.076
BC	17.098	10.304	0.119	-5.002	39.198
ABC	48.041	72.497	0.518	-107.450	203.532

Table 14. Regression model fitting parameters for resistance to moisture damage TSR for MCAS-G mixtures  
 Tablica 14. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	TSR [%]; $R^2 = 0.594$ ; $R_{adj}^2 = 0.4205$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy MS = 24.252				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	74.505	2.843	< 0.001	68.407	80.603
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	74.421	2.843	< 0.001	68.323	80.519
(C) CBPD / UCPP	75.057	2.843	< 0.001	68.959	81.156
AB	-20.851	13.929	0.156	-50.726	9.023
AC	-5.601	13.929	0.693	-35.475	24.273
BC	-3.578	13.929	0.800	-33.453	26.296
ABC	405.540	98.000	< 0.001	195.349	615.730

Model regresyjny odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej w aspekcie składu spoiwa uzyskał postać:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (8), o  $R^2 = 0,807$ :  

$$TSR_{MCAS-D} = 78,115 \cdot CEM + 64,979 \cdot Ca(OH)_2 + 74,047 \cdot UCPP + 36,883 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 28,975 \cdot CEM \cdot UCPP + 17,098 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 48,041 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP,$$
 (8)

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (9), o  $R^2 = 0,594$ :  

$$TSR_{MCAS-G} = 74,505 \cdot CEM + 74,421 \cdot Ca(OH)_2 + 75,057 \cdot UCPP - 20,851 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 5,601 \cdot CEM \cdot UCPP - 3,578 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 404,540 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP.$$
 (9)

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and TSR of recycled mixtures assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (8), with  $R^2 = 0.807$ :  

$$TSR_{MCAS-D} = 78.115 \cdot CEM + 64.979 \cdot Ca(OH)_2 + 74.047 \cdot CBPD + 36.883 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 28.975 \cdot CEM \cdot CBPD + 17.098 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 48.041 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD,$$
 (8)

- for the coarse-graded mixture (9), with  $R^2 = 0.594$ :  

$$TSR_{MCAS-G} = 74.505 \cdot CEM + 74.421 \cdot Ca(OH)_2 + 75.057 \cdot CBPD - 20.851 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 5.601 \cdot CEM \cdot CBPD - 3.578 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 404.540 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD.$$
 (9)

Na Rys. 7 zobrazowano siłę wpływu zawartości składników spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność odporności na działanie czynników atmosferycznych *TSR* recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

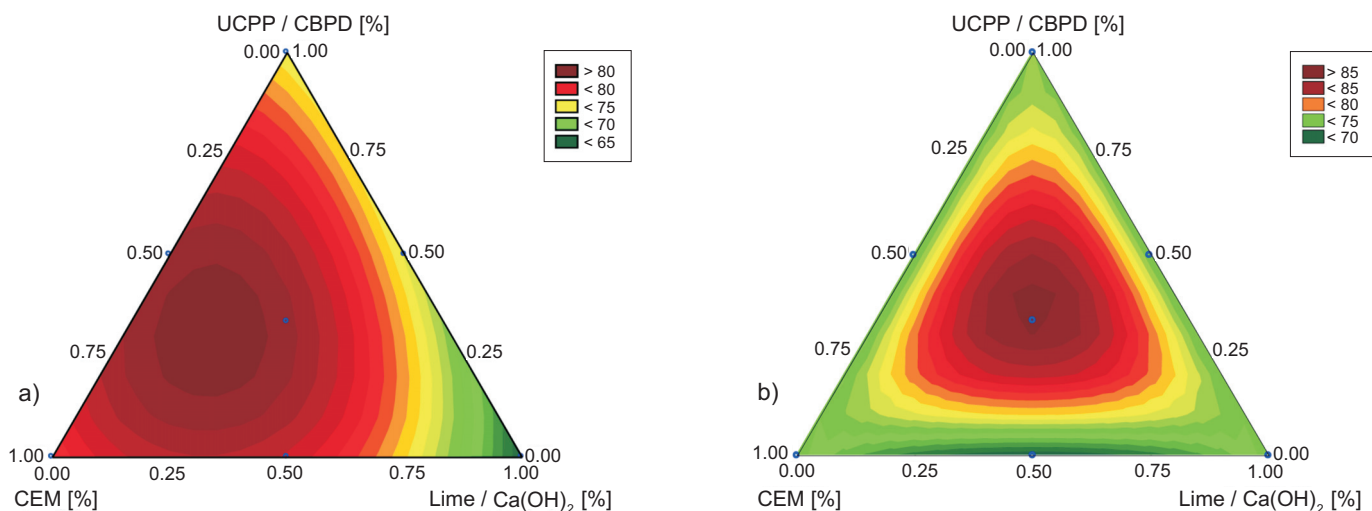


Fig. 7. Response charts for resistance to moisture damage *TSR* of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 7. Powierzchnia odpowiedzi dla odporności na działanie czynników atmosferycznych *TSR* recyklowanej mieszanki w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Oznaczenie odporności na działanie wody wykazało zróżnicowany wpływ składu spoiwa na wskaźnik *TSR*, niezależnie od rodzaju mieszanki (drobno-, gruboziarnista). Najwyższe wartości wykazywała mieszanka z zastosowanym spoiwem 7C (33% CEM, 33%  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz 33% UCPP), bez względu na skład granulometryczny MCAS. Porównując wyniki dla mieszanki ze spoiwem 7C do mieszanki referencyjnej, zaobserwowano odwrócenie zależności odporności na działanie wody od uziarnienia mieszanki. Dla mieszanki referencyjnej większą odporność wykazała mieszanka drobnoziarnista, natomiast dla mieszanki ze spoiwem 7C – mieszanka gruboziarnista. Największe różnice wskaźnika *TSR* w zależności od uziarnienia wykazywały mieszanki ze spoiwami 2V (20% CEM, 60%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 20% UCPP), 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 40% UCPP) oraz 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 20% UCPP). Identyczne wyniki wskaźnika *TSR* osiągnęła mieszanka MCAS ze spoiwem 4C (20% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 40% UCPP).

### 3.4.2. Odporność na oddziaływanie wody i mrozu wg metodyki ITSR

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych odporności na oddziaływanie wody i mrozu wyrażonej wskaźnikiem *ITSR* przedstawiono w Tabl. 15 dla drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D oraz w Tabl. 16 dla gruboziarnistej MCAS-G.

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on the *TSR* ratio of differently graded recycled mixtures is shown in Fig. 7.

Determination of the resistance to moisture damage according to *TSR* indicated variable influence of hydraulic binder on the *TSR* parameter, regardless of the type of the mixture (fine/coarse). The highest values of *TSR* were displayed by mixtures with 7C hydraulic binder (33% CEM, 33%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 33% CBPD), regardless of the grading of the mixture. During comparisons of the results obtained for the reference mixture and the mixture with 7C binder, a certain reversal was observed in terms of dependence on mixture grading. In the case of the reference mixtures, greater *TSR* value was displayed by the fine mixture; in the case of mixtures with 7C, in contrast, greater *TSR* value was displayed by the coarse mixture. The greatest differences in *TSR* depending on mixture grading were exhibited by the mixtures with 2V (20% CEM, 60%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD), 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD) and 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD). Identical results of *TSR* were obtained for mixtures with 4C binder (20% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD).

### 3.4.2. Resistance to moisture and frost damage according to the ITSR methodology

Assessment of the fit of the regression model parameters to the test results of the resistance to moisture and frost

Table 15. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance *ITSR* for MCAS-D mixtures  
 Tablica 15. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych charakteryzowanych przez *ITSR* mieszanki MCAS-D

damage expressed by *ITSR* is presented in Table 15 for the fine mixture MCAS-D and in Table 16 for the coarse mixture MCAS-G.

Variable Zmienna	<i>ITSR</i> [%]; $R^2 = 0.717$ ; $R_{adj}^2 = 0.596$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 18.018$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	63.600	2.450	< 0.001	58.344	68.856
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	52.269	2.450	< 0.001	47.013	57.525
(C) CBPD / UCPP	71.363	2.450	< 0.001	66.107	76.619
AB	24.613	12.006	0.059	-1.137	50.364
AC	-0.444	12.006	0.971	-26.195	25.306
BC	-2.933	12.006	0.810	-28.683	22.818
ABC	-100.151	84.470	0.255	-281.322	81.020

Table 16. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance *ITSR* for MCAS-G mixtures  
 Tablica 16. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych charakteryzowanych przez *ITSR* mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	<i>ITSR</i> [%]; $R^2 = 0.439$ ; $R_{adj}^2 = 0.195$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 17.010$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	61.744	2.381	< 0.001	56.637	66.851
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	56.653	2.381	< 0.001	51.546	61.761
(C) CBPD / UCPP	59.925	2.381	< 0.001	54.818	65.032
AB	-3.343	11.665	0.778	-28.363	21.677
AC	8.248	11.665	0.491	-16.771	33.268
BC	4.038	11.665	0.734	-20.981	29.058
ABC	159.688	82.074	0.072	-16.343	335.720

Na podstawie danych zestawionych w Tabl. 15 i 16 można stwierdzić, że – podobnie jak w przypadku wcześniej analizowanych właściwości – wszystkie składniki spoiwa mieszanego mają istotny wpływ na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie *ITSR* recyklowanych mieszanek, niezależnie od ich uziarnienia. Nie zaobserwowano natomiast żadnych efektów interakcji pomiędzy składnikami spoiwa, niezależnie od uziarnienia mieszanki mineralno-asfaltowej.

Model regresyjny analizowanej zależności dla badanych recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie składu spoiwa uzyskał postać:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (10), o  $R^2 = 0,717$ :

Based on the data presented in Tables 15 and 16, the three hydraulic binder components display significant individual influence on the *ITSR* ratio of recycled mixtures, regardless of their grading. No interactions were observed between hydraulic binder components, regardless of mixture grading.

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and *ITSR* of recycled mixtures assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (10), with  $R^2 = 0.717$ :

$$\begin{aligned}
 ITSR_{MCAS-D} = & 63,6 \cdot CEM + 52,269 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 71,363 \cdot UCPC + 24,613 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \quad (10) \\
 & - 0,444 \cdot CEM \cdot UCPC - 2,933 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPC + \\
 & - 100,151 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPC,
 \end{aligned}$$

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (11), o  $R^2 = 0,439$ :

$$\begin{aligned}
 ITSR_{MCAS-G} = & 61,744 \cdot CEM + 56,653 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 59,925 \cdot UCPC - 3,343 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \quad (11) \\
 & + 8,248 \cdot CEM \cdot UCPC + 4,038 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPC + \\
 & + 159,688 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPC.
 \end{aligned}$$

Oddziaływanie zawartości składników spoiwa mieszane oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność cechy *ITSR* przedstawiono w postaci powierzchni odpowiedzi na Rys. 8.

$$\begin{aligned}
 ITSR_{MCAS-D} = & 63,6 \cdot CEM + 52,269 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 71,363 \cdot CBPD + 24,613 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \quad (10) \\
 & - 0,444 \cdot CEM \cdot CBPD - 2,933 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + \\
 & - 100,151 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD,
 \end{aligned}$$

- for the coarse-graded mixture (11), with  $R^2 = 0.439$ :

$$\begin{aligned}
 ITSR_{MCAS-G} = & 61,744 \cdot CEM + 56,653 \cdot Ca(OH)_2 + \\
 & + 59,925 \cdot CBPD - 3,343 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + \quad (11) \\
 & + 8,248 \cdot CEM \cdot CBPD + 4,038 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + \\
 & + 159,688 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD.
 \end{aligned}$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on *ITSR* is shown in Fig. 8.

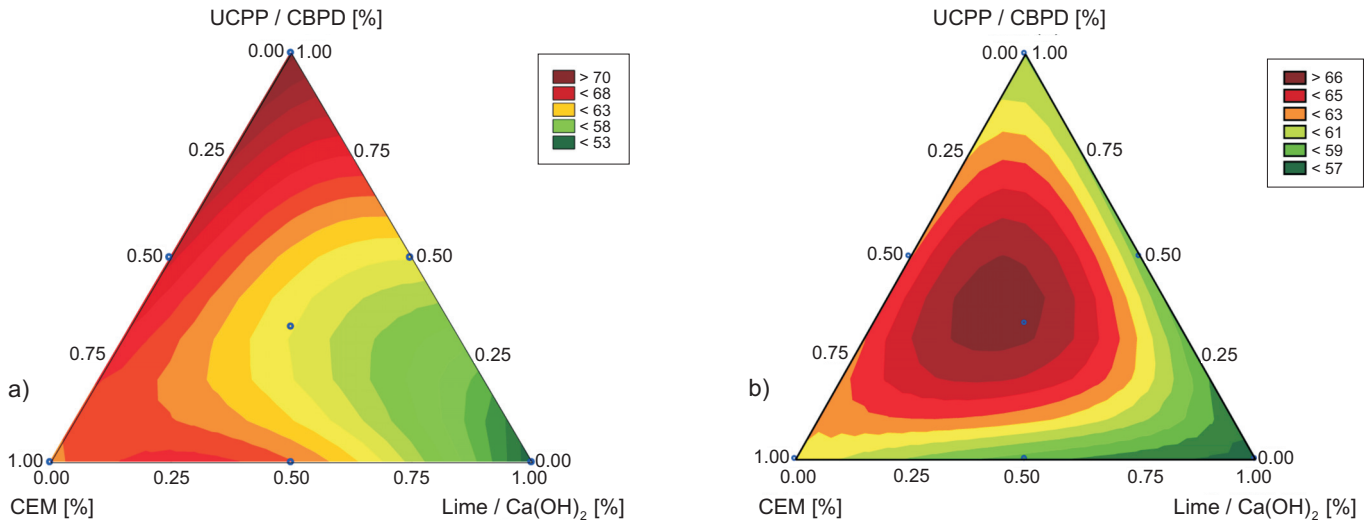


Fig. 8. Response charts for moisture and frost resistance *ITSR* of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 8. Powierzchnia odpowiedzi dla odporności na działanie czynników atmosferycznych *ITSR* recyklowanej mieszanki w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Uzyskane wyniki wskaźnika odporności na działanie wody i mrozu *ITSR*, podobnie jak wyniki wskaźnika *TSR*, wykazały zróżnicowany wpływ rodzaju spoiwa, niezależnie od składu granulometrycznego mieszanki MCAS. Wśród mieszanek drobnoziarnistych największą wytrzymałością charakteryzowała się mieszanka ze spoiwem 1V (20% CEM, 20%  $Ca(OH)_2$  oraz 60% UCPC), natomiast najniższą mieszanka ze spoiwem 2V (20% CEM, 60%  $Ca(OH)_2$  oraz 20% UCPC). Zastosowanie spoiwa 2V w mieszance gruboziarnistej również skutkowało najniższymi wynikami wskaźnika *ITSR*, podczas gdy najlepszy wynik uzyskała mieszanka ze spoiwem 7C (33% CEM, 33%  $Ca(OH)_2$  oraz 33% UCPC).

As was the case with *TSR*, the obtained *ITSR* results indicated variable influence of hydraulic binder on the analyzed parameter, regardless of mixture grading. Among the fine-graded mixtures, the greatest *ITSR* value was displayed by the mixture with 1V binder (20% CEM, 20%  $Ca(OH)_2$  and 60% CBPD); the lowest *ITSR* value was displayed by the mixture with 2V binder (20% CEM, 60%  $Ca(OH)_2$  and 20% CBPD). Use of hydraulic binder 2V in a coarse-graded mixture also resulted in the lowest values of *ITSR*. The best *ITSR* result among the coarse-graded mixtures was obtained for the mixture with binder 7C (33% CEM, 33%  $Ca(OH)_2$  and 33% CBPD).

W zakresie spoiw zawierających w swoim składzie zasadniczą część cementu i UCPP, recyklowana mieszanka gruboziarnista charakteryzuje się większą odpornością na oddziaływanie wody *ITSR* niż recyklowana mieszanka drobnoziarnista z tym samym rodzajem spoiwa.

### 3.4.3. Odporność na oddziaływanie wody i mrozu wg zmodyfikowanej metodyki AASHTO T283 $WR_{W+M}$

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych odporności na oddziaływanie wody i mrozu ocenianej wg metodyki AASHTO T283 przedstawiono w Tabl. 17 dla drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D oraz w Tabl. 18 dla gruboziarnistej MCAS-G.

Table 17. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance AASHTO T283  $WR_{W+M}$  for MCAS-D mixtures

Tablica 17. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych wg AASHTO T283  $WR_{W+M}$  mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	AASHTO T283 $WR_{W+M}$ [%]; $R^2 = 0.411$ ; $R_{adj}^2 = 0.159$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 19.210$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	48.927	2.530	< 0.001	43.499	54.354
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	44.740	2.530	< 0.001	39.313	50.167
(C) CBPD / UCPP	52.524	2.530	< 0.001	47.096	57.950
AB	16.499	12.396	0.204	-10.090	43.087
AC	13.147	12.396	0.306	-13.442	39.735
BC	4.479	12.396	0.723	-2.109	31.067
ABC	-158.697	87.219	0.090	-345.764	28.370

Table 18. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance AASHTO T283  $WR_{W+M}$  for MCAS-G mixtures

Tablica 18. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych wg AASHTO T283  $WR_{W+M}$  mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	AASHTO T283 $WR_{W+M}$ [%]; $R^2 = 0.771$ ; $R_{adj}^2 = 0.673$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 11.52888$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	45.886	1.960	< 0.001	41.682	50.091
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	39.374	1.960	< 0.001	35.169	43.578
(C) CBPD / UCPP	52.803	1.960	< 0.001	48.598	57.007
AB	12.940	9.603	0.199	-7.657	33.538
AC	-32.119	9.603	0.005	-5.717	-11.521
BC	-7.962	9.603	0.421	-2.560	12.635
ABC	299.661	67.568	< 0.001	154.742	444.580

In the case of hydraulic binders that contained substantial proportion of cement and CBPD, the obtained coarse-graded mixtures displayed greater *ITSR* values than the corresponding fine-graded mixtures with the same binder composition.

### 3.4.3. Moisture and frost resistance according to the modified AASHTO T283 methodology $WR_{W+M}$

Assessment of fit of the regression model parameters to the AASHTO T283 test results is presented in Table 17 for the fine mixture MCAS-D and in Table 18 for the coarse mixture MCAS-G.

Ocena danych zestawionych w Tabl. 17 i 18 wskazuje, że – podobnie jak w przypadku wcześniej analizowanych właściwości – wszystkie składniki mają istotny wpływ na odporność recyklowanych mieszank na działanie czynników atmosferycznych wg AASHTO T283  $WR_{W+M}$ , niezależnie od ich uziarnienia. W przypadku mieszanki gruboziarnistej wystąpił efekt interakcji wszystkich składników spoiwa. W związku z tym rodzaj recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej odgrywa rolę w zapewnieniu odpowiednio wysokiego poziomu tego parametru. Podobną zależność zaobserwowano w przypadku charakterystyki *TSR*.

Modele regresyjne odporności na działanie czynników atmosferycznych wg AASHTO T283  $WR_{W+M}$  recyklowanych mieszank mineralno-asfaltowych w aspekcie składu spoiwa użyły postać:

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (12), o  $R^2 = 0,411$ :

$$WR_{MCAS-D} = 48,927 \cdot CEM + 44,740 \cdot Ca(OH)_2 + 52,524 \cdot UCPP + 16,499 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 13,147 \cdot CEM \cdot UCPP + 4,479 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP - 158,697 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP, \quad (12)$$

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (13), o  $R^2 = 0,771$ :

$$WR_{MCAS-G} = 45,886 \cdot CEM + 39,374 \cdot Ca(OH)_2 + 52,803 \cdot UCPP + 12,940 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 32,119 \cdot CEM \cdot UCPP - 7,962 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 299,661 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP. \quad (13)$$

Analysis of the data presented in Tables 17 and 18 indicates that the three hydraulic binder components display significant individual influence on moisture and frost resistance of recycled mixtures according to AASHTO T283, regardless of their grading. In the case of coarse-graded mixtures, the effect of interaction between the three components occurred. Therefore, it may be stated that mixture grading is significant in ensuring the required value of the tested parameter. Similar regularity was noted in the case of the *TSR* parameter.

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and moisture and frost resistance of recycled mixtures according to AASHTO T283  $WR_{W+M}$  assumed the following forms:

- for the fine-graded mixture (12), with  $R^2 = 0.411$ :

$$WR_{MCAS-D} = 48.927 \cdot CEM + 44.740 \cdot Ca(OH)_2 + 52.524 \cdot CBPD + 16.499 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 13.147 \cdot CEM \cdot CBPD + 4.479 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD - 158.697 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD, \quad (12)$$

- for the coarse-graded mixture (13), with  $R^2 = 0.771$ :

$$WR_{MCAS-G} = 45.886 \cdot CEM + 39.374 \cdot Ca(OH)_2 + 52.803 \cdot CBPD + 12.940 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 32.119 \cdot CEM \cdot CBPD - 7.962 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 299.661 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD. \quad (13)$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on  $WR_{W+M}$  is shown in Fig. 9.

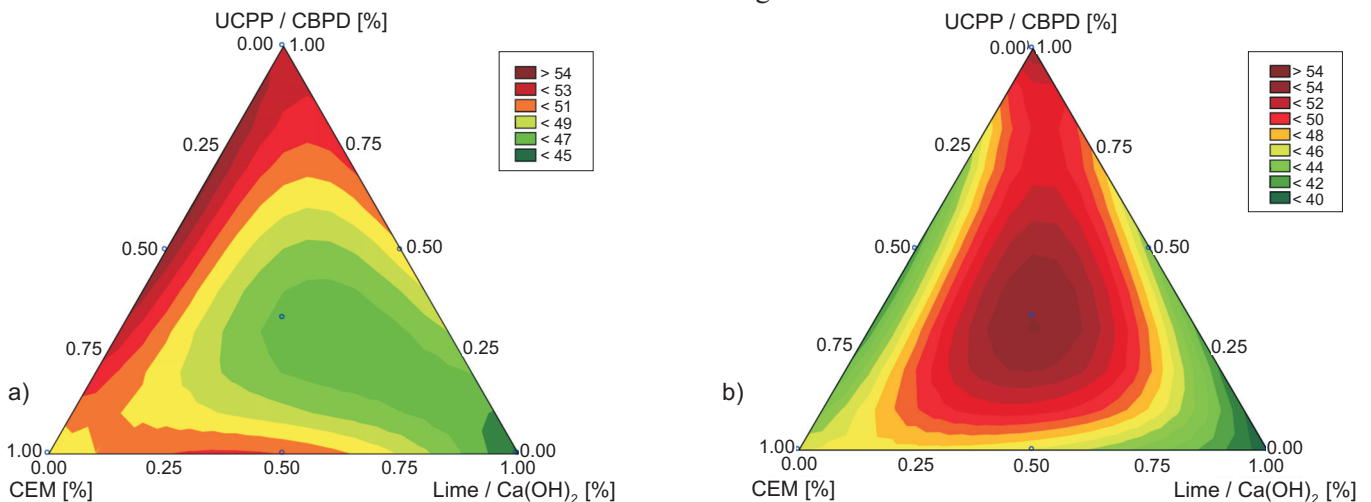


Fig. 9. Response charts for moisture and frost resistance AASHTO T283  $WR_{W+M}$  of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 9. Powierzchnia odpowiedzi dla odporności na działanie czynników atmosferycznych  $WR_{W+M}$  wg AASHTO T283 recyklowanej mieszanki w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Oddziaływanie zawartości składników spoiwa mieszanego oraz interakcji pomiędzy nimi na zmienność odporności na działanie czynników atmosferycznych  $WR_{W+M}$  przedstawiono na Rys. 9.

Wyniki wskaźnika odporności na działanie wody i mrozu  $WR_{W+M}$  określone wg AASHTO T283 wykazały dla większości mieszanek wpływ składu granulometrycznego na wartość tego parametru. Oprócz spoiw 1V (20% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 60% UCPP) oraz 7C (33% CEM, 33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 33% UCPP) mieszanki drobnoziarniste uzyskiwały większe wartości wskaźnika  $WR_{W+M}$ . Podobnie jak w przypadku wskaźników  $TSR$  oraz  $ITSR$ , najgorsze wyniki uzyskała mieszanka oznaczona symbolem 2V (20% CEM, 60%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP).

### 3.4.4. Odporność na oddziaływanie mrozu wg metodyki PANK 4308

Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych odporności na oddziaływanie mrozu wg metodyki PANK 4308 dla drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D przedstawiono w Tabl. 19, zaś gruboziarnistej MCAS-G – w Tabl. 20.

Results of moisture and frost resistance  $WR_{W+M}$  according to AASHTO T283 indicated that for the majority of mixtures their grading type affected the values of this parameter. With the exception of mixtures containing binders 1V (20% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 60% CBPD) and 7C (33% CEM, 33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 33% CBPD), greater values of  $WR_{W+M}$  were displayed by fine-graded mixtures. Like in the case of  $TSR$  and  $ITSR$ , the lowest values were obtained for the mixture with binder 2V (20% CEM, 60%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 20% CBPD).

### 3.4.4. Frost resistance according to the PANK 4308 methodology

Assessment of fit of the regression model parameters to the test results of frost resistance according to the PANK 4308 methodology is presented in Table 19 for the fine mixture MCAS-D and in Table 20 for the coarse mixture MCAS-G.

Table 19. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance  $PANK_{-2^\circ\text{C}}$  for MCAS-D mixtures  
Tablica 19. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych  $PANK_{-2^\circ\text{C}}$  mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	$PANK_{-2^\circ\text{C}}$ [MPa]; $R^2 = 0.437$ ; $R_{adj}^2 = 0.196$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.005$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	1.006	0.041	< 0.001	0.916	1.096
(B) $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.973	0.041	< 0.001	0.883	1.063
(C) CBPD / UCPP	0.916	0.041	< 0.001	0.826	1.006
AB	-0.160	0.205	0.449	-0.600	0.280
AC	0.086	0.205	0.679	-0.353	0.527
BC	-0.100	0.205	0.633	-0.540	0.340
ABC	3.610	1.445	0.025	0.509	6.710

Analiza danych w Tabl. 19 i 20 wskazuje, że wszystkie składniki spoiwa mają istotny wpływ na odporność recyklowanych mieszanek na działanie czynników atmosferycznych wg PANK 4308, niezależnie od ich uziarnienia. Należy zaznaczyć, że w przypadku mieszanki gruboziarnistej dodatkowo stwierdzono wystąpienie interakcji wszystkich składników spoiwa. Podobną zależność zaobserwowano w przypadku wpływu składu spoiwa na mieszankę mineralno-asfaltową w przypadku parametru  $WR_{W+M}$ .

Model regresyjny odporności na działanie czynników atmosferycznych  $PANK_{-2^\circ\text{C}}$  recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie składu spoiwa uzyskał postać:

Analysis of the data presented in Tables 19 and 20 indicates that the three hydraulic binder components display significant individual influence on frost resistance of recycled mixtures according to PANK 4308, regardless of their grading. Additionally, in the case of coarse-graded mixtures, the effect of interaction between the three components was noted. A similar relationship was observed in the case of the  $WR_{W+M}$  parameter.

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and frost resistance of recycled mixtures according to PANK 4308 assumed the following forms:



Table 20. Regression model fitting parameters for moisture and frost resistance  $PANK_{-2^{\circ}C}$  for MCAS-G mixtures  
 Tablica 20. Parametry dopasowania modelu regresji względem odporności na działanie czynników atmosferycznych  $PANK_{-2^{\circ}C}$  mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	$PANK_{-2^{\circ}C}$ [MPa]; $R^2 = 0.761$ ; $R_{adj}^2 = 0.657$ ; Mean Squared Residuals / Resztowy $MS = 0.012$				
	Coefficient Współczynnik $b$	Standard error Błąd standardowy	$p$ -value Wartość $p$	Confidence interval lower bound Dolna granica przedziału ufności (95%)	Confidence interval upper bound Górna granica przedziału ufności (95%)
(A) CEM	1.093	0.063	< 0.001	0.957	1.229
(B) $Ca(OH)_2$	0.896	0.063	< 0.001	0.760	1.032
(C) CBPD / UCPP	0.916	0.063	< 0.001	0.780	1.052
AB	-0.620	0.310	0.065	-1.286	0.046
AC	-0.153	0.310	0.629	-0.820	0.513
BC	-0.573	0.10	0.086	-1.240	0.093
ABC	12.440	2.189	< 0.001	7.748	17.131

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (14), o  $R^2 = 0,437$ :

$$PANK_{-2_{MCAS-D}} = 1,006 \cdot CEM + 0,973 \cdot Ca(OH)_2 + 0,916 \cdot UCPP - 0,16 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 0,086 \cdot CEM \cdot UCPP - 0,1 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 3,61 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP, \quad (14)$$

- w przypadku mieszanki drobnoziarnistej (15), o  $R^2 = 0,761$ :

$$PANK_{-2_{MCAS-G}} = 1,093 \cdot CEM + 0,896 \cdot Ca(OH)_2 + 0,916 \cdot UCPP - 0,62 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 0,153 \cdot CEM \cdot UCPP - 0,573 \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP + 12,44 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot UCPP. \quad (15)$$

- for the fine-graded mixture (14), with  $R^2 = 0.437$ :

$$PANK_{-2_{MCAS-D}} = 1.006 \cdot CEM + 0.973 \cdot Ca(OH)_2 + 0.916 \cdot CBPD - 0.16 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 + 0.086 \cdot CEM \cdot CBPD - 0.1 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 3.61 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD, \quad (14)$$

- for the coarse-graded mixture (15), with  $R^2 = 0.761$ :

$$PANK_{-2_{MCAS-G}} = 1.093 \cdot CEM + 0.896 \cdot Ca(OH)_2 + 0.916 \cdot CBPD - 0.62 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 - 0.153 \cdot CEM \cdot CBPD - 0.573 \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD + 12.44 \cdot CEM \cdot Ca(OH)_2 \cdot CBPD. \quad (15)$$

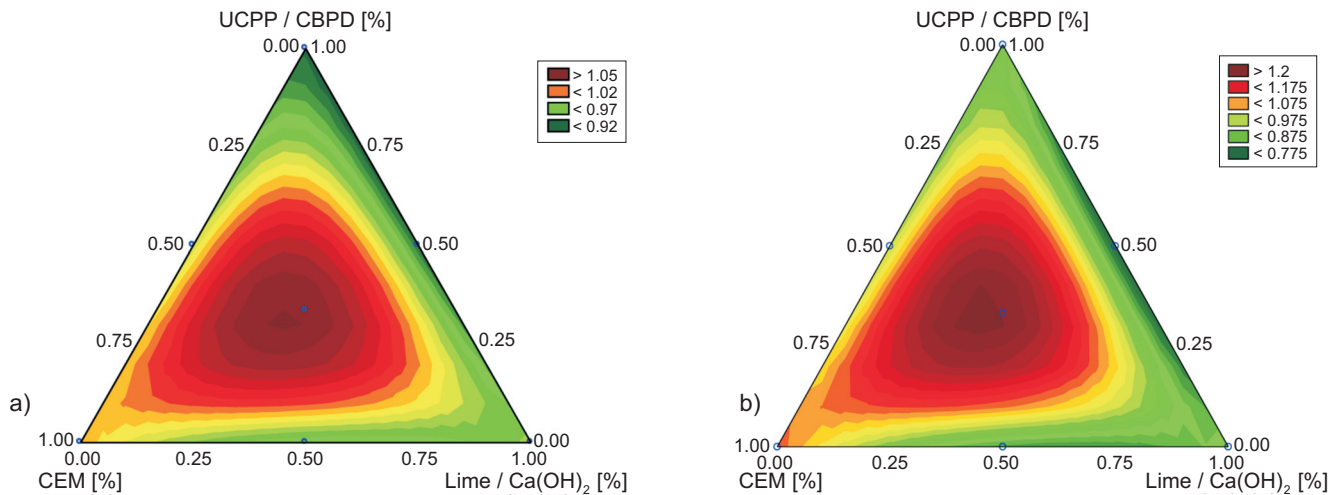


Fig. 10. Response charts for moisture and frost resistance  $PANK_{-2^{\circ}C}$  of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading, for: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Rys. 10. Powierzchnia odpowiedzi dla odporności na działanie czynników atmosferycznych wg  $PANK_{-2^{\circ}C}$  recyklowanej mieszanki w aspekcie uziarnienia dla: a) MCAS-D, b) MCAS-G

Wpływ zawartości składników w spoiwie mieszanym oraz interakcji pomiędzy nimi na odporność na działanie czynników atmosferycznych wyrażoną zmienną  $PANK_{-2^{\circ}C}$  przedstawiono na Rys. 10.

Uzyskane wyniki badań w sposób jednoznaczny pozwalają stwierdzić, że najbardziej odpornymi na działanie czynników atmosferycznych wg PANK 4308 są, niezależnie od składu granulometrycznego, mieszanki zawierające 100% cementu. Nie zanotowano jednoznacznej zależności pozwalającej określić wpływ rodzaju spoiwa na wartość analizowanego parametru  $PANK_{-2^{\circ}C}$ . Należy podkreślić, że w przypadku spoiw wieloskładnikowych większość uzyskanych wyników była na zbliżonym do siebie poziomie. Wyjątkiem były mieszanki drobno- i gruboziarniste ze spoiwem 7C, które uzyskały wyniki podobne do mieszanek z cementem. Wynik żadnej z analizowanych mieszanek nie przekroczył granicznej wartości 4,8 MPa, co pozwala stwierdzić, że wszystkie z nich spełniły wymagania normowe.

### 3.5. MODUŁ SZTYWNOŚCI W POŚREDNIM ROZCIĄGANIU *IT-CY* W ASPEKCIE TEMPERATURY BADANIA

Badania modułu sztywności recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano w czterech charakterystycznych temperaturach pracy konstrukcji nawierzchni, tj.  $-10^{\circ}C$ ,  $+13^{\circ}C$ ,  $+25^{\circ}C$  i  $+40^{\circ}C$ . Pozwala to na ocenę pracy konstrukcji nawierzchni w zmiennych warunkach środowiskowych z uwzględnieniem pór roku, tj. czynników takich jak oddziaływanie mrozu na konstrukcję nawierzchni, występowanie jej przeszywnienia, wiosennego rozmarzania konstrukcji czy pracy w warunkach letnich i powstawania deformacji trwałych pod wpływem wysokich temperatur. Uzyskane wyniki badań umożliwiają również projektowanie konstrukcji nawierzchni w sposób indywidualny za pomocą metod mechanistycznych. Dzięki temu można dokonywać optymalizacji konstrukcji nawierzchni w zakresie jej trwałości oraz w aspekcie ekonomicznym. Ocenę dopasowania parametrów modelu regresyjnego do wyników eksperymentalnych drobnoziarnistej mieszanki MCAS-D przedstawiono w Tabl. 21, a gruboziarnistej MCAS-G – w Tabl. 22.

Analiza danych przedstawionych w Tabl. 21 wskazuje, że zarówno cement portlandzki, jak i wapno hydratyzowane oraz uboczne cementowe produkty pylaste mają istotny wpływ na moduł sztywności recyklowanych mieszanek, niezależnie od temperatury badania. W przypadku temperatury badania  $-10^{\circ}C$  wystąpił dodatkowo efekt interakcji cementu i wapna hydratyzowanego oraz cementu i UCPP.

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on the  $PANK_{-2^{\circ}C}$  parameter of recycled mixtures is shown in Fig. 10.

The obtained test results clearly indicate that the most resistant mixtures according to PANK 4308, regardless of their grading, are those incorporating 100% of cement as hydraulic mixture. No distinct relationships between hydraulic binder compositions and the value of the  $PANK_{-2^{\circ}C}$  parameter were noted. It should be emphasized that in most cases mixtures with the three-component hydraulic binders exhibited similar values of the tested parameter, with the exception of fine- and coarse-graded mixtures with C7 binder, whose results were comparable to those of mixtures with pure cement. None of the analyzed mixtures displayed values greater than the limit value of 4.8 MPa, which indicates that all the mixtures met the requirements of the standard.

### 3.5. INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS *IT-CY* AT VARIOUS TEST TEMPERATURES

Testing of stiffness modulus of recycled mixtures was conducted at four temperatures characteristic for pavement service, i.e.:  $-10^{\circ}C$ ,  $+13^{\circ}C$ ,  $+25^{\circ}C$  and  $+40^{\circ}C$ . Therefore, it was possible to evaluate pavement performance under changing conditions in terms of phenomena typical for individual seasons, including excess mixture stiffness in winter, thawing in spring or service at high temperatures and development of permanent deformations in summer. The obtained results also enable individual pavement design using mechanistic methods, to optimize pavement life and costs. Assessment of fit of the regression model parameters to the test results is presented in Table 21 for the fine mixture MCAS-D and in Table 22 for the coarse mixture MCAS-G.

Analysis of the data presented in Table 21 indicates that the three hydraulic binder components display significant individual influence on stiffness modulus of recycled mixtures, regardless of the test temperature. Additionally, at the temperature of  $-10^{\circ}C$ , the effect of interaction was observed for the following pairs of components: cement-hydrated lime and cement-CBPD.

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and stiffness modulus *IT-CY* of the fine-graded MCAS-D recycled mixtures assumed the following forms at the four test temperatures:

- for the temperature of  $-10^{\circ}C$  (16), with  $R^2 = 0.902$ :

Table 21. Regression model fitting parameters for stiffness modulus  $S_m$  under indirect tension  $IT-CY$  at various temperatures for MCAS-D mixtures

Tablica 21. Parametry dopasowania modelu regresji modułu sztywności  $S_m$  w pośrednim rozciąganiu  $IT-CY$  w aspekcie temperatury badania dla mieszanki MCAS-D

Variable Zmienna	Test temperature / Temperatura badania [°C]							
	-10		+13		+25		+40	
	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$
(A) CEM	7870.50	< 0.001	5556.0	< 0.001	3840.25	< 0.001	308.00	< 0.001
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	903.75	< 0.001	6406.50	< 0.001	4675.25	< 0.001	345.75	< 0.001
(C) CBPD / UCPP	10362.50	< 0.001	7557.75	< 0.001	527.25	< 0.001	380.00	< 0.001
AB	5585.50	< 0.001	-1539.00	0.086	223.00	0.007	-285.50	0.669
AC	4546.00	< 0.001	1953.50	0.032	113.00	0.145	-1356.00	0.052
BC	1958.50	0.032	-2029.50	0.027	-87.00	0.259	-218.50	0.003
ABC	8284.50	0.182	869.75	0.163	10361.25	0.063	766.00	0.113
$R^2$	0.902		0.831		0.735		0.524	
$R_{adj}^2$	0.874		0.873		0.659		0.388	
Mean Squared Residuals Resztowy $MS$	12164.1		122059.6		94012.81		72288.73	

Table 21. Regression model fitting parameters for stiffness modulus  $S_m$  under indirect tension  $IT-CY$  at various temperatures for MCAS-G mixtures

Tablica 22. Parametry dopasowania modelu regresji względem modułu sztywności  $S_m$  w pośrednim rozciąganiu  $IT-CY$  w aspekcie temperatury dla mieszanki MCAS-G

Variable Zmienna	Test temperature / Temperatura badania [°C]							
	-10		+13		+25		+40	
	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$	Coefficient Współczynnik $b$	$p$ -value Wartość $p$
(A) CEM	12209.8	< 0.001	9500.00	< 0.001	8230.25	< 0.001	5306.75	< 0.001
(B) Ca(OH) <sub>2</sub>	11816.5	< 0.001	8371.00	< 0.001	7765.00	< 0.001	4698.00	< 0.001
(C) CBPD / UCPP	12839.8	< 0.001	9438.75	< 0.001	826.50	< 0.001	4823.25	< 0.001
AB	-4677.5	< 0.001	-2084.00	0.034	-926.50	< 0.001	-217.50	0.043
AC	9089.0	< 0.001	3077.50	0.003	-135.50	0.104	2016.00	0.060
BC	-2983.5	< 0.001	-3123.50	0.002	-67.00	0.406	-421.50	0.682
ABC	115544.3	< 0.001	4475.25	< 0.001	1681.50	0.007	-9204.75	0.211
$R^2$	0.977		0.880		0.894		0.535	
$R_{adj}^2$	0.969		0.846		0.864		0.400	
Mean Squared Residuals Resztowy $MS$	118591.7		141217.9		10667.1		171825.2	

Modele regresyjne modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu  $IT-CY$  w aspekcie temperatury w przypadku recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej MCAS-D uzyskały postać:

- dla temperatury  $-10^\circ\text{C}$  (16), o  $R^2 = 0,902$ :

$$\begin{aligned}
 S_{m-10} = & 7870.5 \cdot \text{CEM} + 903.75 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + \\
 & + 10362.5 \cdot \text{CBPD} + 5585.5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + \\
 & + 4546 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} + 1958.5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + \\
 & + 8284.5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD},
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$S_{m-10} = 7870,5 \cdot \text{CEM} + 903,75 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 10362,5 \cdot \text{UCPP} + 5585,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 4546 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} + 1958,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 8284,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (16)$$

- dla temperatury +13°C (17), o  $R^2 = 0,831$ :

$$S_{m+13} = 5556 \cdot \text{CEM} + 6406,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 7557,75 \cdot \text{UCPP} - 1539 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 1953,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 2029,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 869,75 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (17)$$

- dla temperatury +25°C (18), o  $R^2 = 0,735$ :

$$S_{m+25} = 3840,25 \cdot \text{CEM} + 4675,25 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 527,25 \cdot \text{UCPP} + 223 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 113 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 87 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 10361,25 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (18)$$

- dla temperatury +40°C (19), o  $R^2 = 0,524$ :

$$S_{m+40} = 308 \cdot \text{CEM} + 345,75 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 380 \cdot \text{UCPP} - 285,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 - 1356 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 218,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 766 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (19)$$

Analiza danych przedstawionych w Tabl. 22 wskazuje, że zarówno cement portlandzki, jak i wapno hydratyzowane oraz uboczne cementowe produkty pyłaste mają istotny wpływ na moduł sztywności recyklowanych mieszanek, niezależnie od temperatury ich badania. W przypadku temperatury badania -10°C zaobserwowano interesujący efekt. Wystąpił efekt synergii pomiędzy wszystkimi parami składników oraz efekt synergii wszystkich trzech składników spoiwa. W temperaturze +25°C istotne jest też oddziaływanie cementu i wapna hydratyzowanego na moduł sztywności recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej.

Modele regresyjne modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu *IT-CY* w aspekcie temperatury dla recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej MCAS-G uzyskały postać:

- dla temperatury -10°C (20), o  $R^2 = 0,977$ :

$$S_{m-10} = 12209,8 \cdot \text{CEM} + 11816,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 12839,8 \cdot \text{UCPP} - 4677,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 9089 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 2983,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 115544,3 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (20)$$

- dla temperatury +13°C (21), o  $R^2 = 0,88$ :

- for the temperature of +13°C (17), with  $R^2 = 0.831$ :  

$$S_{m+13} = 5556 \cdot \text{CEM} + 6406,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 7557,75 \cdot \text{CBPD} - 1539 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 1953,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 2029,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 869,75 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (17)$$

- for the temperature of +25°C (18), with  $R^2 = 0.735$ :  

$$S_{m+25} = 3840,25 \cdot \text{CEM} + 4675,25 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 527,25 \cdot \text{CBPD} + 223 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 113 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 87 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 10361,25 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (18)$$

- for the temperature of +40°C (19), with  $R^2 = 0.524$ :  

$$S_{m+40} = 308 \cdot \text{CEM} + 345,75 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 380 \cdot \text{CBPD} - 285,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 - 1356 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 218,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 766 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}. \quad (19)$$

Analysis of the data presented in Table 22 indicates that the three hydraulic binder components display significant individual influence on stiffness modulus of recycled mixtures, regardless of the test temperature. For the test temperature of -10°C, an interesting effect was observed – synergy was noted for the three pairs of components as well as for the three components together. At the temperature of +25°C, interaction between cement and hydrated lime is also significant.

Regression models of the analyzed relationships between the content of hydraulic binder components and stiffness modulus under indirect tension *IT-CY* of the coarse-graded MCAS-G recycled mixtures assumed the following forms at the four test temperatures:

- for the temperature of -10°C (20), with  $R^2 = 0.977$ :  

$$S_{m-10} = 12209,8 \cdot \text{CEM} + 11816,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 12839,8 \cdot \text{CBPD} - 4677,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 9089 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 2983,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 115544,3 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (20)$$

- for the temperature of +13°C (21), with  $R^2 = 0.88$ :  

$$S_{m+13} = 9500 \cdot \text{CEM} + 8371 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 9438,75 \cdot \text{CBPD} - 2084 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 3077,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 3123,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 4475,25 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (21)$$

- for the temperature of +25°C (22), with  $R^2 = 0.894$ :

$$S_{m+13} = 9500 \cdot \text{CEM} + 8371 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 9438,75 \cdot \text{UCPP} - 2084 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 3077,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 3123,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 4475,25 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (21)$$

- dla temperatury +25°C (22), o  $R^2 = 0,894$ :

$$S_{m+25} = 8230,25 \cdot \text{CEM} + 7765 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 826,5 \cdot \text{UCPP} - 926,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 - 135,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 67 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} + 1681,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}, \quad (22)$$

- dla temperatury +40°C (23), o  $R^2 = 0,535$ :

$$S_{m+40} = 5306,75 \cdot \text{CEM} + 4698 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 4823,25 \cdot \text{UCPP} - 217,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 2016 \cdot \text{CEM} \cdot \text{UCPP} - 421,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP} - 9204,75 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{UCPP}. \quad (23)$$

Analizę wpływu zawartości składników w spoiwie mieszanym oraz interakcji pomiędzy nimi na moduł sztywności  $S_m$  w formie graficznej przedstawiono na Rys. 11.

Dokonując analizy uzyskanych wyników badań można w sposób jednoznaczny stwierdzić, że w całym zakresie temperaturowym badań recyklowana mieszanka gruboziarnista charakteryzuje się większymi wartościami modułu sztywności niż mieszanka drobnoziarnista z tym samym składem spoiwa. Różnica ta może sięgać nawet 50% wartości porównywanego modułu sztywności.

W temperaturze badania  $-10^\circ\text{C}$  najkorzystniejsze wartości modułu sztywności wśród recyklowanych mieszanek drobnoziarnistych uzyskały mieszanki ze spoiwami 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 40% UCPP) oraz 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 20% UCPP). Natomiast wśród mieszanek gruboziarnistych najkorzystniejszymi wartościami modułu charakteryzowały się mieszanki zawierające spoiwa 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 33.33% UCPP) oraz 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  i 40% UCPP). Rezultaty badań wskazują, że najwyższe moduły sztywności recyklowane mieszanki uzyskują przy dużej zawartości cementu w spoiwie, wynoszącej ponad 40% z uwzględnieniem ubocznych cementowych produktów pyłastych. Oczywiście analizując moduł sztywności w temperaturze  $-10^\circ\text{C}$  należy pamiętać, że nie można kierować się tylko uzyskaniem jego wysokiej wartości, ponieważ negatywnym efektem może być powstanie spękań warstwy recyklowanej podbudowy. Należy dążyć do optymalizacji składu i ilości spoiwa, aby konstrukcja nawierzchni pracowała w sposób prawidłowy zarówno w ujemnych, jak i dodatnich wartościach temperatury.

$$S_{m+25} = 8230,25 \cdot \text{CEM} + 7765 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 826,5 \cdot \text{CBPD} - 926,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 - 135,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 67 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} + 1681,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}, \quad (22)$$

- for the temperature of +40°C (23), with  $R^2 = 0.535$ :

$$S_{m+40} = 5306,75 \cdot \text{CEM} + 4698 \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 4823,25 \cdot \text{CBPD} - 217,5 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 + 2016 \cdot \text{CEM} \cdot \text{CBPD} - 421,5 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD} - 9204,75 \cdot \text{CEM} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{CBPD}. \quad (23)$$

The influence of the content and interactions of the components of the mixed hydraulic binder on stiffness modulus  $S_m$  is shown in Fig. 11.

Analizes of the obtained results clearly indicate that coarse-graded recycled mixtures display greater values of stiffness modulus than their corresponding fine-graded mixtures across the entire range of temperatures. The relative difference in stiffness modulus may even be as high as 50%.

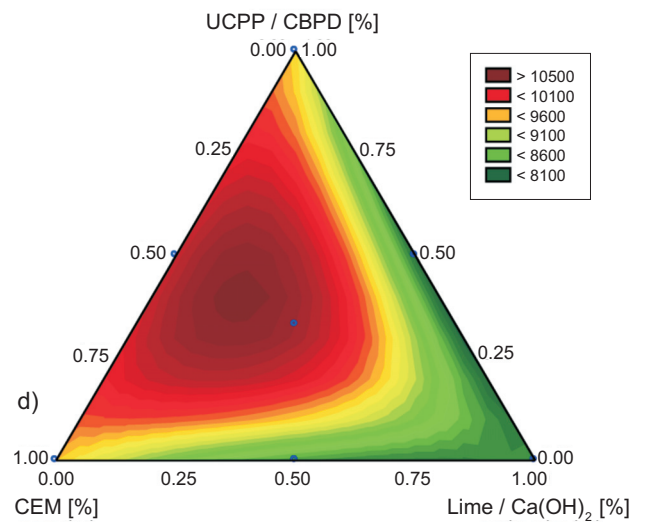
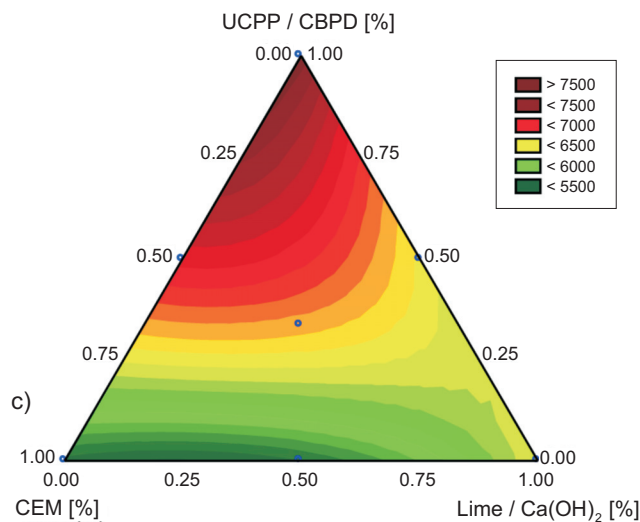
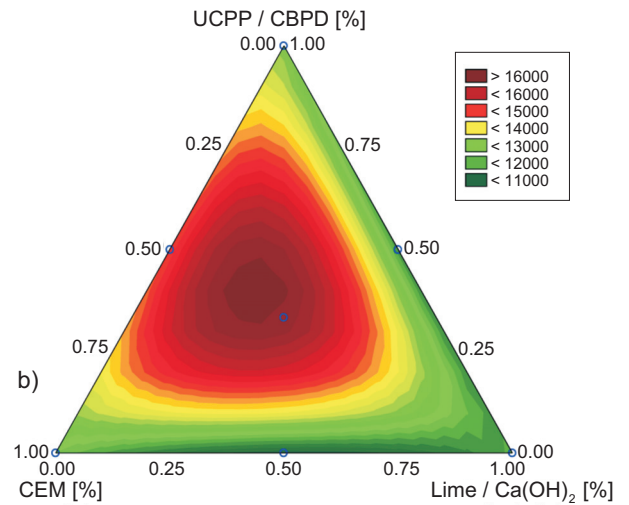
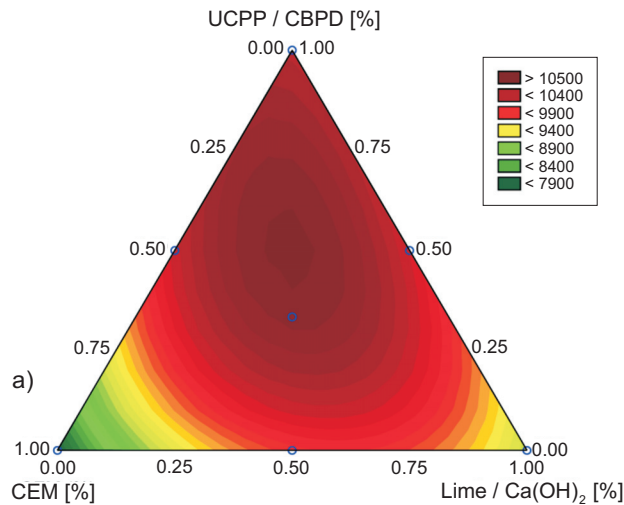
At the temperature of  $-10^\circ\text{C}$ , the most advantageous values of stiffness modulus among the fine-graded mixtures were displayed by mixtures with binders 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD) and 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD). Among the coarse-graded mixtures, the most advantageous values were displayed by mixtures with 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 33.33% CBPD) and 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD). The results indicate that the greatest stiffness moduli are obtained for mixtures containing high content of cement – over 40%, taking into account the cement by-pass dust. Obviously, at  $-10^\circ\text{C}$  one should not treat high stiffness modulus as the only criterion, since high stiffness may result in cracking of the recycled base course. The composition and quantity of hydraulic binder should be optimized to obtain adequate performance both at low and high temperatures.

At the temperature of  $+13^\circ\text{C}$ , the most advantageous values of stiffness modulus  $S_m$  among the fine-graded mixtures were displayed by mixtures with binders 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 33.33% CBPD), 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD) and 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD). Among the coarse-graded mixtures, the most advantageous values were displayed by mixtures with 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 40% CBPD), 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 20% CBPD), 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca(OH)}_2$  and 33.33% CBPD)

Analiza rezultatów badań modułu sztywności  $S_m$  w temperaturze  $+13^\circ\text{C}$  wykazała, że najkorzystniejsze wartości modułu wśród recyklowanych mieszanek droбноziarnistych uzyskały mieszanki ze spoiwami 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 33.33% UCPP), 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP) oraz 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP). Natomiast wśród mieszanek gruboziarnistych najkorzystniejszymi wartościami modułu charakteryzowały się mieszanki zawierające spoiwa 5C (40% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 40% UCPP), 3V (60% CEM, 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP), 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 33.33% UCPP) oraz 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP). Podobnie więc jak w przypadku modułu sztywności w temperaturze  $-10^\circ\text{C}$ , również w tej temperaturze znaczący wpływ na wartość modułu sztywności odgrywają spoiwa, w których składzie dominującą rolę pełnią cement i dodatkowo uboczne cementowe produkty pyłaste.

and 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 20% CBPD). As was the case with stiffness moduli at  $-10^\circ\text{C}$ , stiffness at  $+13^\circ\text{C}$  is also considerably affected by hydraulic binders with dominant content of cement and cement by-pass dusts.

Similar tendencies are noted at  $+25^\circ\text{C}$  and  $+40^\circ\text{C}$ . The highest stiffness modulus – both for coarse and fine grading – was observed for mixtures with binders 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 33.33% CBPD) and 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 20% CBPD). Cement and cement by-pass dusts play an important role in providing high stiffness moduli of recycled mixtures, which improves pavement performance, as long as the obtained stiffness is not excessive. The resulting values may be adjusted through adequate choice of the hydraulic binder, e.g. with greater hydrated lime content.



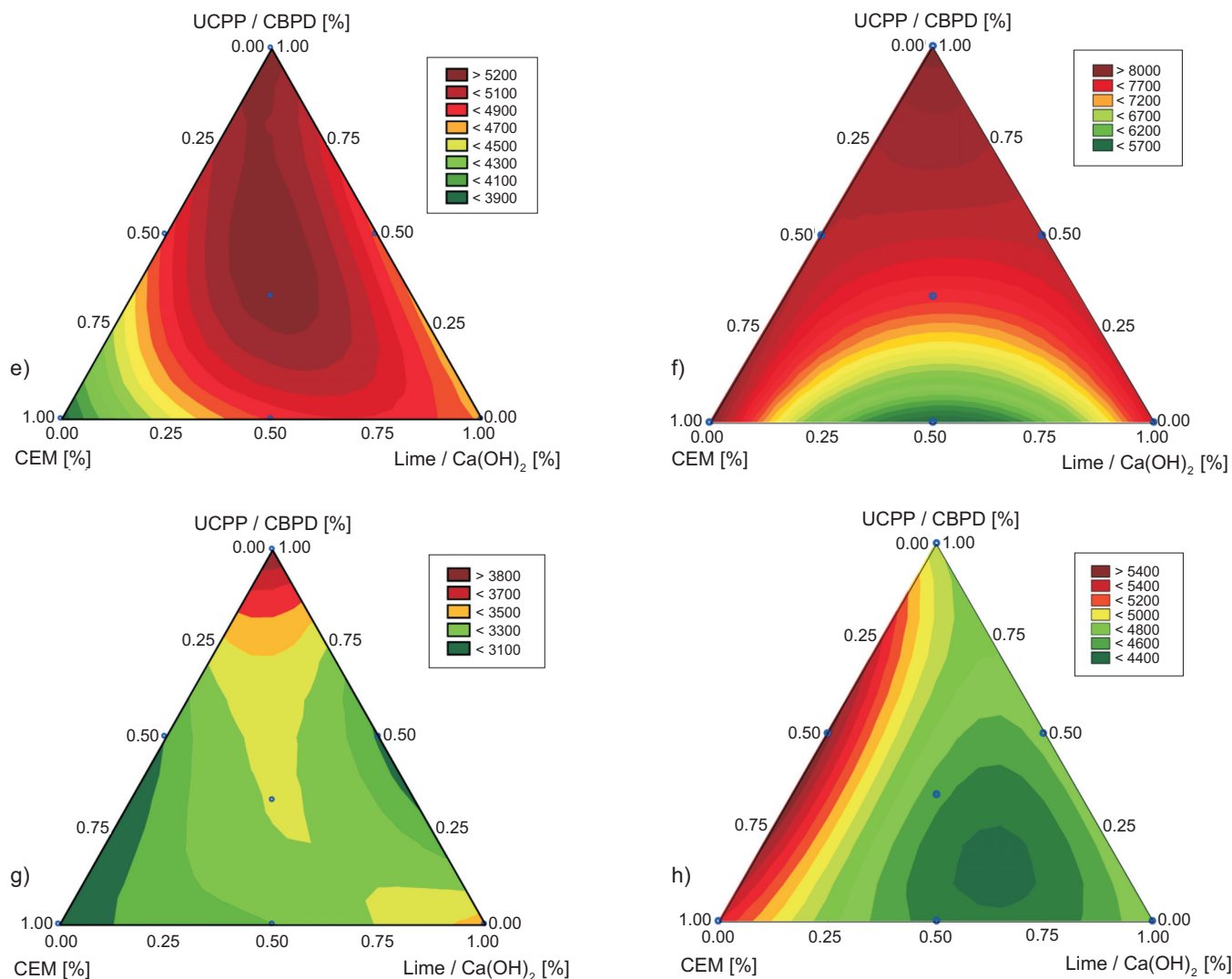


Fig. 11. Response charts for stiffness modulus under indirect tension *IT-CY* (at  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  and  $+40^{\circ}\text{C}$ ) of recycled asphalt mixtures, depending on hydraulic binder composition and mixture grading: a), c), e), g) – MCAS-D, and b), d), f), h) – MCAS-G  
 Rys. 11. Powierzchnia odpowiedzi dla modułu sztywności (odpowiednio w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+13^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$ ) recyklowanej mieszanki w aspekcie uziarnienia: a), c), e), g) – mieszanka drobnoziarnista MCAS-D, oraz b), d), f), h) – mieszanka gruboziarnista MCAS-G

W temperaturach badania  $+25^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$  obserwuje się podobną tendencję, jak w poprzednich zakresach temperaturowych. Najwyższe wartości modułu sztywności, zarówno dla mieszanki drobnoziarnistej, jak i gruboziarnistej, otrzymano przy zastosowaniu spoiw 7C (33.33% CEM, 33.33%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 33.33% UCPP) oraz 6C (40% CEM, 40%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i 20% UCPP). Cement oraz uboczne cementowe produkty pyłaste odgrywają w spoiwie mieszanym istotną rolę w zakresie zapewnienia wysokich wartości modułu sztywności recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych, co pozytywnie wpływa na pracę konstrukcji nawierzchni, pod warunkiem jednak, aby nie nastąpiło jej przesztywnienie. Kwestię tę można regulować

## 4. CONCLUSIONS

Based on the investigations of fine-graded (MCAS-D) and coarse-graded (MCAS-G) cold-recycled mixtures and the influence of hydraulic binder composition on their properties, the following conclusions may be formulated:

1. Grading type of cold-recycled mixtures does not result in practical differences in the relationship between hydraulic binder composition and the basic physical and mechanical parameters (with the exception of compressive strength).

wyborem spoiwa, np. z większą zawartością wapna hydratyzowanego.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań drobnoziarnistej (MCAS-D) i gruboziarnistej (MCAS-G) mieszanki mineralno-asfaltowej oraz wpływu składu mieszanego spoiwa hydraulicznego na ich podstawowe właściwości można stwierdzić, że:

1. Rodzaj uziarnienia recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym praktycznie nie powoduje ich zróżnicowania w zakresie zależności wartości podstawowych parametrów fizyko-mechanicznych (za wyjątkiem wytrzymałości na ściskanie) od składu zastosowanego spoiwa mieszanego.
2. Składniki spoiwa mieszanego (cement, wapno hydratyzowane, uboczne cementowe produkty pylaste) mają istotny wpływ na wartości podstawowych parametrów, zarówno drobnoziarnistej, jak i gruboziarnistej recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem spienionym.
3. Wykorzystując opracowane modele wpływu składu spoiwa mieszanego na analizowane właściwości drobnoziarnistych i gruboziarnistych recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym, można szacować ich właściwości, co pozwala na wykorzystanie ich na określone warstwy konstrukcyjne.
4. Rezultaty badań wskazują, że zastosowanie spoiwa hydraulicznego mieszanego pozwala wykorzystać w technologii recyklingu głębokiego na zimno destruktu asfaltowy wykazujący duże zróżnicowanie w zakresie uziarnienia.
5. Wykorzystanie ubocznych cementowych produktów pylastych jako składnika spoiwa mieszanego daje możliwość kształtowania jego oddziaływania na właściwości recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. Ponadto staje się okazją do utylizacji ubocznych cementowych produktów pylastych powstających w procesie produkcji cementu, wpływając tym samym na ograniczenie hałd odpadów i ochronę środowiska.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można rekomendować wdrożenie stosowania destruktu asfaltowego o szerokim zakresie uziarnienia w wykonawstwie drogowym (w zakresie technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym) przy zapewnieniu wymaganych właściwości recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej ze spoiwem mieszanym.

2. Percentage of components of the three-component hydraulic binder (cement, hydrated lime, cement by-pass dusts) has significant influence on the resultant values of the basic parameters of cold-recycled asphalt mixtures (both fine- and coarse-graded) with foamed bitumen.
3. Using the developed models of the relationships between hydraulic binder compositions and the analyzed characteristics of fine and coarse recycled mixtures with foamed bitumen, it is possible to estimate their properties and design them with particular pavement layers in mind.
4. The results indicate that application of mixed three-component hydraulic binder in cold recycling enables use of reclaimed asphalt pavement material displaying considerable variability in grading.
5. Use of cement by-pass dusts in mixed hydraulic binders enables adjusting their impact on the properties of the obtained asphalt mixture. Moreover, usage of by-pass dust originating from production of cement provides an opportunity to utilize this material, reduce the volume of landfills and contribute to environmental protection.

Based on the obtained results, it is recommended that RAP material with wide range of grading be incorporated in road construction (within the scope of deep cold-recycling technology with foamed bitumen), as long as the required properties of the recycled mixture are provided owing to the use of three-component hydraulic binder.

#### 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 cold-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 (NCBiR).

#### REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Sybilski D., Matras J., Mechowski T., Zawadzki J.: Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno cementowo-emulsyjnej (MCE). IBDiM, Seria „I”, 61, 1999
- [2] Jenkins K.J.: Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. University of Stellenbosch, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, PhD Dissertation, 2000



## INFORMACJE DODATKOWE

Wyniki badań zostały opracowane dla potrzeb realizacji projektu „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej długą trwałość eksploatacyjną” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) w ramach finansowanego przez NCBiR strategiczno-naukowego programu badawczo-rozwojowego „Nowoczesne technologie materiałowe” (TECHMATSTRATEG I).

- [3] *Jaczewski M., Dołycki B., Alenowicz J., Jaskuła P.*: Impact of reclaimed asphalt pavement (RAP) on low-temperature properties of asphalt concrete. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 4, 2019, 303-315, DOI: 10.7409/rabdim.019.020
- [4] *Zawadzki J., Kłos M.*: Zasady projektowania betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe. Wytyczne oznaczania odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pelzania pod obciążeniem statycznym. IBDiM, seria „I”, 34, 1995
- [5] *Dołycki B.*: Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Politechnika Gdańska, 2014
- [6] *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**, 2, 2021, ID article: 300, DOI: 10.3390/ma14020300
- [7] *Sanchez-Alonso E., Vega-Zamanillo A., Castro-Fresno D., Del Rio-Prat M.*: Evaluation of compatibility and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. *Construction and Building Materials*, **25**, 2011, 2304-2311
- [8] *Iwański M.M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.*: Impact of additives on the foamability of a road paving bitumen. IOP Conference Series: Materials Science Engineering, **603**, 2019, ID article: 042040, DOI: 10.1088/1757-899X/603/4/042040
- [9] *Leng Z., Gamez A., Al-Qadi I.L.*: Mechanical property characterization of warm-mix asphalt prepared with chemical additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 2, 2014, 304-311, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000810
- [10] Technical Guideline TG2: Bitumen stabilised materials. A guideline for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilised materials. Asphalt Academy, 2<sup>nd</sup> ed. Pretoria, South Africa, 2009
- [11] *Buczyński P., Iwański M.*: Inactive mineral filler as a stiffness modulus regulator in foamed bitumen-modified recycled base layers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **245**, 3, 2017, ID article: 032042, DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032042
- [12] *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**, 55, 2021, DOI: 10.1007/s43452-021-00192-9
- [13] Cold Recycling Technology. Wirtgen Group, First edition, Wirtgen GmbH, Windhagen, 2012
- [14] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A.*: Evaluation of the effect of using foamed bitumen and bitumen emulsion in cold recycling technology, in: Losa M., Papagiannakis T. (Eds.), Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management. CRC Press, 2014, 69-76, DOI: 10.1201/b16730-12
- [15] *Dołycki 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
- [16] *Bessa I.S., Almeida L.R., Vasconcelos K.L., Bernucci L.L.B.*: Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and portland cement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **43**, 9, 2016, 773-782, DOI: 10.1139/cjce-2016-0111
- [17] Raport z projektu TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017 „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną”, NCBR, 2018
- [18] *Jenkins K.J., de Groot J.L.A., van de Ven M.F.C., Molenaar A.*: Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. Proceedings of the 7<sup>th</sup> conference on asphalt pavements for southern Africa. South Africa 1997
- [19] *Kowalski K.J., Król J.B., Bańkowski W., Radziszewski P., Sarnowski M.*: Thermal and fatigue evaluation of asphalt mixtures containing RAP treated with a bio-agent. *Applied Sciences*, **7**, 3, 2017, ID article: 216, DOI: 10.3390/app7030216
- [20] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.*: The influence of hydrated lime on IT-CY stiffness modulus of foam-based asphalt concrete compacted at 95°C. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **471**, 2019, ID article: 032029, DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032029
- [21] *Jamshidi A., White G.*: Evaluation of performance and challenges of use of waste materials in pavement construction: A critical review. *Applied Sciences*, **10**, 1, 2019, ID article: 226, DOI: 10.3390/app10010226
- [22] *Mallick R.B., Hendrix G.*: Use of foamed asphalt in recycling incinerator ash for construction of stabilized base course. *Resources, Conservation and Recycling*, **42**, 3, 2004, 239-248, DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.04.007
- [23] *Ramanujam J.M., Jones J.D.*: Characterization of foamed-bitumen stabilisation. *International Journal of Pavement Engineering*, **8**, 2, 2007, 111-122, DOI: 10.1080/10298430601149676

- [24] *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, ID article: 1128, DOI: 10.3390/ma13051128
- [25] *Lin J., Hong J., Xiao Y.*: Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, **156**, 2017, 337-344, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.065
- [26] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [27] *Kavussi A., Modarres A.*: Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, **24**, 10, 2021, 1920-1927, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.009
- [28] *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
- [29] *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
- [30] *Iwański M.M.*: Effect of hydrated lime on indirect tensile stiffness modulus of asphalt concrete produced in half-warm mix technology. *Materials*, **21**, 13, 2020, ID article: 4731, DOI: 10.3390/ma13214731
- [31] *Judycki J., Jaskuła P.*: Badania odporności betonu asfaltowego zawierającego wapno hydratyzowane na działanie wody i mrozu. Materiały konferencyjne z V. Międzynarodowej Konferencji „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, 5 maj 1999, Kielce, 111-118
- [32] *Luxemburk G.F.*: Lime hydrate as an additive to improve the adhesion of bitumen to the aggregates. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference “Durable and Save Road Pavements”, 15-16 May 1996, Kielce, 296-302
- [33] *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**, 1, 2013, 1-16, DOI: 10.1080/14680629.2012.743669
- [34] *Stroup-Gardiner M., Epps J.A.*: Four variables that affect the performance of lime in asphalt aggregate mixtures. *Transportation Research Record*, **1115**, 1987, 12-22
- [35] *Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., Iwański M.M.*: Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation. *Construction and Building Materials*, **330**, 2022, ID article: 127274, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127274
- [36] *Czapik P., Zapala-Sławeta J., Owsiak Z., Stepień P.*: Hydration of cement by-pass dust. *Construction and Building Materials*, **231**, 2020, ID article: 117139, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117139
- [37] *Owsiak Z., Czapik P., Zapala-Sławeta J.*: Properties of a three-component mineral road binder for deep-cold recycling technology. *Materials*, **13**, 16, 2020, ID article: 3585, DOI: 10.3390/ma13163585
- [38] *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**, 11, 2021, ID article: 2803, DOI: 10.3390/ma14112803
- [39] *Lazić Ž.R.*: Design of experiments in chemical engineering: a practical guide. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004
- [40] STATISTICA 13.3. Statsoft. Available online: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com) (21.08.2022)