



MICHAŁ CWIAKAŁA¹⁾
 BEATA GAJEWSKA²⁾
 CEZARY KRASZEWSKI³⁾
 LESZEK RAFALSKI⁴⁾

RECAPITULATION OF RESEARCH ON FROST SUSCEPTIBILITY OF UNBOUND MIXTURES FOR PAVEMENT STRUCTURES

PODSUMOWANIE BADAŃ WYSADZINOWOŚCI KRUSZYW NIEZWIĄZANYCH PRZEZNACZONYCH DO NAWIERZCHNI

STRESZCZENIE. W zimnym lub nawet umiarkowanym klimacie istotny wpływ na nawierzchnie drogowe ma oddziaływanie mrozu, czyli temperatura ujemna oraz cykle zamrażania i odmrażania. W celu zapewnienia nośności i trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej w rejonach występowania ujemnej temperatury niezbędne jest stosowanie materiałów odpornych na szkodliwe oddziaływanie mrozu, które może powodować zjawisko wysadzin mrozowych. Wywołują one niekorzystne zmiany objętościowe, podnoszenie się nawierzchni po zamrożeniu, a po rozmarznięciu znaczne zmniejszenie nośności konstrukcji mogące skutkować nawet przełomami drogowymi. W artykule przedstawiono przegląd metod określania wysadzinowości oraz kryteria wysadzinowości gruntów i kruszyw, jak również podsumowano wyniki badań laboratoryjnych drogowych mieszanek niezwiązanych z kruszyw naturalnych przeznaczonych do nawierzchni drogowych. Fragmenty tych badań prezentowano wcześniej na konferencjach naukowych. Do badań wytypowano 14 mieszanek niezwiązanych z kruszyw naturalnych o uziarnieniu ciągłym 0/31,5 mm. Wysadzinowość ustalono na podstawie badań laboratoryjnych następujących cech: zawartości frakcji drobnych < 0,002 mm, < 0,02 mm, < 0,075 mm, granicy plastyczności w_p , granicy płynności w_L , wskaźnika plastyczności I_p , wskaźnika piaskowego SE_4 , błękitu metylenowego MB_F oraz wielkości rzeczywistej wysadzin mrozowej F_H zagęszczonej mieszanki kruszywa poddanej zamrażaniu w cylindrze. Na podstawie tych badań przeanalizowano przydatność stosowanych w Polsce i na świecie metod oraz kryteriów do oceny wysadzinowości kruszyw niezwiązanych.

SŁOWA KLUCZOWE: kruszywo, mieszanka niezwiązana, podbudowa, podłoże, wysadzina, wysadzinowość.

ABSTRACT. The impact of frost, i.e. minus temperatures and cycles of freezing and thawing, has a significant influence on road surfaces in cold or even temperate climate. In order to ensure the bearing capacity and durability of a pavement construction in places where freezing temperatures occur, it is necessary to use materials that are resistant to the harmful effects of frost, which can cause the phenomenon of frost heave. Frost heaves provoke adverse volume changes, the rising of a surface after freezing and a significant reduction of a structure's bearing capacity after thawing, which may even result in the cracking of roads. This article presents an overview of the methods of determining frost susceptibility, as well as the criteria of the frost susceptibility of soils and aggregates. It also summarizes the results of laboratory tests of unbound road mixtures made of natural aggregates for road pavements. Parts of this research have been previously presented at scientific conferences. Fourteen unbound mixtures of natural aggregates with a continuous granulation of 0/31.5 mm were subjected to tests. Frost susceptibility was determined on the basis of laboratory tests of the following properties: the content of fine fractions < 0.002 mm, < 0.02 mm, < 0.075 mm, plastic limit w_p , liquid limit w_L , plasticity index I_p , sand equivalent SE_4 , methylene blue MB_F and also the real value of frost heave F_H of the compacted aggregate mixture subjected to freezing in a cylinder. On the basis of these tests the usefulness of methods and criteria, which are used in Poland and the rest of the world for evaluating the frost susceptibility of unbound aggregates, was analysed.

KEYWORDS: aggregate, frost heave, frost susceptibility, unbound mixture, subbase layer, subgrade.

DOI: 10.7409/rabdim.016.018

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 0-03-302 Warszawa; mcwiakala@ibdim.edu.pl

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 0-03-302 Warszawa; bgajewska@ibdim.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 0-03-302 Warszawa; ckraszewski@ibdim.edu.pl (✉)

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 0-03-302 Warszawa; lrafalski@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Zimą w warunkach polskich jezdnie dróg mogą osiągać nawet temperaturę poniżej -30°C , co powoduje zamarzanie warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoża [1]. Penetracja mrozu w głąb nawierzchni i podłoża powoduje, że w gruntach i warstwach konstrukcyjnych mogą powstawać wysadziny, a w okresie rozmarzania utrzymuje się wysoki stan nawilgocenia i związana z tym niska nośność konstrukcji. Szczególnie niekorzystne są przejścia temperatury przez 0°C , powodujące cykle zamrażania i odmrażania warstw nawierzchni [1-3], bardzo szkodliwe dla warstw drogowych zarówno niezwiązanych, jak i związanych hydraulicznie. Z tego powodu warstwy konstrukcji drogowych powinny charakteryzować się odpornością na działanie mrozu, tj. odpornością na powstawanie wysadzin mrozowych oraz wytrzymałością na cykle zamarzania i odmarzania.

Zjawisko wysadzin obserwuje się w podłożu gruntowym, jak również w warstwach konstrukcyjnych zawierających dużą ilość frakcji pyłowej i iłowej (w materiałach niezwiązanych). Mechanizm powstawania wysadzin polega na tworzeniu się soczewek lodowych, które powiększają swoją objętość na skutek migracji wody kapilarami z podłoża ze strefy niezamrażonej do strefy przemarzania. W przypadku nawierzchni przepuszczalnych, np. z kostki betonowej lub nieszczelnych, starych i spękanych nawierzchni asfaltowych może wystąpić migracja wody od góry do warstw konstrukcyjnych drogi. Warstwy te, w przypadku posiadania właściwości wysadzinowych, mogą powodować tworzenie się soczewek lodowych, obniżenie nośności konstrukcji drogowej po rozmarznięciu, a w konsekwencji przełomy drogowe [4].

W podłożu z gruntów wysadzinowych w okresie rozmarzania zwiększa się wilgotność i następuje obniżenie nośności [5-6]. Możliwość tworzenia się wysadzin w podłożu jest także związana z ograniczoną ochroną przeciwmrozową konstrukcji drogowych zarówno w Polsce, jak również w wielu innych krajach [1]. Do oceny wysadzinowości gruntów stosuje się różne metody badawcze i związane z nimi kryteria wysadzinowości. Do budowy dróg w Polsce najczęściej wykorzystywane są kruszywa niezwiązane. Używa się ich do wykonywania podbudów lub ulepszonego podłoża, a także nawierzchni na drogach gruntowych. Kruszywa zastosowane do tych warstw są narażone podczas eksploatacji dróg na oddziaływanie mrozu. Warunkiem przydatności kruszywa jest trwałość i mrozoodporność skał, z jakich są one produkowane. Kruszywa niezwiązane, które nie zawierają cząstek pylastych lub gliniastych są niewysadzinowe. Natomiast istotnym problemem badawczym jest odporność warstw z kruszywa niezwiązanych na tworzenie się wysadzin w przy-

1. INTRODUCTION

In Polish winter conditions of roadways can even reach a temperature of below -30°C , which causes the freezing of pavement structure layers and the subgrade [1]. Penetration of frost into the pavement and the subgrade may result in the occurrence of frost heaves in soils and structural layers. Moreover, there is a high level of moisture content during thawing and the associated with it low bearing capacity of the structure. Particularly adverse are the transitions of temperature through 0°C that cause the cycles of freezing and thawing of pavement layers [1-3], and are very harmful to road layers, both unbound and hydraulically bound. For this reason, layers of a road construction should be characterized by a high resistance to frost, i.e. resistance to the formation of frost heaves and to cycles of freezing and thawing.

The frost heave phenomenon can be seen in the subgrade and also in the construction layers that contain a large amount of fines and clay fractions (in unbound materials). The mechanism of the occurrence of frost heaves involves the formation of ice lenses, which increase their volume due to capillary migration of water from the subgrade and unfrozen zone to the zone of freezing. In the case of permeable pavements, e.g. made of concrete blocks or old leaky cracked asphalt pavements, migration of water may occur from the surface into the structural layers of a road. These layers, if they have frost-susceptible properties, may cause the formation of ice lenses and reduce the bearing capacity of a road construction after thawing, resulting in road pavement cracking [4].

In a subgrade made of frost-susceptible soils, humidity increases and the bearing capacity decreases during the thawing period [5-6]. The ability to create frost heaves in a subgrade is also associated with a limited frost protection of road constructions in Poland, as well as in many other countries [1]. Various test methods and the criteria of frost susceptibility associated with them are used to evaluate frost susceptibility. Unbound aggregates are most often used for the construction of roads in Poland. They are applied for subbase layers or improved subgrades, as well as surfaces on dirt roads. The aggregates used for such layers are exposed to frost during the operation of roads. A condition of the suitability of aggregates is the durability and frost resistance of the rocks from which aggregates are produced. Unbound aggregates, which do not contain fine or clay particles, are not susceptible to frost. However, the resistance of unbound aggregate layers to the formation of frost heaves in the case when the aggregates

padku, gdy kruszywa zawierają pewną ilość cząstek pylistych lub gliniastych.

W artykule przedstawiono przegląd metod określania wysadzinowości oraz stosowane kryteria wysadzinowości gruntów i kruszyw, jak również podsumowano wyniki badań laboratoryjnych drogowych mieszanek niezwiązanych z kruszyw naturalnych, przeznaczonych do nawierzchni drogowych. Fragmenty tych badań prezentowano wcześniej na konferencjach naukowych. Celem niniejszej pracy było określenie właściwości wysadzinowych mieszanek niezwiązanych z kruszyw naturalnych o uziarnieniu 0/31,5 mm, wykorzystując różne metody badania i porównując stosowane kryteria. Przeprowadzono również analizy zależności pomiędzy zbadanymi cechami oraz dokonano porównania z wysadziną F_H oznaczoną metodą bezpośrednią. Na podstawie przeprowadzonych badań przeanalizowano przydatność stosowanych w Polsce i na świecie metod oraz kryteriów do oceny wysadzinowości kruszyw niezwiązanych.

2. PRZEGLĄD METOD OKREŚLANIA WYSADZINOWOŚCI I KRYTERIÓW WYSADZINOWOŚCI

Do oceny wysadzinowości gruntów i kruszyw stosowane są metody bezpośrednie i pośrednie. Metody bezpośrednie polegają na pomiarze wielkości wysadzin mrozowej zagęszczonej próbki materiału. Na przykład według normy BS 812-124 – test TRRL [7-8] badanie wysadzin polega na zmrożeniu górnej powierzchni próbki do temperatury -17°C , z równoczesnym dostępem dolnej powierzchni próbki do wody o temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$. Badanie wykonuje się w komorze zapewniającej powyższe warunki. Na podstawie pomiaru wielkości wysadzin mrozowej dokonuje się następującej oceny badanego materiału:

- jeżeli wysadzina jest mniejsza niż 9 mm, materiał klasyfikowany jest jako niewysadzinowy,
- jeżeli wysadzina jest większa niż 15 mm, materiał jest klasyfikowany jako wysadzinowy,
- w przypadku, gdy wysadzina zawiera się w zakresie 9÷15 mm materiał jest oceniany jako „wątpliwy” i zaleca się wykonanie badań na tych samych próbkach w 2 innych laboratoriach, a jeżeli średni wynik z 3 laboratoriów jest mniejszy niż 12 mm – materiał klasyfikuje się jako niewysadzinowy, w przeciwnym razie – jako wysadzinowy.

W przypadku materiałów wątpliwych powyższe badanie nie daje pewnego rezultatu i dlatego stosowane są pewne jego modyfikacje. Jedną z nich polega na zastosowaniu materiału

contain a certain amount of fine or clay particles is a significant research problem.

This article presents an overview of methods for determining frost susceptibility and the criteria of frost susceptibility of soils and aggregates. It also summarizes the results of laboratory tests of road mixtures of natural unbound aggregates for road pavements. Parts of this research have been previously presented at scientific conferences. The aim of this study was to determine the properties of the frost susceptibility of mixtures made of natural unbound aggregates with a granulation of 0/31.5 mm by using various methods of testing and by comparing the applied criteria. Analysis of the relations between the evaluated properties was also carried out and a comparison with the frost heave F_H that was determined using the direct method was made. Suitability of the methods and the criteria used in Poland and the rest of the world for evaluating the frost susceptibility of unbound aggregates was analysed on the basis of the conducted research.

2. A REVIEW OF THE METHODS AND CRITERIA FOR DETERMINING FROST SUSCEPTIBILITY

Direct and indirect methods are used to evaluate the frost susceptibility of soils and aggregates. Direct methods are based on measuring the size of the frost heave of the compacted material sample. For example, according to standard BS 812-124 – the TRRL test [7-8], a frost heave test involves the freezing of the top surface of a sample to a temperature of -17°C with simultaneous access of the lower surface of the sample to water of a temperature of $+4^{\circ}\text{C}$. The test is carried out in a chamber that ensures the above conditions. Based on the measuring of the size of a frost heave, the following assessment of the tested material is made:

- if the frost heave is smaller than 9 mm, the material is not classified as frost-susceptible,
- if the frost heave is greater than 15 mm, the material is classified as frost-susceptible,
- in the case when the frost heave is in a range between 9 and 15 mm, the material is evaluated as possibly frost-susceptible and the carrying out of tests of the same samples in two different laboratories is recommended. If the average result from the three laboratories is smaller than 12 mm, the material is not classified as frost-susceptible and otherwise – as frost-susceptible.

Table 1. Criteria of the frost susceptibility of soils and aggregates [11], [12]

Tablica 1. Kryteria wysadzinowości gruntów i kruszyw [11], [12]

Frost group Grupa wrażliwości mrozowej	Soil or aggregate Grunt lub kruszywo	Content of particles < 0.02 mm by weight Zawartość cząstek < 0.02 mm wagowo
NFS ^{*)}	a) Gravel / Żwir Crushed stone / Przekruszony kamień Crushed rock / Przekruszona skała	0 ÷ 1.5
	b) Sands / Piaski	0 ÷ 3
PFS ^{**)}	a) Gravel / Żwir Crushed stone / Przekruszony kamień Crushed rock / Przekruszona skała	1.5 ÷ 3
	b) Sands / Piaski	3 ÷ 10
S1	Gravelly soils / Żwiry	3 ÷ 6
S2	Sandy soils / Piaski	3 ÷ 6
F1	Gravelly soils / Żwiry	6 ÷ 10
F2	a) Gravelly soils / Żwiry	10 ÷ 20
	b) Sands / Piaski	6 ÷ 15
F3	a) Gravelly soils / Żwiry	> 20
	b) Sands, except very fine silty sands / Piaski, z wyjątkiem bardzo drobnych piasków pylastych	> 15
	c) Clays / Gliny, $I_p > 12$	–
F4	a) Silts / Pyły	–
	b) Very fine silty sands / Bardzo drobne piaski pylaste	> 15
	c) Clays / Gliny, $I_p < 12$	–
	d) Varved clays and other fine-grained banded segments / Gliny warwowe i inne osady warstwowe	–
*) Non-frost-susceptible / Niewysadzinowy		
**) Possibly frost-susceptible, laboratory tests are required to classify frost susceptibility / Wątpliwy, wymagane badania laboratoryjne w celu zaklasyfikowania pod względem wysadzinowości		

o znanej wysadzinowości i odpowiednim skalibrowaniu aparatu [8-10]. Z przeglądu literatury wynika, że badanie polegające na pomiarze bezpośrednim wysadzin jest dość trudne i uciążliwe, wymaga ponadto specjalistycznej aparatury, a jego wynik może okazać się niejednoznaczny.

Z tego powodu w praktyce inżynierskiej częściej stosowane są metody pośrednie, polegające na oznaczeniu pewnej cechy materiału, na podstawie której określana jest jego wysadzinowość. Najstarsza taka metoda została zaproponowana przez Casagrande'a w roku 1930, stosuje się ją również obecnie. Polega ona na określeniu zawartości cząstek < 0,02 mm w badanym materiale. Przykładowe kryteria wysadzinowości gruntów i kruszyw na podstawie zawartości cząstek < 0,02 mm stosowane w USA [11-13] przedstawiono w Tabl. 1. Wykorzystywane są także modyfikacje kryterium Casagrande'a polegające na określaniu zawartości innej frakcji niż 0,02 mm. Z przeglądu [11-12, 14-15] wynika, że do oceny wysadzinowości stosuje się najczęściej zawartość cząstek < 0,075 mm lub < 0,063 mm. Wymagania dotyczące wysadzinowości na podstawie zawartości cząstek < 0,075 mm, stosowane w różnych krajach, przedstawia Tabl. 2. Należy zauważyć, że w przypadku tego kryterium

In the case of possibly frost-susceptible materials, the above test does not provide a convincing result, and therefore some modifications of this test are being used. Modification involved the use of a material with a known frost susceptibility and appropriate calibration of the apparatus [8-10]. A review of literature shows that the test involving the direct measurement of a frost heave is quite difficult and arduous. Moreover, it requires specialized equipment and the test result can also be ambiguous.

For this reason, indirect methods are more frequently used in engineering practice and they involve the determination of a certain property of a material, based on which frost susceptibility is determined. The oldest of such methods was proposed by Casagrande in 1930 and it is also used today. It involves determining the content of the particles < 0.02 mm in a tested material. Exemplary criteria of the frost susceptibility of soils and aggregates based on the content of particles < 0.02 mm used in the USA [11-13] are shown in Table 1. Other modifications to the Casagrande criteria involve the determination of the amount of fractions other than 0.02 mm. From reviews of [11-12, 14-15] it can be concluded that the amount of particles < 0.075 mm

występuje dość duży rozrzut wymagań: od 5% do 15% zawartości cząstek < 0,075 mm.

Table 2. Criterion of the frost susceptibility of soils on the basis of the content of particles < 0.075 mm [12]
Tablica 2. Kryterium wysadzinowości gruntów na podstawie zawartości cząstek < 0,075 mm [12]

Agencies / Ośrodki	Content of particles < 0.075 mm / Zawartość cząstek < 0.075 mm [%]
Asphalt Institute / Instytut Asfaltów	7
Canada Newfoundland / Kanada Prowincja Nowa Fundlandia	6
Japan / Japonia	6
USA Alaska / Stan Alaska	6
USA Colorado / Stan Kolorado	5 ÷ 10
USA Kansas / Stan Kansas	15
USA Maryland / Stan Maryland	12
USA Massachusetts / Stan Massachusetts	10
USA Minnesota / Stan Minnesota	10
USA New Hampshire / Stan New Hampshire	8
USA Ohio / Stan Ohio	15
USA Vermont / Stan Vermont	10
USA Washington / Stan Waszyngton	10
USA Wisconsin / Stan Wisconsin	5

W Polsce kryterium wysadzinowości gruntów oparte na zawartości cząstek drobnych (< 0,02 mm i < 0,063 mm) według [14-16] podano w Tabl. 3. Natomiast dopuszczalna zawartość cząstek drobnych < 0,063 mm w mieszankach niezwiązanych według [17] wynosi od 9 do 15% w zależności od zastosowania (9% – podbudowy zasadnicze, 12% – podbudowy pomocnicze, 15% – inne warstwy). Z uwagi na to, że do czasu zmiany wymiaru sita wprowadzonego w Polsce do nowych katalogów w roku 2014 [14-15] stosowano do klasyfikacji gruntów pod względem wysadzinowości sito 0,075 mm, podobnie jak w większości krajów na świecie (sito nr 200 wg AASHTO [18]). W związku z tym dalsze analizy przeprowadzono dla cząstek przechodzących przez sito 0,075 mm. Jednakże sito 0,063 mm nie jest tożsame z sitem 0,075 mm, a wyniki mogą się różnić w interpretacji. Teoretycznie, przyjęcie sita 0,063 mm zamiast 0,075 mm skutkuje złagodzeniem wymagań wysadzinowości, co powinno być przedmiotem odrębnych analiz.

or < 0.063 mm is most commonly used for the evaluation of frost susceptibility. Requirements for frost susceptibility, which are based on the amount of particles < 0.075 mm and used in different countries, are presented in Table 2. It should be noted that there is a quite large spread of requirements, ranging from 5% to 15% of the amount of particles < 0.075 mm, regarding this criterion.

In Poland, according to [14-16], the criterion of the frost susceptibility of soils, which is based on the content of fine particles (< 0.02 mm and < 0.063 mm), is given in Table 3. In contrast, the permissible content of fine particles < 0.063 mm in unbound mixtures according to [17] ranges from 9 to 15%, depending on their application (9% – base layers, 12% – subbase layers, 15% – other layers). A 0.075 mm sieve was used in Poland and in most countries in the world for the classification of soils regarding their frost susceptibility (sieve No. 200 according to the AASHTO [18]) until the time of its size change, which was introduced in 2014 to the new catalogues [14] and [15]. Therefore, further analyzes were conducted for the particles passing through the 0.075 mm sieve. However, a 0.063 mm sieve is not the same as a 0.075 mm sieve and the interpretation of results may vary. Theoretically, the use of a 0.063 mm sieve instead of a 0.075 mm sieve results in a reduction of requirements regarding frost susceptibility, which should be the subject of separate analysis.

Table 3. Frost susceptibility of soils on the basis of the content of fine particles [14-16]
Tablica 3. Wysadzinowość gruntów na podstawie zawartości cząstek drobnych [14-16]

Content of particles Zawartość cząstek		Non-frost-susceptible soil Grunt niewysadzinowy	Possibly frost-susceptible soil Grunt wątpliwy	Frost-susceptible soil Grunt wysadzinowy
< 0.075 mm (0.063 mm)	[%]	< 15	15 ÷ 30	> 30
< 0.02 mm	[%]	< 3	3 ÷ 10	> 10

Table 4. Frost susceptibility based on the plasticity index I_p [12]
 Tablica 4. Wysadzinowość na podstawie wskaźnika plastyczności I_p [12]

Material and layer / Materiał i warstwa	Plasticity index / Wskaźnik plastyczności I_p [%]	Frost susceptibility / Wysadzinowość
Subbase course / Podbudowa dolna	6	medium / średnia
Aggregate base course / Podbudowa z kruszywa	6	medium / średnia
Crushed aggregate base course / Podbudowa z kruszywa łamanego	4	low / mała
Lime rock base course / Podbudowa z kruszywa wapiennego	6	medium / średnia
Sand-clay base course / Podbudowa z piasku gliniastego – gradation / gradacja A – gradation / gradacja B	4 6	low / mała medium / średnia

Kolejnym stosowanym kryterium wysadzinowości jest wskaźnik plastyczności I_p , który dla materiałów gruboziarnistych jest oznaczany na frakcji przechodzącej przez sito 0,425 mm (sito nr 40 wg AASHTO [18]). W Tabl. 4 przedstawiono kryterium wysadzinowości oparte na wartości wskaźnika plastyczności podane w [12]. Następnym kryterium oceny wrażliwości gruntów i kruszyw na działanie mrozu, stosowanym w budownictwie drogowym, jest wskaźnik piaskowy SE . W przypadku badania tej cechy należy pamiętać o zmianach metodyki oznaczania SE w ostatnich latach. Dawniej norma PN-EN 933-8:2001 [19] dotyczyła wskaźnika piaskowego SE , oznaczanego na materiale 0/2 mm (SE) lub 0/4 mm (SE_4) odsianym z kruszywa. Następnie, po modyfikacji tejże normy w 2012 roku, wprowadzono korekcję zawartości pyłów w próbkę materiału 0/2 mm ograniczając ją do max 10% i oznaczono wskaźnik piaskowy symbolem $SE(10)$, pozostawiając SE_4 bez zmian. W 2015 roku wprowadzono korekcję pyłów również we frakcji 0/4 mm. Ostatecznie, według ostatniego wydania normy PN-EN 933-8:2015 [19], wskaźniki piaskowe $SE(10)$ i SE_4 są zawsze oznaczeniem kruszywa o skorygowanej zawartości pyłów (< 10%), niezależnie od ich rzeczywistej wartości w kruszywie. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wskaźnika piaskowego SE_4 wg PN-EN 933-8:2012 [19] (o rzeczywistej zawartości pyłów, bez korekty) jako najbardziej zbliżonego do polskiej praktyki drogowej wg normy branżowej BN-64/8931-01 [20]. Była ona stosowana zarówno dla gruntów, jak i kruszyw drogowych, a wartość progowa wynosiła 35. W związku z powyższym powstaje problem przyjęcia właściwej metodyki badań i interpretacji wyników oznaczania wskaźnika piaskowego zarówno gruntów, jak i kruszyw, co zostało szczegółowo przeanalizowane w publikacji [21]. W niektórych krajach (Tabl. 5) w zależności od zastosowania kruszywa (mieszanki asfaltowe, betonowe, niezwiązane) wymaga się $SE_{min} > 35 \div 60$. W Polsce stosuje się jak dotąd minimalną

Another used criterion of frost susceptibility is the plasticity index I_p , which for coarse-grained materials is determined by the fractions that pass through a 0.425 mm sieve (sieve No. 40 according to AASHTO [18]). Table 4 shows the criterion of frost susceptibility based on the value of the plasticity index I_p that was defined in [12]. Another criterion for assessing the sensitivity of soils and aggregates to frost, which is used in road constructions, is the sand equivalent SE . In terms of evaluating this property, changes in the methodology of determining SE in recent years need to be considered. In the past, the PN-EN 933-8:2001 standard [19] referred to the sand equivalent SE determined using the materials 0/2 mm (SE) or 0/4 mm (SE_4), which were sieved from aggregate. After modification of this standard in 2012, the correction of the content of fines in a sample of a 0/2 mm material was introduced and the content of fines was limited to a maximum of 10%. The sand equivalent was then designated with the symbol of $SE(10)$, while the symbol SE_4 was left unchanged. In 2015 a correction of the fines in 0/4 mm fractions was also introduced. Finally, according to the last edition of the PN-EN 933-8:2015 standard [19], the sand equivalents $SE(10)$ and SE_4 always refer to aggregate with a corrected content of fines (< 10%), regardless of their real amount in the aggregate. This paper presents the results of tests of the sand equivalent SE_4 according to the PN-EN 933-8:2012 standard [19] (with the real content of fines, without corrections), as it is the most similar to Polish road construction practice according to the industry standard BN-64/ 8931-01 [20]. The latter was used for both soils and road-building aggregates in which the threshold limit value was equal to 35. Therefore, there is a problem with the selection of the appropriate test methodology and interpretation of the results of determining the sand equivalent of both soils and aggregates, which was analysed in detail in publication [21]. In some countries (Table 5),

wartość wskaźnika piaskowego $SE_4 35$ (bez korekcji pyłów) jako kryterium gruntu lub kruszywa niewysadzinowego.

Table 5. Criteria of frost susceptibility on the basis of the sand equivalent SE in selected countries [22]
Tablica 5. Kryteria wysadzinowości na podstawie wskaźnika piaskowego SE w wybranych krajach [22]

Aggregates for Przeznaczenie kruszywa	Greek specification Specyfikacja grecka [23]	Polish specification Specyfikacja polska [17]	French specification Specyfikacja francuska [24]	ASTM D2940 [25] ASTM D3515 [26]
Bituminous mixtures for wearing course Mieszanki bitumiczne do warstwy ścieralnej	≥ 55	–	≥ 60	≥ 50
Bituminous base course / Podbudowa bitumiczna	≥ 50	–	≥ 50	≥ 50
Unbound base course / Podbudowy z mieszanki niezwiązanej	≥ 50	≥ 35	≥ 40 or / lub ≥ 50 or / lub ≥ 60	≥ 35
Unbound subbase course / Podbudowy dolne z mieszanki niezwiązanej	≥ 40	≥ 35	≥ 55	≥ 35
Cold bituminous mixtures / Mieszanki na zimno – for wearing course / do warstwy ścieralnej – for binder or base layer / jako spoiwo do podbudowy	≥ 55 ≥ 45	–	≥ 50	–
Surface dressing / Powierzchniowe utrwalenie	≥ 55	–	≥ 60	–

depending on the application of aggregates (asphalt, concrete, unbound mixtures), $SE_{min} > 35 \div 60$ is required. Until now in Poland, the minimum value of the sand equivalent $SE_4 35$ (without correction of fines) is used as a criterion for non-frost-susceptible soils or aggregates.

Badania [23] wykazują, że nie tylko zawartość pyłów, ale i ich właściwości (np. skład mineralny) mają wpływ na powstawanie wysadzin. Jakość drobnych cząstek sprawdza się w badaniu błękitem metylenowym MB_F wg EN 933-9 [27] na frakcji przechodzącej przez sito 0,125 mm. Badanie polega na ocenie adsorpcji tego barwnika przez cząstki drobne. Jako wartość graniczną w niektórych krajach przyjmuje się kategorię $MB_F 10$ według Tabl. 6. Z dokonanego przeglądu publikacji wynika, że do oceny wysadzinowości gruntów i kruszyw stosuje się różne metody badania oraz różne kryteria. Należy także zauważyć, że niektóre kryteria wysadzinowości wynikają z doświadczeń w badaniu wysadzinowości gruntów, a nie kruszyw, ale są przyjmowane także dla kruszyw.

Studies [23] show that not only the content of fines, but also their properties (e.g. mineral composition) have an influence on the formation of frost heaves. The quality of fine particles, as a criterion, works in tests with methylene blue MB_F according to EN 933-9 [27] on fractions passing through the 0.125 mm sieve. The test involves the evaluation of the adsorption of this dye by fine particles. The category of $MB_F 10$, according to Table 6, is assumed as the limit value in some countries. From a review of publications it can be concluded that various test methods and criteria are used to evaluate the frost susceptibility of soils and aggregates. It should also be noted that some criteria of frost susceptibility arise from experience in testing the frost susceptibility of soils, not aggregates. However, they are also adopted for aggregates.

Table 6. Criteria of frost susceptibility on the basis of the adsorption of methylene blue MB_F in selected countries [22]
Tablica 6. Kryteria wysadzinowości na podstawie adsorpcji błękitu metylenowego MB_F w wybranych krajach [22]

Aggregates for Przeznaczenie kruszywa	Greek specification Specyfikacja grecka [23]	Polish specification Specyfikacja polska [28]	French specification Specyfikacja francuska [24]	Specification Specyfikacja ISSA*)
Unbound and bituminous bound layers Warstwy z kruszyw niezwiązanych i warstwy bitumiczne	≤ 10	≤ 10	≤ 10	–
Wearing courses / Warstwy ścieralnej	≤ 10	≤ 10	≤ 10	–
Concrete / Beton	–	–	≤ 10	–
Micro-surfacing (slurry seal) and cold mixtures / Cienkie warstwy i mieszanki na zimno	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10 or / lub ≤ 7

*) International Slurry Surfacing Association / Międzynarodowe Stowarzyszenie Emulsji Bitumicznych do Nawierzchni Drogowych

3. MATERIAŁY, METODY I WYNIKI BADAŃ

Do badań wytypowano kruszywa, które w praktyce są przeznaczone do wykonywania konstrukcji drogowych. Pod względem petrograficznym badane kruszywa reprezentowały różne rodzaje skał: magmowe, osadowe i przeobrażone. Łącznie zbadano 14 kruszyw oznaczonych następującymi symbolami: granitowe (G), piaskowcowe (S), bazaltowe (B), dolomitowe (D1 ÷ D8) i wapienne (L1 ÷ L3). Zakres badań obejmował:

- badanie zawartości cząstek $< 0,125$ mm, $< 0,075$ mm, $< 0,02$ mm oraz $< 0,002$ mm wg PN-EN 933-1 [29],
- badanie wskaźnika piaskowego SE_4 wg PN-EN 933-8 [19],
- badanie granicy plastyczności w_p wg PN-88/B-04481 [30],
- badanie granicy płynności metodą Casagrande'a w_L według PN-88/B-04481 [30],
- badanie sorpcji błękitem metylenowym MB_F wg PN-EN 933-9 [27],
- badanie bezpośredniej wysadziny mrozowej wg własnej metodyki.

Na podstawie granicy płynności i plastyczności obliczono wskaźnik plastyczności $I_p = w_L - w_p$. Badanie bezpośredniej wysadziny mrozowej wykonano według własnej metodyki. Próbkę do badań została przygotowana w normowej formie CBR typu B wg PN-EN 13286-2 [31], do której zainstalowano oprzyrządowanie do pomiaru pęcznienia liniowego. Próbkę zagęszczono stosując standardową metodę Proctora przy wilgotności optymalnej. Istotą badania było uzyskanie wysadziny poprzez wywołanie ujemnej temperatury od -29 do -36°C na górnej powierzchni próbki granuletem zestalonego dwutlenku węgla CO_2 , pozostawiając jej dolną część w wodzie o temperaturze od $+4$ do $+6^\circ\text{C}$. Pomiar trwał 4 doby z rejestracją wysadziny 2 razy w ciągu doby. Badania każdego kruszywa przeprowadzono na dwóch próbkach, do analiz brano wartość średnią. W niniejszej pracy nie analizowano wyników badań wielkości wysadziny bezpośredniej według kryterium TRRL, ponieważ sposób zagęszczania oraz wymiary próbki były inne i nie można było przyjąć tego kryterium do określania wysadzinowości. Natomiast przyjęcie jednakowej metody badania każdej próbki umożliwiło porównanie pomierzonej wysadziny bezpośredniej w odniesieniu do pozostałych zbadanych właściwości i dokonanie analiz wpływu mrozu na mieszanki kruszyw. W Tabl. 7 zestawiono wyniki badań zawartości cząstek drobnych, granicy plastyczności w_p , granicy

3. MATERIALS, TEST METHODS AND RESULTS

Aggregates, which in practice are designed for road constructions, were subjected to tests. In terms of petrography, the investigated aggregates represented different types of rocks: igneous, sedimentary and transformed. A total of 14 aggregates were examined and marked with the following symbols: granite (G), sandstone (S), basalt (B), dolomite (D1 ÷ D8) and limestone (L1 ÷ L3). The scope of the research included:

- examination of the content of particles < 0.125 mm, < 0.075 mm, < 0.02 mm and < 0.002 mm according to PN-EN 933-1 [29],
- examination of the sand equivalent SE_4 according to PN-EN 933-8 [19],
- examination of the plastic limit w_p according to PN-88/B-04481 [30],
- examination of the liquid limit w_L using the Casagrande method according to PN-88/B-04481 [30],
- examination of the sorption of methylene blue MB_F according to PN-EN 933-9 [27],
- examination of the direct frost heave according to own methodology.

On the basis of the liquid limit and plastic limit, the plasticity index $I_p = w_L - w_p$ was calculated. Examination of the direct frost heave was carried out according to the author's own methodology. A sample for the tests was prepared in the standardized CBR form of type B according to PN-EN 13286-2 [31]. Devices to measure linear swelling were installed to this form. The sample was compacted at the optimum moisture content using the standard Proctor method. The essence of the research was to obtain a frost heave by causing minus temperatures ranging between -29°C to -36°C on the top surface of the sample by using granular solid carbon dioxide CO_2 , whilst leaving the bottom part of the sample in water of $+4^\circ\text{C}$ to $+6^\circ\text{C}$. The measurement lasted for 4 days with the frost heave being registered twice a day. Tests of each aggregate were conducted on two samples and the mean value was then considered for further analysis. In the present study, the test results of the size of the direct frost heave according to TRRL criterion were not analysed, as the both methods of compacting and sample dimensions were different and this criterion could not be assumed to determine frost susceptibility. However, the acquisition of the same testing method for every sample enabled the measured direct frost

płynności w_L , wskaźnika piaskowego SE_4 , błękitu metylenowego MB_F oraz wysadzinę mrozową F_H . Podano także wskaźnik plastyczności I_p obliczony na podstawie granicy płynności i granicy plastyczności kruszyw S, D2, D3, D6, D7, D8 i L2. Wskaźnika I_p pozostałych kruszyw nie oznaczono z uwagi na ich małą spoistość.

Table 7. Test results
Tablica 7. Wyniki badań

Aggregate / Kruszywo		G	S	B	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3
Property / Właściwość															
Passing 0.125 mm sieve Przechodzi przez sito 0.125 mm	[%]	5.2	9.2	5.5	3.4	13.0	11.5	4.3	8.3	11.2	8.1	10.6	7.4	12.7	5.9
Passing 0.075 mm sieve Przechodzi przez sito 0.075 mm	[%]	3.6	7.0	4.8	2.9	11.8	10.0	3.9	7.0	9.8	7.4	9.6	5.9	11.3	4.7
Passing 0.02 mm sieve Przechodzi przez sito 0.02 mm	[%]	1.9	4.7	3.9	2.3	9.7	7.4	3.1	5.4	7.6	6.1	8.1	4.6	9.2	3.2
< 0.002 mm content Zawartość frakcji < 0.002 mm	[%]	0.2	0.5	0.3	0.5	2.2	1.6	0.5	0.9	1.5	1.5	1.7	0.9	1.9	0.7
Sand equivalent SE_4 Wskaźnik piaskowy SE_4	[-]	80	46	52	83	27	41	66	79	34	28	26	53	32	91
Methylene blue MB_F Błękit metylenowy MB_F	[g/kg]	3.3	8.3	15	3.3	13.3	6.7	5.0	5.0	8.3	8.3	10.0	5.0	8.3	1.7
Plastic limit w_p Granica plastyczności w_p	[%]	-	17	-	-	15.2	14.5	-	-	14.0	15.3	17.5	12.7	14.6	-
Liquid limit w_L Granica płynności w_L	[%]	-	17.9	-	-	17.3	14.6	-	-	14.0	18.2	21.5	-	18.0	-
Plasticity index I_p Wskaźnik plastyczności I_p	[%]	-	0.9	-	-	2.1	0.1	-	-	0.0	2.9	4	-	3.4	-
Frost heave F_H Wysadzinę F_H	[mm]	0.25	0.59	0.59	0.55	0.65	0.72	0.65	0.43	0.58	0.42	0.71	0.42	0.78	0.36

heave to be compared in relation to the other examined properties, as well as the impact of frost on the aggregate mixtures to be analysed. Table 7 summarizes the test results of the content of fine particles, plastic limit w_p , liquid limit w_L , sand equivalent SE_4 , methylene blue MB_F and frost heave F_H . The plasticity index I_p , which was calculated on the basis of the liquid limit and plastic limit of aggregates S, D2, D3, D6, D7, D8 and L2, was also provided. The plasticity index I_p of other aggregates was not determined due to their low cohesion.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Z przeprowadzonego rozpoznania stanu wiedzy wynika, że właściwości wysadzinowe zależą głównie od zawartości cząstek drobnych. Przeanalizowano zatem zależności pomiędzy zawartością frakcji mniejszej niż 0,02 mm a zawartościami frakcji mniejszych niż 0,075 mm oraz 0,125 mm. Na podstawie tych zależności stwierdzono, że istnieje silny związek pomiędzy zawartościami frakcji mniejszych niż 0,075 mm i 0,125 mm a zawartością frakcji mniejszej niż 0,02 mm (Rys. 1).

Biorąc pod uwagę zawartość frakcji < 0,075 mm, która wynosiła od 2,9% do 11,8%, wszystkie kruszywa można zakwalifikować jako materiały niewysadzinowe, stosując

4. ANALYSIS OF TEST RESULTS

From the conducted review of the available state of knowledge it can be concluded that the properties of frost susceptibility mainly depend on the content of fine particles. Therefore, the relations between the fractions smaller than 0.02 mm as well as the contents of the fractions smaller than 0.075 mm and 0.125 mm were analysed. On the basis of these correlations, it was found that there is a strong relation between the contents of the fractions smaller than 0.075 mm and 0.125 mm, and the content of the fractions smaller than 0.02 mm (Fig. 1).

Considering the content of the fractions < 0.075 mm, which ranged from 2.9% to 11.8%, it can be stated that all

kryterium zawartości tej frakcji wynoszące $\leq 15\%$ wg [14-16]. Zawartość frakcji $< 0,02$ mm zawierała się od 1,9% do 9,7%. Według tego kryterium jedynie 2 kruszywa (G, D1) należy zaliczyć do materiału niewysadzinowego, pozostałe można zakwalifikować jako wysadzinowe. Z powyższego wynika, że ocena wysadzinowości badanych kruszyw na podstawie zawartości frakcji drobnych jest rozbieżna, przyjmując kryteria zawartości frakcji 0,02 mm i 0,075 mm. Na Rys. 2 przedstawiono wielkość wysadziny F_H w zależności od zawartości frakcji $< 0,002$ mm, $< 0,02$ mm, $< 0,075$ mm i $< 0,125$ mm. W przypadku 15% zawartości frakcji $< 0,075$ mm otrzymano wysadzinę $F_H = 0,8$ mm, natomiast przyjmując 3% zawartości frakcji $< 0,02$ mm wysadzina wyniosła $F_H = 0,45$ mm, co potwierdza znaczną rozbieżność w klasyfikacji wysadzinowości kruszyw przy zastosowanych kryteriach zawartości cząstek drobnych.

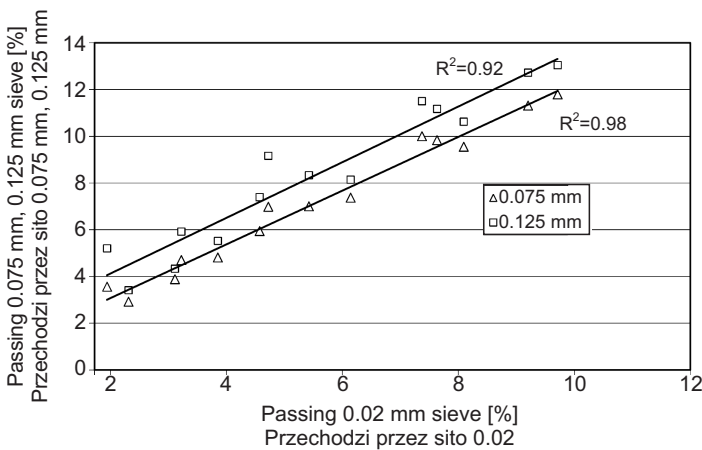


Fig. 1. Relationship between percentage passing 0.075 mm and 0.125 mm of the percentage passing 0.02 mm
Rys. 1. Zależność pomiędzy % zawartością cząstek mniejszych niż 0,075 mm i 0,125 mm a 0,02 mm

Przyjmując liniowe zależności pomiędzy zawartościami frakcji drobnych a wysadziną można zauważyć, że wielkość wysadziny jest proporcjonalna do zawartości tych cząstek. Pomiedzy zawartościami cząstek drobnych, mniejszych niż: 0,02 mm, 0,075 mm, 0,125 mm i 0,002 mm a wysadziną mrozową F_H uzyskano korelacje ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,32 \div 0,42$. Zauważa się, że linie trendu zależności wielkości wysadziny od zawartości pyłów są do siebie niemal równoległe. Pozwala to postawić tezę, że wielkość wysadziny może być przewidywana na podstawie procentowej zawartości materiału przechodzącego przez sito: 0,02 mm, 0,075 mm lub 0,125 mm ze zbliżoną dokładnością. Dla każdej frakcji powinno się jednak ustalić indywidualne kryterium ich zawartości. Nieco odmienny charakter wykazuje zależność wielkości wysadziny od zawartości

aggregates can be classified as non-frost-susceptible materials when using the criterion of the content of those fractions equal to $\leq 15\%$ according to [14-16]. The content of the fractions < 0.02 mm ranged from 1.9% to 9.7%. According to this criterion, only two aggregates (G, D1) should be classified as non-frost-susceptible materials, whereas the others can be classified as frost-susceptible materials. When considering the above, it can be concluded that the evaluation of the frost susceptibility of the tested aggregates, on the basis of the content of fine fractions, is divergent with regards to the criteria of the content of 0.02 mm and 0.075 mm fractions. Fig. 2 shows the size of a frost heave F_H in relation to the content of fractions < 0.002 mm, < 0.02 mm, < 0.075 mm and < 0.125 mm. In the case of 15% of the content of the fractions < 0.075 mm, the frost heave $F_H = 0.8$ mm was obtained; while in the case of 3% of the content of fractions < 0.02 mm, the frost heave $F_H = 0.45$ mm was obtained. This confirms the considerable divergence in the classification of aggregate frost susceptibility when using the fine particle content criteria.

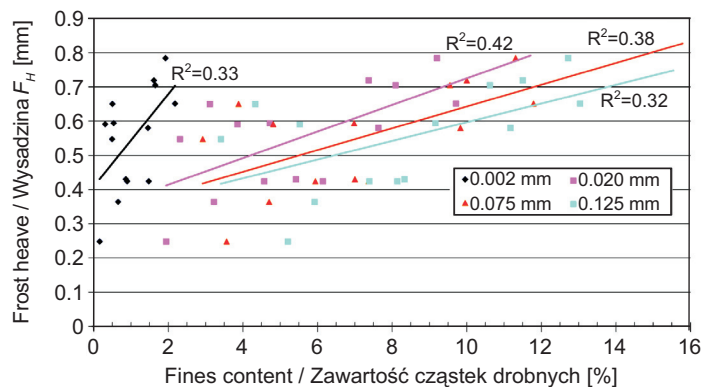


Fig. 2. Relationship between frost heave and the fines content
Rys. 2. Zależność pomiędzy wysadziną mrozową a zawartością pyłów

When assuming linear relations between the contents of fines and a frost heave, it can be noted that the size of a frost heave is proportional to the content of these particles. Correlations with a coefficient of determination of $R^2 = 0.32 \div 0.42$ between the contents of fines smaller than 0.02 mm, 0.075 mm, 0.125 mm and 0.002 mm and a frost heave F_H were obtained. It can be noted that the trend lines of the relation between the size of a frost heave and the content of fines are almost parallel to each other. This allows for the statement that the size of a frost heave can be anticipated with a similar accuracy on the basis of the percentage content of a material passing through the following sieves: 0.02 mm, 0.075 mm or 0.125 mm.

frakcji iłowej ($< 0,002$ mm), co może być związane z większym oddziaływaniem tych cząstek na wysadzinowość w porównaniu do cząstek pyłowych. Ze względu na bardzo małą zawartość frakcji iłowej w badanych kruszywach ($0,2 \div 2,2\%$) nie analizowano tego zagadnienia [32-33].

Kolejnymi badanymi cechami były: granica plastyczności, granica płynności oraz obliczony wskaźnik plastyczności. W przypadku 7 kruszyw nie było możliwe oznaczenie granicy płynności, a w przypadku 6 kruszyw – granicy plastyczności. Spowodowała to mała zawartość frakcji iłowej, która wynosiła $0,2 \div 2,2\%$. Z tego powodu obliczono wskaźnik plastyczności 7 badanych kruszyw. Granica plastyczności wyniosła $w_p = 12,7 \div 17,5\%$, granica płynności $w_L = 14,6 \div 21,5\%$, a wskaźnik plastyczności $I_p = 0,0 \div 4,0$. Biorąc pod uwagę kryterium wysadzinowości oparte na I_p , we wszystkich przypadkach można sklasyfikować kruszywa jako niewysadzinowe (Tabl. 4). Stwierdzono brak korelacji pomiędzy granicą plastyczności a wysadziną określoną metodą bezpośrednią ($R^2 = 0,001$), natomiast w przypadku granicy płynności – korelację liniową ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,38$. Ponadto stwierdzono brak korelacji pomiędzy wskaźnikiem plastyczności a wysadziną określoną metodą bezpośrednią ($R^2 = 0,02$). Oznacza to, że w zakresie $I_p = 0 \div 4$ wskaźnik plastyczności nie jest cechą odpowiednią do prognozowania wysadzinowości kruszyw [33].

Następną analizowaną właściwością był wskaźnik piaskowy SE_4 , najczęściej stosowany do prognozowania wysadzinowości gruntów i kruszyw. Badane kruszywa charakteryzowały się wartościami wskaźnika piaskowego SE_4 z zakresu od 26 do 91. Na podstawie wyników badań oraz stosując kryterium wysadzinowości materiałów niewysadzinowych według polskich wymagań $SE_4 > 35$ (Tabl. 5) dokonano następującego podziału badanych kruszyw: 9 kruszyw zaklasyfikowano do materiałów niewysadzinowych ($SE_4 = 41 \div 91$), a 5 do wysadzinowych ($SE_4 = 26 \div 34$). Zależność wielkości wysadzin od wartości wskaźnika piaskowego przedstawiono na Rys. 3. Przyjmując kryterium wysadzinowości $SE_4 = 35$ według zależności przedstawionej na Rys. 3 otrzymuje się wielkość wysadzin $F_H = 0,62$ mm.

W badaniu błękitem metylenowym uzyskano wartości MB_F od 1,7 do 15 g/kg. Na podstawie kryterium ($MB_F = 10$ wg Tabl. 6) ustalono, że do kruszyw wysadzinowych można zaliczyć 2: B i D2 o wartości $MB_F = 13,3 \div 15$ g/kg, a pozostałe 12 – do niewysadzinowych o $MB_F = 1,7 \div 8,3$ g/kg. Zależność wielkości wysadzin bezpośredniej od wartości MB_F przedstawia Rys. 4. Stosując kryterium wysadzinowości $MB_F = 10$ g/kg (Tabl. 6) z zależności przedstawionej na Rys. 4 uzyskuje się wysadzinę $F_H = 0,61$ mm, bardzo

However, for each fraction an individual criterion of its content should be determined. A different nature has the relation between a frost heave and the content of the clay fraction (< 0.002 mm), which may be associated with a greater influence of these particles on frost susceptibility when compared to fines. Due to a very low content of clay fractions in the tested aggregates ($0.2 \div 2.2\%$), this issue was not analysed [32-33].

The properties investigated next were the plastic limit, liquid limit and the calculated plasticity index. In the case of 7 aggregates, it was not possible to determine the liquid limit, and in the case of 6 aggregates, the plastic limit. This was due to the low content of clay fractions, which amounted to $0.2 \div 2.2\%$. For this reason the plasticity index was calculated for 7 aggregates. The plastic limit was equal to $w_p = 12.7 \div 17.5\%$, the liquid limit to $w_L = 14.6 \div 21.5\%$ and the plasticity index to $I_p = 0.0 \div 4.0$. Considering the criterion of frost susceptibility, which is based on I_p , aggregates can be classified as non-frost-susceptible in all cases (Table 4). No correlation was found between the plastic limit and a frost heave determined using the direct method ($R^2 = 0.001$), and in the case of the liquid limit, a linear correlation with a coefficient of determination of $R^2 = 0.38$ was found. Moreover, there was no correlation between the plasticity index and a frost heave specified using the direct method ($R^2 = 0.02$). This means that within a range of $I_p = 0 \div 4$, the plasticity index is not a suitable property for the forecasting of aggregate frost susceptibility [33].

The next analysed property was the sand equivalent SE_4 , which is most often used to forecast the frost susceptibility of soils and aggregates. The tested aggregates were characterized by the value of the sand equivalent SE_4 within a range between 26 and 91. Based on the test results and using the criterion of frost susceptibility of non-frost-susceptible materials according to Polish requirements $SE_4 > 35$ (Table 5), the following division of the tested aggregates was made: 9 aggregates were classified as non-frost-susceptible material ($SE_4 = 41 \div 91$) and 5 as frost-susceptible material ($SE_4 = 26 \div 34$). The dependence of the frost heave value to the sand equivalent is shown in Fig. 3. When assuming the criterion of frost susceptibility $SE_4 = 35$ according to the relation shown in Fig. 3, a value of the frost heave equal to $F_H = 0.62$ mm was obtained.

During the tests with methylene blue, values of MB_F ranging from 1.7 to 15 g/kg were obtained. On the basis of the criterion ($MB_F = 10$ according to Table 6) it was established that the 2 aggregates B and D2, with a value of the

zblizoną do wielkości wysadziny według kryterium wskaźnika piaskowego $SE_4 = 35$ i $F_H = 0,62$ mm (Rys. 3). W związku z powyższymi wartościami tych kryteriów są ze sobą zgodne w odniesieniu do wielkości wysadziny oznaczonej metodą bezpośrednią F_H . Zgodność tę potwierdza także zależność pomiędzy MB_F a SE_4 o współczynniku determinacji $R^2 = 0,7$ (Rys. 5). Zależności pomiędzy zawartością cząstek drobnych a SE_4 i MB_F przedstawiono na Rys. 6 i Rys. 7. W przypadku wskaźnika piaskowego SE_4 uzyskano zależności o współczynniku $R^2 = 0,63 \div 0,74$, a w przypadku MB_F – korelacje o nieco słabszym dopasowaniu z wartościami $R^2 = 0,33 \div 0,42$.

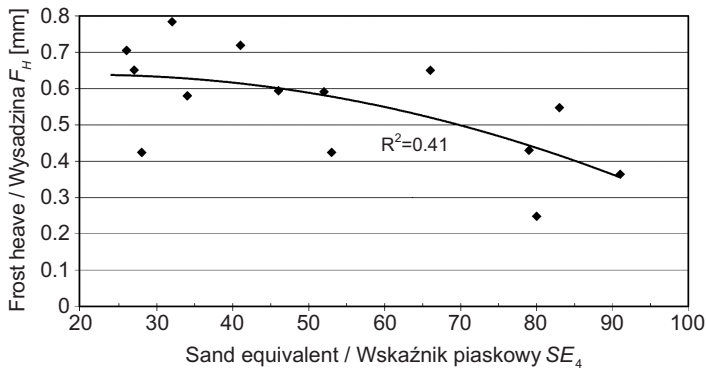


Fig. 3. Relationship between frost heave F_H and the SE_4 value
Rys. 3. Zależność pomiędzy wysadziną mrozową F_H a wskaźnikiem piaskowym SE_4

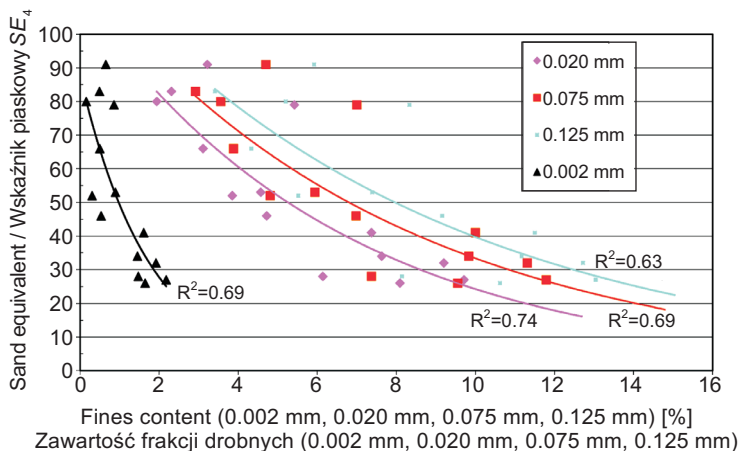


Fig. 6. Relationship between sand equivalent SE_4 and fines content
Rys. 6. Zależność pomiędzy wskaźnikiem piaskowym SE_4 i zawartością pyłów

$MB_F = 13.3 \div 15$ g/kg, can be classified as frost-susceptible, and the remaining 12, with a value of $MB_F = 1.7 \div 8.3$ g/kg, as non-frost-susceptible. The relation between the size of a direct frost heave to the MB_F is shown in Fig. 4. From the relation shown in Fig. 4, using the criterion of frost susceptibility $MB_F = 10$ g/kg (Table 6), a frost heave of $F_H = 0.61$ mm is obtained and is very similar to the size of a frost heave according to the criterion of sand equivalent $SE_4 = 35$ and $F_H = 0.62$ mm (Fig. 3). This indicates that the values of these criteria are mutually compatible in relation to the size of a frost heave F_H determined using the direct method. This compatibility is confirmed by the relation between MB_F and SE_4 , which has a coefficient of determinacy of $R^2 = 0.7$ (Fig. 5). The relations between fines content and SE_4 and MB_F are shown in Figs. 6 and 7. In the case of the sand equivalent SE_4 , correlations with a coefficient of determinacy of $R^2 = 0.63 \div 0.74$ were obtained. In turn, in the case of MB_F , correlations with a slightly weaker compatibility and values of $R^2 = 0.33 \div 0.42$ were obtained.

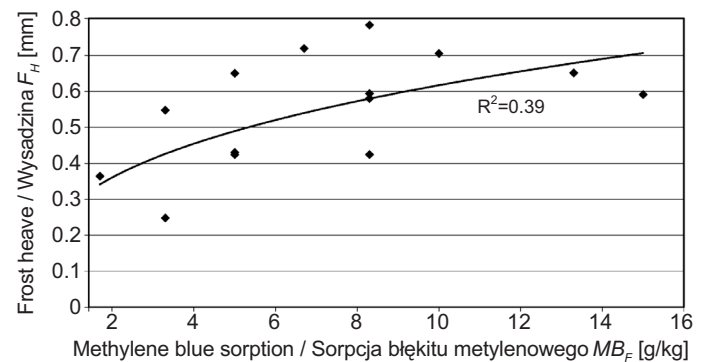


Fig. 4. Relationship between frost heave F_H and the MB_F value
Rys. 4. Zależność pomiędzy wysadziną mrozową F_H a sorpcją błękitu metylenowego MB_F

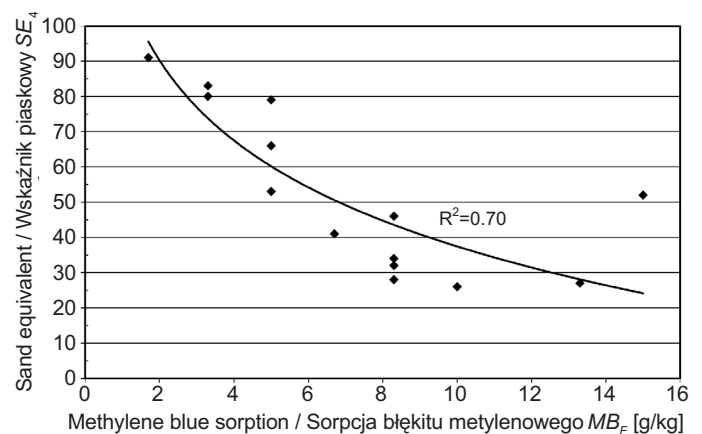


Fig. 5. Relationship between the sand equivalent SE_4 and the MB_F value
Rys. 5. Zależność pomiędzy wskaźnikiem piaskowym SE_4 i wskaźnikiem MB_F

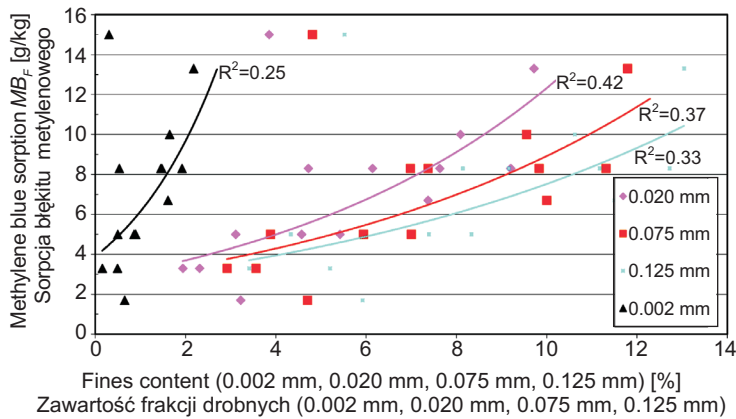


Fig. 7. Relationship between methylene blue sorption MB_F and fines content

Rys. 7. Zależność pomiędzy wskaźnikiem sorpcji błękitu metylenowego MB_F i zawartością pyłów

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując wyniki badań można stwierdzić, że w zależności od badanej cechy i przyjętego kryterium występują duże rozbieżności w klasyfikacji badanych kruszyw pod względem wysadzinowości. Takie rozbieżności stwierdzono na przykład oceniając wysadzinowość badanych kruszyw na podstawie zawartości cząstek $< 0,02$ mm i $< 0,075$ mm. W przypadku zawartości cząstek $< 0,02$ mm i przyjętego kryterium wysadzinowości $< 3\%$, 12 kruszyw można zakwalifikować do wysadzinowych i 2 – do niewysadzinowych. W przypadku zawartości cząstek $< 0,075$ mm i kryterium wysadzinowości $< 15\%$, 14 badanych kruszyw można zakwalifikować do niewysadzinowych. Tę rozbieżność poświadczają również uzyskane wielkości wysadziny kruszyw. W przypadku cząstek $< 0,02$ mm i kryterium $< 3\%$ ich zawartości wielkość wysadziny wynosi $F_H = 0,45$ mm, natomiast w przypadku cząstek $< 0,075$ mm i kryterium $< 15\%$ ich zawartości to $F_H = 0,8$ mm. Wynika z tego, że przyjmowane kryterium wysadzinowości $< 3\%$ zawartości cząstek $< 0,02$ mm jest zbyt rygorystyczne.

Jak wspomniano wcześniej, wskaźnik plastyczności I_p nie jest cechą odpowiednią do prognozowania wysadzinowości kruszyw. Wynika to z braku korelacji pomiędzy wskaźnikiem plastyczności a wysadziną, jak również braku możliwości oznaczenia granicy plastyczności i granicy płynności niektórych kruszyw. Wyniki badań wysadzinowości kruszyw przy stosowanych kryteriach dotyczących wskaźnika piaskowego SE_4 i sorpcji błękitem metylenowym MB_F dały dość zgodne rezultaty. Przyjmując kryterium $SE_4 = 35$ pomierzona wielkość wysadziny wynosi $F_H = 0,62$ mm, a w przypadku kryterium $MB_F = 10$ g/kg otrzymuje się podobną wielkość wysadziny $F_H = 0,61$ mm. Jednak kryteria

5. SUMMARY

When summing up the results of research it can be stated that, depending on the evaluated property and assumed criterion, there are large discrepancies in the classification of the tested aggregates regarding frost susceptibility. Such discrepancies were found, e.g. when assessing the frost susceptibility of tested aggregates based on the content of particles < 0.02 mm and < 0.075 mm. In the case of the content of particles < 0.02 mm and the assumed criterion of frost susceptibility $< 3\%$, 12 aggregates can be classified as frost-susceptible and 2 as non-frost-susceptible. In the case of the content of particles < 0.075 mm and the criterion of frost susceptibility $< 15\%$, 14 of the tested aggregates can be classified as non-frost-susceptible. This discrepancy is also confirmed by the obtained sizes of aggregate frost heaves. In the case of particles < 0.02 mm and the criterion of $< 3\%$ of their content, the size of the frost heave amounts to $F_H = 0.45$ mm. In the case of particles < 0.075 mm and the criterion of $< 15\%$ of their content, the size of the frost heave amounts to $F_H = 0.8$ mm. Due to this, it can be concluded that the assumed criterion of frost susceptibility of $< 3\%$ of the particles content < 0.02 mm is too stringent.

As was previously mentioned, the plasticity index I_p is not a suitable property to predict aggregate frost susceptibility. This is due to the lack of correlation between the plasticity index and frost heave, as well as the inability to determine the plastic limit and liquid limit of some aggregates. The results of the studies of aggregate frost susceptibility gave fairly consistent results when using the criteria of the sand equivalent SE_4 and sorption of methylene blue MB_F . When assuming the criterion $SE_4 = 35$, the measured size of the frost heave amounts to $F_H = 0.62$ mm. In the case of criterion $MB_F = 10$ g/kg, a similar size of the frost heave that is equal to $F_H = 0.61$ mm is obtained. However, the criteria of frost susceptibility based on SE_4 and MB_F , which are considered separately, do not overlap completely. When assuming the criterion of $MB_F \geq 10$ g/kg, 2 aggregates are frost-susceptible and when assuming the criterion of $SE_4 \leq 35$ – 5 aggregates may be classified as frost-susceptible.

On the basis of the obtained relations between the properties of the tested aggregates, an attempt to revise the selected criteria of frost susceptibility was made in order to obtain better compatibility of the evaluation of aggregate frost susceptibility. The individual criteria were assumed with both a consideration of the permissible size of the frost heave of $F_H = 0.6$ mm, and also by using the

wysadzinowości oparte na SE_4 i MB_F rozpatrywane oddzielnie nie pokrywają się całkowicie. Przyjmując kryterium $MB_F \geq 10$ g/kg – 2 kruszywa są wysadzinowe, a w przypadku kryterium $SE_4 \leq 35 - 5$ kruszyw można zaliczyć do wysadzinowych.

Na podstawie uzyskanych zależności pomiędzy właściwościami badanych kruszyw podjęto próbę zweryfikowania niektórych kryteriów wysadzinowości w celu uzyskania lepszej zgodności oceny wysadzinowości kruszyw. Poszczególne kryteria przyjęto przy założeniu dopuszczalnej wysadziny $F_H = 0,6$ mm oraz wykorzystując opracowane zależności korelacyjne. Zaproponowano następujące kryteria niewysadzinowości:

- zawartość cząstek $< 0,02$ mm $\leq 7\%$,
- zawartość cząstek $< 0,075$ mm $\leq 9\%$,
- zawartość cząstek $< 0,125$ mm $\leq 10\%$,
- wskaźnik piaskowy $SE_4 \geq 38$,
- sorpcja błękitu metylenowego $MB_F \leq 8$ g/kg.

W Tabl. 8 zestawiono wyniki badań i ocenę wysadzinowości zbadanych kruszyw z uwzględnieniem zweryfikowanych kryteriów wysadzinowości. Kolorem czerwonym zaznaczono wyniki badań, według których kruszywa oceniono jako wysadzinowe według zweryfikowanych kryteriów niewysadzinowości. Po zweryfikowaniu kryteriów wysadzinowości uzyskano znaczącą poprawę zgodności różnych właściwości do oceny wysadzinowości kruszyw metodami pośrednimi.


developed correlative relations. The following criteria of non-frost-susceptibility were proposed:

- the content of particles < 0.02 mm $\leq 7\%$,
- the content of particles < 0.075 mm $\leq 9\%$,
- the content of particles < 0.125 mm $\leq 10\%$,
- sand equivalent $SE_4 \geq 38$,
- sorption of methylene blue $MB_F \leq 8$ g/kg.

Table 8 summarizes the results of tests and the evaluation of the frost susceptibility of the examined aggregates when considering the revised criteria of frost susceptibility. The colour red indicates the test results, according to which aggregates were assessed as frost-susceptible due to the revised criteria of non-frost-susceptibility. After revising the criteria of frost susceptibility, there was a significant improvement in the compatibility between the different properties for the evaluation of aggregate frost susceptibility using indirect methods.

Table 8. Summary of test results with the determination of frost susceptibility based on revised criteria of non-frost-susceptibility
Tablica 8. Zestawienie wyników badań z określeniem wysadzinowości na podstawie przyjętych zweryfikowanych kryteriów niewysadzinowości

Aggregate Kruszywo	Property / Właściwość					
	Content of particles Zawartość cząstek < 0.125 mm [%]	Content of particles Zawartość cząstek < 0.075 mm [%]	Content of particles Zawartość cząstek < 0.020 mm [%]	Sand equivalent Wskaźnik piaskowy SE_4 [-]	Sorption of methylene blue Sorpcja błękitu metylenowego MB_F [g/kg]	Frost heave Wysadzina F_H [mm]
	Revised criterion of non-frost-susceptibility / Zweryfikowane kryterium niewysadzinowości					
Test result / Wynik badania						
G	5.2	3.6	1.9	80	3.3	0.25
S	9.2	7.0	4.7	46	8.3	0.59
B	5.5	4.8	3.9	52	15.0	0.59
D1	3.4	2.9	2.3	83	3.3	0.55
D2	13.0	11.8	9.7	27	13.3	0.65
D3	11.5	10.0	7.4	41	6.7	0.72
D4	4.3	3.9	3.1	66	5.0	0.65
D5	8.3	7.0	5.42	79	5.0	0.43
D6	11.2	9.8	7.6	34	8.3	0.58
D7	8.1	7.4	6.1	28	8.3	0.42
D8	10.6	9.6	8.1	26	10.0	0.71
L1	7.4	5.9	4.6	53	5.0	0.42
L2	12.7	11.3	9.2	32	8.3	0.78
L3	5.9	4.7	3.2	91	1.7	0.36

 The pink colour indicates frost-susceptible aggregates according to the revised criteria
Kolorem różowym oznaczono kruszywo wysadzinowe według zweryfikowanych kryteriów

5. WNIOSKI

Właściwości wysadzinowe kruszyw zależą głównie od zawartości cząstek drobnych. Pomiedzy ich zawartością w kruszywie (< 0,02 mm, 0, 075 mm i 0,125 mm) a wysadziną określaną metodą bezpośrednią są korelacje, jednakże stosując dotychczasowe kryteria zawartości tych cząstek otrzymuje się bardzo zróżnicowane wyniki oceny wysadzinowości kruszyw. Na podstawie analizy wyników badań zaproponowano zweryfikowanie niektórych dotychczas stosowanych kryteriów wysadzinowości w celu uzyskania lepszej zgodności oceny kruszyw metodami pośrednimi. W przypadku przyjęcia zweryfikowanych (Tabl. 8) zawartości cząstek drobnych uzyskano 100% zgodność w klasyfikacji wysadzinowości kruszyw.

W badanym zakresie wskaźnika plastyczności $I_p = 0 \div 4,0\%$ nie stwierdzono korelacji pomiędzy tym wskaźnikiem a wysadziną zbadaną metodą bezpośrednią. Oznacza to, że wskaźnik plastyczności nie jest odpowiednią właściwością do oceny wysadzinowości kruszyw, stosowany jest raczej do oceny gruntów spoistych. Pomiedzy wskaźnikiem piaskowym a wysadziną określaną metodą bezpośrednią oraz pomiedzy sorpcją błękitem metylenowym a wysadziną określaną metodą bezpośrednią w przypadku badanych kruszyw stwierdzono korelacje nieliniowe. Wyniki oceny wysadzinowości kruszyw przy stosowanych kryteriach dotyczących wskaźnika piaskowego i sorpcji błękitem metylenowym dały dość zgodne rezultaty i właściwości te mogą być wykorzystywane do oceny wysadzinowości kruszyw metodami pośrednimi. Badania wykazały, że wysadzinowość określaną różnymi parametrami nie zawsze daje jednoznaczny i zgodny wynik, a stosowane kryteria wymagają weryfikacji. Z tego powodu zasadne jest stosowanie równoczesne co najmniej 2 kryteriów: zawartości pyłów w kruszywie i dodatkowo SE lub MB_F .

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES:

- [1] Kraszewski C., Rafalski L., Wilczek J.: Ochrona przeciwmrozowa nawierzchni drogowych na przykładzie wybranych krajów. Drogownictwo, **LXIX**, 2, 2014, 39-45
- [2] Kraszewski C.: Analiza wyników badań mrozoodporności mieszanek z kruszyw związanych hydraulicznie. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **7**, 3, 2008, 19-33
- [3] Rafalski L., Wilczek J.: Warstwy mrozoochronne ze słabych kruszyw grubookruchowych w nawierzchniach drogowych. Studia i Materiały, zeszyt 57, IBDiM, Warszawa, 2006
- [4] Rolla S.: Zwalczenie przełomów i wzmocnienie nawierzchni drogowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1970

5. CONCLUSIONS

The properties of aggregate frost susceptibility mainly depend on the content of fine particles. There are correlations between the content of fine particles in aggregates (<0.02 mm, 0.075 mm and 0.125 mm) and the frost heaves that were determined using the direct method. However, when using recent criteria of the content of these particles, very diversified results of the evaluation of aggregate frost susceptibility are obtained. Based on the analysis of test results, a revision of previously used selected criteria of frost susceptibility was proposed in order to obtain a better compatibility of the evaluation of aggregates using indirect methods. In the case of the assumption of the revised (Table 8) content of fine particles, a 100% compliance in the classification of aggregate frost susceptibility was achieved.

In the assessed range of the plasticity index $I_p = 0 \div 4.0\%$, there was no correlation between this index and the frost heave that was evaluated using the direct method. This means that the plasticity index is not an appropriate property to evaluate aggregate frost susceptibility, but is used to evaluate cohesive soils. In the case of the tested aggregates, non-linear correlations were found between both the sand equivalent and the frost heave that was determined using the direct method, and also between the sorption with methylene blue and the frost heave determined using the direct method. The results of aggregate frost susceptibility evaluation, when using the criteria of the sand equivalent and sorption of methylene blue, were fairly consistent. Therefore, these properties can be used to evaluate aggregate frost susceptibility using indirect methods. Studies have shown that frost susceptibility, determined by different parameters, not always gives a clear and consistent result, and due to this the used criteria need to be verified. The simultaneous use of at least 2 criteria: the content of fines in aggregate and also SE or MB_F , is therefore justified.

- [5] Graczyk M.: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych. Studia i Materiały, zeszyt 63, IBDiM, Warszawa, 2010
- [6] Rafalski L.: Podbudowy drogowe. Studia i Materiały, zeszyt 59, IBDiM, Warszawa, 2007
- [7] Roe P.G., Webster D.C.: Specification for the TRRL frost-heave test. Report No SR829. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England, 1984
- [8] BS 812-124:2009 Testing aggregates. Part 124: Method for determination of frost-heave

- [9] Chamberlain E.J.: Frost susceptibility of soils. Review of index tests, CRREL monograph 81-2. US. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, USA, 1981, <http://acwc.sdp.sirsi.net/client/search/asset/1011743>, 02.08. 2016
- [10] Smith M.R., Collis L.: Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 17, Oxford, UK., 2001
- [11] Witczak M.W., Houston W.N.: Guide for the design of new and rehabilitated pavement structures. Selections of resilient moduli for frozen/thawed unbound materials. Arizona State University, USA, 2000
- [12] Janoo V.C., Eaton R., Barna L.: Evaluation of Airport Subsurface Materials. Special Report 97-13. US. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, USA, 1997
- [13] Engineering and Design Pavement Criteria for Seasonal Frost Conditions Mobilization Construction. Department of the Army. Corps of Engineers Office of the Chief of Engineers. Engineer Manual No. 1110-3-138. 1984, http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-3-138.pdf, 10.08.2016
- [14] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014
- [15] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014
- [16] PN-S-02205:1999 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [17] Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych WT-4. Wymagania techniczne. GDDKiA, 2010
- [18] AASHTO D 2487-06 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- [19] PN-EN 933-8:(2001, 2012, 2015) Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Sand equivalent test
- [20] BN64/8931-01 Drogi samochodowe. Oznaczanie wskaźnika piaskowego
- [21] Kraszewski C., Piech R., Wilczek J.: Ocena zawartości drobnych cząstek w kruszywach drogowych na podstawie wskaźnika piaskowego. *Drogownictwo*, **LXX**, 2, 2015, 53-56
- [22] Nikolaides A., Menthos E., Sarafidou M.: Sand equivalent and methylene blue value of aggregates for highway engineering. Foundation of civil and environmental engineering, 10, Poznan University of Technology, 2007, 111-121, <http://www.fcee.put.poznan.pl>, 25.07.2016
- [23] Technical Note, 354/12/29.8.03, Egnatia Odos S.A., 2003
- [24] Normalisation Française XP P 18-540. Granulats. 1997
- [25] ASTM D2940:2009 Standard Specification for Graded Aggregate Material For Bases or Subbases for Highways or Airports
- [26] ASTM D3515-01 Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures
- [27] PN-EN 933-9:2013 Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Methylene blue test
- [28] Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych WT-1 Kruszywa. Wymagania Techniczne. GDDKiA, 2014
- [29] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego - Metoda przesiewania
- [30] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- [31] PN-EN 13286-2:2010 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content – Proctor compaction
- [32] Cwiągła M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L.: Laboratory investigation of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses. Proceedings of 6th Transport Research Arena, Warsaw, Transportation Research Procedia, 14, 2016, 3476-3484
- [33] Kraszewski C., Rafalski L.: Laboratory examination of frost-having properties of road unbound mixtures based on fines content and plasticity index. Advances in Transportation Geotechnics, the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, Guimaraes, Portugal, Procedia Engineering, **143**, 2016, 836-843