

DANUTA BEBŁACZ<sup>1)</sup>

## PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE AS BASE COURSE IN CONCRETE PAVEMENT STRUCTURES

## WŁAŚCIWOŚCI BETONU PRZEPUSZCZALNEGO DO PODBUDÓW DROGOWYCH W KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI Z BETONU CEMENTOWEGO

**STRESZCZENIE.** W pracy omówiono podbudowy przepuszczalne z betonu cementowego jako jedno z możliwych rozwiązań przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni z betonu cementowego. W tego rodzaju nawierzchniach może występować zjawisko erozji podbudowy – wypłukiwanie drobnoziarnistych części z górnej warstwy podbudowy. Zjawisko to można wyeliminować, stosując podbudowy odporne na erozję, w tym m.in. drenujące podbudowy z wodoprzepuszczalnego betonu cementowego. Przedstawiono przykłady rozwiązań konstrukcyjnych nawierzchni betonowych stosowanych w innych krajach z zastosowaniem podbudów przepuszczalnych. Omówiono wyniki własnych badań doświadczalnych betonów jamistych zaprojektowanych jako beton do podbudów drenujących. Nie stwierdzono zależności między wytrzymałością na ściskanie a odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Wykazano dużą wodoprzepuszczalność betonu jamistego z kruszywem żwirowym, powyżej  $10^{-3}$  m/s, porównywalną z przepuszczalnością gruntów naturalnych, takich jak żwiry, grubo- i średnioziarniste piaski.

**SŁOWA KLUCZOWE:** beton przepuszczalny, nawierzchnia betonowa, podbudowa.

**ABSTRACT.** The paper discusses permeable base courses of pervious cement concrete as a possible design solution for rigid road pavement structures. Such pavements are threatened by base erosion – washing out of fine particles of the upper base layer. This effect may be eliminated through the use of erosion-resistant base courses, including drainage bases of pervious cement concrete. The article presents a review of example structural solutions of concrete pavements with permeable bases used in other countries. The results of own experimental research on pervious concretes for permeable road bases are also presented. No relationships were observed between the compressive strength of concrete and its resistance to cyclic freezing/thawing. An elevated water permeability of pervious concrete containing gravel aggregate was noted – over  $10^{-3}$  m/s, which is comparable to the permeability of natural soils such as gravels and coarse or medium sands.

**KEYWORDS:** base course, concrete pavement, pervious concrete.

DOI: 10.7409/rabdim.021.021

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

## 1. WPROWADZENIE

Pojawiające się w konstrukcjach nawierzchni drogowych z betonu cementowego zjawisko erozji podbudowy jest niebezpieczne z uwagi na trwałość nawierzchni. Gdy pomiędzy warstwą nawierzchniową a podbudową znajduje się woda, sytuacja ulega dodatkowemu pogorszeniu. Obciążenia przekazywane przez koła pojazdów powodują nieznaczne pionowe przemieszczenia krawędzi płyty nawierzchni, co skutkuje tym, że woda może być zasysana pod płytę. W chwili przejeżdżania koła po szczelinie między płytami krawędź następnej płyty przemieszcza się w dół, podczas gdy krawędź poprzednio obciążonej płyty podnosi się i zasysa wodę, a wraz z nią okruchy materiałów mineralnych. Dochodzi wtedy do zjawiska tzw. hydrodynamicznego pompowania wody. Towarzyszy temu duża prędkość przepływu, wywołująca znaczne siły erozyjne. Wskutek tego na powierzchnię płyt w obrębie jezdni wypłukiwane są drobnoziarniste okruchy oderwane z podbudowy. Może to w konsekwencji doprowadzić do zjawiska tzw. klawiszowania płyt.

Zjawisko erozji podbudów można wyeliminować m.in. poprzez zastosowanie:

- podbudowy z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym lub z betonu asfaltowego,
- podbudowy z kruszywa,
- geowłókniny pomiędzy podbudową a warstwą nawierzchniową,
- drenującej podbudowy z wodoprzepuszczalnego betonu cementowego [1].

W konstrukcji nawierzchni sztywnej (z betonu cementowego), której schemat przedstawiono na Rys. 1, ułożonej na podłożu gruntowym lub na warstwie ulepszanego podłoża, wyróżnia się dolne warstwy konstrukcji nawierzchni (warstwa mrozochronna i podbudowa pomocnicza) oraz górne warstwy konstrukcji nawierzchni (podbudowa zasadnicza, warstwa poślizgowa i warstwa nawierzchniowa).

Pavement structure (pavement) Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Upper courses of the pavement Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Surface course (concrete slab – undoweled or jointed, plain or reinforced) Warstwa nawierzchniowa (płyta niedyblowana, dyblowana i kotwiona, zbrojona)
		Separation layer / Warstwa poślizgowa
	Lower courses of the pavement Warstwy dolne konstrukcji	Base course / Podbudowa zasadnicza
		Subbase / Podbudowa pomocnicza
Subgrade Podłoże gruntowe nawierzchni	Improved subgrade Warstwa ulepszanego podłoża	Capping layer / Warstwa mrozochronna
	In-situ subgrade in cut or fill material on an embankment, qualified to one of bearing capacity groups (G1 to G4) Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie, zakwalifikowany do jednej z grup nośności podłoża od G1 do G4.	

Fig. 1. A scheme of rigid pavement and subgrade layers [2]

Rys 1. Schemat warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych i podłoża gruntowego [2]

## 1. INTRODUCTION

The effect of base course erosion, which may occur in cement concrete road pavements, is dangerous due to the possible reduction in pavement life. When water infiltrates between the concrete slab and the base course, the situation becomes even more adverse. Loading from vehicle wheels causes slight vertical displacements of the edges of the slab, resulting in possibility of water being drawn in under the slab. When a wheel passes over the joint between the slabs, the edge of the next slab moves downwards, while the edge of the previous slab begins upward movement upon unloading, sucking in water and small particles of mineral material. The resulting effect is referred to as hydrodynamic water pumping. It is characterized by high flow velocity, resulting in considerable erosive forces. It also leads to washing out of fine particles of the base onto the surface of the roadway. In consequence, faulting of the joints may occur.

The means for elimination of the effect of base course erosion include the use of:

- base course of hydraulically bound material or asphalt concrete,
- base course of aggregate,
- non-woven geotextile between the concrete slab and the base course,
- drainage base course of pervious cement concrete [1].

According to the Polish catalog [2], a rigid pavement structure (of cement concrete), which is placed on subgrade or improved subgrade, consists of the lower courses (capping layer, subbase) and the upper courses (base course, separation layer and surface course). Its scheme is shown in Fig. 1.

Drenująca podbudowa zasadnicza z wodoprzepuszczalnego betonu cementowego – jako jedno z rozwiązań podbudowy odpornej na erozję – jest najmniej rozpowszechnionym rozwiązaniem, w Polsce praktycznie niestosowanym. Informacje o znanych świecie przykładach stosowania tego typu podbudów znaleźć można w pracach [3-9].

## 2. DRENUJĄCE BETONY JAMISTE

Szczelność betonu zależy od wielu czynników materiałowych i technologicznych, w tym od stopnia wypełnienia zaprawą/zaczynem pustek międzyziarnowych kruszywa grubego. Z punktu widzenia stopnia wypełnienia zaprawą przestrzeni międzyziarnowych rozróżnić można betony zwarte, półzwarte i jamiste. Betony zwarte zawierają zaprawę cementowo-piaskową w ilości nieco przekraczającej objętość pustek w stosie okruszonym kruszywa grubego (jamistość). Po zagęszczeniu takiej mieszanki łączna objętość pustek powietrznych nie powinna przekraczać zazwyczaj 2% objętości. Nieszczelna tekstura betonów półzwartych tworzy się przy częściowym wypełnieniu zaprawą pustek między ziarnami kruszywa grubego. Mniejsza zawartość zaprawy wiąże się także z mniejszą zawartością piasku w tych betonach.

Beton jamisty otrzymuje się, gdy w jego składzie nie ma drobnego kruszywa, a ziarna kruszywa grubego są tylko pokryte zaczynem cementowym. Zawartość zaczynu cementowego jest tak dobrana, aby wystarczyło go jedynie do otulenia ziaren kruszywa i spojenia ich punktowo w miejscach styku. Jamistą teksturę betonu można uzyskać przez zastosowanie jedno- lub dwufrakcyjnego kruszywa, nie drobniejszego niż 4 mm. Dobór składu betonu jamistego omówiony jest m.in. w monografii Z. Jamroży [10].

Jak już wspomniano, dotychczasowe zastosowania betonów jamistych w drogownictwie nie są liczne. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi znalazły one zastosowanie jako podbudowy w konstrukcjach nawierzchni z betonu cementowego, w tym m.in. w tunelach, a także jako podbudowy pod nawierzchnie z drobnowymiarowych elementów drogowych.

Mieszanka betonu przepuszczalnego przeznaczona do wykonania podbudowy może być wytwarzana w wytwórni stacjonarnej lub na budowie w bezpośrednim procesie mieszania. Podczas wykonywania podbudowy bezpośrednio na budowie dozuje się kolejno: kruszywo grube, piasek, cement. Następnie składniki poddawane są procesowi mieszania przy użyciu gruntofrezarki z jednoczesnym dozowaniem wody.

Można wymienić m.in. następujące przykłady zastosowań podbudów przepuszczalnych:

1) Pierwszy odcinek doświadczalny w Niemczech z wbudowaniem podbudowy drenującej wykonano na drodze

Among the solutions for erosion-resistant bases, drainage base courses of pervious concrete are the least popular – practically unused in Poland. Information on known global examples of their use may be found in publications [3-9].

## 2. DRAINAGE PERVIOUS CONCRETES

Water permeability of concrete depends on various material and technological factors, including the degree to which the voids between coarse aggregate grains are filled with cement mortar or paste. Taking the latter parameter into account, concretes may be classified as impermeable, semi-permeable and pervious. Impermeable concretes contain cement-sand mortar in quantity slightly greater than the volume of voids in the coarse aggregate mixture. After compaction of such a concrete mixture, the total air void content should not typically exceed 2% of volume. Partly open structure of semi-permeable concretes results from incomplete filling of voids between coarse aggregate grains with mortar. Lower content of mortar leads to lower content of sand in these concretes.

Pervious concrete is obtained when there is no fine aggregate in the mix, and the coarse grains are only covered with cement paste. The content of cement paste is selected in such a way to achieve coating of aggregate grains and their spot connection at points of contact. The open structure of concrete may be obtained through the use of one or two fractions of aggregate, not smaller than 4 mm. Among other sources, pervious concrete mix design is discussed in the monograph by Z. Jamroży [10].

As mentioned above, the number of applications of pervious concrete in road construction so far has been relatively low. According to the literature, such concrete mixtures are used in base courses in cement concrete pavements, including pavements in tunnels, and base courses under block paving elements.

Pervious concrete mixtures for road bases may be produced in stationary plants or mixed in place. When the base course is mixed directly on site, the ingredients are dosed in the following order: coarse aggregate, sand and cement. They are subsequently mixed using a soil stabilization miller with simultaneous dosage of water.

Noteworthy examples of the use of permeable road bases include the following applications:

1) First experimental section with drainage base course in Germany was constructed on an internal road in a gravel pit in Neubeuern. The drainage base course served as

wewnętrznej w zwirowni w Neubeuern. Podbudowa drenująca stanowiła warstwę nośną pod zespoloną nawierzchnią kamienną [4];

- 2) W 1991 r. w ramach budowy autostrady A30 w Salzbergen wykonano odcinek 1,5 km nawierzchni betonowej składającej się z dwóch pasów jezdni i pasa postojowego o łącznej szerokości 11 m, pod którą ułożono podbudowę drenującą [5];
- 3) W 1992 r. w ramach rozbudowy autostrady A7 pomiędzy Hanowerem a Hildesheim wykonano podbudowę drenującą pod pasami postojowymi [5];
- 4) W 1982 r. w ramach prac naprawczych na lotnisku Charles de Gaulle w Paryżu zastosowano beton drenujący, aby łatwiej odprowadzić wodę powierzchniową wsiąkającą w szczeliny;
- 5) We Francji betony porowate stosuje się do odwadniania nawierzchni na pasach postojowych [6];
- 6) W 2007 r. w ciągu francuskiej autostrady A51 w tunelu de Sinard o długości 980 m na wysokości 800 m n.p.m. wykonano nawierzchnię z betonu cementowego na podbudowie drenującej [7].

Niemieckie wytyczne [11] podają zalecenia dotyczące ilości poszczególnych składników betonu do przepuszczalnych podbudów (Tabl. 1). Przykładowe receptury betonów przepuszczalnych stosowanych w Niemczech podano w Tabl. 2.

Table 1. German recommendations for the design of pervious concrete mixtures for road bases [11]

Tablica 1. Niemieckie wytyczne do projektowania receptur betonów przepuszczalnych stosowanych jako podbudowy [11]

Ingredient / Składnik	Content in % (by mass) / Udział w % (mas.)	Content in kg/m <sup>3</sup> / Udział w kg/m <sup>3</sup>
Cement	8-12% of aggregate / kruszywa	150-220
Water / Woda	3-6% of cement + aggregate / 3-6% cementu + kruszywa	60-90
Sand 0/1 mm or 0/2 mm Piasek 0/1 mm lub 0/2 mm	10% of aggregate / 10% kruszywa	150-180
Crushed aggregate 8/22 mm or 8/32 mm Kruszywo łamane 8/22 mm lub 8/32 mm	90% of aggregate / 90% kruszywa	1500-1600

Zgodnie z wytycznymi [11], wartość współczynnika  $w/c$  nie powinna przekraczać 0,40. W przykładowych recepturach (Tabl. 2) współczynnik  $w/c$  wynosił od 0,40 do 0,51 w przypadku betonu z kruszywem z recyklingu. W przypadku powyższych zastosowań uzyskano następujące parametry betonu drenującego:

- przy jamistości pomiędzy 15% a 20% uzyskano wytrzymałość na ściskanie około 12 MPa,
- przy jamistości około 15% uzyskano przepuszczalność mierzoną współczynnikiem filtracji  $k$  około  $10^{-3}$  m/s (beton bardzo przepuszczalny).

a structural bearing layer under the stone-paved surface course [4];

- 2) In 1991, during construction of the A30 highway in Salzbergen, a 1.5-kilometer-long section of concrete pavement was constructed, consisting of two traffic lanes and a stopping lane – of total roadway width of 11 m – incorporating a drainage base course [5];
- 3) In 1992, during extension of the A7 highway between Hanover and Hildesheim, drainage base course was placed under stopping lanes [5];
- 4) In 1982, during pavement repair works at the Charles de Gaulle Airport in Paris, pervious concrete was used to facilitate drainage of surface water infiltrating the joints;
- 5) In France pervious concretes are used for drainage of stopping lane pavements [6];
- 6) In 2007, a cement concrete pavement with permeable base course was placed in the 980-meter-long Tunnel de Sinard carrying the A51 French highway at the elevation of 800 m a.s.l. [7].

The German guidelines [11] present the recommended quantities of specific ingredients in concrete mixtures for permeable road bases (Table 1). Examples of German pervious concrete mixture proportions are shown in Table 2.

According to the guidelines [11], the water-cement ratio should not exceed 0.40. In the example mix designs (Table 2) the water-cement ratio ranged from 0.40 to 0.51 in the case of concrete with recycled aggregate. In the above applications, the following parameters of permeable concrete were obtained:

- at void content in the range from 15% to 20%, compressive strength equaled approx. 12 MPa,
- at void content of about 15%, water permeability expressed by filtration coefficient  $k$  equaled approximately  $10^{-3}$  m/s (highly permeable concrete).

Table 2. Example pervious concrete mix designs used in Germany for road base courses [4, 5]

Tablica 2. Przykładowe receptury betonów przepuszczalnych stosowane w Niemczech na warstwy podbudowy [4, 5]

Ingredient Składnik	Use / Zastosowanie		
	A30 base course [5] Podbudowa na A30 [5]	A7 base course [5] Podbudowa na A7 [5]	Base under stone blocks in Neubeuern [4] Podbudowa pod kostką kamienną w Neubeuern [4]
Cement [kg]	200	195	205
Water [kg] Woda	90	100	82
Sand [kg] Piasek	180 (natural / naturalny 0/2 mm)	140 (natural / naturalny 0/2 mm)	92 (natural / naturalny 0/4 mm)
			91 (crushed / łamany 0/4 mm)
Coarse aggregate [kg] Kruszywo grube	810 (crushed aggregate 8/16 mm kruszywo łamane 8/16 mm)	1460 (recycled aggregate 8/32 mm kruszywo z recyklingu 8/32 mm)	186 (pebble aggregate 4/8 mm kruszywo otoczkowe 4/8 mm)
	810 (crushed aggregate 16/22 mm kruszywo łamane 16/22 mm)		1480 (pebble aggregate 8/16 mm kruszywo otoczkowe 8/16 mm)
Water-cement ratio [-] Współczynnik <i>w/c</i>	0.45	0.51	0.40
Density [kg/m <sup>3</sup> ] Gęstość objętościowa	2090	1895	2136

Analizując publikacje zagraniczne poświęcone betonom jamistym, należy stwierdzić, że dotyczą one najczęściej betonów przeznaczonych do wykonywania górnej warstwy nawierzchni o wytrzymałości powyżej 20 MPa, przy użyciu cementu w ilości powyżej 300 kg/m<sup>3</sup>, z kruszywem o różnym uziarnieniu, często modyfikowanych domieszkami i dodatkami. Nie zajmowano się zagadnieniem mrozoodporności betonów jamistych o wytrzymałości poniżej 20 MPa.

W pracy [12] autorzy przedstawili wyniki badań betonów jamistych o uziarnieniu kruszywa do 12,5 mm, z zawartością cementu do 200 kg/m<sup>3</sup>. Uzyskano wytrzymałość na ściskanie od 1,06 MPa do 6,95 MPa, przy średniej jamistości 37% i gęstości około 1716 kg/m<sup>3</sup>. Stwierdzono zależność pomiędzy gęstością i jamistością oraz wodoprzepuszczalnością. Wyniki badań przedstawione w pracy [13] wykazały zależność liniową pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i jamistością oraz między przepuszczalnością i jamistością. W badanych betonach zastosowano kruszywo o uziarnieniu do 20 mm oraz użyto od 260 kg/m<sup>3</sup> do 320 kg/m<sup>3</sup> cementu. Wyniki badań przedstawione w pracy [14] również wykazały zależność wytrzymałości na ściskanie od jamistości betonu porowatego. Betony modyfikowano przy użyciu pyłu krzemionkowego oraz domieszki upłynniającej.

W opracowaniach [15, 16] przedstawiono zależności parametrów betonów nawierzchniowych zaprojektowanych w Stanach Zjednoczonych. Stwierdzono spadek przepuszczalności oraz wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem gęstości. W opracowaniach poruszono kwestię poprawy

Based on the review of the international literature on pervious concrete, it may be noted that the publications largely pertain to concretes for the surface courses of rigid pavements – with strength above 20 MPa, using over 300 kg of cement per cubic meter, with aggregates of varying grading, often modified with additives and admixtures. The problem of freeze-thaw resistance of pervious concretes of strengths below 20 MPa was not discussed.

Authors of the work [12] presented test results of pervious concretes with aggregate grading of up to 12.5 mm and cement content of up to 200 kg/m<sup>3</sup>. The obtained compressive strengths ranged from 1.06 MPa to 6.95 MPa, with average void content of 37% and density of approx. 1716 kg/m<sup>3</sup>. Correlation was noted between density, void content and water permeability. Test results presented in [13] implied a linear relationship between compressive strength and void content, as well as between permeability and void content. The tested concretes contained aggregate of grain size of up to 20 mm and cement content ranged from 260 kg/m<sup>3</sup> to 320 kg/m<sup>3</sup>. The results presented in the work [14] also show a relationship between compressive strength and void content of pervious concrete. The concretes were modified using silica fume and water reducing admixture.

Publications [15, 16] show the relationships between parameters of road pavement concretes designed in the United States. It was noted that when density of concrete increases, its permeability decreases and compressive

mrozoodporności poprzez stosowanie domieszek napowietrzających. Stosowanie domieszek do betonów porowatych w celu poprawy mrozoodporności zalecono również w publikacji [17]. Kwestię kształtowania mrozoodporności betonów jamistych poruszono również w pracy [18], w której przedstawiono wyniki badań betonów jamistych przeznaczonych do nawierzchni, z zastosowaniem cementu w ilości do  $390 \text{ kg/m}^3$ . Autorzy zaobserwowali poprawę mrozoodporności betonu dzięki zastosowaniu domieszki napowietrzającej i dodatku styrenowo-butadienowego.

Krajowe badania betonu przepuszczalnego były jak dotąd fragmentaryczne. W pracy [19] dotyczącej betonu jamistego o gęstości objętościowej od  $751 \text{ kg/m}^3$  do  $2014 \text{ kg/m}^3$  z wykorzystaniem kruszyw naturalnych i alternatywnych – takich jak kruszywo lekkie popiołoporytowe, kruszywo ze szkła spienionego oraz kruszywo z recyklingu betonu – wykazano wpływ rodzaju kruszywa na właściwości mechaniczne betonu jamistego.

W pracy [20] ogólnie omówiono przykłady nawierzchni wodoprzepuszczalnych przeznaczonych na ciągi piesze i ulice. Przegląd parametrów technicznych zagranicznych nawierzchni przepuszczalnych z betonu cementowego wykazał, że na ogół zawartość pustek w takim betonie wynosi od 15% do 25%. Geometryczny model budowy wewnętrznej betonów jamistych przedstawiono natomiast w pracy [21]. Przeanalizowano ponadto układ ziaren kruszywa w betonie w zależności od wypełnienia jam zaczynem cementowym. W wymienionych nielicznych publikacjach nie przedstawiono pomiarów przepuszczalności betonu jamistego. W krajowych badaniach nie zajmowano się także zagadnieniem mrozoodporności. Biorąc powyższe pod uwagę, w IBDiM przeprowadzono stosowne badania, które są przedmiotem niniejszego artykułu.

### **3. BADANIA DOŚWIADCZALNE BETONÓW PRZEPUSZCZALNYCH**

#### **3.1. ETAP I**

##### **3.1.1. Materiały i próbki**

W celu weryfikacji właściwości betonów przepuszczalnych do podbudów realizowanych w warunkach krajowych i z krajowych składników, w pierwszym etapie przeprowadzono wstępne badania kilkunastu mieszanek z wykorzystaniem różnych kruszyw naturalnych i alternatywnych. Do projektowania wykorzystano wskazówki doboru materiałów i proporcje poszczególnych składników zawarte w wytycznych niemieckich [11] oraz składy podbudów zastosowanych w Niemczech i we Francji [4, 5, 7].

Krajowe wymagania dotyczące podbudów określone są w normach PN-S-96013 [22], PN-S-96014 [23] i PN-EN

strength increases. The publications discuss the question of improvement of freeze-thaw resistance of concretes through application of air-entraining admixtures. Use of admixtures in order to improve the freeze-thaw resistance of porous concretes was also recommended in publication [17]. The problem of freeze-thaw resistance of pervious concretes was also addressed in the work [18], which presents test results of pervious concretes for road pavements, using cement in quantity of up to  $390 \text{ kg/m}^3$ . The authors observed an improvement in freeze-thaw resistance of concrete when air-entraining admixture and styrene-butadiene additive were used.

Hitherto, Polish research of pervious concrete has been fragmentary. In the work [19], pertaining to pervious concrete of density from  $751 \text{ kg/m}^3$  to  $2014 \text{ kg/m}^3$  with natural and alternative aggregates – such as fly ash lightweight aggregate, foamed glass aggregate and recycled concrete aggregate – the influence of aggregate type on mechanic properties of pervious concrete was demonstrated.

The work [20] generally describes permeable pavements for streets and sidewalks. The review of technical parameters of pervious concrete pavements used abroad has shown that typically void content in such concrete ranges from 15% to 25%. Geometrical model of the internal structure of pervious concretes was presented in [21]. The arrangement of aggregate grains depending on the degree of filling of voids with cement paste was also analyzed. The few available publications do not present measurements of pervious concrete water permeability. There are also no Polish research works devoted to freeze-thaw resistance of such concretes. Taking this into account, relevant tests were conducted at the Road and Bridge Research Institute (IBDiM). They are described in this article.

### **3. EXPERIMENTAL TESTING OF PERVIOUS CONCRETES**

#### **3.1. STAGE I**

##### **3.1.1. Materials and specimens**

In order to verify the properties of pervious concretes for road bases produced in Polish conditions and from Polish materials, the first stage encompassed preliminary testing of over ten concrete mixes containing various natural and alternative aggregates. Mixture design was based on recommendations and ingredient proportions given in the German guidelines [11] as well as on actual base course mix designs used in Germany and France [4, 5, 7].

The Polish requirements regarding road base courses are determined in the standards PN-S-96013 [22],

14227-1 [24]. Zgodnie z PN-S-96013 [22], wytrzymałość na ściskanie chudego betonu powinna wynosić:

- po 7 dniach – od 3,5 MPa do 5,5 MPa,
- po 28 dniach – od 6 MPa do 9 MPa.

Norma PN-S-96014 [23] określa następujące wymagane właściwości podbudowy z betonu cementowego:

- wytrzymałość na ściskanie odpowiadająca klasie B15 (obecnie C12/15),
- nasiąkliwość – nie większa niż 7%,
- odporność na działanie mrozu – stopień mrozoodporności min. F25.

Powyższe wymagania nie dotyczą jednak podbudów z betonu cementowego przepuszczalnego. Jako kryteria projektowania składu betonu przepuszczalnego przyjęto parametry wg PN-S-96014 [23].

W pierwszym etapie badań zaprojektowano skład betonu przepuszczalnego w formie receptury ramowej podanej w Tabl. 3. Receptury miały w swoim składzie kruszywa naturalne [4] i pochodzenia przemysłowego [5]. Charakterystykę stosowanych składników, w tym także rodzaj kruszyw, podano poniżej.

PN-S-96014 [23] and PN-EN 14227-1 [24]. According to PN-S-96013 [22], the required compressive strength of lean concrete is as follows:

- after 7 days – 3.5 MPa to 5.5 MPa,,
- after 28 days – 6 MPa to 9 MPa.

The PN-S-96014 standard [23] defines the following requirements for a cement concrete road base:

- compressive strength corresponding to the B15 grade (currently C12/15),
- water absorption – no greater than 7%,
- frost resistance-minimum level of freeze-thaw resistance: F25.

Nevertheless, the above requirements do not pertain to road bases of pervious cement concrete. Criteria for pervious concrete mixture design were adopted based on PN-S-96014 [23].

In the first stage of the research, a basic general design of pervious concrete mixture was assumed, as given in Table 3. Individual mixtures contained natural aggregates [4] and industrial by-product aggregates [5]. Characteristics of the ingredients, including the types of aggregates, are given below.

Table 3. General mixture design used in the first stage of the research  
Tablica 3. Receptura ramowa stosowana w I etapie badań

Ingredient / Składnik	Content / Zawartość
Cement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R	200 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2 mm / Piasek 0/2 mm	170 kg/m <sup>3</sup>
Coarse aggregate / Kruszywo grube	0.604 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Water / Woda wodociągowa	90 kg/m <sup>3</sup>
Air-entraining admixture (optional) / Domieszka napowietrzająca (opcjonalnie)	0.2% of cement mass / masy cementu

Zastosowano następujące materiały:

- cement CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R,
- piasek naturalny o uziarnieniu 0/2 mm,
- kruszywo grube w 7 rodzajach (w nawiasach zawartość w kg/m<sup>3</sup>):
  - 1) grys granitowy 8/16 mm (1600 kg/m<sup>3</sup>) – dalej mieszanka oznaczana jako Dren-1,
  - 2) grys wapienny 8/16 mm (1600 kg/m<sup>3</sup>) – mieszanka Dren-2,
  - 3) grys granitowy 8/16 mm i 16/22 mm w proporcji 1:1 (1600 kg/m<sup>3</sup>) – mieszanka Dren -3,
  - 4) żwir 8/16 mm (1600 kg/m<sup>3</sup>) – mieszanka Dren-4,

The following materials were used:

- cement CEM II/B-M(V-LL) 32.5 R,
- natural sand 0/2 mm,
- 7 types of coarse aggregate (content in kg/m<sup>3</sup> given in brackets):
  - 1) crushed granite 8/16 mm (1600 kg/m<sup>3</sup>) – concrete mixture containing this aggregate herein after labeled Dren-1,
  - 2) crushed limestone 8/16 mm (1600 kg/m<sup>3</sup>) – concrete mixture Dren-2,
  - 3) crushed granite 8/16 mm and 16/22 mm at proportion of 1:1 (1600 kg/m<sup>3</sup>) – concrete mixture Dren-3,

- 5) żużel ponikłowy 8/16 mm ( $1930 \text{ kg/m}^3$ ) – mieszanka Dren-5,
- 6) granulaty cementowy 10/20 mm ( $548 \text{ kg/m}^3$ ) – mieszanka Dren-6,
- 7) kruszywo z recyklingu betonu 8/16 mm ( $1150 \text{ kg/m}^3$ ) – mieszanka Dren-7.

Granulaty cementowy użyty do mieszanki Dren-6 powstaje w wyniku przetwarzania odpadów przemysłowych. Baza granulatu jest komponowana z różnego rodzaju odpowiednio dobranych materiałów odpadowych. Następnie mieszanka jest poddawana wstępnej obróbce polegającej na separacji magnetycznej metali i separacji sitowej zanieczyszczeń mechanicznych oraz obróbce chemicznej. Następnym etapem jest mieszanie kompozycji materiałów odpadowych z hydraulicznym środkiem wiążącym oraz wodą do uzyskania masy o konsystencji plastycznej. Stwardniała masa jest kruszona i sortowana.

Z uwagi na projektowaną mrozoodporność betonu przepuszczalnego każda z mieszanek została zaprojektowana w dwóch wersjach:

- bez domieszki napowietrzającej (Dren-1, Dren-2, Dren-3, Dren-4, Dren-5, Dren-6, Dren-7),
- z domieszką napowietrzającą (Dren-1-1, Dren-2-1, Dren-3-1, Dren-4-1, Dren-5-1, Dren-6-1, Dren-7-1).

Z powyższych materiałów wykonano według ramowej receptury mieszanki betonowe w warunkach laboratoryjnych, stosując mieszarkę o pojemności 50 litrów zgodnie z zasadami normy PN-B-06250 [25]. Wykonano normowe próbki sześciennie o krawędzi 150 mm i 100 mm, zagęszczając mieszankę na stole wibracyjnym. Czas zagęszczania dobrano doświadczeniowo, aby zaczyn cementowy nie spłynął na dno formy. Po wykonaniu próbek były pielęgnowane w komorze w temperaturze  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności powyżej 90% przez okres 28 dni.

### 3.1.2. Metody badań

Próbki stwardniałego betonu przepuszczalnego poddano następującym badaniom:

- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach na próbkach sześciennych o wymiarach  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  wg PN-EN 12390-3 [26],
- odporności na działanie mrozu (stopień mrozoodporności F50 lub F25) na próbkach sześciennych o wymiarach  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  wg PN-B-06265 [27].

### 3.1.3. Wyniki badań i ich analiza

Uzyskane wyniki badania próbek o składzie według Tabl. 3 przedstawiono w Tabl. 4.

- 4) gravel 8/16 mm ( $1600 \text{ kg/m}^3$ ) – concrete mixture Dren-4,
- 5) nickel slag 8/16 mm ( $1930 \text{ kg/m}^3$ ) – concrete mixture Dren-5,
- 6) cement-bound granulated waste 10/20 mm ( $548 \text{ kg/m}^3$ ) – concrete mixture Dren-6,
- 7) recycled concrete aggregate 8/16 mm ( $1150 \text{ kg/m}^3$ ) – concrete mixture Dren-7.

The cement-bound granules used in mixture Dren-6 are produced from processed industrial waste. The raw base of the material is composed of adequately selected waste materials and subjected to preliminary processing consisting in magnetic separation of metals, sieve separation of unwanted solids and chemical treatment. The next stage of production consists in mixing of waste material composition with hydraulic binder until a plastic mass is obtained. Hardened mass is crushed and sorted.

In order to analyze the assumed freeze-thaw resistance of pervious concretes, each mixture was designed in two variants:

- without air-entraining admixture (Dren-1, Dren-2, Dren-3, Dren-4, Dren-5, Dren-6, Dren-7),
- with air-entraining admixture (Dren-1-1, Dren-2-1, Dren-3-1, Dren-4-1, Dren-5-1, Dren-6-1, Dren-7-1).

Using the materials listed above, concrete mixtures were prepared according to the adopted general design. Mixtures were prepared under laboratory conditions, using a 50-liter mixer, according to the principles presented in PN-B-06250 [25]. Standard cubic specimens were prepared in two sizes – edge lengths of 150 mm and 100 mm – and compacted on a vibrating table. Optimum time of compaction was determined experimentally in order to avoid cement paste flowing down to the bottom of the mold. Compacted specimens were cured for 28 days in a chamber at the set temperature of  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  and humidity above 90%.

### 3.1.2. Test methods

Specimens of hardened pervious concrete were subjected to the following tests:

- compressive strength after 28 days, on cubic  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  specimens according to PN-EN 12390-3 [26],
- freeze-thaw resistance (level of F50 or F25) on cubic  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  specimens according to PN-B-06265 [27].

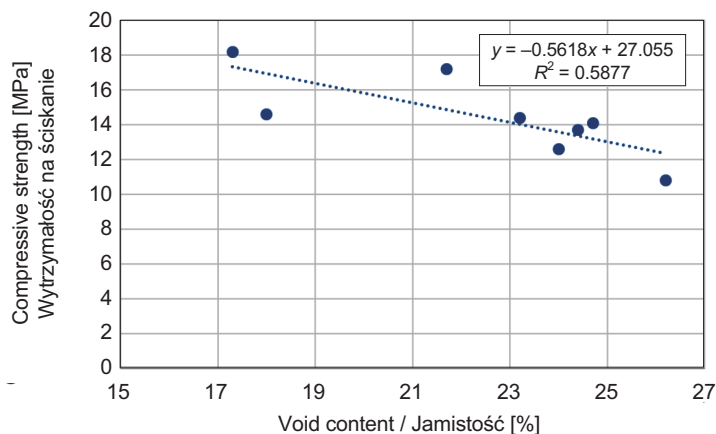


Table 4. Test results obtained for pervious concretes designed according to Table 3, using various types of aggregate

Tablica 4. Wyniki badań betonów jamistych o składzie wg Tabl. 3 z zastosowaniem różnych rodzajów kruszyw

Design no. Nr receptury	Density Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Void content Jamistość [%]	Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Freeze-thaw resistance (F50 or F25) Odporność na działanie mrozu (F50 lub F25)
Concretes with natural aggregates / Betony z kruszyw naturalnych				
Dren-1	1912	24.7	14.1	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-1-1	1951	23.2	14.4	F50 – positive result / wynik pozytywny
Dren-2	1874	26.2	10.8	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-2-1	1930	24.0	12.6	F50 – positive result / wynik pozytywny
Dren-3	1921	24.4	13.7	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-3-1	1990	21.7	17.2	F50 – positive result / wynik pozytywny
Dren-4	2050	18.0	14.6	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-4-1	2068	17.3	18.2	F50 – positive result / wynik pozytywny
Concretes with alternative aggregates / Betony z kruszyw alternatywnych				
Dren-5	2316	20.4	14.1	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-5-1	2261	22.3	10.8	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-6	1883	54.3	11.5	F25 – negative result / wynik negatywny
Dren-6-1	1720	40.1	13.0	F25 – negative result / wynik negatywny
Dren-7	1746	10.0	26.4	F50 – negative result / wynik negatywny
Dren-7-1	1825	5.9	10.2	F50 – negative result / wynik negatywny

Spośród betonów z zastosowaniem kruszyw naturalnych bez domieszki napowietrzającej największą jamistość (26,2%) uzyskał beton Dren-2 z kruszywem wapiennym. Jednocześnie beton ten charakteryzował się najniższą wytrzymałością na ściskanie (10,8 MPa). Najniższą jamistość (18,0%) uzyskał beton ze żwirem Dren-4; jednocześnie beton ten charakteryzował się najwyższą wytrzymałością na ściskanie (14,6 MPa). Jak można się było spodziewać, im większa jest jamistość, tym wytrzymałość na ściskanie badanych betonów jest mniejsza. Ilościowo zależność tę zilustrowano na Rys. 2.



### 3.1.3. Test results and their analysis

The results of tests performed on specimens designed according to Table 3 are presented in Table 4.

Among the concretes with natural aggregates and without air-entrainer, the greatest void content (26.2%) was obtained for Dren-2 concrete with limestone aggregate. At the same time, this concrete was characterized by the lowest compressive strength (10.8 MPa). The lowest void content (18.0%) was noted for the concrete with gravel Dren-4, which also reached the greatest compressive strength (14.6 MPa). Not unexpectedly, the lower the void content, the greater the compressive strength of the tested concretes. This relationship is illustrated quantitatively in Fig. 2.

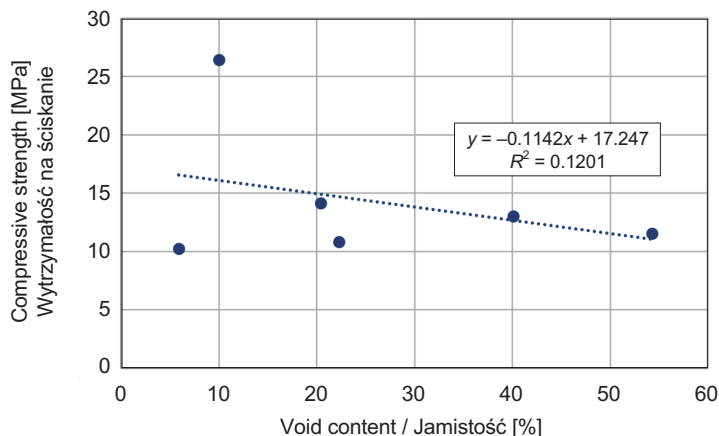
Fig. 2. Relationship between compressive strength and void content of pervious concretes with natural aggregates, designed according to Table 3

Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie od jamistości betonu przepuszczalnego z kruszywami naturalnymi o składzie wg Tabl. 3

Wszystkie betony z domieszką napowietrzającą uzyskały stopień mrozoodporności F50. Żaden beton bez domieszki nie uzyskał stopnia mrozoodporności F50.

Próby wykonania betonów przepuszczalnych z zastosowaniem kruszyw alternatywnych nie dały zadowalających rezultatów. Betony charakteryzowały się brakiem odporności na działanie mrozu dla stopnia F25, nawet z zastosowaniem domieszki napowietrzającej, a ponadto charakteryzowały się stosunkowo niską wytrzymałością.

Spośród zbadanych betonów z zastosowaniem kruszyw alternatywnych największą zawartość pustek (54,3%) uzyskał beton Dren-6 z granulatem cementowym. Najniższą zawartość pustek (5,9%) uzyskał beton Dren-7-1 z kruszywem z recyklingu betonu. Wytrzymałość na ściskanie wyniosła od 10,2 MPa do 26,4 MPa. Zależność wytrzymałości na ściskanie od jamistości przedstawiono na Rys. 3.



Dodanie domieszki napowietrzającej spowodowało poprawę mrozoodporności betonu, aczkolwiek żaden z betonów nie uzyskał zakładanego stopnia mrozoodporności: betony Dren-5, Dren-5-1, Dren-7 i Dren-7-1 – stopnia F50, a betony Dren-6 i Dren-6-1 – stopnia F25. Oględziny próbek po badaniu mrozoodporności jednoznacznie wskazują, że przyczyną braku mrozoodporności betonu było zastosowane kruszywo.

Nie uzyskano zadowalających wartości wytrzymałości na ściskanie betonów z zastosowaniem kruszyw alternatywnych zgodnie z [11], które odpowiadałyby klasie betonu B15 (C12/15) (5 serii próbek uzyskało wytrzymałości na ściskanie od 10,2 MPa do 14,1 MPa), poza betonem Dren-7 z kruszywem z recyklingu betonu (26,4 MPa), który jednak charakteryzował się niską jamistością (5,9%) i brakiem mrozoodporności. Nie stwierdzono również założonej odporności na działanie mrozu.

Wyniki badań betonów z zastosowaniem kruszywa z recyklingu betonu są zbieżne z wynikami przedstawionymi

All the concretes with air-entraining admixture obtained the freeze-thaw resistance level of F50. Not a single concrete without the admixture reached the freeze-thaw resistance level of F50.

The trials of production of pervious concretes with alternative aggregates did not lead to satisfactory results. The concretes were characterized with lack of freeze-thaw resistance at level F25, even when air-entraining admixture was used. Moreover, their strength was relatively low.

Among the tested concretes with alternative aggregates, the highest void content (54.3%) was obtained for the Dren-6 concrete with cement-bound granulated waste. The lowest void content (5.9%) was noted for the Dren-7-1 concrete with recycled concrete aggregate. Compressive strength ranged from 10.2 MPa to 26.4 MPa. Relationship between compressive strength and void content is shown in Fig. 3.

Fig. 3. Relationship between compressive strength and void content of pervious concretes with industrial by-product aggregates, designed according to Table 3  
Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie od jamistości betonu przepuszczalnego z kruszywami pochodzenia przemysłowego o składzie wg Tabl. 3

While the use of air-entraining admixture resulted in an improvement in freeze-thaw resistance, none of the concretes with alternative aggregates achieved the expected level of resistance: concretes Dren-5, Dren-5-1, Dren-7 and Dren-7-1 – the F50 level; and concretes Dren-6 and Dren-6-1 – the F25 level. Visual assessment of the specimens after freeze-thaw cycles evidently indicated that the used aggregate was the cause of the lack of frost resistance.

The obtained compressive strengths of concretes with alternative aggregates were not satisfactory according to [11], as they did not correspond to the B15 (C12/15) concrete grade (compressive strength of 5 series of specimens ranged from 10.2 MPa to 14.1 MPa) – except the Dren-7 concrete with recycled concrete aggregate (26.4 MPa). However, the Dren-7 concrete was characterized by very low void content (5.9%) and lack of frost resistance. The assumed level of freeze-thaw resistance was not reached.

The results obtained in the test for concretes containing recycled concrete aggregate are in agreement with the

w pracy [28], w której wykazano przydatność takiego kruszywa do podbudów zasadniczych z mieszanek związanych cementem, ale dopiero po ewentualnym doziarnieniu materiałem kamiennym, z uwagi na niską mrozoodporność kruszywa z recyklingu betonu.

## 3.2. ETAP II

### 3.2.1. Materiały i próbki

W drugim etapie badań doświadczalnych wybrano recepturę ramową w celu opracowania składu betonu przepuszczalnego, mrozoodpornego i przeznaczonego do wykonywania podbudów drogowych.

Wytypowano cement CEM II/B-V 32,5 R. Cement ten może być stosowany przy klasach ekspozycji XF1 i XF2 [27], czyli w środowisku umiarkowanego nasycenia wodą bez środków odladzających (XF1) i ze środkami odladzającymi (XF2). Dokumenty techniczne GDDKiA odnoszące się do podbudów drogowych z mieszanek związanych hydraulicznie [29, 30] dopuszczają stosowanie cementów wg PN-EN 197-1:2012 [31]. Założono zastosowanie kruszywa żwirowego z uwagi na powszechną dostępność tego rodzaju kruszywa oraz uzyskanie porównywalnych wyników wytrzymałości na ściskanie betonów z kruszywem łamanym i betonów z kruszywem żwirowym. Przyjęto 3 frakcje kruszywa w różnych proporcjach. Uzyskane wyniki badań będą analizowane w kolejnym etapie badań pod kątem zależności pomiędzy uziarnieniem a wytrzymałością betonu i jego jamistością. Zastosowano domieszkę napowietrzającą. Wstępne badania pokazały, że napowietrzenie mieszanki jest niezbędne do uzyskania założonego stopnia mrozoodporności F25. W opracowaniach [15-17, 32] wykazano celowość napowietrzenia betonów stosowanych w konstrukcjach drogowych, w tym także betonów jamistych [17]. Poprzez napowietrzenie betonu porowatego uzyskuje się zwiększenie trwałości mrozowej zaprawy cementowej, która spaja poszczególne ziarna kruszywa. Nie można jednak określić sumarycznej ilości i jakości wprowadzonego powietrza standardowymi metodami badawczymi z uwagi na to, że napowietrzana jest jedynie zaprawa otaczającą ziarna kruszywa.

Ramową recepturę stosowaną w II etapie podano w Tabl. 5. Według tej receptury zaprojektowano 66 różnych mieszanek. We wszystkich mieszankach przyjęto takie same ilości cementu, piasku 0/2 mm, wody i domieszki napowietrzającej, jak również stałą sumaryczną ilość kruszywa grubego. Zmienną był udział poszczególnych frakcji kruszywa grubego w stosie okruszowym. Przyjęto zmienne ilości poszczególnych frakcji kruszywa różniące się od siebie o 10%, np., 0%/10%/90%; 0%/20%/80%.

results presented in the work [28], in which such recycled aggregates were deemed potentially suitable for use in cement-bound base courses on the condition that they are used together with stone aggregate – due to low frost resistance of recycled concrete aggregate.

## 3.2. STAGE II

### 3.2.1. Materials and specimens

In the second stage of the experimental research, a general basic design was selected in order to achieve a permeable and frost-resistant concrete mixture suitable for use in road bases.

The CEM II/B-V 32.5 R cement was chosen. This type of cement may be used at exposure classes of XF1 and XF2 [27], that is in conditions of moderate water saturation, both with and without de-icing agents. Technical documents on hydraulically-bound road bases published by the General Directorate for National Roads and Highways [29, 30] allow the use of cements according to PN-EN 197-1:2012 [31]. Usage of gravel aggregate was assumed, due to wide availability of this material and comparable compressive strength results obtained for concretes with crushed aggregate and gravel aggregate. Three particle size fractions were used at different proportions. The obtained test results will be analyzed in further stages in terms of relationships between aggregate grading, concrete strength and void content. Air-entraining admixture was used. Preliminary tests have shown that air entraining is required in order to obtain the assumed level of freeze-thaw resistance: F25. Arguments for air entraining of concretes used in road structures are given in [15-17, 32], also including air entraining of pervious concretes [17]. The use of air-entraining admixture in porous concrete leads to an increase in freeze resistance of cement paste that binds individual aggregate grains. The total quantity and quality of entrainment may not be determined using typical test methods, since only the cement paste that coats the aggregate is entrained with air.

A basic general mix design used in the second stage of the research is shown in Table 5. Based on this general design, 66 different mixtures were designed. Across all the mixtures, the same quantities of cement, 0/2 mm sand, water and air-entraining admixture were assumed. The total quantity of coarse aggregate was also constant. The proportion of the three particle size fractions in the coarse aggregate mixture constituted the analyzed variable. The values changed by a step of 10%, e.g.: 0%/10%/90%; 0%/20%/80%.

Table 5. General concrete mixture design with coarse gravel aggregate of varying particle size proportions  
 Tablica 5. Ramowa receptura z grubym kruszywem żwirowym o różnym składzie granulometrycznym

Ingredient / Składnik	Content / Zawartość
Cement CEM II/B-V 32.5 R	200 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2 mm / Piasek 0/2 mm	170 kg/m <sup>3</sup>
Gravel 8/16 mm, 16/22.4 mm, 22.4/31.5 mm <sup>*)</sup> / Żwir 8/16 mm, 16/22,4 mm, 22,4/31,5 mm <sup>*)</sup>	1600 kg/m <sup>3</sup>
Water / Woda	90 kg/m <sup>3</sup>
Air-entraining admixture based on natural resins Domieszka napowietrzająca na bazie żywic naturalnych	0.2% of cement mass / masy cementu
*) varying mass proportions between fractions / zmienne proporcje masy frakcji	

Stosując te same procedury, według receptury podanej w Tabl. 5 wykonano mieszanki betonowe, a z nich normowe próbki sześciennie o krawędzi 150 mm i 100 mm, które następnie pielęgnowano w taki sam sposób, jak na I etapie badań.

### 3.2.2. Metody badań

Próbki stwardniałego betonu przepuszczalnego poddano następującym badaniom:

- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach na próbkach sześciennych o wymiarach 150 × 150 × 150 mm wg PN-EN 12390-3 [26],
- odporności na działanie mrozu (stopień mrozoodporności F50 lub F25) na próbkach sześciennych o wymiarach 100 × 100 × 100 mm wg PN-B-06250 [25].

Dodatkowo w przypadku wybranych betonów o zróżnicowanym składzie uziarnienia, które uzyskały założony stopień mrozoodporności, przeprowadzono badanie przepuszczalności wody na 3 próbkach, stosując metodykę oznaczania wskaźnika przepuszczalności gruntów zgodnie z PN-B-04492 [33]. Współczynnik filtracji określa zdolność materiału do przepuszczania wody przy istnieniu różnicy ciśnień. Metoda badania jest analogiczna do metody wg dokumentu normalizacyjnego ISO/TS 17892-11 [34]. W metodzie tej próbki poddaje się przepływowi wody. W celu obliczenia współczynnika filtracji mierzy się wartość ciśnienia po stronie napływu i objętość wody przechodzącej przez próbkę. Pomiar objętości musi być prowadzony po stwierdzeniu przepływu ustalonego. Współczynnik filtracji  $k_{10}$  określono przy przepływie wody od góry.

Współczynnik filtracji  $k_t$  przy temperaturze  $t$  [°C], wyrażony w centymetrach na minutę, oblicza się według wzoru:

$$k_t = \frac{Q}{A \cdot T \cdot i}, \quad (1)$$

w którym:

$Q$  – objętość wody [cm<sup>3</sup>], która przepłynęła przez próbkę w czasie  $T$  [min],

Using the same procedures as before, concrete mixtures were produced using the design given in Table 5 and standard cubic specimens were prepared in two sizes – edge lengths of 150 mm and 100 mm. They were compacted and cured in the same manner as during the first stage of the tests.

### 3.2.2. Test methods

Specimens of hardened pervious concrete were subjected to the following tests:

- compressive strength after 28 days, on cubic 150 × 150 × 150 mm specimens according to PN-EN 12390-3 [26],
- freeze-thaw resistance (level of F50 or F25) on cubic 100 × 100 × 100 mm specimens according to PN-B-06250 [25].

Additionally, for chosen concretes that achieved the assumed levels of freeze-thaw resistance, water permeability was tested on 3 specimens per mixture type, using the methodology of filtration coefficient measurement according to PN-B-04492 [33]. Filtration coefficient expresses the ability of the material to let water pass through at a given difference in pressure. The test method is analogous to the method presented in the document ISO/TS 17892-11 [34]. In the method, the specimens are subjected to flow of water. In order to calculate the filtration coefficient, the pressure on the inflow side and the volume of water passing through the specimen are measured. Filtration coefficient  $k_{10}$  was determined at the inflow of water from the top of the specimen.

Filtration coefficient  $k_t$  at temperature  $t$  [°C], expressed in centimeter per minute, is calculated from:

$$k_t = \frac{Q}{A \cdot T \cdot i}, \quad (1)$$

where:

$Q$  – volume of water [cm<sup>3</sup>] passing through the specimen in the time  $T$  [min],

$A$  – powierzchnia przekroju próbki [ $\text{cm}^2$ ],

$i$  – spadek hydrauliczny.

Otrzymany wskaźnik  $k_t$  należy przeliczyć w odniesieniu do temperatury  $10^\circ\text{C}$  według wzoru:

$$k_{10} = \frac{k_t}{0,7 + 0,03 \cdot t}, \quad (2)$$

gdzie:

$t$  – temperatura wody podczas badania [ $^\circ\text{C}$ ].

Dodatkowo określono także objętość i gęstość objętościową próbek betonu w stanie naturalnym oraz obliczono ich jamiistość na podstawie teoretycznej gęstości wyliczonej z ilości poszczególnych składników i ich gęstości objętościowej w odniesieniu do rzeczywistej gęstości betonu na podstawie masy i objętości zaformowanych próbek. Obliczona jamiistość obejmuje zawartość porów w betonie, w tym dużych pustek (jam) pomiędzy ziarnami kruszywa otoczonymi cienką warstwą zaprawy cementowej oraz porów w zaprawie, w tym wprowadzonych przez zastosowanie domieszki napowietrzającej.

### 3.2.3. Wyniki badań i ich analiza

Uzyskane wyniki badań próbek o składzie według Tabl. 5 przedstawiono w Tabl. 6. Analizując uzyskane wyniki badań betonów zaprojektowanych przy różnych wariantach uziarnienia kruszywa należy stwierdzić, że:

- 19 betonów nie uzyskało stopnia mrozoodporności F25,
- uzyskano wytrzymałość na ściskanie w przedziale od 5,3 MPa do 17,2 MPa,
- uzyskano jamiistość w przedziale od 17,9% do 27,5%,
- uzyskano gęstość objętościową w przedziale od  $1,83 \text{ g/cm}^3$  do  $2,07 \text{ g/cm}^3$ ,
- współczynnik filtracji betonów, które uzyskały stopień mrozoodporności F25, wyniósł od  $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  do  $12,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

Przykładowe przekroje próbek betonowych według receptur, z których uzyskano beton mrozoodporny, poddany dodatkowo badaniu współczynnika filtracji, przedstawiono na Rys. 4-13.



Fig. 4. Section through concrete design no. 5  
Rys. 4. Przekrój próbki o składzie nr 5

$A$  – area of cross-section of the specimen [ $\text{cm}^2$ ],

$i$  – hydraulic head.

The obtained coefficient  $k_t$  should be transformed to the reference temperature of  $10^\circ\text{C}$  using the following formula:

$$k_{10} = \frac{k_t}{0,7 + 0,03 \cdot t}, \quad (2)$$

in which:

$t$  – water temperature during the test [ $^\circ\text{C}$ ].

Volume and density of concrete specimens in natural state were also determined. Their void content was calculated based on the theoretical density resulting from the quantity and density of individual ingredients compared to the actual mass and volume of the obtained concrete specimens. Void content calculated in this manner incorporates the pores in the concrete: the large voids between aggregate grains coated with thin layer of cement paste and the pores in the paste itself, including the ones introduced through application of air-entraining admixture.

### 3.2.3. Test results and their analysis

The results of tests performed on specimens designed according to Table 5 are presented in Table 6. Based on the analysis of the test results obtained for concretes designed with various coarse aggregate grading proportions, it may be noted that:

- 19 concretes did not reach the frost resistance level of F25,
- compressive strength ranged from 5.3 MPa to 17.2 MPa,
- void content ranged from 17.9% to 27.5%,
- density ranged from  $1.83 \text{ g/cm}^3$  to  $2.07 \text{ g/cm}^3$ ,
- filtration coefficient of the concretes that reached the F25 frost resistance level ranged from  $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  to  $12.8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

Examples of cross-sections through concrete specimens that proved frost-resistant and were chosen for filtration coefficient measurements are shown in Figs 4-13.



Fig. 5. Section through concrete design no. 11  
Rys. 5. Przekrój próbki o składzie nr 11

Table 6. Test results of pervious concretes designed with different aggregate grading variants (general design according to Table 5)

Tablica 6. Wyniki badań betonów przepuszczalnych z zastosowaniem różnych wariantów uziarnienia (skład wg Tabl. 5)

Design no. Nr receptury	Proportion of the particle size fraction in the total content of gravel aggregate Zawartość frakcji w stosie okruszowym kruszywa żwirowego [%]			Freeze-thaw resistance level of F25 Stopień mrozoodporności F25 [0 – no / nie 1 – yes / tak]	Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Void content Jamistość [%]	Density Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Filtration coefficient Współczynnik filtracji k <sub>10</sub> [m/s]
	8/16 mm	16/22.4 mm	22.4/31.5 mm					
1	0	0	100	0	13.3	24.8	1.90	–
2	100	0	0	1	7.9	24.9	1.89	–
3	0	100	0	0	9.1	27.5	1.83	–
4	0	50	50	1	13.7	22.1	1.96	–
5	50	0	50	1	17.2	17.9	2.07	6.4 · 10 <sup>-3</sup>
6	50	50	0	0	12.7	22.0	1.97	–
7	80	0	20	1	16.1	18.9	2.04	–
8	20	0	80	1	13.3	22.6	1.95	–
9	40	0	60	1	14.5	22.2	1.96	–
10	60	0	40	0	16.3	18.7	2.05	–
11	80	20	0	1	17.2	18.7	2.05	9.2 · 10 <sup>-3</sup>
12	20	80	0	0	11.4	24.0	1.91	–
13	0	80	20	1	13.6	21.1	1.99	–
14	0	20	80	1	13.2	21.9	1.97	–
15	60	40	0	0	11.6	21.7	1.97	–
16	40	60	0	1	11.7	21.9	1.97	–
17	0	60	40	1	12.7	21.6	1.97	12.8 · 10 <sup>-3</sup>
18	0	40	60	0	11.5	23.4	1.93	–
19	60	20	20	0	12.4	22.2	1.96	–
20	20	60	20	1	13.4	21.6	1.98	–
21	20	20	60	1	11.3	22.4	1.95	–
22	40	20	40	0	12.4	21.1	1.99	–
23	20	40	20	1	10.6	24.1	1.91	–
24	20	40	40	0	11.1	23.4	1.93	–
25	80	10	10	1	14.1	21.5	1.98	8.1 · 10 <sup>-3</sup>
26	10	80	10	1	9.8	24.3	1.91	–
27	10	10	80	1	7.5	26.5	1.85	–
28	40	30	30	1	13.8	19.7	2.02	–
29	30	40	30	0	8.1	23.7	1.92	–
30	30	30	40	1	7.0	24.1	1.91	–
31	50	10	40	1	6.6	23.6	1.93	–
32	50	40	10	1	8.8	23.1	1.94	8.8 · 10 <sup>-3</sup>
33	40	50	10	1	9.4	22.3	1.96	–

Table 6 (continued). Test results of pervious concretes designed with different aggregate grading variants (general design according to Table 5)

Tablica 6 (ciąg dalszy). Wyniki badań betonów przepuszczalnych z zastosowaniem różnych wariantów uziarnienia (skład wg Tabl. 5)

Design no. Nr receptury	Proportion of the particle size fraction in the total content of gravel aggregate Zawartość frakcji w stosie okruszonym kruszywa żwirowego [%]			Freeze-thaw resistance level of F25 Stopień mrozoodporności F25 [0 – no / nie 1 – yes / tak]	Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Void content Jamistość [%]	Density Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Filtration coefficient Współczynnik filtracji $k_{10}$ [m/s]
	8/16 mm	16/22.4 mm	22.4/31.5 mm					
34	10	50	40	0	8.2	23.7	1.92	–
35	10	40	50	1	6.2	24.3	1.91	–
36	40	10	50	1	8.4	23.0	1.94	–
37	50	20	30	1	9.0	21.7	1.97	–
38	50	30	20	1	7.4	24.2	1.91	–
39	30	50	20	1	10.7	21.1	1.99	$8.8 \cdot 10^{-3}$
40	20	50	30	1	6.4	25.2	1.89	–
41	30	30	50	1	7.1	24.8	1.90	–
42	30	20	50	1	6.2	25.3	1.88	–
43	60	10	30	1	5.7	25.4	1.88	–
44	60	30	10	1	6.6	25.0	1.89	–
45	30	60	10	0	11.6	20.4	2.01	–
46	10	60	30	1	14.6	18.8	2.05	$9.4 \cdot 10^{-3}$
47	10	30	60	0	6.6	24.6	1.90	–
48	30	10	60	1	8.7	21.8	1.97	–
49	70	10	20	0	11.6	22.2	1.96	–
50	70	20	10	1	7.1	24.6	1.90	–
51	20	70	10	1	6.9	25.2	1.89	–
52	10	70	20	1	6.7	24.6	1.90	–
53	10	20	70	1	11.7	21.0	1.99	–
54	20	10	70	1	10.8	20.2	2.01	–
55	90	10	0	1	5.3	27.0	1.84	$10.2 \cdot 10^{-3}$
56	90	0	10	0	17.1	19.0	2.04	–
57	0	90	10	0	6.9	24.8	1.90	–
58	10	90	0	1	14.2	22.8	1.95	$8.8 \cdot 10^{-3}$
59	10	0	90	1	12.5	23.2	1.94	–
60	0	10	90	1	6.6	26.4	1.85	–
61	70	30	0	1	6.7	25.8	1.87	–
62	70	0	30	0	9.1	22.9	1.94	–
63	0	70	30	1	9.0	23.1	1.94	$8.1 \cdot 10^{-3}$
64	30	70	0	1	6.7	25.1	1.89	–
65	30	0	70	1	9.0	21.5	1.98	–
66	0	30	70	0	10.0	25.4	1.88	–



Fig. 6. Section through concrete design no. 17  
Rys. 6. Przekrój próbki o składzie nr 17



Fig. 7. Section through concrete design no. 25  
Rys. 7. Przekrój próbki o składzie nr 25



Fig. 8. Section through concrete design no. 32  
Rys. 8. Przekrój próbki o składzie nr 32



Fig. 9. Section through concrete design no. 39  
Rys. 9. Przekrój próbki o składzie nr 39



Fig. 10. Section through concrete design no. 46  
Rys. 10. Przekrój próbki o składzie nr 46



Fig. 11. Section through concrete design no. 55  
Rys. 11. Przekrój próbki o składzie nr 55



Fig. 12. Section through concrete design no. 58  
Rys. 12. Przekrój próbki o składzie nr 58



Fig. 13. Section through concrete design no. 63  
Rys. 13. Przekrój próbki o składzie nr 63



Analizując uzyskane wyniki badań należy stwierdzić, że uziarnienie kruszywa ma wpływ na wyniki wytrzymałości na ściskanie, jamistości i odporności na działanie mrozu, pomimo stałej ilości zaczynu cementowego.

W przypadku betonów, które nie uzyskały założonego stopnia mrozoodporności F25 zauważono, że im większy jest udział frakcji 8/16 mm, tym większa jest wytrzymałość na ściskanie, natomiast im większy jest udział frakcji 16/22,4 mm, tym wytrzymałość na ściskanie jest mniejsza. Jednocześnie stwierdzono, że jamistość maleje ze wzrostem udziału frakcji 8/16 mm, zaś wzrasta ze wzrostem udziału frakcji 16/22,4 mm.

W przypadku betonów mrozoodpornych nie było możliwe sformułowanie zależności pomiędzy uziarnieniem kruszywa a wytrzymałością na ściskanie betonu oraz pomiędzy uziarnieniem kruszywa a jamistością betonu.

Jak można się było spodziewać, im większa jest jamistość betonu, tym niższa jego wytrzymałość na ściskanie (Rys. 14). Na Rys. 15 pokazano zależność – także o spodziewanym charakterze – wytrzymałości na ściskanie od gęstości objętościowej betonu przepuszczalnego. Nie stwierdzono zależności między wytrzymałością na ściskanie a odpornością na działanie mrozu.

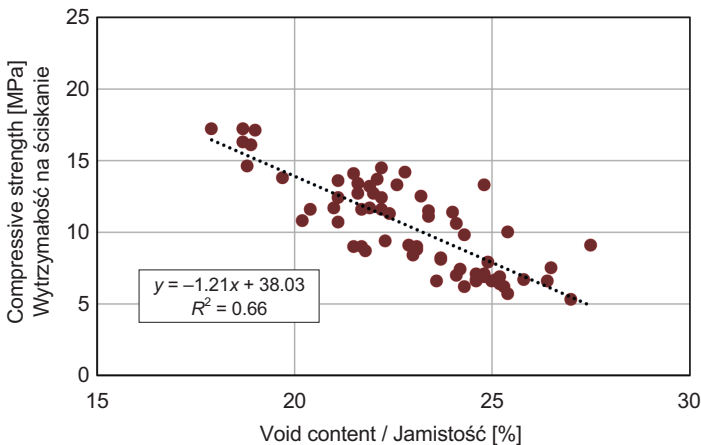


Fig. 14. Relationship between compressive strength and void content of pervious concretes with gravel aggregates, designed according to Table 5

Rys. 14. Zależność wytrzymałości na ściskanie od jamistości betonu przepuszczalnego z kruszywem żwirowym o składzie wg Tabl. 5

Uzyskano bardzo dobrą przepuszczalność mierzoną współczynnikiem filtracji  $k_{10}$ : powyżej  $10^{-3}$  m/s, a więc porównywalną do przepuszczalności gruntów naturalnych takich jak: otoczaki, żwiry, żwiry piaszczyste, grubo- i średnioziarniste piaski [35]. Nie stwierdzono wyraźnej korelacji między jamistością i współczynnikiem filtracji  $k_{10}$  (Rys.16).

Based on the analysis of the obtained results, it is observable that aggregate grading affects compressive strength, void content and frost resistance, despite the constant content of cement paste in the mixtures.

In the case of concretes that did not achieve the assumed freeze-thaw resistance level of F25, it was noted that the greater the proportion of the 8/16 mm fraction, the greater the compressive strength. On the other hand, the greater the proportion of the 16/22.4 mm fraction, the lower the compressive strength. It was also noted that void content decreases with an increase in the proportion of the 8/16 mm fraction, and increases with an increase in the proportion of the 16/22.4 mm fraction.

In the case of concretes that proved frost-resistant, it was impossible to formulate relationships between aggregate grading and compressive strength or void content.

As expected, the greater the void content of concrete, the lower its compressive strength (Fig 14). Fig. 15 presents the relationship – also of expected nature – between compressive strength and density of pervious concrete. No correlations were observed between compressive strength and frost resistance.

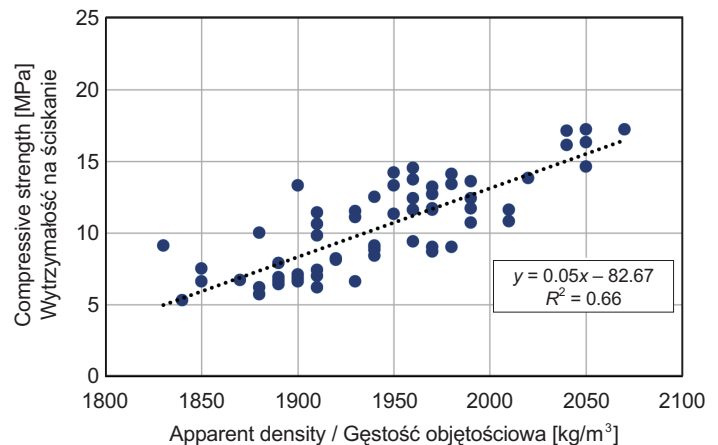


Fig. 15. Relationship between compressive strength and density of pervious concretes with gravel aggregates, designed according to Table 5

Rys. 15. Zależność wytrzymałości na ściskanie od gęstości objętościowej betonu przepuszczalnego z kruszywem żwirowym o składzie wg Tabl. 5

Very good water permeability was obtained, as expressed by the  $k_{10}$  filtration coefficient greater than  $10^{-3}$  m/s, therefore comparable with permeability of natural soils such as pebbles, gravels, sandy gravels and coarse or medium sands [35]. No evident correlations were observed between void content and filtration coefficient  $k_{10}$  (Fig.16).

## 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Do uzyskania betonu jamistego odpornego na zamrażanie i rozmrażanie niezbędne jest napowietrzenie betonu - podobnie jak w przypadku innych betonów. Wyniki badań potwierdziły zawarte w licznych opracowaniach tezy o celowości napowietrzania betonu, w tym także betonu jamistego, w zastosowaniach w konstrukcjach drogowych.
2. Uzyskane w programie badawczym zależności pomiędzy gęstością betonu a wytrzymałością na ściskanie oraz jamistością i przepuszczalnością są zbieżne z zależnościami wskazanymi w wymienionych w artykule publikacjach, chociaż z uwagi na inne ilości składników betonu otrzymano inne parametry betonu porowatego.
3. Część próbek betonowych nie uzyskała założonego stopnia mrozoodporności pomimo zastosowania domieszki napowietrzającej. Wszystkie próbki betonowe miały taką samą ilość zaczynu i były jednakowo napowietrzane. Zmienną w składzie była jedynie struktura stosu okruszowego. Przyczyny braku mrozoodporności należy upatrywać w rozkładzie kruszywa grubego, chociaż analiza uzyskanych wyników badań nie daje jednoznacznej odpowiedzi. Obecność dużych pustek pomiędzy ziarnami kruszywa może sprzyjać słabszemu połączeniu poszczególnych ziarn.
4. Podczas kolejnego etapu prac uzyskane wyniki badań będą analizowane statystycznie pod kątem zależności pomiędzy uziarnieniem a wytrzymałością betonu i jego jamistością, zaś w połączeniu z analizą przekrojów próbek – pod kątem zależności pomiędzy uziarnieniem betonu a jego odpornością mrozową.
5. Dalsze badania mogą przyczynić się do opracowania algorytmów do określania parametrów betonu porowatego do podbudów drogowych w zależności od składu ziarnowego kruszyw, jak również do uzyskania danych do projektowania podbudów z uwzględnieniem oddziaływań eksploatacyjnych oraz oddziaływań czynników klimatycznych w warunkach krajowych.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Polski Cement, Kraków, 2004
- [2] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [3] *Birmann D.*: Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau. Bau und Bewertung. Straße und Autobahn, **45**, 4, 1994, 200-209

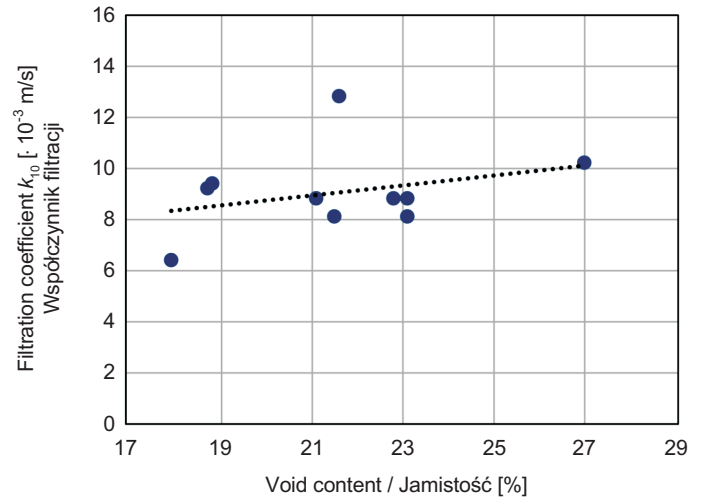


Fig. 16. Relationship between filtration coefficient  $k_{10}$  and void content of chosen variants of pervious concrete with gravel aggregates, designed according to Table 5

Rys. 16. Zależność współczynnika filtracji  $k_{10}$  od jamistości wybranych wariantów betonu przepuszczalnego z kruszywami żwirowego o składzie wg Tabl. 5

## 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

1. In order to obtain pervious concrete that is resistant to freezing and thawing, air entrainment is necessary – similarly as in the case of other concrete types. Test results have confirmed the theses presented in numerous papers regarding validity of air entrainment of concretes – including pervious concretes – used in road structures.
2. The relationships between density, compressive strength, void content and permeability of concretes obtained in the research project are in agreement with relationships noted in other publications mentioned in the article, regardless of the fact that different concrete parameters were obtained due to different quantities of ingredients used.
3. Some of the concrete specimens did not achieve the assumed level of frost resistance despite the use of air-entraining admixture. All the specimens were characterized by the same cement paste content and the same degree of air entrainment. The only variable in the design was the proportion between the fractions of coarse aggregate. Therefore, lack of frost resistance should be ascribed to coarse aggregate grading. Nevertheless, analysis of the obtained results does not lead to detection of unambiguous correlations and causes. It is possible that large air voids between individual grains of aggregate contribute to weaker connection of the grains.

- [4] *Leykauf G., Birmann D.*: Verkehrsflächen mit Betonverbundsteinpflaster und Drain-HGT, *Beton*, 4, 1994, 198-201
- [5] *Eickschen E., Siebel E.*: Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau. Technologische Untersuchungen. *Straße und Autobahn*, 45, 4, 1994, 193-199
- [6] *Nissoux J.L., Merrien P.*: Les bandes d'arrêt d'urgence en béton poreux - Étude du Matériau. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 92, 1977, 142-148
- [7] *Chevalier C., Depetrini A., Horvath S.*: Tunnel du Sinard. Une chaussée durable en béton sur l'A51. *Revue Générale Des Routes*, 862, 2007, 39-41
- [8] *Feng X., Liang F., Jiang H., Yuan J.*: Mixture Ratio Design of a Porous Concrete Base in a Tunnel Pavement Based on the Orthogonal Test. *Geotechnical Special Publications 266. Geo-China 2016: Material, Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavement*, 91-99, DOI: 10.1061/9780784480090.012
- [9] *Care F.R.A.M., Subagio B.S., Rahman H.*: Porous concrete basic property criteria as rigid pavement base layer in Indonesia. *MATEC Web of Conferences*, 147, 2018, 02008, DOI: 10.1051/mateconf/201814702008
- [10] *Jamróży Z.*: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Kraków, 2000
- [11] *Merkblatt für Dränbetontragschichten (M DBT)*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1996
- [12] *Ibrahim A., Mahmoud E., Yamin M., Patibandla V.C.*: Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 2014, 524-529, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022
- [13] *Bhutta M.A.R., Tsuruta K., Mirza J.*: Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 31, 2012, 67-73, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024
- [14] *Lian C., Zhuge Y., Beecham S.*: The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 11, 2011, 4294-4298, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005
- [15] *McCain G.N., Dewoolkar M.M.*: An Investigation into Porous Concrete Pavements for Northern Communities. Final Report. University of Vermont, Burlington, 2010
- [16] *Schaefer V., Wang K., Suleiman T., Kevern J.T.*: Mix Design Development for Portland Cement Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Iowa State University, Ames, 2006
4. Further research will consist in statistical analysis of the obtained results in terms of relationships between grading, strength and air voids. Statistical analysis combined with analysis of cross-sections of the specimens will facilitate the search for relationships between grading and freeze-thaw resistance of concrete.
5. Future research may result in development of algorithms for determination of parameters of pervious concretes for road bases, depending on aggregate grading. The obtained data may also enable road base design adapted to service and climatic factors in Polish conditions.
- [17] *Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete*. National Ready Mixed Concrete Association, 2004
- [18] *Shu X., Huang B., Wu H., Dong Q., Burdette E.G.*: Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 25, 8, 2011, 3187-3192, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002
- [19] *Kurpińska M., Wcisło A.*: Wpływ parametrów kruszywa na właściwości betonu przepuszczającego. *Konferencja „Dni Betonu”*, 2018, 547-558
- [20] *Siedlecka M., Suchocka M.*: Wodoprzepuszczalne nawierzchnie a zrównoważony rozwój terenów miejskich. *Drogoznictwo*, 72, 2, 2017, 60-67
- [21] *Mrozik Ł., Świtoński A., Lachiewicz-Złotowska A.*: Geometryczny model struktury betonów jamistych, w: *Budownictwo Ogólne, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz*, 2011, 229-236
- [22] PN-S-96013:1997 Drogi samochodowe – Podbudowa z chudego betonu – Wymagania i badania
- [23] PN-S-96014:1997 Drogi samochodowe i lotniskowe – Podbudowa z betonu cementowego pod nawierzchnię ulepszoną – Wymagania i badania
- [24] PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania. Część 1: Mieszanki związane cementem
- [25] PN-B-06250:1998 Beton zwykły
- [26] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania

- [27] PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
- [28] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 39-53, DOI: 10.7409/rabdim.018.003
- [29] Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych. D-04.05.01 Podbudowa i warstwa mrozoochronna z mieszanki związanej cementem (dokument wzorcowy). GDDKiA, Warszawa, 2019
- [30] Wymagania Techniczne WT-5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. Załącznik Nr 4 do Zarządzenia Nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19.11.2010 r.
- [31] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [32] *Glinicki M.A., Jaskulski R., Dąbrowski M.*: Design principles and testing of internal frost resistance of concrete for road structures - critical review. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 1, 2016, 21-43, DOI: 10.7409/rabdim.016.002
- [33] PN-B-04492:1955 Grunty budowlane – Badania właściwości fizycznych – Oznaczanie wskaźnika wodoprzepuszczalności
- [34] ISO/TS 17892-11:2004 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 11: Oznaczanie filtracji przy stałym i obniżającym spadku hydraulicznym
- [35] *Wiłun Z.*: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010