

**Tereza Kulovaná<sup>1</sup>, Eva Vejmelková<sup>1</sup>, Martin Keppert<sup>1</sup>, Pavla Rovnaníková<sup>2</sup>,  
Michal Ondráček<sup>2</sup>, Zbyněk Keršner<sup>3</sup>, Robert Černý<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Materials Engineering and Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Thákurova 7, 166 29 Prague 6, Czech Republic

<sup>2</sup> Institute of Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Žižkova 17, 602 00 Brno, Czech Republic

<sup>3</sup> Institute of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Veveří 95, 602 00 Brno, Czech Republic

## **Technologia betonu napowietrzonego jako efektywna metoda zwiększenia dodatku zmielonych odpadów z cegieł w cementach wieloskładnikowych**

### **Air-entrained concrete technology as an effective tool for increasing the limits of brick powder percentage in blended Portland cement binders**

**Słowa kluczowe:** beton napowietrzony, zmielone odpady z cegieł, właściwości wilgotnościowe i cieplne, trwałość

**Keywords:** air-entrained concrete, waste brick powder, mechanical parameters, hydric properties, thermal properties, durability

#### **1. Wprowadzenie**

Zadawalającą odporność na mróz i działanie środków odladzających wielu rodzajów betonu można osiągnąć, jeżeli mieszanka betonowa jest prawidłowo napowietrzona. Pory powietrzne powstają już w mieszance betonowej podczas mieszania, natomiast zastosowanie domieszek napowietrzających ma ułatwić ten proces oraz zapewnić trwałość baniec powietrznych w późniejszych okresach (1, 2). Pomimo, że beton napowietrzony jest powszechnie stosowany w praktyce budowlanej od wielu lat, należy brać pod uwagę, że wprowadzanie porów powietrznych i zapewnienie ich trwałości w młodym betonie jest problemem bardzo złożonym. Każdy składnik mieszanki betonowej, włączając w to rodzaj cementu i kruszywa, czy też ilość wody zarobowej oraz rodzaj i dodatek domieszek chemicznych, może wpływać w znacznym stopniu na strukturę porów powietrznych (3). Dlatego od czterdziestu lat prowadzono badania różnych rodzajów betonu napowietrzonego, lecz z powodu ich złożonego zachowania problem ten pozostał nie wyjaśniony w pełni zagadnieniem.

Przez ostatnie dwadzieścia lat badania dotyczące betonu napowietrzonego wytwarzanego z cementu portlandzkiego były znacznie rzadziej podejmowane niż we wcześniejszych okresach (4). Więcej uwagi poświęcano betonom o wysokiej wytrzymałości (5) oraz betonom samozagęszczającym się (6). Betony z dodatkiem pucolan były częściej badane, ponieważ wpływ pucolan na odporność na mróz oraz na działanie środków odladzających był trudny do przewidzenia. Betony napowietrzone z dodatkiem pyłu

#### **1. Introduction**

A satisfactory freeze/thaw resistance and to deicing salt resistance of many types of concrete can be achieved if the mixture contains an adequate system of air voids. They are entrained in fresh concrete already by the mixing procedure but air-entraining agents are supposed to be used for facilitating the process and stabilizing the air voids in later age (1, 2). Although the air-entrained concrete (AEC) is commonly used in the building practice for many decades, one always should take into account that the air bubble entrainment and stability in fresh concrete is a very complex problem. Each component in a concrete mixture, including the type of cement and aggregate, or the amount of water and type and dosage of admixtures, can affect the air-void system in a significant way (3). Therefore, since 1940s AEC of various types has been widely investigated by many researchers but due to its complex behavior it remained a frequently studied topic hitherto.

During the last decade or two, the studies dealing with common Portland cement AEC were, contrary to the previous periods, very rare (4). More attention was paid to the high performance (5) and self compacting (6) concrete. Pozzolan containing concretes were investigated most frequently because the effect of pozzolan on the freezing and thawing resistance and to deicing salt resistance was difficult to predict. AECs with silica fume (5-7), fly ash (8, 9), and slag (10, 11) were typical representatives of this group, but also the effects of metakaolin (12) and volcanic ash (13) were analyzed.

krzemionkowego (5-7), popiołu lotnego (8, 9) oraz granulowanego żużla wielkopieczowego (10, 11) były typowymi reprezentantami tej grupy, chociaż badano również wpływ metakaolinitu (12) oraz popiołów wulkanicznych (13).

Głównym celem stosowania betonu napowietrzonego jest poprawa odporności na mróz i/lub na działanie środków odladzających, a do najczęściej badanych czynników należą wytrzymałość na ścislenie, moduł sprężystości oraz ubytek masy, po pewnej liczbie cykli zamrażania, w określonych warunkach. Co najmniej jeden z tych czynników był badany w każdej publikacji analizującej właściwości betonu napowietrzonego. Inne parametry były znacznie rzadziej badane. Garbalińska i Wygocka (7) określiły współczynnik absorpcji wody betonu napowietrzonego i porównywały go do betonów zawierających pył krzemionkowy oraz superplastyfikator, o małym w/c. Van den Heede i in. (8) mierzyli przepuszczalność gazów betonu napowietrzonego, Ramezianpour i in. (13) badali wytrzymałość na rozciąganie oraz głębokość wnikania wody, Al-Akhras (12) badał wpływ na korozję siarczanową, Giergiczny i in. (10) określali wytrzymałość na zginanie i głębokość migracji wody, a Sisomphon i in. (11) analizowali nasiąkliwość. Badania innych właściwości różnych rodzajów betonu, a mianowicie odporność na pęknięcie, właściwości transportowe pary wodnej, lub właściwości cieplne nie były dotychczas publikowane w powszechnie dostępnych źródłach literaturowych.

Aktywność pucolanowa prażonych glin znana jest od dawna (14-16). Z tego względu mogą one zastępować część cementu portlandzkiego w betonie, gdy zostaną odpowiednio zmielone (17-19). Jednakże, nie zbadano jeszcze wszechstronnie ich wpływu na właściwości cementów wieloskładnikowych. Prawdopodobnych przyczyn można upatrywać w procesie prażenia, uzależnionym od pochodzenia i składu mineralnego glin, który może stanowić zagrożenie w technologii produkcji cementu, lub w ograniczonej dostępności glin w niektórych rejonach (20). Jednak z drugiej strony ilość odpadowych wyrobów ceramicznych, przydatnych do ponownego wykorzystania w przemyśle cementowym wzrasta w ostatnich latach, co zachęca licznych naukowców do prowadzenia badań związanych z tymi zagadnieniami (21-25).

W niniejszym artykule przedstawiono badania zastosowania zmieszanych odpadowych cegieł, jako dodatku mineralnego zastępującego część cementu portlandzkiego, w betonie napowietrzonego. Autorzy nie natrafili na opublikowaną pracę badawczą, poświęconą tej tematyce. W przeciwieństwie do większości artykułów podejmujących zagadnienie betonów napowietrzonych, które przeważnie ograniczają się do małej liczby ważnych właściwości, niniejsza praca przedstawia kompleksowe badania właściwości mieszanek betonowych. W doświadczeniach uwzględniono podstawowe właściwości fizyczne, między innymi odporność na pęknięcie, właściwości określające zdolności transportowe i sorpcyjne wody oraz właściwości cieplne, odporność na mróz i sole odladzające. Złożoność prezentowanej pracy badawczej polega ponadto na ocenie potencjalnej możliwości zastępowania dodatkiem ze zmieszanych cegieł cementu portlandzkiego w szerokim zakresie, aż do 60% masowych.

As the main purpose of designing AEC is the improvement of freezing and thawing resistance and/or to deicing salt resistance, the compressive strength, elasticity modulus and loss of mass after a prescribed number of cycles under defined conditions belong to the most frequently studied parameters; at least one of them was reported in all papers analyzing the properties of air-entrained concrete. Other parameters were much less common. Garbalińska and Wygocka (7) determined water absorption coefficient of AEC and compared it with concretes containing silica fume and superplasticizer, thus having lower w/c. Van den Heede et al. (8) measured gas permeability of AEC, Ramezianpour et al. (13) analyzed tensile strength and water penetration depth, Al-Akhras (12) studied the effects of sulfate attack, Giergiczny et al. (10) measured flexural strength and water penetration depth, and Sisomphon et al. (11) analyzed capillary water uptake. Measurements of other parameters commonly studied for other types of concrete, such as fracture-mechanical properties, water vapor transport properties, chemical resistance, or thermal properties were not reported yet in common literature sources.

Calcined clays are known to have a pozzolanic activity already for a long time (14-16). Therefore, they are suitable to replace a part of Portland cement in concrete, when they are ground to an appropriate fineness (17-19). However, they did not realize yet their full potential as blended cement constituents. The possible reasons can be the calcination process, being determined by the origin and composition of the clays, which may present a risk for cement producers, or in the limited availability of clays in some regions (20). On the other hand, the amount of waste ceramic products suitable for reuse in the cement industry increases during the last decades, which encourages a growing number of scientists in conducting an intensive research in this field (21-25).

In this paper, we present the study of the application of waste brick powder as a partial replacement of Portland cement in air-entrained concrete. Such research was never reported before in the common databases. Contrary to the majority of papers dealing with air-entrained concrete, which are mostly restricted to very few important parameters only, this paper introduces a complex view of material properties of the produced concretes. They include basic physical characteristics, mechanical and fracture-mechanical properties, hydric and thermal properties, freeze/thaw resistance and deicing salt resistance. The complexity of the presented research work is also linked with the examination of the potential of the brick powder as the mineral addition for Portland cement replacement in a wide range, even equal to 60% by mass.

## 2. Experimental methods

### 2.1. Basic physical characteristics

The water vacuum saturation method (26) was used for the measurement of bulk density  $\rho_b$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ], open porosity  $\psi$  [%  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ] and density  $\rho_{mat}$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ]. Each sample was dried in a drier to remove majority of the physical water. After that the samples were placed

## 2. Metody badań

### 2.1. Podstawowe właściwości fizyczne

Metodę nasycania wodą pod próżnią (26) zastosowano do pomiaru gęstości objętościowej  $\rho_o$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ], porowatości otwartej  $\psi$  [ $\% \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ] oraz gęstości  $\rho_{mat}$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ]. Każdą próbkę suszono w suszarce, aby usunąć większość wody fizycznej. Następnie próbki umieszczano w ekssykatorze z odpowietrzoną wodą. W przeciągu 3 godzin odciągano powietrze z ekssykatora za pomocą pompy próżniowej. Próbki następnie przechowywano pod wodą przez co najmniej 24 godziny. Zawartość wilgoci w kapilarach  $w_{cap}$  [ $\% \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ] oznaczano metodą grawimetryczną, po przetrzymywaniu próbek w wodzie przez 7 dni.

Strukturę porów oznaczano porozymetrią rtęciową; stosowano aparat Pascal 140 i 440 (Thermo Scientific). Zakres zastosowanego ciśnienia odpowiada średnicy porów od 2 nm do 2000  $\mu\text{m}$ . Ponieważ rozmiar próbek jest ograniczony do objętości wynoszącej około 1  $\text{cm}^3$ , a analizowane materiały zawierały niektóre kruszywa tych samych rozmiarów, badania porowatości przeprowadzono na próbkach bez kruszywa grubych.

Mikrostrukturę betonów z cementów z dodatkiem zmielonych odpadów z cegieł, jako zamiennika części cementu portlandzkiego, badano za pomocą elektronowej mikroskopii skaningowej. Stosowano elektronowy mikroskop skaningowy JEOL JSM-U3, o rozdzielczości 10 nm.

### 2.2. Właściwości mechaniczne

Do pomiaru wytrzymałości na ściskanie stosowano prasę hydrauliczną VEB WPM Leipzig o nacisku 3000 kN. Badania wykonano zgodnie z normą ČSN EN 12390-3 (27) po 7 i 28 dniach.

Odporność na pęknięcie mierzono stosując metodę opisaną przez Karihaloo (28), która łączy klasyczną mechanikę pęknięcia materiału sprężystego z długością rysy. Zastosowano trój-punktowe zginania próbki z centralną szczeliną o głębokości około 1/3 grubości próbki. Odległość podpór wynosiła 300 mm. Krzywą uzyskaną w wyniku pomiaru obciążenie-odkształcenie (F-d) wykorzystano do obliczenia odporności na pęknięcie. Energię pęknięcia wyznaczono z wykresu F-d, zgodnie z metodą RILEM (29).

### 2.3. Właściwości transportowe i sorpcyjne wody

Metodę zlewki zastosowano do określenia właściwości transportowych pary wodnej. Pomiar, oparte na metodzie opisanej w pracy Roelsa i in. (26), prowadzono w warunkach izotermicznych, stosując układ do liniowego pomiaru dyfuzji pary wodnej, pomiar strumienia dyfuzyjnego pary wodnej przez próbkę oraz ciśnienia parcjalego pary wodnej w powietrzu, poniżej oraz powyżej powierzchni próbki. Mierzonymi parametrami był współczynnik dyfuzji pary wodnej  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], przepuszczalność dyfuzyjna pary wodnej  $\delta$  [s] oraz współczynnik oporu dyfuzyjnego pary wodnej  $\mu$  [-].

Stosowano dwa warianty metody zlewkowej w pomiarach parametrów dyfuzji pary wodnej. W pierwszym (sucha zlewka) uszczelniony pojemnik zawierający wyprażony  $\text{CaCl}_2$  (5% W W)

into the desiccator with deaired water. During three hours air was evacuated with vacuum pump from the desiccator. The specimen was then immersed in water for not less than 24 hours. The capillary-saturation moisture content  $w_{cap}$  [ $\% \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ] was determined by the gravimetric method after this immersion for 7 days.

The pore structure was examined by mercury intrusion porosimetry. For the experiments the instrument Pascal 140 and 440 (Thermo Scientific) was used. The range of applied pressure corresponds to the pore radius from 2 nm to 2000  $\mu\text{m}$ . Since the size of the specimens is restricted to the volume of approximately 1  $\text{cm}^3$  and the studied materials contained some aggregates about the same size, the porosimetry measurements were performed on samples without coarse aggregate.

Scanning electron microscopy (SEM) was the method selected for the basic characterization of microstructural changes caused in the hardened mixes by the application of brick powder as a partial replacement of Portland cement. The scanning electron microscope JEOL JSM-U3 with 10 nm resolution was used in the experiments.

### 2.2. Mechanical and fracture-mechanical properties

The compressive strength was measured with the hydraulic testing device VEB WPM Leipzig, having a stiff loading frame with the capacity of 3000 kN. The tests were performed according to ČSN EN 12390-3 (27) after 7 and 28 days of standard curing.

The effective fracture toughness was measured using the Effective Crack Model (28) which combines the linear elastic fracture mechanics and crack length approaches. A three-point bending test of a specimen, having a central edge notch with a depth of about 1/3 of the depth of the sample, was used in the experiment. The loaded span was equal to 300 mm. A continuous record of the load–deflection (F–d) diagram was used for the calculation of effective fracture toughness. The specific fracture energy was obtained from the F–d diagram according to the RILEM method (29).

### 2.3. Hydric properties

The cup method was used for determination of water vapor transport parameters. The measurement was based on the procedure described by Roels et al. (26). It was carried out in steady state under isothermal conditions, using one-dimensional water vapor diffusion setup. The water vapor diffusion flux through the specimen at known partial water vapor pressure in the air under and above specific specimen surface was determined. The measured parameters were the water vapor diffusion coefficient  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], water vapor diffusion permeability  $\delta$  [s] and water vapor diffusion resistance factor  $\mu$  [-].

Two versions of the cup method were employed in the measurement of the water vapor diffusion parameters. In the first one (dry cup), the sealed cup containing burnt  $\text{CaCl}_2$  (5% relative humidity) was placed in a controlled climatic chamber at  $(25\pm 0.5)^\circ\text{C}$  and 50% relative humidity and weighed periodically. In the second one (wet cup), the cup containing saturated  $\text{K}_2\text{SO}_4$  solution (97% relative

umieszczono w szafie klimatycznej w temperaturze  $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  i 50% W W i cyklicznie ważono. W drugiej (mokra zlewka) pojemnik zawierający nasycony roztwór  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (97% W W) umieszczono w temperaturze  $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  oraz 50% W W. Uszczelnione pojemniki z próbkami ważono cyklicznie. W oparciu o ustalony przyrost lub ubytek masy określano właściwości transportowe próbek betonu, w przypadku pary wodnej.

Absorpcję wody wyznaczano wykorzystując normowy zestaw badawczy (30). Cztery boczne ścianki próbek uszczelniano w stosunku do wody i pary wodnej, a ścianka czołowa była zanurzona w wodzie, na głębokość 1 – 2 mm; stały poziom wody w zbiorniku zapewniało naczynie Marriotte'a z dwoma rurkami kapilarnymi. Jedna z nich, o wewnętrznej średnicy 2 mm, była umieszczona poniżej poziomu wody, druga, o wewnętrznej średnicy 5 mm, znajdowała się powyżej poziomu wody. Automatyczna waga umożliwiała zapis przyrostu masy. Współczynnik absorpcji wody  $A$  [ $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ ] obliczano z równania:

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad [1]$$

gdzie:  $i$  – skumulowana absorpcja wody [ $\text{kg/m}^2$ ],  $t$  – czas absorpcji.

Współczynnik absorpcji wody wykorzystano następnie do obliczenia dyfuzji wilgoci, korzystając z wzoru [2] podanego przez Kumarana (31):

$$\kappa_{app} \approx \left( \frac{A}{w_c - w_0} \right)^2 \quad [2]$$

gdzie:  $w_c$  – zawartość wilgoci w warunkach nasycenia [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  $w_0$  – początkowa zawartość wilgoci [ $\text{kgm}^{-3}$ ].

## 2.4. Właściwości cieplne

Przewodność cieplna  $\lambda$  [ $\text{W/mK}$ ] i ciepło właściwe  $c$  [ $\text{J/kgK}$ ] w stanie suchym i w stanie nasycenia wodą oznaczono stosując aparaturę Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). Isomet 2104 jest wielofunkcyjnym urządzeniem, które jest wyposażone w wiele różnego rodzaju opcjonalnych czujników; sondy igłowe stosowane w przypadku materiałów porowatych, włóknistych lub materiałów miękkich, a sondy powierzchniowe w przypadku materiałów twardych. Pomiar opiera się na analizie zmian temperatury materiału pod wpływem przepływu ciepła. Przepływ ciepła jest wywołany poprzez grzanie elektryczne za pomocą podgrzewacza oporowego, posiadającego bezpośredni kontakt cieplny z powierzchnią próbki.

## 2.5. Badania trwałości

Odporność na mróz badano zgodnie z normą ČSN 73 1322/Z1 (32), po 28 dniach przechowywania próbek w warunkach normowych. Stosowano 100 cykli zamrażania i rozmrażania. Jeden cykl obejmował 4 godziny zamrażania w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  i 2 godziny rozmrażania w ciepłej wodzie, w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ . Współczynnik odporności na mróz  $K$  określano, jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania do wytrzymałości próbek referencyjnych, dojrzewających w warunkach normowych.

humidity) was placed in  $(25\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$  and 50% relative humidity environment. The sealed cups with samples were weighed periodically. The steady state values of mass gain or mass loss were utilized for the determination of water vapor transport properties.

Water absorption was analyzed using a standard experimental setup (30). The specimen was water and vapor-proof insulated on four lateral sides and the face side was immersed 1 - 2 mm in the water. Constant water level in tank was achieved by a Marriotte bottle with two capillary tubes. One of them, of inside diameter 2 mm, was ducked under the water level, the second, of inside diameter 5 mm, was above water level. The automatic scale allowed recording the increase of mass. The water absorption coefficient  $A$  [ $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ ] was then calculated using the formula:

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad [1]$$

where  $i$  is the cumulative water absorption [ $\text{kg/m}^2$ ],  $t$  is the time from the beginning of the suction experiment. The water absorption coefficient was then employed for the calculation of the apparent moisture diffusivity in the form (31):

$$\kappa_{app} \approx \left( \frac{A}{w_c - w_0} \right)^2 \quad [2]$$

where  $w_c$  is the saturated moisture content [ $\text{kgm}^{-3}$ ] and  $w_0$  the initial moisture content [ $\text{kgm}^{-3}$ ].

## 2.4. Thermal properties

The thermal conductivity  $\lambda$  [ $\text{W/mK}$ ] and specific heat capacity  $c$  [ $\text{J/kgK}$ ] in dry and water saturated state were measured using the commercial device Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). Isomet 2104 is a multifunctional instrument which is equipped with various types of optional probes; needle probes are for porous, fibrous or soft materials and surface probes are suitable for hard materials. The measurement is based on analysis of the temperature response of the analyzed material to heat flow impulses. The heat flow is induced by electrical heating using a resistor heater, having a direct thermal contact with the surface of the sample.

## 2.5. Durability tests

Frost resistance were tested according to ČSN 73 1322/Z1 (32), after 28 days of standard curing. The test embraced 100 freezing and thawing cycles. One cycle consisted of 4 hours freezing at  $-20^{\circ}\text{C}$  and 2 hours thawing at  $20^{\circ}\text{C}$  in warm water. Frost resistance coefficient,  $K$ , was determined as the ratio of compressive strength of specimens, subjected to 100 freezing and thawing cycles, to the strength of reference samples, cured in standard conditions.

The resistance of concretes against the deicing salts was measured according to ČSN 731326/Z1 (33). The specimens were water saturated and immersed in 3% NaCl solution. Then, 100 freezing and thawing cycles were applied. In one cycle the tested specimen was cooled at first in an automatic conditioning device from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $-15^{\circ}\text{C}$  during 45 minutes, then it was kept at  $-15^{\circ}\text{C}$  for 15 minu-

Odporność betonów na działanie soli odladzających określano zgodnie z normą ČSN 731326/Z1 (33). Próbki nasycano wodą i umieszczano w wannie, w 3% roztworze NaCl, po czym poddawano je 100 cyklom zamrażania i rozmrażania. Jeden cykl obejmował kolejno ochłodzenie próbki w automatycznym urządzeniu z 20°C do -15°C w ciągu 45 minut, przetrzymywanie przez 15 minut w temperaturze -15°C, podgrzewanie do 20°C w ciągu 45 minut i przetrzymywanie w tej temperaturze przez 15 minut. Po kolejnych 25 cyklach próbki wyjmowano z wanny, oznaczano ubytek masy spowodowany odpryskami materiału z powierzchni, wymieniano roztwór NaCl i ponownie umieszczano próbki w wannie.

### 3. Materiały i próbki

Betony napowietrzane wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, którego powierzchnia właściwa cementu wynosiła 341 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, a skład chemiczny podano w tabelicy 1. Część cementu (od 10 do 60% masowych) zastąpiono odpadową cegłą dziurawką zmieloną do powierzchni właściwej 271 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>. Skład chemiczny tych odpadów podano w tabelicy 2. Jako kruszywo grube zastosowano łamany granodioryt (Olbramovice, 2640 kg/m<sup>3</sup>), a jako kruszywo drobne żwir rzeczny (Žabčice, 2580 kg/m<sup>3</sup>). Jako domieszkę napowietrzającą zastosowano Mapeplast PT1.

Skład betonów napowietrzonych podano w tabelicy 3, a właściwości mieszanek betonowych w tabelicy 4. Zachowywano tę samą ilość wody we wszystkich mieszankach, zatem stosunek woda/spoiwo był także stały. Konsystencję mieszanek badano opadem stożka zgodnie z normą ČSN EN 12350-2 (35), przy czym wymiary stożka wynosiły: górna średnica 100 mm, dolna średnica 200 mm, wysokość 300 mm. Ponieważ urabialność mieszanek malała wraz ze wzrostem zawartości zmielonej cegły, zwiększano dodatek plastyfikatora do próbek, w których ta zawartość wynosiła 40% i 60%. Pomimo tego, opad stożka był mniejszy w przypadku tych mieszanek (tablica 4).

Pomiary właściwości materiałowych próbek betonowych przeprowadzono po 28 dniach normowego przechowywania (chyba, że podano inaczej). Próbki dojrzewały w klimatyzowanej komorze, w temperaturze 22°C ± 1 oraz wilgotności względnej 25 - 30%. Do badań stosowano następujące próbki: gęstość objętościowa i właściwa, porowatość otwarta, oraz zawartość wilgoci w warunkach nasycenia kapilar – 6 próbek 50 x 50 x 50 mm, rozkład wielkości porów – 2 próbki ~ 40 x 40 x 10 mm, wytrzymałość na ściskanie – 3 próbki 150 x 150 x 150 mm, odporność na kruche pękanie – 3 próbki 100 x 100 x 400 mm, właściwości transportowe pary wodnej – 6 próbek 150 x 150 x 20 mm, właściwości transportowe wody – 5 próbek 100 x 100 x 20 mm, właściwości cieplne – 3 próbki 70 x 70 x 70 mm, mrozoodporność – 3 próbki 100 x 100 x 400 mm, odporność na działanie soli odladzających – 3 próbki 100 x 100 x 400 mm.

tes, subsequently heated to 20°C during 45 minutes and kept 15 minutes at this temperature. After 25 cycles the specimens were removed from the bath, the mass of scaled-off particles from the surface was determined, the NaCl solution was replaced by a new one and specimens were placed into the bath again.

### 3. Materials and samples

The air-entrained concrete mixes were prepared using Portland cement CEM I 42.5 R as the main binder. Its specific surface area was 341 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, and the chemical composition is given in Table 1. A part of cement (10 - 60% by mass) was replaced by red-brick powder with the specific surface area of 271 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, originating from the hollow-brick production as a waste material. Its chemical composition is shown in Table 2. Crushed granodiorite was used as coarse aggregate (Olbramovice, 2640 kg/m<sup>3</sup>), river sediments as fine aggregate (Žabčice, 2580 kg/m<sup>3</sup>). Mapeplast PT1 was applied as the air-entraining agent.

The composition of the air-entrained concrete mixtures is presented in Table 3, and their properties are given in Table 4. In the mix

Table 1 / Tablica 1

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT

CHEMICKÝ SKLAD CEMENTU

Component	Content, %
SiO <sub>2</sub>	18.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.83
CaO	62.37
MgO	0.99
SO <sub>3</sub>	2.31
Difference	3.81
Loss on ignition	1.52

Table 2 / Tablica 2

CHEMICAL COMPOSITION OF BRICK POWDER

SKLAD CHEMICKÝ ZMIELONYCH ODPADŮ Z CEGLY

Component	Content, %
SiO <sub>2</sub>	54.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.77
CaO	11.14
MgO	3.63
SO <sub>3</sub>	2.07
Na <sub>2</sub> O	1.27
K <sub>2</sub> O	3.08
TiO <sub>2</sub>	0.55
MnO	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17
Loss on ignition	0.00

Table 3 / Tablica 3

## COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES

## SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

Component	Content, kgm <sup>-3</sup>				
	AR	AC 10	AC 20	AC 40	AC 60
CEM I 42.5 R	385	347	308	231	154
Aggregate 0-4 mm	775	775	775	775	775
Aggregate 4-8 mm	175	175	175	175	175
Aggregate 8-16 mm	770	770	770	770	770
Water	124	124	124	124	124
Dynamon SX 14	3.4	3.4	3.4	4.0	4.0
Mapeplast PT1	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Brick powder	-	38 (10%)	77 (20%)	154 (40%)	231 (60%)

## 4. Omówienie wyników badań

## 4.1. Podstawowe właściwości fizyczne

Gęstość objętościowa malała stosunkowo szybko wraz ze wzrastającą zawartością proszku ceglanego w mieszance (tablica 5); różnica pomiędzy betonem z 60% dodatkiem proszku ceglanego (AC 60) a betonem odniesienia (AR) wynosiła ~ 13%. Natomiast, gęstość właściwa również malała, a różnica pomiędzy betonem AR i AC 60 wynosiła ~ 12%. Dlatego wzrost porowatości otwartej z uwagi na zastosowanie proszku ceglanego w matrycy był powolny i wynosił tylko ~ 6% w przypadku AC 40, a ~ 12% dla AC 60, w porównaniu z AR. Zawartość wilgoci w warunkach nasycenia kapilarnego (tablica 5) wzrosła tylko w przypadku AC 10. W następnych próbkach malała, aby osiągnąć w próbce AC 60 spadek o około 20%, w stosunku do AR. Ta niezgodność z porowatością otwartą była prawdopodobnie spowodowana uwięzionym powietrzem w martwych końcach porów, w trakcie zanurzenia próbek w wodzie.

Przebieg krzywych rozkładu wielkości porów był zbliżony aż do 40% zawartości proszku ceglanego w spoiwie, z pierwszym maksimum przy około 50 - 60 nm i drugim przy około 1 - 2 μm (rysunek 1). W przypadku betonu AC 60 wystąpiło dodatkowe maksimum przy około 200 nm, natomiast maksimum przy około 2 μm uległo zmniejszeniu. Wskazywało to na zagęszczenie mikrostruktury próbki AC 60, w porównaniu z próbkami innych betonów, co zostało potwierdzone obserwacjami pod elektronowym mikroskopem skaningowym (rysunki 2 a-e).

Tablica 4 / Table 4

## WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

## PROPERTIES OF THE CONCRETE MIXTURES

Concrete/property	AR	AC 10	AC 20	AC 40	AC 60
Slump, mm	150	160	140	120	100
Air content, %	8.0	6.5	7.5	8.0	7.5
Bulk density, kg m <sup>-3</sup>	2300	2280	2240	2240	2260

Tablica 5 / Table 5

## PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE

## BASIC PHYSICAL PROPERTIES

Concrete	Bulk density	Density	Ψ	w <sub>cap</sub>
	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	% m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	% m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
AR	2172	2540	13.8	13.3
AC 10	2030	2363	14.1	13.8
AC 20	2029	2368	14.3	13.5
AC 40	1994	2302	14.6	12.1
AC 60	1885	2231	15.5	10.5

design, the water content was constant in all mixtures, so that the water/binder ratio did not affect the comparison of their properties. The consistency was monitored with the slump test according to ČSN EN 12350-2 (35), using a conical mold (upper diameter 100 mm, lower diameter 200 mm, height 300 mm). The result of the slump test (in mm) was the difference between the height of the mold and the upper surface level of the specimen after the test. As the workability of the mixtures decreased with the increasing amount of brick powder, the plasticizer dosage was increased for

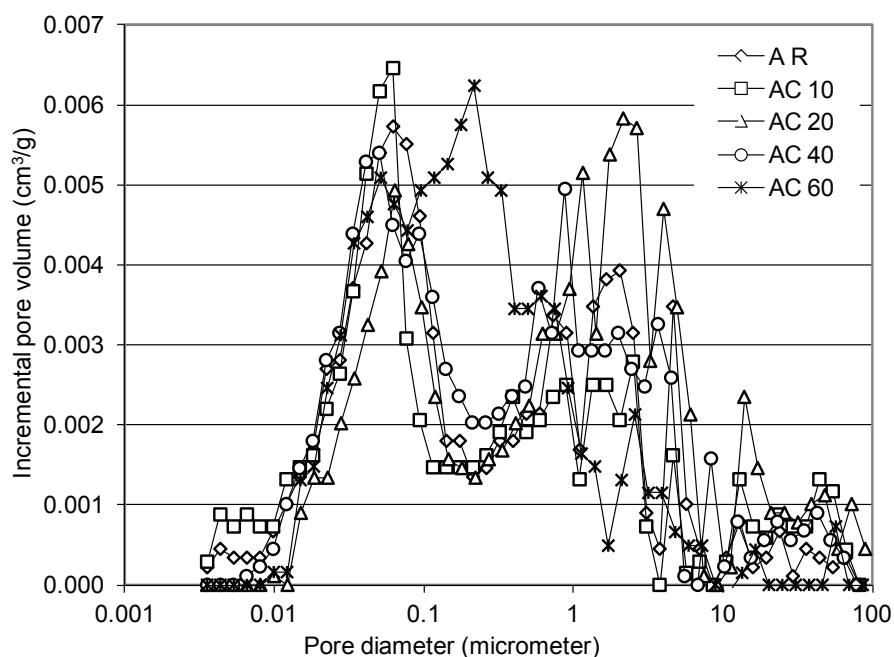


Fig. 1. Pore size distribution

Rys. 1. Krzywe udziału objętościowego porów

Najwidoczniej powodem zaobserwowanych zmian w podstawowych właściwościach fizycznych, spowodowanych wzrostem zawartości proszku z odpadowych cegieł była jego podwójna rola w betonie. Jak wykazano w badaniach Tydlitát i in. (36) w pierwszym tygodniu po sporządzeniu betonu bezpośredni wpływ proszku z czerwonej ceramiki na proces hydratacji jest mały, co przejawia się podobnym ciepłem hydratacji tylko do około 20% zastąpienia cementu portlandzkiego; dla większej zawartości proszku ceramicznego jego aktywność, jako spoiwa szybko maleje. Część proszku ceramicznego może później uczestniczyć w reakcji pucolanowej z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (16). Jednakże, w przypadku spoiw wielokładnikowych, z dużą zawartością zmielonych odpadów ceramicznych, zawsze pozostaje pewna jej ilość, która może pełnić rolę bardzo drobnego wypełniacza, uzupełniającego krzywą ziarnową kruszywa. W betonowych badanych w niniejszej pracy wpływ ten najwyraźniej zaznaczył się w betonie AC 60; zagęszczenie jego mikrostruktury było spowodowane wypełnieniem pustek drobnymi cząstkami proszku ceramicznego.

#### 4.2. Właściwości mechaniczne i odporność na pękanie

Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach malała wraz ze wzrostem zawartości proszku z odpadowych cegieł w betonie, niemal w sposób liniowy (tablica 6); różnica wynosząca około 25% w stosunku do AR wystąpiła w przypadku próbki AC 60. Ten wpływ utrzymał się również w odniesieniu do wytrzymałości po 28 dniach, z tym że różnice były mniejsze, dochodzące do około 10%, co było prawdo-

Tablica 6 / Table 6

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE, MPa

COMPRESSIVE STRENGTH, MPa

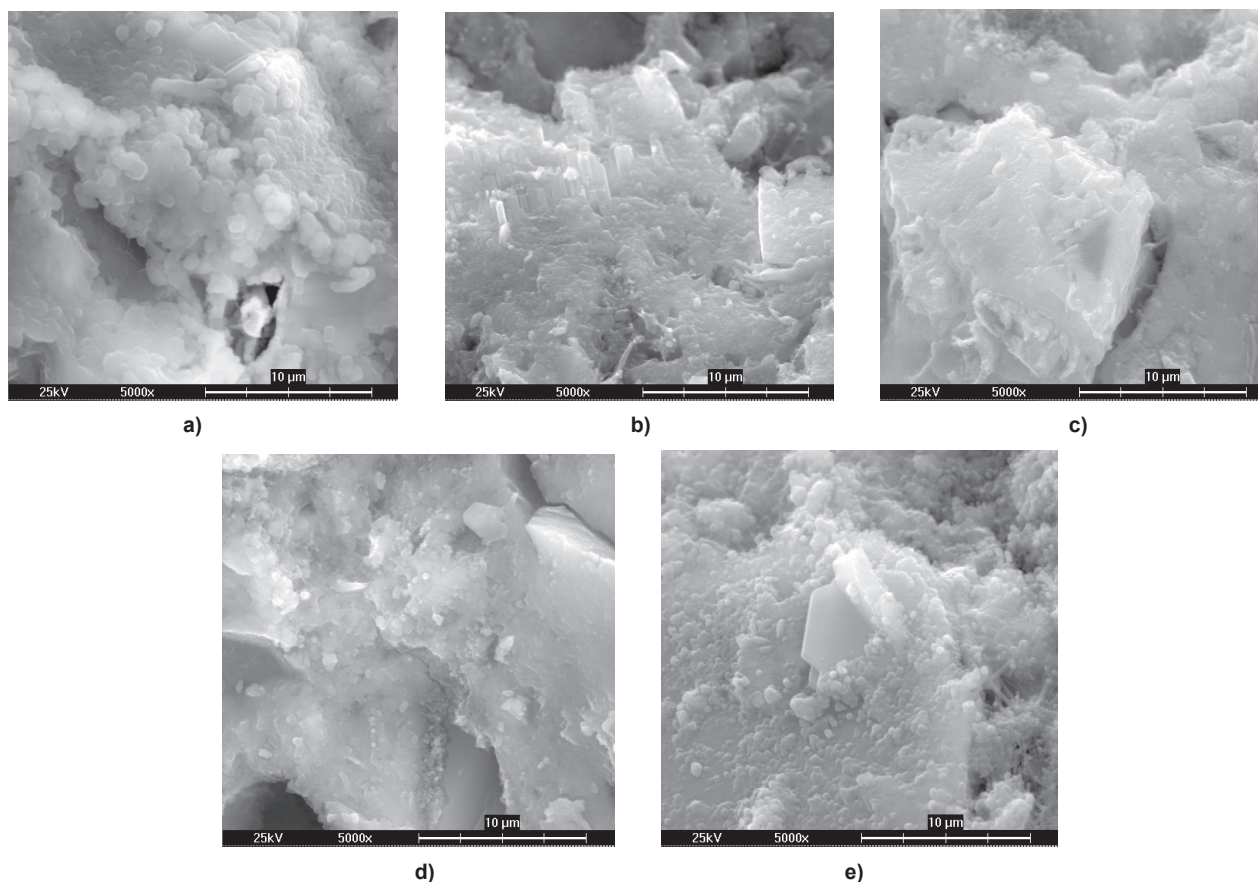
Concrete	7 days	28 days
AR	32.5	43.0
AC 10	31.7	41.2
AC 20	28.9	40.1
AC 40	26.9	38.9
AC 60	24.5	38.6

Tablica 7 / Table 7

ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE

FRACTURE-MECHANICAL PROPERTIES

Concrete Beton	Effective fracture toughness Odporność na pękanie MPam <sup>1/2</sup>	Specific fracture energy Energia pękania, Jm <sup>-2</sup>
AR	1.26	147
AC 10	1.02	125
AC 20	1.06	115
AC 40	0.99	129
AC 60	1.39	167



Rys. 2. Mikrostruktura próbek betonu

Fig. 2. Microstructure under SEM : a) AR, b) AC 10, c) AC 20, d) AC 40, e) AC 60

podobnie spowodowane zapoczątkowaniem reakcji pucolanowej, już w okresie pomiędzy 7 i 28 dniem. Dlatego można wnioskować, że z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie wszystkie betony napowietrzane, w których część cementu portlandzkiego została zastąpiona proszkiem z odpadowych cegieł, aż do 60%, miały dobre właściwości inżynierskie.

Porównanie z poprzednimi pracami, obejmującymi betony lub zaprawy ze spoiw wieloskładnikowych, złożonych z cementu portlandzkiego i proszków ceramicznych, wykazuje, że wartość graniczna korzystnego stosowania proszku z odpadowych cegieł, oceniana zmniejszeniem wytrzymałości na ściskanie, była we wszystkich tych badaniach znacznie mniejsza od poziomu sześćdziesięcioprocentowego zastępowania cementu portlandzkiego, stwierdzonego w niniejszych badaniach. Toledo Filho i in. (17) ustalili, w przypadku dwóch rodzajów betonu o wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  40 i 55 MPa, wartość graniczną wynoszącą 20%. O'Farrell i in. (37) badając zaprawy o wysokiej wytrzymałości [ $f_c \sim 60 - 65$  MPa] oraz Vejmelková i in. (22) w przypadku BWW o tej samej wytrzymałości znaleźli tę samą wartość graniczną, wynoszącą 20%. Przyczynę obserwowanych różnic należy upatrywać w technologii produkcji betonu. W przeciwieństwie do betonów objętych badaniami przez cytowanych autorów (17, 22 i 37), które zaprojektowano tradycyjnie, z obliczoną zawartością powietrza w mieszance betonowej na poziomie  $\sim 1 - 2\%$ , mieszanki betonu napowietrzonego w tym artykule, z zawartością powietrza  $\sim 7 - 8\%$  (tablica 4), zawierały dużą objętość równomiernie rozmieszczonych banieczek powietrza, już w początkowych fazach hydratacji. Dlatego część proszku z cegieł, która nie wzięła udziału w reakcji pucolanowej, mogła spełniać rolę wypełniacza i jej drobne cząstki prawdopodobnie częściowo wypełniały pory w strefie przejściowej z kruszywem, rekompensując tym samym w pewnym stopniu zmniejszoną zawartość cementu portlandzkiego.

Odporność na pękanie w przypadku wszystkich betonów zawierających proszek z cegieł (za wyjątkiem AC 60) była mniejsza w porównaniu z betonem odniesienia AR (tablica 7); w przypadku odporności na pękanie spadek wynosił 19, 16 i 21% odpowiednio dla AC 10, AC 20 i AC 40. Natomiast energia pękania tych samych betonów zmniejszyła się odpowiednio o 10, 8 i 13%. Natomiast próbki betonu AC 60 wykazały 10% wzrost odporności na pękanie i 14% wzrost energii pękania. Wyniki te dobrze korelują z zagęsz-

the cement replacement levels of 40% and 60%. Nevertheless, the slump was still lower than that of the other mixes (Table 4).

The material parameters of hardened concretes were examined (unless stated otherwise) after 28 days of standard curing. It took place in a conditioned laboratory at the temperature of  $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and 25 - 30% relative humidity. The following specimens were used in the experiments: for bulk density, open porosity, matrix density and capillary-saturation moisture content - 6 specimens  $50 \times 50 \times 50$  mm; for pore distribution - 2 specimens  $\sim 40 \times 40 \times 10$  mm, compressive strength - 3 specimens  $150 \times 150 \times 150$  mm, fracture-mechanical properties - 3 specimens  $100 \times 100 \times 400$  mm, water vapor transport - 6 specimens  $150 \times 150 \times 20$  mm, water transport - 5 specimens  $100 \times 100 \times 20$  mm, thermal properties - 3 specimens  $70 \times 70 \times 70$  mm, frost resistance - 3 specimens  $100 \times 100 \times 400$  mm, deicing salts resistance - 3 specimens  $100 \times 100 \times 400$  mm.

## 4. Experimental results and discussion

### 4.1. Basic physical characteristics

The bulk density decreased relatively fast with the increasing amount of brick powder in the mix (Table 5); the difference between the concrete with 60% brick powder (AC 60) and the reference concrete (AR) was  $\sim 13\%$ . However, the matrix density also decreased and the difference between AR and AC 60 was of  $\sim 12\%$ . Therefore, the increase of open porosity, due to the addition of brick powder to the mix, was relatively low, only  $\sim 6\%$  for AC 40 and  $\sim 12\%$  for AC 60, as compared with AR. The capillary-saturation moisture content (Table 5) increased only for AC 10. Then, it began to decrease so that for AC 60 it was already  $\sim 20\%$  lower than for AR. This disagreement with the open porosity could be probably explained by the trapping of air in dead-end pores, at the water-immersion experiment.

The pore size distribution curves was similar for brick powder content in the binder, up to 40%, with the first peak on the curve at  $\sim 50 - 60$  nm and the second at  $\sim 1 - 2$   $\mu\text{m}$  (Fig. 1). The curve of AC 60 mix exhibited an additional peak at  $\sim 200$  nm while the peak at  $\sim 2$   $\mu\text{m}$  was diminished. This indicated a compaction of the AC 60 microstructure in a comparison with the other hardened

mixes, which was confirmed then by the SEM analysis (Figs. 2a-e).

The apparent reason for the observed changes in the basic physical properties caused by the increasing dosage of brick powder was its dual role in the concrete mixes. As it was reported by Tydlitát et al. (36), during the first week of hydration the direct involvement of

Tablica 8 / Table 8

TRANSPORT PARY WODNEJ

WATER VAPOR TRANSPORT PROPERTIES

Concrete	5/50%			97/50%		
	$\delta$	$D$	$\mu$	$\delta$	$D$	$\mu$
	s	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$	-	s	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$	-
AR	1.49E-12	2.04E-07	112.52	2.20E-12	3.02E-07	76.07
AC 10	1.58E-12	2.16E-07	106.55	2.45E-12	3.36E-07	69.02
AC 20	1.64E-12	2.25E-07	102.27	2.59E-12	3.56E-07	64.62
AC 40	1.66E-12	2.29E-07	100.56	2.78E-12	3.82E-07	60.17
AC 60	1.70E-12	2.34E-07	98.39	2.83E-12	3.90E-07	59.08



czeniu mikrostruktury mieszanki AC 60 (w porównaniu z innymi mieszankami), co pokazano na rysunkach 1 i 2.

### 4.3. Dyfuzja pary wodnej i wody oraz jej absorpcja

Współczynnik dyfuzji pary wodnej wzrastał z rosnącym dodatkiem proszku z cegieł w mieszance, zarówno w badaniach metodą suchej zlewki (aż o 15%) oraz mokrej zlewki (aż o 30%) [tablica 9]. Wyniki te zgadzały się dobrze ze wzrastającą porowatością otwartą [tablica 6]. Dyfuzja pary wodnej była szybsza w pomiarach mokrą zlewką, co było związane z częściowym transportem wody, która uległa kondensacji w kapilarach, w warunkach wysokiej wilgotności względnej. Otrzymane wyniki zgadzały się jakościowo z pomiarami przepuszczalności tlenu Pacheco-Torgal i Jalali [21], którzy wykazali jej 10% wzrost w betonie z 20% dodatkiem proszku z cegieł.

Współczynnik absorpcji wody oraz dyfuzja wilgoci malały wraz ze wzrastającym dodatkiem proszku z cegieł (tablica 9). Ten wynik, pomimo braku zgodności ze stwierdzonym zwiększeniem porowatości otwartej, korelował dobrze ze zmniejszeniem zawartości wilgoci w nasyconych wodą kapilarach (tablica 5). Ponadto można to łączyć z obecnością martwych zakończeń porów w próbkach betonu z dużą zawartością proszku z cegieł. Równocześnie jednak zmiany w rozkładzie porów mogą odgrywać ważną rolę; próbki betonu z mniejszym dodatkiem proszku z cegieł (AC 10 i AC 20) miały więcej dużych porów w zakresie 10 – 100  $\mu\text{m}$  (rysunek 1) niż beton z większą zawartością proszku (AC 40 i AC 60). W przypadku AC 60 innym ważnym czynnikiem była mniejsza sumaryczna objętość porów kapilarnych, co przejawiało się zmniejszeniem maksimum na krzywej przy 2  $\mu\text{m}$ , pojawieniem się nowego maksimum przy 200 nm i praktycznie brakiem porów w zakresie 10 – 100  $\mu\text{m}$  (rysunek 1). Zmniejszenie zawartości porów kapilarnych spowodowało zatem spowolnienie transportu wody.

Badania właściwości transportowych wody, opublikowane przez innych autorów; Toledo Filho i in. (17) stwierdzili zmniejszenie sorpcyjności wody przez zaprawy wraz ze wzrastającą ilością zmielonej cegły, zastępującej aż do 40% masy cementu. Pacheco-Torgal i Jalali (21) zmierzili 10% spadek przepuszczalności betonu z 20% dodatkiem zmielonych cegieł. Obserwacja ta zgadza się jakościowo z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy.

### 4.4. Właściwości cieplne

Przewodność cieplna w stanie suchym malała wraz ze wzrastającym dodatkiem proszku z cegieł (tablica 10), co było zgodne ze wzrastającą porowatością otwartą (tablica 5). Ciepło właściwe wykazało odwrotną tendencję; w przypadku AC 60 było o około 25% większe niż próbki AR (tablica 10). Taki wynik można łączyć z większym ciepłem właściwym ceramiki czerwonej [1040 J/kgK według (38)]. Przewodność cieplna w stanie kapilarnego nasycenia wodą była o około 50 - 60% większa niż w stanie suchym, co było spowodowane obecnością wody w porach (tablica 11). Wraz ze wzrastającą zawartością proszku z cegieł malała ona szybciej niż w stanie suchym. Było to związane ze zmniejszeniem zawartości wilgoci w stanie nasycenia kapilar (tablica 5) oraz ze wzrostem objętości powietrza, pozostającego w martwych końcach porów

red ceramic powder in the hydration process, as manifested by the hydration heat evolution, is limited approximately to 20% of Portland cement replacement level; for higher ceramics content its effectiveness as a binder decreases fast. An additional part of the ceramic powder can then be consumed by the pozzolanic reaction with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (16). However, for the blended binders with high ceramics contents there is still its certain amount available which can fulfil a role of the very fine filler. In the concrete analyzed in this paper this effect was the most distinct in the AC 60 mix; the compaction of its microstructure was clearly due to the filling of the voids by the fine ceramics particles.

### 4.2. Mechanical and fracture-mechanical properties

The compressive strength after 7 days decreased with the increase of the brick powder content in the mix in an almost linear way [Table 6]; the difference of ~ 25% was observed between AR and AC 60. This basic trend was maintained also for the 28-days strength but the differences were much lower, only up to ~ 10%, which was an apparent consequence of the initiation of the pozzolanic reaction already in the period from 7 to 28 days. Therefore, it could be concluded that from the point of view of compressive strength all AEC mixes containing brick powder as a partial replacement of Portland cement up to 60% by mass were suitable for practical application.

A comparison with the previous studies, dealing with concrete or mortar based on the Portland cement with ceramic powder blends, shows that the limit for the effective use of the ground bricks, on the basis of compressive strength decrease, was in all cases much lower than the 60% Portland cement replacement level found in

Tablica 9 / Table 9

#### TRANSPORT WODY

#### WATER TRANSPORT PROPERTIES

Concrete	A	$K_{app}$
	$\text{kg m}^2\text{s}^{-1/2}$	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
AR	0.0145	8.404E-09
AC 20	0.0133	8.340E-09
AC 10	0.0127	8.075E-09
AC 40	0.0123	7.948E-09
AC 60	0.0121	7.067E-09

Tablica 10 / Table 10

#### WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE W STANIE SUCHYM

#### THERMAL PROPERTIES IN DRY STATE

Concrete	$\lambda$	c
	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
AR	1.450	787
AC 10	1.497	826
AC 20	1.327	851
AC 40	1.293	843
AC 60	1.213	980

po nasyceniu kapilar. Ciepło właściwe w stanie nasycenia kapilar wodą było aż do 40% większe niż w stanie suchym, natomiast nie stwierdzono wyraźnego związku z ilością proszku z cegieł w mieszance (tablica 11). Można to tłumaczyć mniejszą dokładnością pomiaru ciepła właściwego w zastosowanej metodzie impulsowej, która wynosiła  $\pm 10\%$  (38).

#### 4.5. Trwałość

Odporność na mroz wszystkich betonów napowietrzonych była znakomita (tablica 12). Współczynnik mrozoodporności wzrastał ze zwiększeniem proszku z odpadowych cegieł aż do 40% dodatku, a w przypadku AC 60 był zbliżony do AC 20. Te wyniki wykazały pełne powodzenie opracowanego składu betonu. Ubytek masy spowodowany działaniem soli odładzających wzrastał powoli ze zwiększaniem dodatku proszku z cegieł, aż do 40%, jednak zmierzone wielkości można zaklasyfikować, jako zadowalające dla trwałego betonu (tablica 13). Jednakże AC 60 nie spełniał podstawowego kryterium odporności na środki odładzające; jego ubytek masy był około cztery razy większy niż w przypadku AC 40. Było to prawdopodobnie związane z brakiem większych porów w AC 60, w porównaniu do pozostałych mieszanek (rysunek 1). Należy jednak zaznaczyć, że warunki badania odporności na środki odładzające są bardzo trudne; w zastosowaniach praktycznych tylko nieliczna grupa betonów narażona jest na takie środowiska.

W porównaniu do betonów napowietrzonych badanych przez innych badaczy, współczynnik mrozoodporności naszych betonów napowietrzonych z dodatkiem proszku z cegieł do 20% i więcej (tablica 12) był porównywalny jakościowo z betonami analizowanymi przez Shang i Yi (4), Peng i in. (5) i Łażniewską-Piekarczyk (6). Bardzo dobrą zgodność uzyskano z pomiarami Garbalińskiej i Wygockiej (7), które określiły mrozoodporność betonu napowietrzonego i betonu o małym stosunku w/c, stosując te same metody jak w tej pracy, znajdując współczynnik  $K$  wynoszący około 1 po 80 cyklach, w przypadku tych dwóch rodzajów betonów.

Odporność na działanie środków odładzających mieszanek betonów napowietrzonych zaprojektowanych w tym artykule była znacznie lepsza niż betonu napowietrzonego o podobnej wytrzymałości na ściskanie, zawierającego 18% popiołu wulkanicznego, badanego przez Ramezianpour i in. (13); ubytek masy po 50 cyklach próbek w tej pracy, z dodatkiem nie przekraczającym 40% proszku z cegieł, był o około pięć do sześć razy mniejszy. Z drugiej strony beton napowietrzony badany przez Van den Heede i in. (8), jako beton odniesienia wykazał znacznie mniejszy ubytek masy niż nasz beton referencyjny AR. W przypadku pozostałych betonów zaprojektowanych przez Van den Heede i in. (8), które zawierały 50% popiołu lotnego, jako zamiennika cementu portlandzkiego, chociaż o gorszych właściwościach niż beton uzyskany w tej pracy z 40% dodatkiem proszku z cegieł – ubytek masy był większy o około 30 – 50%. Referencyjny beton napowietrzony badany przez Giergicznego i in. (10) wykazał około dwa razy mniejszy ubytek masy niż nasza mieszanka odniesienia AR, natomiast przy 30% dodatku granulowanego żużla wielkopieczowego w cemencie wieloskładnikowym ubytek masy był w przybliżeniu taki sam jak

Tablica 11 / Table 11

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE W STANIE NASYCENIA WODĄ KAPILAR  
THERMAL PROPERTIES IN CAPILLARY WATER SATURATED STATE

Concrete	$\lambda$	$c$
	$Wm^{-1}K^{-1}$	$Jkg^{-1}K^{-1}$
AR	2.377	1112
AC 10	2.023	975
AC 20	1.998	1119
AC 40	1.963	1046
AC 60	1.813	995

this paper. Toledo Filho et al. (17) for two types of concrete with the compressive strength  $f_c$ , of 40 and 55 MPa, found this limit to be 20%. O'Farrell et al. (37) for high performance mortars with  $f_c \sim 60 - 65$  MPa and Vejmelková et al. (22) for high performance concrete of the same strength reported the same 20% limit. The apparent reason for the observed differences can be found in the technology of concrete production. Contrary to the concrete mixes analyzed in previous works (17, 22 and 37) which were designed in a common way, with the calculated air content in the fresh mix of  $\sim 1 - 2\%$ , the AEC mixes produced in this work with the air content of  $\sim 7 - 8\%$  (Table 4) contained a high volume of uniformly distributed air voids, already in the initial hydration phases. Therefore, the part of the brick powder, which did not take part in the pozzolanic reaction could act effectively as fine particles, probably partially filling the pores in the interfacial transition zone, compensating, to a certain extent, the decrease of Portland cement content.

The fracture-mechanical parameters of all concretes containing brick powder (except for AC 60) were lower than for the reference mix AR (Table 7); in the case of effective fracture toughness the decrease was 19, 16 and 21% for AC 10, AC 20 and AC 40, respectively, the specific fracture energy of the same mixes decreased by 10, 8 and 13%. The AC 60 mix, on the other hand, exhibited a 10% increase of effective fracture toughness and 14% increase of specific fracture energy. This can be an additional argument for interstitial transition zone strengthening.

#### 4.3. Hydric properties

The water vapor diffusion coefficient was rising with the increasing addition of the brick powder in concrete samples in both dry-cup (up to 15%) and wet-cup (up to 30%) procedures (Table 8). This was in accordance with the increasing open porosity (Table 5). The water vapor diffusion was faster in the wet-cup measurements, which was related to the partial transport of capillary condensed water in the conditions of high relative humidity. The obtained results were in a qualitative agreement with the measurements of oxygen permeability by Pacheco-Torgal and Jalali (21) who found 10% increase in concrete with 20% of ceramic brick powder content.

The water absorption coefficient and apparent moisture diffusivity decreased with the increasing brick powder dosage (Table 9). This finding, while contradictory to the observed increase of open porosity, correlated with the decrease of capillary saturation mo-

naszych betonów z 20% i 40% dodatkiem proszku z cegieł. Podsumowując powyższe porównanie wyników badań odporności na działanie środków odladzających należy wziąć pod uwagę, że nie były one dokładnie takie same, ponieważ zastosowane metody nie były identyczne. Metody doświadczalne zastosowane przez Ramezianipoura i in. (13) oparto na normie ASTM, stosowane przez Van den Heede i in. (8) oraz Giergicznego i in. (10) opierały się na normie EN. Obydwie normy stosują mniej trudne warunki niż specyficzna metoda użyta w tym artykule, w którym próbki początkowo były nasycone wodą, a następnie zanurzone w roztworze soli podczas badań zamrażania i rozmrażania. W związku z tym, że betony opracowane w tych badaniach wykazały analogiczne właściwości w porównaniu do betonów napowietrzonych badanych przez innych autorów, i to nawet w gorszych warunkach niż zalecane w ASTM i EN, potwierdza sukces zaprojektowanych w tej pracy betonów napowietrzonych.

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule zbadano zastosowanie proszku z odpadowych cegieł, jako częściowego zamiennika cementu portlandzkiego w betonie napowietrzonym. Kompleksowa analiza właściwości materiałowych zaprojektowanych betonów, uwzględniająca podstawowe właściwości fizyczne, w tym odporność na pękanie, właściwości cieplne oraz transportowe wody i pary, mrozoodporność, a także odporność na działanie soli odladzających i pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków :

- Zastosowanie proszku z odpadowych cegieł zastępującego cement aż do poziomu 60% spowodowało mały wzrost porowatości otwartej. Krzywe rozkładu wielkości porów były zbliżone aż do 40% zawartości proszku z cegieł w spoiwie, z jednym maksimum przy około 50 - 60 nm oraz drugim przy około 1 - 2  $\mu\text{m}$ . Natomiast w przypadku spoiwa z dodatkiem 60% proszku drugie maksimum zostało zastąpione przez nowe przy około 200 nm. Zagęszczenie mikrostruktury betonu zawierającego 60% proszku z cegieł zostało potwierdzone przez obserwacje za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego.
- Wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach była zadowalająca w przypadku spoiwa aż do zawartości proszku z cegieł wynoszącego 60%; wystąpił jedynie spadek nie przekraczający 10% w porównaniu z betonem odniesienia. Odporność na pękanie wszystkich betonów zawierających proszek z cegieł była nieznacznie gorsza niż betonu odniesienia; beton ze spoiwa z 60% dodatkiem proszku z cegieł wykazał nawet 10% wzrost odporności na pękanie i 14% wzrost energii pękania.
- Współczynnik dyfuzji pary wodnej wraz z rosnącą zawartością proszku z cegieł w spoiwie wzrósł o 30%, co jest bardzo korzystne z punktu widzenia właściwości cieplno-wilgotnościowych ściany betonowej. Współczynnik absorpcji wody i dyfuzja wilgoci malały w betonach ze spoiwa zawierającego aż 60% dodatku proszku, co także było korzystne, bowiem wskazywało na dobrą trwałość.

Tablica 12 / Table 12

FROST RESISTANCE COEFFICIENT *K*

WSPÓŁCZYNNIK ODPORNOŚCI NA MRÓZ

Concrete	<i>K</i>
AR	0.86
AC 10	0.88
AC 20	0.98
AC 40	1.03
AC 60	0.96

Tablica 13 / Table 13

UBYTEK MASY Z ODPRYSKAMI WYWOŁANYMI DZIAŁANIEM SOLI ODŁADZAJĄCYCH [g m<sup>-2</sup>]

LOSS OF MASS OF SCALED-OFF PARTICLES DUE TO THE DEICING SALT ACTION [g m<sup>-2</sup>]

Concrete/ Number of cycles	AR	AC 10	AC 20	AC 40	AC 60
25	193.3	247.4	294.4	262.7	994.8
50	395.0	490.3	539.2	566.7	2577.7
75	675.5	734.3	798.2	888.0	3971.2
100	862.9	938.6	1019.7	1128.7	4868.1

isture content (Table 5). On one hand, it could be attributed to the presence of dead-end pores in concrete samples with higher brick powder content. On the other, the changes in pore distribution could play a substantial role; the mixes containing less brick powder (AC 10 and AC 20) had higher amount of bigger pores in the range of 10 – 100  $\mu\text{m}$  (Fig. 1) than those with higher brick powder content (AC 40 and AC 60). In the case of AC 60 the another important factor was the lower cumulative volume of capillary pores, which was manifested in diminishing of the 2- $\mu\text{m}$  peak, appearance of a new one at 200 nm and an almost complete absence of the pores in the range of 10 – 100  $\mu\text{m}$  (Fig. 1). The reduction of the capillary pores content was thus reflected in slowing down the liquid water transport.

The measurements of liquid water transport properties reported by other investigators; Toledo Filho et al. (17) found the water sorptivity of mortar to decrease with the increasing replacement of cement by ground brick up to 40% by mass. Pacheco-Torgal and Jalali (21) observed a 10% decrease of water permeability of concrete with 20% of ceramic brick powder. This was in a qualitative agreement with the results obtained in this study.

### 4.4. Thermal properties

The thermal conductivity in the dry state decreased with the increasing brick powder dosage (Table 10) which was in accordance with the increase of open porosity (Table 5). The specific heat capacity exhibited an opposite trend – for AC 60 it was ~ 25% higher than for AR (Table 11). This finding could be attributed to the higher specific heat capacity of red-clay ceramics [1040 J/kgK according to (38)]. The thermal conductivity in the capillary water saturated state was

- Przewodność cieplna w stanie suchym malała wraz ze wzrostem dodatku proszku z cegieł, co było zgodne ze zwiększeniem porowatości otwartej; w stanie nasycenia kapilar wodą była ona o około 50 - 60% większa niż w stanie suchym, co było spowodowane obecnością wody w porach. Ciepło właściwe,  $c$ , w stanie suchym wykazało tendencję przeciwną niż przewodność cieplna; może to być związane z większym ciepłem właściwym ceramiki czerwonej. W stanie nasycenia kapilar wodą na ciepło właściwe miała wpływ ta duża właściwość wody.
- Mrozoodporność wszystkich badanych betonów napowietrzonych była bardzo dobra; wzrastała ona z rosnącym dodatkiem proszku z cegieł w spoiwie aż do 40%, a w przypadku 60% nadal była większa niż betonu odniesienia.
- Ubytek masy betonów, spowodowany działaniem środków odładzających, wzrastał stopniowo ze zwiększającą się zawartością proszku z cegieł w spoiwie aż do 40%; można go uznać za zadowalający dla betonu trwałego. Beton ze spoiwa o 60% zawartości proszku z cegieł nie spełniał jednak podstawowego warunku odporności na środki odładzające.

Podsumowując wyniki doświadczalne można stwierdzić, że efektywna wartość graniczna dodatku proszku z odpadowych cegieł do spoiwa w betonie napowietrzonym była bardzo wysoka. Dla większości zastosowań praktycznych spoiwo wieloskładnikowe zawierające 40% cementu i 60% proszku z cegieł może być bezpiecznie stosowane, bez pogorszenia głównych właściwości inżynierskich betonu. Jedynym wyjątkiem są takie konstrukcje, w których beton może być narażony na działanie środków odładzających; w takim przypadku tylko 40% poziom zastąpienia cementu w spoiwie może być zalecany.

Należy zaznaczyć, że wartości graniczne dodatku proszku z cegieł, jako dodatku mineralnego do spoiw wieloskładnikowych ustalone w tej pracy jest znacznie większe niż w większości prac badawczych dotychczas publikowanych, a dotyczących innych rodzajów betonu. Jest to bardzo korzystne, zarówno z punktu widzenia ochrony środowiska jak i ekonomicznego. Bardzo korzystne właściwości betonu napowietrzonego mogą być z tego względu przypisane dwóm głównym czynnikom. Pierwszy to reakcja pucolanowa, która wystąpiła w okresie od 7 do 28 dni. Drugim czynnikiem, być może ważniejszym, jest bardzo korzystny wpływ części cząstek proszku z cegieł, która pełniła rolę wypełniacza; przyczynił się do zwiększenia zwartości stwardniałych betonów i tym samym zrekompensował, do pewnego stopnia, zmniejszenie ilości spoiwa.

## Podziękowania

Niniejsza praca badawcza jest częściowo wspierana przez Czech Science Foundation, w ramach projektu Nr P105/12/G059, oraz częściowo przez European Union's „Operational Programme Research and Development for Innovations”, Nr CZ.1.05/2.1.00/03.0097, jako działalność regionalna Centre AdMaS „Advanced Materials, Structures and Technologies”.

~ 50 - 60% higher than in the dry state which was caused by the presence of water in the pores (Table 11). With the increasing brick powder content it decreased faster than in the dry state. This was related to the decrease of capillary-saturation moisture content (Table 7) and increase of the volume of air remaining in the dead-end pores after capillary saturation. The specific heat capacity in capillary water saturated state was up to 40% higher than in the dry state but any clear trend, as for the brick powder content in the mix, was not observed (Table 11). This could be explained by the lower accuracy of the specific heat capacity measurement by the applied pulse method, which was  $\pm 10\%$  (38).

## 4.5. Durability tests

The frost resistance of all analyzed air entrained concrete was excellent (Table 12). The frost resistance coefficient increased with the increasing amount of brick powder up to 40% percentage, for AC 60 it was similar to AC 20. These findings indicated the basic successfulness of the mix design. The mass of scaled-off particles due to the deicing salt action increased for the concrete samples till to 40% brick powder dosage only slowly – the measured values could be classified as satisfactory for a durable concrete (Table 13). AC 60, however, did not meet the basic criteria for deicing salt resistance; its loss of mass was about four times higher than for AC 40. This was probably related to the absence of bigger pores in AC 60 as compared with the other concretes (Fig. 1). It should be noted, however, that the conditions of the deicing salt resistance test are very severe; in the practical applications only a small part of concretes is exposed to such environments.

In a comparison with the AEC studied by other investigators, the frost resistance coefficient  $K$  of our AEC mixes with the brick powder dosage of 20% and higher (Table 12) was, in a qualitative sense, comparable with the mixes analyzed by Shang and Yi (4), Peng et al. (5) and Lazniewska-Piekarczyk (6). A very good agreement was achieved with the measurements of Garbalinska and Wygocka (7), who determined the frost resistance of AEC and concrete with low water/cement ratio using the same method as in this paper, found  $K \sim 1$  after 80 cycles for both types of mixes.

The deicing salt resistance of the AEC, designed in this study, was significantly higher than for the AEC with similar compressive strength containing 18% of volcanic ash, which was studied by Ramezani-pour et al. (13). The mass of scaled-off particles after 50 cycles was for our concretes with 40% of brick powder content about five to six times lower. On the other hand, the AEC analyzed by Van den Heede et al. (8) the reference samples exhibited much lower loss of mass than our reference concrete AR. The other mixes designed by Van den Heede et al. (8), which contained 50% of fly ash as Portland cement replacement, have shown worse performance than our mix with 40% brick powder percentage – the loss of mass of the first was ~ 30 – 50% higher. The reference AEC studied by Giergiczny et al. (10) showed about two times lower loss of mass than our reference AR sample, but for the 30% slag content in the blended cement the mass of scaled-off particles was approximately the same as for our mixes with 20% and 40%

## Literatura / References

1. T. C. Powers, The air requirement of frost-resistant concrete. Proceedings of the Highway Research Board, 29, 184–211 (1949).
2. M. Pigeon, J. Marchand, R. Pleau, Frost resistant concrete. *Constr. Build. Mat.*, **10**, 339–348 (1996).
3. L. Du, K. J. Folliard, Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cem. Concr. Res.* **35**, 1463–1471 (2005).
4. H. S. Shang, T. H. Yi, Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete. *The Scientific World Journal* 2013; Article ID 650791, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/650791>.
5. G. F. Peng, Q. Ma, H. M. Hu, R. Gao, Q. F. Yao, Y. F. Liu, The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60 MPa grade concrete. *Constr. Build. Mat.*, **21**, 1034–1039 (2007).
6. B. Lazniewska-Piekarczyk, The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. *Constr. Build. Mat.*, **40**, 659–671 (2013).
7. H. Garbalinska, A. Wygocka, Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Constr. Build. Mat.*, **51**, 258–266 (2014).
8. P. Van den Heede, J. Furniere, N. De Belie, Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete. *Cem. Concr. Comp.*, **37**, 293–303 (2013).
9. M. A. Glinicki, M. Zielinski, Frost salt scaling resistance of concrete containing CFBC fly ash. *Materials and Structures*, **42**, 993–1002 (2009).
10. Z. Giergiczny, M. A. Glinicki, M. Sokołowski, M. Zielinski, Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement. *Constr. Build. Mat.*, **23**, 2451–2456 (2009).
11. K. Sisomphon, O. Copuroglu, A. L. A. Fraaij, Development of blast furnace slag mixtures against frost salt attack. *Cem. Concr. Comp.*, **32**, 630–638 (2010).
12. N. M. Al-Akhras, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cem. Concr. Res.*, **36**, 1727–1734 (2006).
13. A. A. Ramezani-pour, M. J. Nadooshan, M. Peydayesh, A. M. Ramezani-pour, Effect of Entrained Air Voids on Salt Scaling Resistance of Concrete Containing a New Composite Cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**, 213–219 (2014).
14. J. Ambroise, M. Murat, J. Pera, Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. V – extension of the research and general conclusions. *Cem. Concr. Res.*, **15**, 261–268 (1985).
15. C. He, B. Osbaeck, E. Makovicky, Pozzolanic reactions of six principal clay minerals activation, reactivity assessments and technological effects. *Cem. Concr. Res.* **25**, 1691–702 (1995).
16. G. Baronio, L. Binda, Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Constr. Build. Mat.*, **11**, 41–46 (1997).
17. R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, E. M. R. Fairbairn, Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cem. Concr. Res.* **37**, 1357–1365 (2007).
18. A. E. Lavat, M. A. Trezza, M. Poggi, Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, **29**, 1666–1674 (2009).
19. L. A. Pereira-de-Oliveira, J. P. Castro-Gomes, P.M.S. Santos, The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Constr. Build. Mat.*, **31**, 197–203 (2012).
20. M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production—present and future. *Cem. Concr. Res.*, **41**, 642–650 (2011).
21. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Reusing ceramic wastes in concrete. *Constr. Build. Mat.*, **24**, 832–838 (2010).
22. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, M. Ondráček, Z. Keršner, R. Černý, Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Comp.*, **34**, 55–61 (2012).

of brick powder in the binder. Summarizing when comparing the results of the frost-salt scaling resistance tests given above, one should take into account that they were not fully comparable, because the applied tests were not identical. The experimental procedures used in (13) were based on the ASTM standard, those utilized in (8) and (10) followed the EN standard. Both these standards apply less severe conditions than the specific test used in this study, in which the specimens were firstly fully saturated in water and then completely submerged in the salt solution during the freezing and thawing cycles. The fact that our concretes were found quite comparable with the AEC studied by other researchers, even under worse conditions than those prescribed by the ASTM and EN tests, confirms the successfulness of our AEC mix design.

## 5. Conclusions

The application of waste brick powder as a partial replacement of Portland cement in air-entrained concrete was analyzed in this study. The results of complex analysis of material properties of the concretes, including the basic physical, mechanical and fracture-mechanical properties, hydric and thermal properties, freeze/thaw resistance, deicing salt resistance can be summarized as follows:

- The addition of brick powder led to only a low increase of open porosity till to the 60% cement replacement level. The pore size distribution curves was similar for the binders with brick powder content till to 40%, with one peak at ~ 50 - 60 nm and another one at ~ 1 - 2  $\mu\text{m}$ , but for the 60% dosage of brick powder the second peak was replaced by a new one at ~ 200 nm. The compaction of the microstructure of concrete containing 60% brick powder was confirmed by the SEM analysis.
- The compressive strength of concrete after 28 days was satisfactory even for 60% brick powder content in the binder; the differences lower than 10% were found in comparison to the reference concrete. The fracture-mechanical parameters of all concretes containing brick powder were only slightly lower than that of the reference sample; the concrete with 60% brick powder content in binder exhibited even a 10% increase of effective fracture toughness and 14% increase of specific fracture energy.
- The water vapor diffusion coefficient was higher of about 30% with the increasing brick powder content which was positive from the point of view of hygrothermal performance of a concrete wall. The water absorption coefficient and apparent moisture diffusivity decreased for concrete with waste brick addition, even for 60% cement replacement level, which was, once again, a positive behavior, indicating a good durability.
- The thermal conductivity in dry state decreased with the increasing brick powder percentage which was in accordance with the increase of open porosity; in the capillary water saturated state it was about to 50 - 60% higher than in the dry state, which was caused by the content of water in the pores. The specific heat capacity  $c$ , in the dry state exhibited an opposite trend than thermal conductivity; this could be attributed to the

23. M. C. Bignozzi, A. Saccani, Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast alkali silica reaction (ASR). *Cem. Concr. Comp.*, **34**, 1141–1148 (2012).
24. C. Medina, P. F. G. Banfill, M.I. Sánchez de Rojas, M. Frías, Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste. *Constr. Build. Mat.*, **40**, 822–831 (2013).
25. J. Katzer, Strength performance comparison of mortars made with waste fine aggregate and ceramic fume. *Constr. Build. Mat.*, **47**, 1–6 (2013).
26. S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Černý, Z. Pavlík, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge, Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, **27**, 307–325 (2004).
27. ČSN EN 12390-3, Testing of hardened concrete – Part 3: Compressive strength. Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague 2002.
28. B. L. Karihaloo, *Fracture Mechanics of Concrete*. Longman Scientific & Technical, New York 1995.
29. RILEM Committee 50-FMC, Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Test on Notched Beams. *Materials and Structures*, **18**, 258–290 (1985).
30. E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Jerman, R. Černý, Free Water Intake as Means of Material Characterization. *Journal of Building Physics*, **33**, 29–44 (2009).
31. M. K. Kumaran, Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, **22**, 349–355 (1999).
32. ČSN 73 1322/Z1:1968, Concrete testing – Hardened concrete – Frost resistance. Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague 2003.
33. ČSN 731326/Z1:1984, Determination of the resistance of the surface of concrete against water and de-icing salts. Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague 2003.
34. E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Keppert, Z. Keršner, P. Rovnaníková, M. Ondráček, M. Sedlmajer, R. Černý, High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Constr. Build. Mat.*, **24**, 1404–1411 (2010).
35. ČSN EN 12350-2, Testing of fresh concrete – Part 2: Slump test. Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague 2000.
36. V. Tydlitát, J. Zákoutský, P. Volfová, R. Černý, Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics. *Thermochimica Acta*, **543**, 125–129 (2012).
37. M. O'Farrell, B. B. Sabir, S. Wild, Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cem. Concr. Comp.*, **28**, 790–799 (2006).
38. Z. Pavlík, L. Fiala, E. Vejmelková, R. Černý, Application of Effective Media Theory for Determination of Thermal Properties of Hollow Bricks as a Function of Moisture Content. *Inter. J. Thermophysics*, **34**, 894–908 (2013).

higher *c* value of brick powder. In the capillary water saturated state the *c* value was influenced by the high specific heat capacity of water.

- The frost resistance of all analyzed air entrained concretes was excellent; it increased with the increasing content of brick powder till 40% in the binder and even for the 60% content it was still higher than for the reference sample.
- The mass of scaled-off particles due to the deicing salt action was increasing for the sample with the level of brick powder content till 40% dosage only slowly; it could be classified as satisfactory for a durable concrete. The concrete with 60% of brick powder content in binder, however, did not meet the basic criteria for deicing salt resistance.

The experimental results obtained in this study have shown that the effective limit for the use of waste brick powder in the analyzed air-entrained concrete was very high. For most practical applications the blended binder containing 40% of Portland cement and 60% of fine red-brick powder could be used safely, without any significant loss of the main engineering properties of concrete. The only exception were such structures where the concrete could be exposed to a heavy action of deicing salts; in such a case only 40% cement replacement level could be recommended.

It should be noted that the limits for the percentage of brick powder as supplementary cementing material in blended Portland cement based binders found in this paper were significantly higher than in most investigations reported before for other types of concrete. This was very positive from both environmental and economical points of view. The success of the air-entrained concrete mix design in that respect could be attributed to the two main factors. The first was the pozzolanic reaction which was effective already during the time period of 7 to 28 days. The second factor, perhaps the more important one, was the positive effect of the part of the fine brick powder which did not enter in the pozzolanic reaction and fulfil the role of a fine filler which contributed to the compaction of the hardened mixes and could thus compensate, to a certain extent, the lower content of the binder.

## Acknowledgments

This research has been supported partially by the Czech Science Foundation, under project No P105/12/G059, and partially the European Union's "Operational Programme Research and Development for Innovations", No CZ.1.05/2.1.00/03.0097, as an activity of the regional Centre AdMaS "Advanced Materials, Structures and Technologies".