

Charakterystyka mechaniczna betonów wysokowartościowych z częściowym zastąpieniem kruszywa drobnego odpadowym materiałem z produkcji płyt CETRIS

Mechanical characteristics of high-performance concretes with substitution of fine aggregate by waste material from CETRIS Boards Production

Kateřina Matýsková^{1,*}, Vlastimil Bílek¹, Marie Horňáková¹, David Bujdoš¹

¹VŠB — Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic

*Corresponding Author: Kateřina Matýsková, email: katerina.matyskova@vsb.cz

Streszczenie

W artykule omówiono możliwość zastąpienia kruszywa drobnego w betonie wysokowartościowym [HPC] odpadowym materiałem pochodzącym z produkcji płyt CETRIS [WCM]. Płyty CETRIS są wytwarzane z mieszaniny drobnych wiórów drzewnych i zaprawy cementowej, a podczas ich produkcji – w wyniku cięcia i szlifowania płyt – powstają znaczne ilości odpadów. W niniejszych badaniach drobnoziarnisty materiał odpadowy z produkcji płyt CETRIS wykorzystano jako potencjalny zamiennik kruszywa drobnego w betonie. Zaprojektowano betony wysokowartościowe o maksymalnym wymiarze ziarna kruszywa 8 mm, wskaźniku wodno-spoiwowym równym 0,25 oraz 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie wynoszącej około 140 MPa. Tego typu betony nie zawierają wystarczającej ilości wody do pełnej hydratacji cementu, dlatego zastosowanie pielęgnacji wewnętrznej realizowanej poprzez wstępne nawilżenie kruszywa może korzystnie wpływać na przebieg tego procesu. W pracy omówiono wpływ zastąpienia kruszywa materiałem WCM na urabialność mieszanki, wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz moduł sprężystości betonu. Przeanalizowano również mrozoodporność badanych betonów.

Słowa kluczowe: beton, CETRIS, beton wysokowartościowy, materiał odpadowy, zrównoważony rozwój

Summary

This paper discusses the possibility of replacing fine aggregates in high performance concrete [HPC] with waste material from CETRIS boards production [WCM]. CETRIS boards are made from a combination of fine wood chips and cement mortar, and a large amount of waste material is generated during their production - cutting and grinding of the boards. In this research, fine waste material from CETRIS boards was used as a potential replacement for fine aggregate in concrete. The high-performance concretes were designed with a maximum size of aggregates of 8 mm, water to binder ratio of 0.25 and 28-days compressive strength around 140 MPa. These types of concrete do not contain enough water for hydration of the cement, so an internal curing process carried out by pre-wetting aggregates can improve this situation. Influence of WCM substitution on workability, bending and compressive strength and modulus of elasticity of concrete are discussed in this paper. The frost resistance of concretes is discussed as well.

Keywords: concrete, CETRIS, high-performance concrete, waste material, sustainability.

1. Wprowadzenie

Beton wysokowartościowy [HPC] jest szczególnym rodzajem betonu projektowanym w celu uzyskania właściwości przewyższających właściwości betonów konwencjonalnych, zwłaszcza pod względem trwałości, odporności na oddziaływania środowiskowe oraz – w ra-

1. Introduction

High-performance concrete [HPC] is a special type of concrete designed to offer superior properties compared to conventional concrete, particularly in terms of durability and resistance to environmental factors and, if necessary, high strength (1). It is

zie potrzeby – wysokiej wytrzymałości (1). Charakteryzuje się stosowaniem zaawansowanych domieszek chemicznych i dodatków mineralnych [mikrokrzemionki, popiołu lotnego, żużla], a przede wszystkim bardzo niskim wskaźnikiem wodno-spoiwowym. Czynniki te poprawiają urabialność mieszanki, zmniejszają porowatość i zwiększają odporność na działanie substancji chemicznych, cykli zamrażania i rozmrażania oraz ścieranie. Jednocześnie bardzo szczelna mikrostruktura HPC powoduje określone problemy eksploatacyjne. Niski wskaźnik wodno-spoiwowy oznacza również niedobór wody w kapilarach i porach betonu. Woda ta jest zużywana podczas hydratacji cementu, co prowadzi do wysychania betonu od wewnątrz. Zjawisko to określane jest mianem samoosuszenia [ang. self-desiccation]. W betonach zwykłych proces ten może być ograniczany przez pielęgnację zewnętrzną, która uzupełnia wodę zużywaną w procesie hydratacji. Jednak w przypadku HPC mikrostruktura jest na tyle szczelna, że woda pielęgnacyjna nie może skutecznie penetrować wnętrza materiału, co prowadzi do samoosuszenia oraz skurczu autogenicznego. Stanowi to jedną z odstawowych różnic pomiędzy betonami zwykłymi a betonami wysokowartościowymi. Jednym ze sposobów ograniczenia samoosuszenia jest zastosowanie tzw. pielęgnacji wewnętrznej (2). Metoda ta polega na wprowadzeniu do mieszanki betonowej dodatkowej ilości wody zgromadzonej w porach kruszywa podczas procesu mieszania. W tym celu część kruszywa zastępuje się porowatym, uprzednio nasyconym wodą materiałem. W trakcie wiązania i twardnienia HPC, gdy postępuje samoosuszenie, woda zgromadzona w porach kruszywa jest stopniowo uwalniana, uzupełniając wodę pierwotnie obecną w porach i kapilarach zaczynu cementowego. Jako kruszywo porowate najczęściej stosuje się keramzyt, jednak możliwe jest również wykorzystanie innych naturalnych lub sztucznych materiałów porowatych (3-4). Alternatywę stanowią kruszywa z recyklingu betonu lub szerzej – odpady budowlane i rozbiórkowe, które również charakteryzują się znaczną porowatością (5). Zastosowanie kruszyw pochodzących z recyklingu lub materiałów odpadowych sprzyja ograniczeniu ilości odpadów, zmniejsza zapotrzebowanie na powierzchniach składowisk oraz ogranicza ślad środowiskowy związany z eksploatacją surowców naturalnych, przyczyniając się do bardziej zrównoważonej produkcji betonu (6). Choć wykorzystanie takich materiałów jest zazwyczaj związane z pogorszeniem właściwości mechanicznych betonu, odpowiednio zaprojektowane mieszanki umożliwiają uzyskanie również betonów wysokowartościowych.

Przedmiotem niniejszych badań było wykorzystanie sortowanego drobnoziarnistego materiału odpadowego [WCM] pochodzącego z produkcji cementowo-drzazgowych płyt CETRIS jako zamiennika najdrobniejszych frakcji kruszywa oraz materiału absorbującego wodę przeznaczonego do realizacji procesu pielęgnacji wewnętrznej w HPC. Produkcja tego rodzaju płyt generuje – według obliczeń teoretycznych przedstawionych w pracy (7) – około 7600 ton odpadów rocznie w zakładzie CIDEM Hranice a.s. w Republice Czeskiej. Odpady te składają się głównie z wiórów drzewnych oraz pozostałości zaprawy cementowej. Tradycyjnie są one kierowane na składowiska, co wiąże się z kosztami oraz negatywnym oddziaływaniem na środowisko. Ze względu na

characterized by use of advanced admixtures and supplementary cementitious materials [silica fume, fly ash, slag] and especially by a very low water to binder ratio. These aspects improve the concrete's workability, reduce porosity, and enhance resistance to chemicals, freeze-thaw cycles, and abrasion. On the other hand, very dense microstructure of HPC also brings some problems. A low water to binder ratio also means a lack of water inside of concrete - in the capillaries and pores of the concrete. This pore water in HPC is consumed by the hydration of the cement and the HPC therefore dries from the inside. This phenomenon is known as self-desiccation. The self-desiccation in ordinary concretes can be eliminated by the curing water, which will replace the water in the pores and capillaries consumed by hydration. However, HPC has such a dense microstructure that the curing water cannot penetrate into the concrete, and therefore self-desiccation and drying shrinkage occur. This is the basic difference between ordinary concrete and HPC. One of the possibilities to eliminate the effect of self-desiccation is the use of so-called internal curing (2). Internal curing is based on the introduction of water trapped in the pores of aggregate into the concrete during mixing process. For this process, part of the aggregate is usually replaced by porous, soaked aggregate. During setting and hardening of HPC and self-desiccation, the water from the soaked aggregate is released and replaces the mixing water that originally filled the pores and capillaries. Expanded clay aggregates are often used as porous aggregate, but other types of natural or artificial porous aggregate can also be used (3,4). Another approach is using the recycled concrete or, more generally, construction and demolition wastes, which are also porous (5). The use of recycled or waste aggregates promotes waste minimisation, reduces landfill requirements and reduces the ecological footprint associated with mining, making concrete production more sustainable (6). Although the use of recycled or waste aggregates is generally associated with reduction of concrete mechanical properties, with a proper design, even HPC can be developed.

Our present research focuses on the use of sorted fine waste material [WCM] from the production of CETRIS cement bonded particle boards as the substitution of fine aggregate fractions and an absorbent material for the internal curing process in HPC. The production of these cement-bonded particleboards generates approximately 7 600 tons of waste annually based on theoretical calculations done in the thesis (7) at the company CIDEM Hranice, a.s., in the Czech Republic, consisting of wood chips and cement residues. Traditionally sent to landfills, this waste management method is costly and unsustainable. Due to its compatibility with original production materials, reintroducing this waste directly back into production presents an optimal recycling solution, but it is not realistic for the entire waste stream. Alternative applications of this waste material include subsoil stabilization, floor backfill, and as a binder in brick rubble or fine-grained cement composites (8). Coarser WCM can be used also in cellular concrete for noise barriers (9). Preliminary research, that has been described in thesis (8) explored substituting 5 % and 10 % of the cement binder with

zgodność składu z materiałami wykorzystywanymi do produkcji płyt, najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby ponowne wprowadzenie odpadów do procesu technologicznego, jednak nie jest to możliwe w przypadku całego strumienia odpadów. Alternatywne kierunki zagospodarowania obejmują stabilizację podłoża gruntowego, wykonywanie warstw wypełniających pod posadzki oraz stosowanie jako składnika wiążącego w gruzie ceglanym i drobnoziarnistych kompozytach cementowych. Grubsze frakcje WCM mogą być również wykorzystywane do produkcji betonów komórkowych przeznaczonych na ekrany akustyczne. Wstępne badania opisane w pracy (8) obejmowały zastąpienie 5% i 10% spoiwa cementowego materiałem WCM, zarówno w postaci nieprzesianej, jak i przesianej, przy odpowiednim dostosowaniu ilości wody zarobowej. Wyniki wykazały możliwość skutecznego zastąpienia części tradycyjnych składników spoiwa tym materiałem odpadowym, stwarzając perspektywę jego wykorzystania w wyrobach na bazie cementu. Prezentowany program badawczy stanowi rozwinięcie tych prac i koncentruje się na opracowaniu efektywnych oraz zrównoważonych mieszanek betonowych prowadzących do uzyskania betonów wysokowartościowych. Wstępne wyniki dotyczące właściwości materiału odpadowego oraz podstawowych właściwości mechanicznych drobnoziarnistych mieszanek betonowych zostały już opublikowane we wcześniejszej pracy (10).

Głównym celem niniejszego artykułu jest analiza wybranych właściwości mechanicznych oraz mrozoodporności betonów wysokowartościowych, w których najdrobniejsza frakcja kruszywa została całkowicie zastąpiona odpadowym materiałem pochodzącym z produkcji płyt CETRIS. Odpadowe kruszywo poddano wstępnemu nawilżeniu w celu zapewnienia pielęgnacji wewnętrznej betonu. Należy jednak uwzględnić, że zastąpienie części wysokiej jakości kruszywa materiałem porowatym może niekorzystnie wpływać na właściwości mechaniczne betonu. Zastosowanie kruszywa o niższej wytrzymałości może prowadzić do obniżenia wytrzymałości końcowej betonu, mimo że skuteczniejsza pielęgnacja może ograniczać powstawanie rys i mikropęknięć. Jednocześnie jedną z podstawowych zalet HPC jest wysoka trwałość, dlatego korzyści wynikające z zastosowania pielęgnacji wewnętrznej powinny być oceniane również z punktu widzenia trwałości materiału.

2. Materiały i metody

2.1. Materiał odpadowy z produkcji płyt CETRIS [WCM]

Nasiąkliwość materiału WCM oznaczono zgodnie z normą EN 1097-7 (11). Uzyskana wartość wyniosła 45,3%. Tak wysoka nasiąkliwość jest prawdopodobnie związana z obecnością wiórów świerkowych lub jodłowych, które nawet po rozdrobnieniu zachowują swój kształt i nie tworzą drobnego proszku, jak ma to miejsce w przypadku matrycy cementowej [rys. 1a]. Gęstość objętościowa materiału wyniosła 770 kg/m³. Na rysunku 1b przedstawiono obraz drobnoziarnistego materiału WCM uzyskany za pomocą mikroskopu optycznego.

Odczyn wyciągu wodnego oznaczono zgodnie z normą ČSN 72 1070 (12). W tym celu 10 g materiału WCM zmieszano z 70 g

WCM, in both untreated and sieved forms, to maintain matrix workability by adjusting water content accordingly. In the research (8), five concrete formulations were tested, including one reference mix, demonstrating that this waste material can effectively replace traditional binder materials while offering sustainable recycling possibilities in cement-based products. Our research programme builds on these investigations by using this type of waste material to create efficient and sustainable concrete mixes with the aim of creating HPC. Initial results of the properties of the selected waste material and the basic mechanical properties of the created fine-graded concrete mixtures have already been published in the previous article (10).

The main aim of this paper is the investigation of the selected mechanical properties and frost resistance of HPC with full substitution of the finest aggregate fraction by fine waste material from CETRIS board production. The waste aggregate was pre-wetted to introduce internal curing to the HPC. It should be taken into account that the replacement of a part of a high-quality aggregate with porous aggregate may have a negative effect on the mechanical properties of concrete. The use of a less strong aggregate can cause a reduction in the resulting strength of the concrete, even though the formation of potential cracks could be eliminated by better curing. However, one of the main advantages of HPC is also a high durability. From this point of view, the benefits of internal curing should also be evaluated.

2. Materials and methods

2.1. Waste material from CETRIS production [WCM]

The absorption of WCM was measured according to EN 1097-7 (11). The resulting value is 45.3 %. The high-water absorption in this material is caused probably by the spruce or fir chips, which retain their shape even during grinding and therefore do not form a fine powder as in the case of the cement matrix, see Fig. 1a). The volume density is 770 kg·m⁻³. Fig. 1b) shows an image of this fine WCM from an optical microscope.

The pH of the leachate was determined according to ČSN 72 1070 (12). 10 g of WCM was mixed with 70 g of demineralized water and the pH was measured with a pH-meter after 24 hours of leaching. The resulting value of pH was measured as 11.48.

Based on the EN 196-3 standard (13), the setting delay of cement paste prepared with WCM leachate was also tested. A paste with a composition of 500 g CEM I 42.5 R + 135 g demineralised water had an initial setting time of 3:20 hrs, while a paste containing 500 g of CEM I 42.5 R + 135 leachate had an initial setting time of 3:50 hrs. The setting delay is therefore quite significant. Retardation of cement setting can be affected by cellulose derivatives, which leaches out especially in an environment with a higher pH (14,15).

2.2. Other materials for concrete preparation

White cement CEM I 52.5 R [Aalborg, Denmark] was used for concrete preparation, as well as white microsilica [Remei CZ,



Rys. 1. Drobnziarnisty materiał odpadowy pochodzący z produkcji płyt CETRIS: a) widok ogólny materiału, b) obraz uzyskany metodą mikroskopii optycznej (25). Długość wskaźnika skali na zdjęciu b wynosi 1000 μm .

Fig. 1. Fine waste material from the CETRIS board production a), optical microscopy b) (25). Scale bar in image b is 1000 μm .

wody demineralizowanej, a po 24 godzinach ługowania zmierzono wartość pH za pomocą pH-metru. Otrzymana wartość pH wyniosła 11,48.

Na podstawie normy EN 196-3 (13) zbadano również wpływ wyciągu wodnego z materiału WCM na czas wiązania zaczynu cementowego. Zaczyn o składzie 500 g cementu CEM I 42,5 R oraz 135 g wody demineralizowanej osiągnął początek wiązania po 3 godz. 20 min, natomiast zaczyn zawierający 500 g cementu CEM I 42,5 R oraz 135 g wyciągu wodnego z WCM po 3 godz. 50 min. Oznacza to istotne opóźnienie procesu wiązania. Zjawisko to może być związane z obecnością pochodnych celulozy, które ulegają wymywaniu szczególnie w środowisku o podwyższonym pH (14,15).

2.2. Pozostałe materiały zastosowane do przygotowania betonów

Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano biały cement CEM I 52,5 R [Aalborg, Dania], białą mikrokrzemionkę [Remei CZ, Chomutov, Czechy] oraz zmielony kamień wapienny [Carmeuse, Mokrą, Czechy]. Jako wodę zarobową wykorzystano wodę wodociągową. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek normowy zgodny z EN 196-1 (16), składający się z dwóch wąskich frakcji: PG1 0,08–0,5 mm oraz PG2 0,5–1,0 mm. Kruszywo grube stanowił granit łamany z kamieniołomu Litice o uziarnieniu 4/8 mm. W celu poprawy urabialności mieszanek zastosowano kombinację dwóch superplastyfikatorów na bazie polikarboksylianów.

2.3. Projektowanie mieszanek betonowych i przygotowanie próbek

W ramach badań wstępnych zaprojektowano dwa rodzaje mieszanek betonowych. Pierwsza z nich była mieszką referencyjną zawierającą wyłącznie kruszywo naturalne [CET0]. W drugiej mieszance [CET100] 100% najdrobniejszej frakcji kruszywa zastąpiono materiałem WCM. Mieszanki zaprojektowano przy bardzo niskim wskaźniku wodno-cementowym wynoszącym 0,25. Skład poszczególnych mieszanek przedstawiono w tablicy 1. Ilość

Chomutov, Czech Republic] and ground limestone [Carmeuse, Mokra, Czech Republic]. Potable water from the water supply line was used for the mixing of concrete. Standard sand according to EN 196-1 (16) of two narrow fractions PG1 0.08/0.5 mm and PG2 0.5/1 mm was used as the natural aggregate. Crushed granite from the Litice quarry, fraction 4/8 mm, was used as coarse aggregate. Combination of two polycarboxylate based superplasticizers was used to enhance workability of mixtures.

2.3. Concrete design and samples preparation

In this initial research, two types of concrete mixes were designed. The first mix to be tested was a reference mix using only natural aggregate [CET0]. In the second mix 100 % of the finest aggregate fraction was replaced by WCM [CET100]. The concrete mixes were designed with a very low water to cement ratio of 0.25. The composition of each mix is detailed in Table 1. The doses of WCM are given in the dry state, but they were added to the concrete as pre-wetted, taking into account the measured absorption [45 %]. The pre-wetting process lasted for 48 hours.

The concrete was mixed in a laboratory mixer, the volume of each mixture was 20 l. The workability of the concrete was tested by minicone flow test according to EN 1015-3 (17) and is listed in Table 1. This method was chosen because the maximum aggregate grain size was only 8 mm. All test samples were produced in steel moulds. Beams 40x40x160 mm were used for the production of samples for strength testing. For samples for measuring the modulus of elasticity a cylinder with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm were used. Moulds with concrete were compacted by vibration for the necessary time. Then the moulds with fresh concretes were covered by a plastic foil. After 24 hours, the samples were unmoulded and wrapped in foil to prevent moisture exchange with the environment. In this way, the effect of internal curing can be assessed. The wrapped samples were stored in the laboratory until testing, which was carried out when the samples were 7, 28 or 91 days old.

materiału WCM podano dla stanu suchego, jednak do mieszanki wprowadzano go po wcześniejszym nasyceniu wodą, uwzględniając oznaczoną nasiąkliwość wynoszącą 45%. Proces wstępnego nawilżania trwał 48 godzin.

Mieszankę betonową przygotowano w mieszarce laboratoryjnej, a objętość każdej partii wynosiła 20 dm³. Urabialność mieszanek oceniano za pomocą testu rozplywu mini-stożkiem zgodnie z EN 1015-3 (17), a uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 1. Metodę tę wybrano ze względu na maksymalny wymiar ziarna kruszywa wynoszący jedynie 8 mm. Wszystkie próbki wykonano w formach stalowych. Do badań wytrzymałościowych przygotowano beleczki o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. Do badań modułu sprężystości zastosowano walce o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Formy z mieszanką betonową zagęszczano przez wibrowanie przez odpowiedni czas, a następnie przykrywano folią polietylenową. Po 24 godzinach próbki rozformowano i szczelnie owinięto folią w celu ograniczenia wymiany wilgoci z otoczeniem. Takie warunki umożliwiały ocenę skuteczności pielęgnacji wewnętrznej. Próbki przechowywano w laboratorium do momentu badań prowadzonych po 7, 28 lub 91 dniach dojrzewania.

2.4. Badania właściwości mechanicznych

W celu określenia podstawowych właściwości mechanicznych wykonano badania gęstości objętościowej, wytrzymałości na zginanie oraz wytrzymałości na ściskanie. Wykorzystano trzy beleczki o wymiarach 40 × 40 × 160 mm, które przechowywano w folii do wieku 7 lub 28 dni. Gęstość objętościową oznaczono zgodnie z normą EN 12390-7 (18). Wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na ściskanie określono zgodnie z procedurami opisanymi w normie EN 196-1 (16). Ponadto przeprowadzono badania statycznego i dynamicznego modułu sprężystości na trzech walcach o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Statyczny moduł sprężystości oznaczono zgodnie z procedurą zawartą w normie ISO 1920-10 (19). Próbki przechowywano w folii do wieku 28 i 91 dni. Dynamiczny moduł sprężystości wyznaczono metodą ultradźwiękową zgodnie z normami EN 12504-4 (20) oraz ČSN 73 1371 (21). Badania przeprowadzono na trzech walcach o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm po 28 i 91 dniach dojrzewania. Podobnie jak w przypadku pozostałych badań próbki były przechowywane w folii przez cały okres poprzedzający pomiary.

2.5. Badania mrozoodporności

Mrozoodporność oznaczono zgodnie z normą ČSN 73 1322 (22). Norma ta przewiduje stosowanie belek o wymiarach 100 × 100 × 400 mm, jednak w niniejszych badaniach wykorzystano po trzy próbki referencyjne i trzy próbki poddawane zamrażaniu i rozmrażaniu o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. Próbki poddano 125 cyklom zamrażania i rozmrażania [F&T]. Jeden cykl obejmował 4 godziny przebywania w temperaturze -20°C, a następnie 2 godziny zanurzenia w wodzie o temperaturze +20°C. Badania prowadzono przy użyciu automatycznego urządzenia badawczego.

Przed rozpoczęciem cykli F&T oraz po ich zakończeniu oznaczono gęstość objętościową, wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONÓW (25).

COMPOSITIONS OF THE DESIGNED CONCRETE MIXTURES (25).

Skład 1 dm ³ Mix proportions per 1 dm ³	CET0	CET100
Stopień zastąpienia kruszywa Replacement rate of aggregates	0 %	100 % PG1 ~ 33 % total
CEM I 52.5 biały / white, g	650	650
Biała mikrokrzemionka White microsilica, g	70	70
Kamień wapienny / Limestone, g	80	80
Uplynnacze / Superplasticizers, g	17.5	17.5
Woda / Water, g	160	223
CETRIS, g	/	140
PG1 0.08/0.5, g	470	∅
PG2 0.5/1, g	470	470
Litice 4/8, g	470	470
Rozplyw / Flow test, mm	270	270

2.4. Tests of mechanical properties

Tests were carried out on the specimens to determine the basic mechanical characteristics, namely volume density, three-point bending strength and compressive strength. Three prisms 40×40×160 mm were used and these samples were kept wrapped in foil up to age of 7 or 28 days. The volume density was determined according to EN 12390-7 (18). The bending strength and subsequently the compressive strength were tested and evaluated based on EN 196-1 (16).

Subsequently, tests were also carried out to determine the elastic moduli, both static and dynamic, on three cylinders with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm. The static modulus of elasticity was tested according to the procedures given in ISO 1920-10 (19). The samples were kept in foil up to age of 28 and 91 days.

The dynamic modulus of elasticity was determined using the ultrasonic method according to the standard procedures given in EN 12504-4 (20) and CSN 73 1371 (21). The test was carried out on three cylinders with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm at the age 28 and 91 days. The samples were also kept in foil for the whole time before the test.

2.5. Frost resistance

Frost resistance was measured according to CSN 73 1322 (22). This standard assumes 100x100x400 mm prisms, but in this case three reference and three frosted 40x40x160 mm prisms were used. Three prisms underwent 125 freezing and thawing [F&T] cycles. One cycle represents 4 hours at the temperature of -20 °C and then followed by 2 hours in water at the temperature of +20 °C. An automatic device was used for test. Volume density, bending strength, compressive strength and dynamic modulus of elasticity were determined in accordance with the aforementioned standards on the prisms before F&T cycles and after F&T cycles. Subsequently, the frost resistance index [I] was calculated, which

ściskanie oraz dynamiczny moduł sprężystości zgodnie z wcześniej wymienionymi normami. Następnie obliczono wskaźnik mrozoodporności I , definiowany jako stosunek wartości właściwości próbek poddanych cyklowi zamrażania i rozmrażania do odpowiednich wartości uzyskanych dla próbek referencyjnych oznaczonych w tym samym czasie. Zgodnie z wymaganiami normy beton uznaje się za mrozoodporny, jeżeli wartość wskaźnika mrozoodporności spełnia warunek $I > 0,75$.

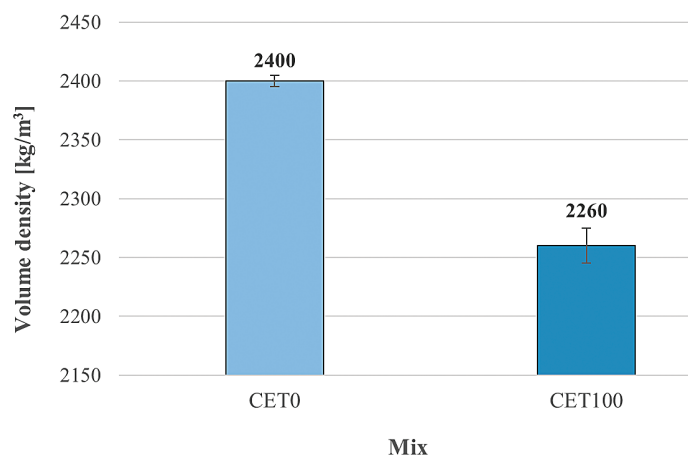
3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Gęstość objętościowa

Na rys. 2 przedstawiono gęstość objętościową próbek referencyjnych oraz próbek, w których 100% najdrobniejszej frakcji kruszywa zastąpiono materiałem WCM. Zgodnie z oczekiwaniami próbki zawierające WCM charakteryzują się mniejszą gęstością objętościową niż mieszanka referencyjna, co wynika z zastosowania kruszywa o niższej gęstości objętościowej.

3.2. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie

Wyniki wytrzymałości na zginanie betonów HPC przedstawiono na rys. 3. Różnica pomiędzy wytrzymałością próbek referencyjnych a próbek zawierających WCM jest znacząca – mieszanka referencyjna osiąga wytrzymałość wyższą o około 30%. W przypadku próbek referencyjnych zaobserwowano wzrost wytrzymałości o około 7% pomiędzy 7. a 28. dniem dojrzewania. Natomiast próbki zawierające WCM wykazały jedynie nieznaczny przyrost wytrzymałości, wynoszący około 3%. Oznacza to, że efekt pielęgnacji wewnętrznej nie był wystarczająco intensywny, aby zrekomensować negatywny wpływ dodatku WCM. Niewielki wzrost wytrzymałości w przedziale od 7 do 28 dni również nie wskazuje na istotny wpływ pielęgnacji wewnętrznej, co jest interesujące, ponieważ mieszanka zawierała wodę zgromadzoną w porach materiału WCM i tym samym powinna wykazywać wyraźniejsze efekty tego procesu.



Rys. 2. Gęstość objętościowa betonu wysokowartościowego z zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 2. Volume density of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).

is the ratio of the properties of the prisms that underwent these F&T cycles to the properties of the reference prisms, which were determined at the same time as cycled samples. In accordance with the mentioned standard, concrete is considered frost-resistant if the frost resistance index I is greater than 75% [$I > 0.75$].

3. Results and discussion

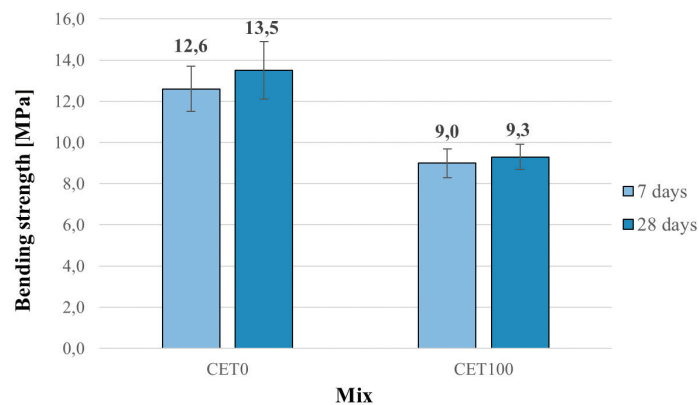
3.1. Volume density

Fig. 2 shows the volume density of reference samples and samples with 100 % replacement of the finest fraction of aggregate. It is logical that samples with substitution by WCM show lower volume density than reference mixture, because of the use of aggregates with lower volume density.

3.2. Bending and compressive strength

Bending strengths of HPC are shown in Fig. 3. The difference between the bending strength of the reference samples and the samples with WCM is quite high, the reference mixture shows approximately 30 % higher strength. An increase of 7 % in strength between 7 and 28 days can be observed for the reference samples. In contrast, samples with WCM show almost no increase in strengths [only 3 %]. The effect of internal curing is probably not enough strong to intensify the hydration to eliminate the effect of the addition of WCM. Even the increase in strength in the interval from 7 to 28 days does not indicate a significant effect of internal curing, which is interesting, because this mixture contains water trapped in WCM and thus should show pronounced effect of internal curing.

In the case of compressive strength, the situation is similar to the previous case of bending strength, see Fig. 4. Compressive strength is lower in the CET100 concrete, this decrease is significant, but not dramatic [approximately 20 %]. In the interval between 7 and 28 days, all compressive strengths increase. The relative increase in strength between 7 and 28 days is 13.6 % in the case of CET 0 and 10.6 % in the case of CET100. But the lower increase of strength in CET100 may be due to the fact that the effect of worse properties of WCM prevails over any internal curing effect.



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie betonu wysokowartościowego z zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 3. Bending strength of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).

Podobną zależność zanotowano w przypadku wytrzymałości na ściskanie [rys. 4]. Beton CET100 osiągał niższe wartości wytrzymałości niż beton referencyjny, przy czym spadek ten był wyraźny, choć nie bardzo duży – około 20%. W przedziale pomiędzy 7. a 28. dniem dojrzewania wytrzymałość na ściskanie wzrastała dla obu mieszanek. Względny przyrost wytrzymałości wynosił 13,6% dla mieszanki CET0 oraz 10,6% dla CET100. Mniejszy przyrost wytrzymałości w przypadku CET100 może świadczyć o tym, że niekorzystny wpływ słabszych właściwości materiału WCM przeważa nad potencjalnymi korzyściami wynikającymi z pielęgnacji wewnętrznej.

3.3. Statyczny i dynamiczny moduł sprężystości

Podczas gdy wytrzymałość badano po 28 dniach dojrzewania, moduły sprężystości oznaczano po 28 i 91 dniach. Dynamiczny moduł sprężystości wyznaczono na podstawie czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego przez próbkę. Czas propagacji fali ultradźwiękowej zależy od mikrostruktury materiału – obecność mikrorys, porów oraz kruszyw o niższej jakości, takich jak WCM, powinna wydłużać czas przejścia sygnału, a tym samym obniżać wartość dynamicznego modułu sprężystości E_d .

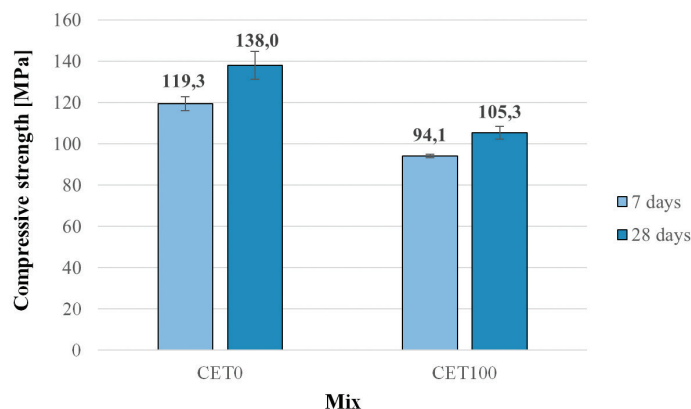
Jak pokazano na rysunku 5, różnica pomiędzy wartościami dynamicznego modułu sprężystości po 28 i 91 dniach była niewielka i wynosiła około 0,5%. Dynamiczny moduł sprężystości mieszanki referencyjnej był natomiast o około 22% wyższy niż w przypadku mieszanki CET100. Niższe wartości E_d dla betonów zawierających WCM były spodziewane i wynikają z zastosowania bardziej porowatego materiału odpadowego.

W przypadku statycznego modułu sprężystości E_s zanotowano podobną tendencję jak dla modułu dynamicznego. Wyniki przedstawiono na rys. 6. Mieszanka referencyjna osiągała wartości o około 25% wyższe niż beton zawierający WCM. Powszechnie wiadomo, że statyczny moduł sprężystości betonu jest bardzo wrażliwy na właściwości zastosowanego kruszywa, co najprawdopodobniej odpowiada za uzyskane różnice. W czasie badań zaobserwowano niewielki spadek wartości E_s dla mieszanki referencyjnej, o około 1,9% oraz niewielki wzrost dla mieszanki z WCM, około 1,7%. Zmiany te nie były jednak statystycznie istotne.

3.4. Mrozoodporność

Po 28 dniach dojrzewania próbki umieszczono w automatycznej komorze do badania mrozoodporności. W celu porównania wpływu cykli zamrażania i rozmrażania część próbek pozostawiono nadal owiniętych folią jako próbki świadki. Po przeprowadzeniu 125 cykli zamrażania i rozmrażania oznaczono podstawowe właściwości materiałowe próbek: gęstość objętościową, wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie oraz dynamiczny moduł sprężystości. Uzyskane wyniki zestawiono w tabelicy 2.

Na podstawie oznaczonych właściwości wyznaczono wskaźnik mrozoodporności, którego wartości przedstawiono na rys. 7. Analiza wyników wskazuje na wzrost wytrzymałości na zginanie po cyklach zamrażania i rozmrażania. W przypadku mieszanki CET0



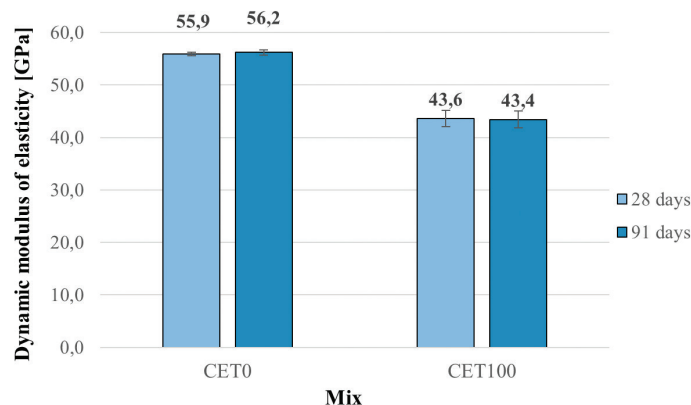
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonu wysokowartościowego z zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 4. Compressive strength of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).

3.3. Static and dynamic modulus of elasticity

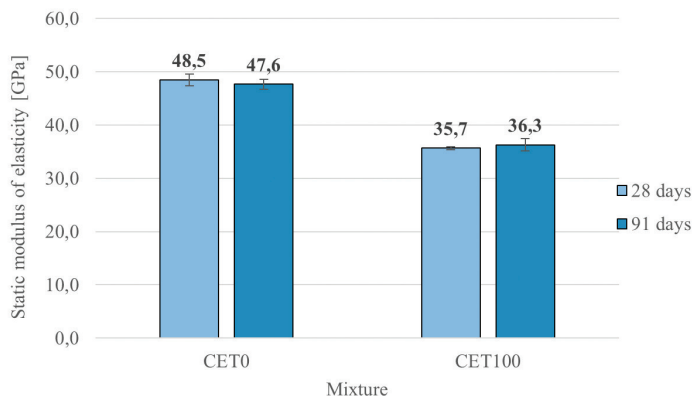
While the presented strengths were measured at the age of 28 days, the elastic moduli were measured at the age of 28 and 91 days. Firstly, the dynamic modulus of elasticity was calculated from the time of the ultrasound signal transmission through the test sample. The time of ultrasound transmission through the sample depends on the composition of the concrete. Microcracks, pores and poor-quality aggregates, for example WCM, should increase the time of ultrasound signal transmission and thus reduce the calculated value of the dynamic modulus of elasticity E_d . Fig. 5 shows that the difference between the dynamic elastic moduli at 28 and 91 days is not that significant [around 0.5 %]. The dynamic modulus of the reference mixture is approximately 22 % higher than the results of CET100 mixture. It was expected that the concrete with WCM particles would have lower E_d than reference concrete and these results is therefore not surprising.

In the case of static modulus of elasticity E_s , it is similar decreasing tendency of the results like in the case of dynamic modulus of elasticity E_d . Results of static moduli of elasticity are shown in Fig. 6, the reference mixture shows approximately 25 % higher results than WCM mixture. It is generally known that the values



Rys. 5. Dynamiczny moduł sprężystości betonu wysokowartościowego (HPC) z zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 5. Dynamic modulus of elasticity of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).



Rys. 6. Statyczny moduł sprężystości betonu wysokowartościowego (HPC) z częściowym zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 6. Static modulus of elasticity of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).

wzrost ten wyniósł około 33%, natomiast dla mieszanki CET100 około 43%. Dla wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano natomiast spadek o około 5% dla wszystkich badanych próbek. Dynamiczny moduł sprężystości zmniejszył się po cyklach zamrażania i rozmrażania o około 2%, niezależnie od rodzaju mieszanki.

Uzyskane wyniki są zaskakujące. Można było oczekiwać, że zastosowanie materiału WCM spowoduje obniżenie mrozoodporności betonu. Lepsza odporność na działanie mrozu może być związana z niewielką nasiąkliwością samego betonu, która ogranicza penetrację wody do wnętrza mikrostruktury materiału. Efekt ten może być dodatkowo wzmacniany przez pielęgnację wewnętrzną, ograniczającą powstawanie mikrorys w matrycy cementowej. Potwierdzeniem takiej interpretacji mogą być wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz modułów sprężystości. Różnice pomiędzy wynikami dla CET0 i CET100 wynikają nie tylko z ograniczenia rozwoju mikrorys, lecz także z zastosowania porowatego kruszywa, które charakteryzuje się niższą wytrzymałością i mniejszym modułem sprężystości. W konsekwencji wartości właściwości mechanicznych są niższe, jednak dzięki ograniczeniu powstawania mikrorys mrozoodporność okazuje się lepsza. Należy podkreślić, że podobny korzystny wpływ porowatych kruszyw, w tym kruszyw z recyklingu, na mrozoodporność betonu obserwowano również w innych programach badawczych (23, 24).

4. Wnioski

Zaprojektowano dwa rodzaje betonów wysokowartościowych: mieszankę referencyjną oraz mieszankę, w której najdrobniejsza

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚIWOŚCI PRÓBEK PRZED I PO CYKLACH ZAMRAŻANIA – ROZMRAŻANIA (25).

PROPERTIES OF SPECIMENS – REFERENCE AND FROSTED (25).

	CET0		CET100	
	Próbki odniesienia Reference	Próbki po cyklach Frosted	Próbki odniesienia Reference	Próbki po cyklach Frosted
Gęstość objętościowa / Volume density, kg/m ³	2400 ± 10	2400 ± 10	2250 ± 10	2240 ± 50
Wytrzymałość na zginanie / Bending strength, MPa	13.2 ± 0.7	17.6 ± 0.9	8.0 ± 0.1	11.4 ± 0.5
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa	145.1 ± 4.3	137.5 ± 4.8	109.9 ± 2.4	104.9 ± 4.1
Dynamiczny moduł sztywności / Dynamic moduli of elasticity, GPa	56.5 ± 0.4	55.4 ± 0.7	47.5 ± 0.5	46.4 ± 0.8

of the static modulus of elasticity of concrete are very sensitive to the properties of the used aggregates, which is probably the reason for the lower values of elasticity moduli. In the time, the results of reference mixture slightly decreased [about 1.9 %] and the results of WCM mixture slightly increased [about 1.7 %]. This is statistically not significant.

3.4. Frost resistance

The samples were placed in an automatic freezer after 28 days of curing. To compare the effects of the freezing cycles, some of the samples were still left in the foils. After 125 F&T cycles, the basic material properties of the samples were determined - volume density, bending strength, compressive strength and dynamic modulus of elasticity. The properties found are shown in Table 2

The frost resistance index of the samples was determined and is shown in Fig. 7. Based on this index, it is possible to observe an increase in the bending strengths of the prisms after F&T cycles. In the case of CET0 it is about 33 %. For the prisms with content of waste material [CET100] there was an increase of 43 %. In the case of compressive strengths, there was a reduction of strengths by about 5 % after F&T cycles for all samples. Dynamic modulus of elasticity decreases by about 2 % after F&T cycles for all samples.

These results are surprising. Rather, it was expected that the frost resistance of concrete containing WCM would decrease. The reason for better frost resistance may be the low water absorption of concrete, which does not allow water to penetrate deeper into the concrete structure. This could be influenced by internal curing, which may limit the formation of microcracks inside the concrete. This would be indicated by compressive strengths and elastic moduli. The difference between results of CET0 and CET100 are affected not only by the reduction of microcracks, but also by the use of porous aggregates, which certainly have lower values of strength and modulus of elasticity. The resulting values of the mechanical properties are lower, but due to the limitation of the formation of microcracks, the frost resistance is better. It should be noted that in other research programmes, the frost resistance was also increased in the case of using other porous aggregates, including recycled ones (23,24).

4. Conclusions

Two types of HPC were designed, the first one as a reference mixture and the second one with full replacement of finest aggregate

frakcja kruszywa została całkowicie zastąpiona materiałem WCM. W wieku 7 i 28 dni oznaczono gęstość objętościową, wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na zginanie. Zastosowanie alternatywnego kruszywa WCM, charakteryzującego się niższą gęstością objętościową, spowodowało obniżenie gęstości objętościowej próbek CET100. Również wytrzymałość na zginanie i ściskanie osiągała niższe wartości niż w przypadku mieszanki referencyjnej.

Próbki poddano również badaniom statycznego i dynamicznego modułu sprężystości po 28 i 91 dniach dojrzewania. Obie charakterystyki wykazały podobny spadek wartości w betonach zawierających WCM. Wpływ czasu dojrzewania na wyniki modułów sprężystości pomiędzy 28. a 91. dniem był dla obu mieszanek pomijalny. Oznacza to, że również betony zawierające WCM nie wykazują pogorszenia analizowanych właściwości w tym przedziale czasu.

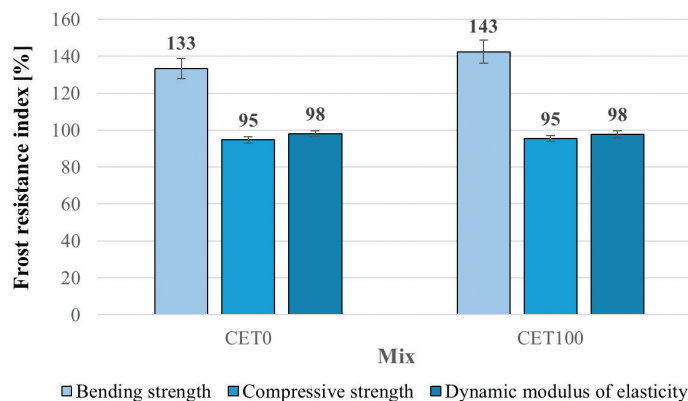
Szczególnie interesujące okazały się wyniki badań mrozoodporności. W przypadku betonu CET100 stwierdzono znaczący wzrost wytrzymałości na zginanie po cyklach zamrażania i rozmrażania. Może to stanowić przesłankę wskazującą na poprawę właściwości materiału dzięki zastosowaniu pielęgnacji wewnętrznej realizowanej za pomocą wstępnie nawilżonego materiału WCM.

Podziękowania

Praca została zrealizowana przy wsparciu projektu SGS [SP2024/097]. W badaniach wykorzystano również infrastrukturę rozwijaną w ramach projektu CirkArena nr CZ.10.03.01/00/22_003/0000045, finansowanego ze środków Europejskiego Funduszu na rzecz Sprawiedliwej Transformacji w ramach Programu Operacyjnego Sprawiedliwa Transformacja pod patronatem Ministerstwa Środowiska Republiki Czeskiej.

Literatura / References

1. A. Neville, P.C. Aitcin, High performance concrete—An overview. *Mater. Struct.* **31**(2), 111–117 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF02486473>.
2. P.C. Aitcin, The problems with high strength and low w/c ratio concretes. *Cem. Wapno Beton* **19**(2), 127–137 (2014).
3. M. Suzuki, M.S. Meddah, R. Sato, Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.* **39**(5), 373–381 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.007>.
4. J.X. Lu, P. Shen, H.A. Ali, C.S. Poon, Development of high performance lightweight concrete using ultra high performance cementitious composite and different lightweight aggregates. *Cem. Concr. Compos.* **124**, 104277 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104277>.
5. B.A. Tayeh, D.M.A. Saffar, R. Alyousef, The utilization of recycled aggregate in high performance concrete: A review. *J. Mater. Res. Technol.* **9**(4), 8469–8481 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.126>.
6. D. Caro, C. Lodato, A. Damgaard, J. Cristóbal, G. Foster, F. Flachenecker i in., Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union. *Sci. Total Environ.* **908**, 168295 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168295>.
7. M. Melo, Analysis of the possibility of using waste from the production of cement-bonded particleboards. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Technology of Building Materials and Components, Brno (2013).



Rys. 7. Wskaźnik mrozoodporności betonu wysokowartościowego z zastąpieniem kruszywa materiałem WCM (25).

Fig. 7. Frost resistance index of HPC with replacement of aggregate with WCM (25).

fraction by WCM. Samples were tested to determine the volume density, compressive strength and bending strength at the age of 7 and 28 days. Due to the use of the alternative aggregate [WCM] with lower volume density, the volume density of the CET100 samples decreased. The bending strength and compressive strength also showed lower values than in the case of the reference mix. Samples were also tested to determine static and dynamic moduli of elasticity at the age of 28 and 91 days. These characteristics also show a similar decrease in values for concrete with WCM content. The influence of time in the case of results from testing elastic moduli at the age of 28 and 91 days is neglectable for both mixtures. This indicates that even concretes with WCM do not deteriorate in the observed properties in this time interval. The results from the frost resistance tests are interesting. In the case of CET100 concrete, there is a significant improvement in the bending strength after F&T cycles. This could be evidence of improved properties through internal curing of mixtures with the use of pre-wetted WCM.

Acknowledgements

This paper was supported by the SGS [project SP2024/097], while the infrastructure has been utilized in the frame of project CirkArena, number CZ.10.03.01/00/22_003/0000045 supported from the European Just Transition Fund within the Operational Programme Just Transition under the aegis of the Ministry of the Environment of the Czech Republic.

8. A. Bartoň, Possibilities of usage of waste from the production of cement-bonded particleboard in building materials. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Technology of Building Materials and Components, Brno (2018).
9. J.S. Suh, E.C. Kang, J.Y. Park, Manufacturing characteristics of cement-bonded wood composite board as sound absorption type-noise barrier. *J. Korean Wood Sci. Technol.* **32**(6) (2004).
10. K. Matyskova, V. Bilek, L. Prochazka, R. Hedlova, M. Hornakova, Replacement of fine aggregates in fine-grained concrete by waste material from Cetrus boards production. *Defect Diffus. Forum* **432**, 31–38 (2024). <https://doi.org/10.4028/p-sMCI67>.
11. EN 1097-7, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Determination of the particle density of filler – Pycnometer method. European Committee for Standardization, Brussels (2022).
12. ČSN 72 1070, Determination of pH of ceramic raw materials and masses. Czech Agency for Standardization, Prague (2015).
13. EN 196-3, Methods of testing cement – Part 3: Determination of setting times and soundness. European Committee for Standardization, Brussels (2017).
14. N.L. Thomas, J.D. Birchall, The retarding action of sugars on cement hydration. *Cem. Concr. Res.* **13**(6), 830–842 (1983). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90084-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90084-4).
15. D.P. Miller, A.A. Moslemi, Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fiber Sci.* **23**(4), 472–482 (1991).
16. EN 196-1, Methods of testing cement – Determination of strength. European Committee for Standardization, Brussels (2016).
17. EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). European Committee for Standardization, Brussels (1999).
18. EN 12390-7, Testing hardened concrete – Density of hardened concrete. European Committee for Standardization, Brussels (2019).
19. ISO 1920-10, Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. International Organization for Standardization, Geneva (2010).
20. EN 12504-4, Testing concrete in structures – Determination of ultrasonic pulse velocity. European Committee for Standardization, Brussels (2021).
21. ČSN 73 1371, Non-destructive testing of concrete – Method of ultrasonic pulse testing of concrete. Czech Agency for Standardization, Prague (2011).
22. ČSN 73 1322, Determination of frost resistance of concrete. Czech Agency for Standardization, Prague (1969).
23. V. Bilek, M. Pesata, K. Matyskova, P. Miarka, Long-term development of mechanical properties of concrete with different water to cement ratio and internal curing ability. *Fract. Struct. Integr.* **19**(71), 263–272 (2024). <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.71.19>.
24. T. Pavlů, K. Fořtová, J. Řepka, D. Mariaková, J. Pazderka, Improvement of the durability of recycled masonry aggregate concrete. *Materials* **13**(23), 5486 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13235486>.

Repository

25. Experimental dataset: HPC with substitution of aggregates by CETRIS waste material. 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14244224>.