dr inż. Alicja Wieczorek[1)*)]
ORCID: 0000-0003-2723-3552
dr inż. Dalia Bednarska[1)]
ORCID: 0000-0002-2146-0650
dr inż. Kalina Materak[1)]
ORCID: 0000-0003-1232-8399
inż. Bartosz Nowak[2)]
inż. Jakub Łompieś[2)]

Durability of low-clinker concretes in the context of sustainable development of construction materials

Trwałość betonów o obniżonej zawartości klinkieru w aspekcie zrównoważonego rozwoju materiałów budowlanych

DOI: 10.15199/33.2026.10.21

Abstract. The aim of this study was to evaluate the durability of concretes made with CEM I, CEM III, and CEM V cements in the context of sustainable construction materials. The influence of 100 freeze–thaw cycles on the mechanical and durability properties of the concretes was investigated. Concrete made with CEM III cement exhibited the highest resistance to frost degradation, whereas the greatest susceptibility to degradation was observed for concrete containing CEM V cement. The results indicate that CEM III cement provides a favorable compromise between concrete durability and the reduction of the carbon footprint.
Keywords: carbon footprint of cement; freeze-thaw resistance of concrete; low-clinker cements; durability of concrete.

Streszczenie. W artykule przedstawiono ocenę trwałości betonów wykonanych z cementów CEM I, CEM III i CEM V w kontekście zrównoważonego rozwoju materiałów budowlanych. Oceniono wpływ stu cykli zamrażania i rozmrażania na właściwości mechaniczne i trwałość betonów. Największą odporność na degradację mrozową wykazał beton z cementem CEM III, natomiast największą podatność na degradację stwierdzono w betonie z cementem CEM V. Uzyskane wyniki wskazują, że cement CEM III stanowi korzystny kompromis między trwałością betonu a ograniczeniem śladu węglowego.
Słowa kluczowe: ślad węglowy cementu; mrozoodporność betonu; cementy o obniżonej zawartości klinkieru; trwałość betonu.

The construction sector's transition toward climate neutrality has made reducing the environmental impact of building materials one of the key challenges facing the modern construction industry. This is reflected in European Union policy, including the EPBD *(Energy Performance of Buildings Directive)* [1] and the CPR *(Construction Products Regulation)* [2], which promote the design of buildings with low environmental impact throughout their entire life cycle.

Consequently, Life Cycle Assessment (LCA), conducted in accordance with PN-EN 15804+A2 [3], is becoming increasingly important, with its results reported in Environmental Product Declarations (EPDs) [4].

One of the main directions in the decarbonization of cement production is to reduce the Portland clinker content by replacing it with mineral additions. This approach makes it possible to significantly reduce the carbon footprint of cement while utilizing by-products from other industries, in line with the principles of a circular economy. At the same time, numerous studies indicate that the use of mineral additions affects the hydration process, microstructure development, transport properties [5, 6], and the durability of concrete, while the nature of these changes depends on the type and proportion of the mineral components used [7, 8]. It should be noted, however, that

Transformacja sektora budowlanego w kierunku neutralności klimatycznej sprawia, że ograniczenie wpływu materiałów budowlanych na środowisko stało się jednym z najważniejszych wyzwań współczesnego budownictwa. Znajduje to odzwierciedlenie w polityce Unii Europejskiej, m.in. w Dyrektywie EPBD *(Energy Performance of Buildings Directive)* [1] oraz Rozporządzeniu CPR *(Construction Products Regulation)* [2], promujących projektowanie obiektów o niskim oddziaływaniu środowiskowym w całym cyklu życia.

Coraz większego znaczenia nabiera zatem ocena cyklu życia wyrobów (*Life Cycle Assessment* – LCA), wykonywana zgodnie z normą PN-EN 15804+A2 [3], której wyniki prezentowane są w deklaracjach środowiskowych EPD *(Environmental Product Declaration)* [4].

Jednym z głównych kierunków dekarbonizacji produkcji cementu jest ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego przez zastąpienie go dodatkami mineralnymi. Rozwiązanie to pozwala znacznie ograniczyć ślad węglowy cementu oraz wykorzystać produkty uboczne z innych gałęzi przemysłu, wpisując się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednocześnie liczne badania wskazują, że zastosowanie dodatków mineralnych wpływa na przebieg hydratacji, rozwój mikrostruktury, właściwości transportowe [5, 6] oraz trwałość betonów, a charakter tych zmian zależy od rodzaju i udziału zastosowanych składników mineralnych [7, 8]. Należy jednak zwrócić uwagę, że ograniczenie śladu węglowego materiału nie powinno być oceniane wyłącznie na podstawie emisji

[1)] Politechnika Łódzka,Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[2)] student
[*)] Correspondence address: alicja.marciniak@p.lodz.pl

reducing the carbon footprint of a material should not be assessed solely on the basis of emissions associated with its production. Actual environmental benefits can be achieved only when reductions in CO_2 emissions are accompanied by adequate material durability throughout its service life. The aim of this article is to assess the effect of CEM I, CEM III, and CEM V cements on concrete durability in the context of the sustainable development of building materials. The study examined the resistance of concrete to cyclic freezing and thawing, as well as its resistance to carbonation following frost exposure. The results were related to the carbon footprint, indicating that the environmental assessment of concrete with reduced clinker content should take into account not only the carbon footprint associated with cement production but also the durability of the material, which determines its actual environmental impact throughout its entire life cycle.

Materials and methods

The scope of the study included the preparation of three series of concretes differing only in the type of cement used, while maintaining a constant water-to-cement ratio (w/c = 0.5). The tests were performed on concrete made with CEM I 52.5 N-NA, CEM III/A 42.5 N, and CEM V/A (S-V) 32.5 R cements. The mix compositions are presented in Table 1.

Table 1. Composition of the tested specimens per 1 m^3
Tabela 1. Skład badanych próbek w przeliczeniu na 1 m^3

Sample designation/Oznaczenie	CEM I	CEM III	CEM V
Cement [kg]	CEM I 52,5 N-NA	CEM III A 42,5 N	CEM V/A (S-V) 32,5 R
		390	
Water [kg]/Woda [kg]		195	
Granite (8 – 16 mm) [kg]/Granit (8 – 16 mm) [kg]		558	
Granite (2 – 8 mm) [kg]/Granit (2 – 8 mm) [kg]		648	
Sand (0 - 2 mm) [kg]/Piasek (0 – 2 mm) [kg]		594	
w/c		0,5	

Due to the slower strength development of concretes made with CEM III and CEM V cements, resulting from the presence of mineral additions, the tests were conducted after 56 days of curing the specimens in water. The internal frost resistance of the concrete was assessed in accordance with PN-88/B-06250 [9]:

- number of specimens subjected to freeze – thaw cycles: 6 (for each type of concrete) + 6 control cubes (stored in water throughout the entire freeze–thaw testing period);
- specimen dimensions: 100 x 100 x 100 mm^3;
- temperature range during one cycle: +18°C ± 2°C to −18°C ± 2°C;
- duration of one cycle: 6 – 8 hours;
- total number of cycles: 100;
- tested parameters: mass loss (%), capillary water absorption [10], ultrasonic wave propagation velocity [11], decrease in compressive strength [12], depth of water penetration under pressure [13].

związanych z jego produkcją. Rzeczywiste korzyści środowiskowe mogą zostać osiągnięte jedynie wówczas, gdy redukcji emisji CO_2 towarzyszy zachowanie odpowiedniej trwałości materiału w okresie jego użytkowania. W artykule omówiono wpływ cementów CEM I, CEM III oraz CEM V na trwałość betonów w aspekcie zrównoważonego rozwoju materiałów budowlanych. W ramach badań przeanalizowano odporność betonów na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz odporność na karbonatyzację po oddziaływaniu mrozu. Uzyskane wyniki odniesiono do śladu węglowego, wskazując, że ocena środowiskowa betonów o zmniejszonej zawartości klinkieru powinna uwzględniać nie tylko ślad węglowy związany z produkcją cementu, ale również trwałość materiału determinującą jego rzeczywisty wpływ środowiskowy w całym cyklu życia

Materiały i metody badań

Zakres badań obejmował wykonanie trzech serii betonów różniących się wyłącznie rodzajem zastosowanego cementu, z zachowaniem stałego stosunku wody do cementu (w/c = 0,5). Przeprowadzono badania betonów na bazie cementów CEM I 52,5 N-NA, CEM III/A 42,5 N oraz CEM V/A(S-V) 32,5 R. Skład mieszanek przedstawiono w tabeli 1.

Ze względu na wolny przyrost wytrzymałości betonów wykonanych z cementów CEM III i CEM V, wynikający z obecności dodatków mineralnych, do badań przystąpiono po 56 dniach dojrzewania próbek w wodzie. Badanie mrozoodporności wewnętrznej betonów wykonano zgodnie z PN-88/B-06250 [9]:

- liczba próbek zamrażanych – 6 z każdego rodzaju betonu + 6 kostek kontrolnych (przechowywane przez cały okres cykli mrozowych w wodzie);
- wymiary próbki – 100 x 100 x 100 mm^3;
- zakres temperatury podczas 1 cyklu: +18°C +/- 2°C do -18°C +/- 2°C;
- czas trwania 1 cyklu – 6 – 8 h;
- całkowita liczba cykli – 100;
- badany parametr: ubytek masy [%]; absorpcja kapilarna wody [10]; prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej [11]; zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie [12]; głębokość wnikania wody pod ciśnieniem [13].

Depth of water penetration under pressure. After removal from the climatic chamber (100 freeze-thaw cycles) or from water (control specimens), the specimens were stored for 14 days under air-dry conditions (T = 20°C ± 2°C; RH = 55% ± 5%). Subsequently, four sides of each specimen were coated with an epoxy resin sealant. The two uncoated sides were opposite one another. The specimens were then placed in a water permeability testing machine for 72 hours (Photo 1).



Photo 1. Concrete specimens after 100 freeze-thaw cycles subjected to the water penetration under pressure test

Fot. 1. Betonowe próbki po stu cyklach mrażania i rozmrażania podczas wnikania wody pod ciśnieniem

Resistance to carbonation was assessed in accordance with PN-EN 12390-12 [14] by determining the depth of CO_2 penetration into the concrete specimens. Two cubic specimens from each series were used for the tests: specimens subjected to 100 freeze-thaw cycles and control specimens stored in water. Before testing, the specimens were conditioned for 21 days under laboratory conditions (T = 20°C, RH = 55%), after which four side surfaces were sealed with silicone, leaving two opposite surfaces exposed. Carbonation was carried out for 28 days in a chamber with a relative humidity of 55% and a CO_2 concentration of 4%. After the exposure period, the specimens were broken, the fracture surfaces were sprayed with a phenolphthalein solution, and the carbonation depth was determined based on the color boundary, with five measurements taken on each surface.

Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem. Próbki po wyjęciu z komory klimatycznej (100 cykli mrozowych) i wody (próbki kontrolne) przechowywano przed badaniem przez 14 dni w warunkach powietrzno-suchych (T = 20°C +/- 2°C; RH = 55% +/- 5%). Kolejno, cztery ściany każdej z próbek pokryto środkiem uszczelniającym w postaci żywicy epoksydowej. Dwie z niepokrytych ścian były do siebie przeciwległe. Następnie, próbki umieszczono na 72 h w maszynie przeznaczonej do badania przepuszczalności wody (fotografia 1).

Odporność na korozję węglanową (karbonatyzację) zbadano zgodnie z normą PN-EN 12390-12 [14], określając głębokość wnikania CO_2 do próbek betonowych. Do badań wykorzystano po dwie kostki sześcienne z każdej serii: próbki po stu cyklach zamrażania i rozmrażania oraz próbki kontrolne, przechowywane w wodzie. Przed badaniem próbki sezonowano przez 21 dni w warunkach laboratoryjnych (T = 20°C, RH = 55%), a następnie uszczelniono silikonem cztery powierzchnie boczne, pozostawiając dwie przeciwległe odsłonięte. Karbonatyzację prowadzono przez 28 dni w komorze o wilgotności względnej 55% i stężeniu CO_2 równym 4%. Po zakończeniu ekspozycji próbki przełamano, powierzchnie przełomu spryskano roztworem fenoloftaleiny, a głębokość karbonatyzacji wyznaczono na podstawie granicy zabarwienia, wykonując po pięć pomiarów na każdej powierzchni.

Results

Mass loss. After 100 freeze–thaw cycles, no significant change in the mass of the specimens made with CEM I and CEM III cements was observed. In contrast, a slight increase in specimen mass was observed for the concrete made with CEM V cement (4.3 g on average). This phenomenon may be interpreted as a result of increased water absorption associated with the formation of microdamage and changes in the pore structure of the concrete. The increase in mass may indicate the initiation of freeze–thaw degradation processes. At later stages of degradation, the propagation and formation of cracks may lead to the detachment of concrete fragments.

Ultrasonic wave propagation velocity. The average values of ultrasonic wave transit time and ultrasonic wave propagation velocity for control specimens and specimens subjected to 100 freeze-thaw cycles are presented in Table 2.

Wyniki badań

Ubytek masy. Po stu cyklach zamrażania i rozmrażania betonów wykonanych z cementów CEM I oraz CEM III nie odnotowano istotnej zmiany masy badanych próbek, natomiast w przypadku betonu wykonanego z cementu CEM V zaobserwowano niewielki przyrost masy próbek (średnio 4,3 g). Zjawisko to można interpretować jako efekt zwiększonej absorpcji wody, wynikającej z powstawania mikrouszkodzeń oraz zmian w strukturze porowatej betonu. Wzrost masy może świadczyć o inicjacji procesów degradacji mrozowej. W dalszych etapach degradacji rozwój i łączenie się mikropęknięć może prowadzić do odspajania fragmentów betonu.

Prędkość fali ultradźwiękowej. Średnie wartości czasu przejścia oraz prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w przypadku próbek kontrolnych i próbek poddanych stu cyklom zamrażania i rozmrażania przedstawiono w tabeli 2.

Table 2. Comparison of ultrasonic pulse velocity for different types of concrete as a function of the number of freeze–thaw cycles

Tabela 2. Porównanie prędkości fal ultradźwiękowych w różnych rodzajach betonu w zależności od liczby cykli zamrażania i rozmrażania

Sample designation/ Beton z cementu	Average ultrasonic pulse travel time ± standard deviation [µs]:/ Średni czas przejścia fali dla danego betonu wraz z odchyleniem [µs]:			Average ultrasonic pulse velocity [km/s]:/ Średnia prędkość fali ultradźwiękowej [km/s]:		
	0 f-t cycles/0 cykli	50 f-t cycles/50 cykli	100 f-t cycles/100 cykli	0 f-t cycles/0 cykli	50 f-t cycles/50 cykli	100 f-t cycles/100 cykli
CEM I	22,1 (±0,3)	22,7 (±0,1)	23,3 (±0,4)	4,5	4,4	4,3
CEM III	22,6 (±0,3)	23,0 (±0,2)	23,1 (±0,1)	4,4	4,3	4,3
CEM V	22,4 (±0,2)	25,0 (±0,7)	26,1 (±1,1)	4,5	4,0	3,8

The results showed that the greatest changes occurred in concrete made with CEM V cement. After 100 freeze-thaw cycles, an increase in wave transit time was observed, resulting in a 14% decrease in its propagation velocity compared with the control specimens. This result may indicate the development of internal microdamage and an increase in discontinuities within the concrete structure. For concrete made with CEM I cement, the decrease in ultrasonic wave propagation velocity was 5%, whereas for concrete made with CEM III cement, it was only 2%.

Compressive strength. The effect of 100 freeze-thaw cycles on the compressive strength of concrete is shown in Figure 1 (the results are the averages of three specimens). The greatest decrease in strength was observed for concrete made with CEM V cement (32%), followed by concrete made with CEM I cement (16%), while the smallest decrease was observed for concrete made with CEM III cement (3%). Since all mixtures were prepared with the same water-to-cement ratio and aggregate composition, the observed differences can be attributed primarily to the properties of the cement used and the different reaction kinetics of its mineral components. CEM III/A 42.5 N-LH/HSR/NA cement belongs to a group of cements with a high proportion of granulated blast furnace slag and is characterized by hydraulic activity. In contrast, CEM V/A (S-V) cement contains both slag and fly ash, with the pozzolanic reaction of the latter proceeding more slowly. As a result, the formation of secondary C-S-H phases and microstructural densification proceeded more slowly than in concrete made with CEM III cement, favoring greater water transport and more intensive degradation during cyclic freezing and thawing.

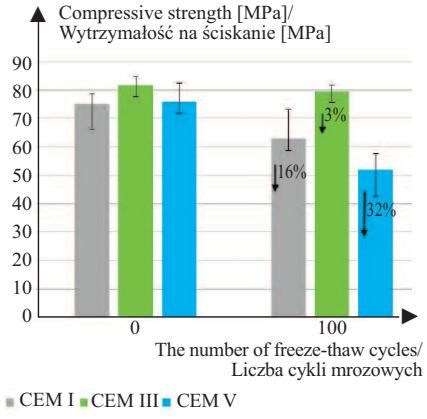


Fig. 1. Effect of the number of freeze–thaw cycles on the compressive strength of concrete
Rys. 1. Wytrzymałość betonu na ściskanie w zależności od liczby cykli działania mrozowych

The presence of granulated blast furnace slag in CEM III cement promotes the formation of additional hydration products, leading to densification of the cement matrix, reduced permeability, and a decrease in the amount of water freezing in the pores. As a result, the concrete exhibits greater resistance to damage caused by cyclic freezing and thawing, as also confirmed by the results of capillary water absorption and water penetration under pressure.

Capillary water absorption. Capillary water absorption was determined for concrete specimens after 100 freeze–thaw cycles and for the corresponding control specimens. The determined capillary absorption coefficients are presented in Table 3, while the capillary absorption curves are shown in Figure 2. Concrete made with CEM III slag cement exhibited similar capillary water absorption in the control specimens and after 100 freeze–thaw cycles, indicating a minor effect of freeze–thaw exposure on the permeability of the concrete structure. A different trend was observed for concrete made with CEM V multi-component cement. After freeze–thaw exposure, a clear increase in the amount of absorbed water and in the capillary absorption coefficient was observed,

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że największe zmiany odnotowano w przypadku betonu wykonanego z cementu CEM V. Po stu cyklach zamrażania i rozmrażania stwierdzono wydłużenie czasu przejścia fali, co spowodowało zmniejszenie prędkości jej propagacji o 14% w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Wynik ten może wskazywać na rozwój mikrouszkodzeń wewnętrznych oraz zwiększenie nieciągłości struktury betonu. W przypadku betonu wykonanego z cementu CEM I spadek prędkości propagacji fali ultradźwiękowej wyniósł 5%, natomiast betonu z cementu CEM III jedynie 2%.

Wytrzymałość na ściskanie. Wpływ stu cykli zamrażania i rozmrażania na wytrzymałość betonu na ściskanie przedstawiono na rysunku 1 (wyniki stanowią średnie z trzech próbek). Największy spadek wytrzymałości odnotowano w przypadku betonu z cementu CEM V (32%), mniejszy betonu z cementu CEM I (16%), natomiast najmniejszy betonu z cementu CEM III (3%). W związku z tym, że wszystkie mieszanki wykonano przy identycznym stosunku w/c oraz tym samym składzie kruszyw, obserwowane różnice należy wiązać przede wszystkim z właściwościami zastosowanego cementu oraz odmienną kinetyką reakcji jego składników mineralnych. Cement CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA należy do grupy cementów o dużym udziale granulowanego żużla wielkopiecowego, charakteryzującego się aktywnością hydrauliczną. Z kolei cement CEM V/A (S-V) zawiera zarówno żużel, jak i popiół lotny, którego reakcja pucolanowa przebiega wolniej. W rezultacie tworzenie wtórnych faz C-S-H oraz uszczelnianie mikrostruktury przebiegały wolniej niż w przypadku betonu z cementem CEM III, co sprzyjało większemu transportowi wody i intensywniejszej degradacji podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Obecność granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie CEM III sprzyja powstawaniu dodatkowych produktów hydratacji, prowadząc do uszczelnienia matrycy cementowej, ograniczenia przepuszczalności oraz zmniejszenia ilości wody zamarzającej w porach. W efekcie beton wykazuje większą odporność na uszkodzenia wywołane cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem, co znajduje potwierdzenie również w wynikach badań absorpcji kapilarnej oraz głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

Absorpcję kapilarną wody badano na próbkach betonów po stu cyklach zamrażania i rozmrażania oraz na odpowiadających im próbkach kontrolnych. Wyznaczone współczynniki absorpcji kapilarnej przedstawiono w tabeli 3, natomiast przebieg absorpcji kapilarnej zaprezentowano na rysunku 2. Betony wykonane z cementu hutniczego CEM III charakteryzowały się zbliżoną absorpcją kapilarną próbek kontrolnych i po stu cyklach zamrażania i rozmrażania, co wskazuje na niewielki wpływ oddziaływania mrozu na szczelność ich struktury. Odmienny przebieg zaobserwowano w przypadku betonów wykonanych z cementu wieloskładnikowego CEM V. Po oddziaływaniu mrozu stwierdzono w nich wyraźne zwięk-

Table 3. Average capillary water absorption coefficients of concretes subjected to freeze–thaw cycles
Tabela 3. Uśrednione współczynniki absorpcji kapilarnej betonów poddanych badaniu mrozoodporności

The number of freeze--thaw cycles / Liczba cykli mrozowych	CEM I		CEM III		CEM V	
	capillary water absorption coefficients/ współczynnik absorpcji kapilarnej	standard deviation/odchylenie standardowe	capillary water absorption coefficients/ współczynnik absorpcji kapilarnej	standard deviation/odchylenie standardowe	capillary water absorption coefficients/ współczynnik absorpcji kapilarnej	standard deviation/odchylenie standardowe
	[kg/(m²·h^{0,5})]					
0 (reference samples)/ 0 (próbki kontrolne)	0,331	0,018	0,259	0,021	0,323	0,034
100	0,563	0,028	0,252	0,040	0,552	0,131

with the latter increasing by approximately 70% compared with the control specimens.

In the case of concrete made with CEM I Portland cement, an increase in the capillary absorption coefficient was also observed after 100 freeze–thaw cycles. However, the increase was smaller than that observed for concrete made with CEM V cement. It should be emphasized, however, that capillary water absorption is one of the parameters describing the transport properties of concrete and should not be interpreted as the sole factor determining its frost resistance. Frost resistance results from the interaction between the transport properties of the material, the physicochemical properties of the cement used, and the microstructure formed during hydration [15, 16].

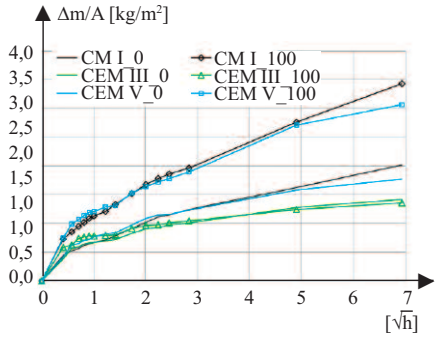


Fig. 2. Capillary water absorption of concretes
Rys. 2. Przebieg absorpcji kapilarnej betonów

Depth of water penetration under pressure. After 72 h of exposure to water under pressure, the specimens were split, and the maximum depth of water penetration was measured on the resulting fracture surfaces. The results are presented in Table 4 and Photograph 2. The greatest depth of water penetration, accompanied by the largest increase in specimen mass (approximately 32 g), was recorded for the concrete made with CEM V cement after 100 freeze–thaw cycles. In contrast, the concrete made with CEM III cement exhibited the lowest depth of water penetration and the smallest increase in specimen mass (approximately 3.5 g).

szenie ilości podciągniętej wody oraz współczynnika absorpcji kapilarnej o ok. 70% w porównaniu z próbkami kontrolnymi.

W przypadku betonu wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I odnotowano również zwiększenie współczynnika absorpcji kapilarnej po stu cyklach zamrażania i rozmrażania. Był on jednak mniejszy niż w przypadku betonu z cementem CEM V. Należy jednak podkreślić, że absorpcja kapilarna stanowi jeden z parametrów opisujących właściwości transportowe betonu i nie powinna być interpretowana jako jedyny czynnik decydujący o jego mrozoodporności. Uzyskana odporność na działanie mrozu jest wynikiem współoddziaływania właściwości transportowych materiału, właściwości fizykochemicznych zastosowanego cementu oraz mikrostruktury kształtującej się w procesie hydratacji [15, 16].

Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem. Po 72 h działania wody pod ciśnieniem próbki przełamano, a na powierzchni przełomu wyznaczono maksymalną głębokość penetracji wody. Wyniki przedstawiono w tabeli 4 oraz na fotografii 2. Największą głębokość penetracji wody oraz największy przyrost masy próbek (ok. 32 g) odnotowano w przypadku betonu wykonanego z cementu CEM V po stu cyklach zamrażania i rozmrażania. Najmniejszą głębokość penetracji oraz najmniejszy przyrost masy próbek (ok. 3,5 g) stwierdzono w przypadku betonu z cementu CEM III.

Table 4. Maximum depth of water penetration under pressure in concrete specimens
Tabela 4. Maksymalna głębokość wniknięcia wody pod ciśnieniem w betonowe próbki

Composition symbol/ Parametr	CEM I		CEM III		CEM V	
	the number of freeze-thaw cycles/ liczba cykli zamrażania/ rozmrażania					
	0	100	0	100	0	100
Maximum depth of water penetration in concrete specimens [mm]/ Maksymalna głębokość wniknięcia wody w próbkę [mm]	22	59	8	14	12	100

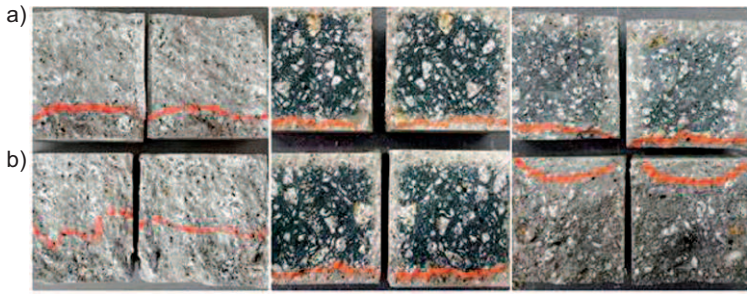


Photo 2. Depth of water penetration under pressure in concrete specimens made with CEM I, CEM III, and CEM V: a) control specimens; b) specimens subjected to 100 freeze–thaw cycles
Fot. 2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w próbkach betonów wykonanych z cementów CEM I, CEM III oraz CEM V: a) próbki kontrolne; b) próbki po stu cyklach zamrażania i rozmrażania

Susceptibility of concrete to carbonation after freeze–thaw exposure. The average carbonation depths, together with the coefficients of variation, are presented in Table 5. Cross-sections of the concrete specimens after application of a phenolphthalein solution are shown in Photograph 3. Among the control specimens, the greatest carbonation depth was observed in concrete made with CEM V cement (5.9 mm), followed by concrete made with CEM III cement (3.5 mm), whereas the smallest depth was observed in concrete made with CEM I cement (2.4 mm). These results indicate that concrete made with cements with reduced clinker content is more susceptible to carbonation than the reference concrete. Exposure to 100 freeze–thaw cycles resulted in a further increase in carbonation depth in all analyzed concretes. For concrete made with CEM I cement, the carbonation depth increased to 3.3 mm, i.e., by 0.9 mm (38%). For concrete made with CEM III cement, it increased from 3.5 to 5.0 mm, corresponding to an increase of 43%. Concrete made with CEM V cement exhibited the largest absolute increase, amounting to 2.3 mm (from 5.9 to 8.2 mm, i.e., 39%). This phenomenon can be explained by the interaction of two mechanisms. On the one hand, the use of mineral additions leads to a reduction in the portlandite ($Ca(OH)_2$) content, thereby reducing the concrete's buffering capacity and its ability to maintain a high pH, and consequently increasing its susceptibility to carbonation [17, 18]. On the other hand, cyclic freezing and thawing causes degradation of the material's microstructure. This is evidenced by a decrease in ultrasonic wave propagation velocity, indicating the development of microcracks and disruption of microstructural continuity. The resulting damage may lead to the formation of an interconnected network of pores and microcracks, facilitating CO_2 ingress into the concrete [19]. Consequently, carbonation may proceed more rapidly than in concrete not exposed to freeze–thaw cycles.

Podatność betonów na karbonatyzację po oddziaływaniu mrozu. Średnią głębokość karbonatyzacji wraz ze współczynnikiem zmienności przedstawiono w tabeli 5. Przełomy próbek betonowych po naniesieniu roztworu fenoloftaleiny zamieszczono na fotografii 3. W przypadku próbek kontrolnych największą głębokość karbonatyzacji wykazał beton z cementem CEM V (5,9 mm), następnie beton z cementem CEM III (3,5 mm), natomiast najmniejszą z cementem CEM I (2,4 mm). Wyniki te wskazują, że betony wykonane z cementów o obniżonej zawartości klinkieru mają większą podatność na karbonatyzację niż beton referencyjny. Oddziaływanie stu cykli zamrażania i rozmrażania spowodowało dalszy wzrost głębokości karbonatyzacji we wszystkich analizowanych betonach. W przypadku betonu z cementem CEM I głębokość karbonatyzacji zwiększyła się do 3,3 mm, tj. o 0,9 mm (38%), betonu z cementem CEM III z 3,5 do 5,0 mm, tj. o 43%, natomiast w przypadku betonu z cementem CEM V odnotowano największy bezwzględny przyrost, wynoszący 2,3 mm (z 5,9 do 8,2 mm, tj. o 39%). Zaobserwowane zjawisko można wyjaśnić współdziałaniem dwóch mechanizmów. Z jednej strony zastosowanie dodatków mineralnych prowadzi do zmniejszenia zawartości portlandytu ($Ca(OH)_2$), zmniejszając zdolność betonu do utrzymania wysokiego pH i zwiększając tym samym jego podatność na karbonatyzację [17, 18]. Z drugiej strony cykliczne zamrażanie i rozmrażanie powoduje degradację mikrostruktury materiału. O procesie tym świadczy zmniejszenie prędkości propagacji fali ultradźwiękowej, wskazujące na rozwój mikropęknięć oraz naruszenie ciągłości mikrostruktury. Powstałe uszkodzenia prowadzą do rozwoju połączonej sieci porów i mikropęknięć, zwiększając właściwości transportowe betonu oraz ułatwiając dyfuzję CO_2 do jego wnętrza [19]. W konsekwencji proces karbonatyzacji może przebiegać szybciej niż w betonie niepoddanym oddziaływaniu mrozu.

Table 5. Average carbonation depth of control specimens and specimens subjected to 100 freeze–thaw cycles
Tabela 5. Średnia głębokość karbonatyzacji betonów w przypadku próbek kontrolnych i próbek po stu cyklach zamrażania i rozmrażania

The number of freeze-thaw cycles /Liczba cykli mrozowych	CEM I	CEM III	CEM V
	average carbonation depth [mm] (± c_V [%])/ głębokość karbonatyzacji [mm] (± c_V [%])		
Reference samples/ Próbki kontrolne	2,4 (± 20,2)	3,5 (± 25,0)	5,9 (± 28,0)
100	3,3 (± 21,5)	5,0 (± 24,9)	8,2 (± 22,6)

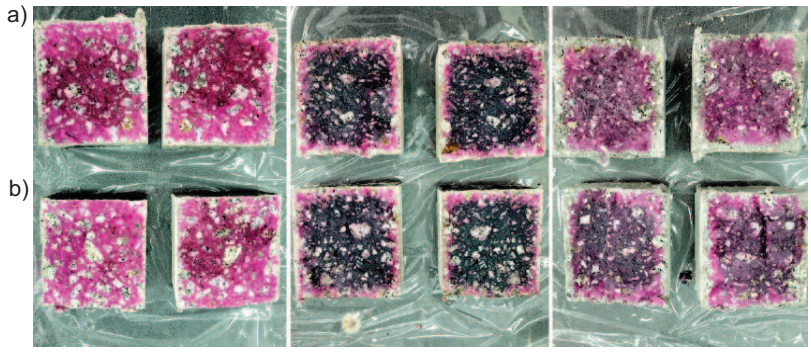


Photo 3. Fractured surfaces of concrete specimens after application of phenolphthalein solution: a) control specimens; b), specimens subjected to 100 freeze–thaw cycles
Fot. 3. Przełomy próbek betonowych po naniesieniu roztworu fenoloftaleiny: a) próbki kontrolne; b) próbki po stu cyklach zamrażania i rozmrażania

Carbon footprint of selected cements

The use of cements with reduced clinker content makes it possible to reduce CO_2 emissions already at the production stage (LCA modules A1-A3), which includes raw material extraction, transportation, and the manufacturing process. The calculations were based on a Type III Environmental Product Declaration developed by the Building Research Institute [20]

Ślad węglowy wybranych cementów

Zastosowanie cementów o obniżonej zawartości klinkieru pozwala ograniczyć emisję CO_2 już na etapie produkcji (moduły A1 – A3 analizy LCA), obejmującym pozyskanie surowców, ich transport oraz proces wytwarzania. Obliczenia wykonano na podstawie Deklaracji Środowiskowej Produktu Typu III, opracowanej przez Instytut Techniki Budowlanej [20] zgodnie

in accordance with [21]. For a cement content of 390 kg/m³ of concrete, the carbon footprint values were 0.155 t CO_2 eq/m³ for CEM III and 0.168 t CO_2 eq/m³ for CEM V. Compared with concrete made with Portland cement (0.228 t CO_2 eq/m³), these values correspond to emission reductions of 32% for CEM III cement and 26% for CEM V cement.

It should be emphasized, however, that the presented values refer to the specific cement types analyzed in this study and are based on the data provided in the Type III Environmental Product Declaration for cements produced in Poland. Therefore, they should not be interpreted as a universal relationship applicable to all CEM III and CEM V cements. The differences in the carbon footprint values of the analyzed cements result from the different proportions of their main constituents. According to the data presented in [20], the analyzed CEM III cement contained 43.0% clinker and 53.0% blast furnace slag, whereas the CEM V cement contained 58.2% clinker, 18.5% ash, and 19.5% blast furnace slag. The higher clinker content of CEM V cement compared with CEM III resulted in a higher CO_2 emission factor for the analyzed cement, as clinker production is the main source of emissions associated with cement manufacturing.

Assessment of concrete durability

Reducing the clinker content is one of the main approaches to reducing CO_2 emissions associated with cement production. The use of cements with reduced clinker content, such as CEM III and CEM V, enables a significant reduction in the carbon footprint at the production stage. However, according to the life cycle assessment (LCA) concept, the actual environmental impact of a material should be evaluated over the entire service life of a structure [22, 23]. The durability of concrete affects the need for repairs and maintenance, as well as the service life of the structure, and consequently the environmental impact during the use stage (Module B of the LCA).

The results demonstrate that the assessment of concrete with reduced clinker content cannot rely solely on the carbon footprint associated with cement production. Material durability must also be considered, as only a combined assessment of these two aspects allows for a reliable evaluation of the environmental performance of concrete over the entire life cycle of a structure. Significant differences were observed between the analyzed cements. Concrete made with CEM III cement exhibited high resistance to cyclic freezing and thawing and good durability, confirming the potential to reduce the carbon footprint while maintaining high resistance to the tested degradation factors. In contrast, concrete made with CEM V cement did not meet the frost resistance criterion: after 100 freeze–thaw cycles, the decrease in compressive strength reached 32%, exceeding the permissible value of 20%. Furthermore, increased susceptibility to carbonation was observed.

These findings indicate that the more favorable environmental performance of cements with reduced clinker content should be assessed not only in terms of CO_2 emissions during production but also with regard to concrete durability and the expected service life of the structure.

z [21]. Przy zawartości cementu 390 kg/m³ betonu ślad węglowy wyniósł: CEM III – 0,155 t CO_2 eq/m³; CEM V – 0,168 t CO_2 eq/m³. W porównaniu z betonem na cemencie portlandzkim (0,228 t CO_2 eq/m³) oznacza to redukcję emisji o 32% w przypadku cementu CEM III oraz o 26% cementu CEM V.

Należy podkreślić, że przedstawione wartości odnoszą się do analizowanych grup cementów, zgodnie z danymi zawartymi w Deklaracji Środowiskowej Produktu Typu III dotyczącej cementów produkowanych w Polsce i nie powinny być interpretowane jako uniwersalna zależność pomiędzy wszystkimi cementami CEM III i CEM V. Różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi w przypadku analizowanych cementów wynika z odmiennego udziału poszczególnych składników głównych. Zgodnie z danymi przedstawionymi w [20], analizowany cement CEM III zawierał 43,0% klinkieru oraz 53,0% żużla wielkopiecowego, natomiast cement CEM V – 58,2% klinkieru, 18,5% popiołu oraz 19,5% żużla wielkopiecowego. Większa zawartość klinkieru w cemencie CEM V, w porównaniu z CEM III, wpłynęła na wyższy wskaźnik emisji CO_2 analizowanej grupy cementów, ponieważ proces produkcji klinkieru jest głównym źródłem emisji związanych z wytwarzaniem cementu.

Ocena trwałości betonów

Ograniczenie zawartości klinkieru jest jednym z głównych sposobów redukcji emisji CO_2 związanej z produkcją cementu. Zastosowanie cementów o obniżonej zawartości klinkieru, takich jak CEM III oraz CEM V, umożliwia istotne zmniejszenie śladu węglowego już na etapie produkcji. Zgodnie z koncepcją oceny cyklu życia (LCA) rzeczywisty wpływ materiału na środowisko należy jednak oceniać z uwzględnieniem całego okresu użytkowania konstrukcji [22, 23]. Trwałość betonu wpływa na potrzebę wykonywania napraw i konserwacji oraz na okres użytkowania konstrukcji, a tym samym na oddziaływanie środowiskowe w fazie użytkowania (moduły B analizy LCA).

Uzyskane wyniki potwierdzają, że ocena betonów o obniżonej zawartości klinkieru nie może polegać wyłącznie na analizie śladu węglowego związanego z produkcją cementu. Konieczne jest jednoczesne uwzględnienie trwałości materiału, ponieważ dopiero połączenie obu aspektów pozwala na wiarygodną ocenę środowiskową w całym cyklu życia konstrukcji. Przeprowadzone badania wykazały istotne różnice pomiędzy analizowanymi cementami. Beton z cementu CEM III charakteryzował się dużą odpornością na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz trwałością, potwierdzając możliwość jednoczesnego ograniczenia śladu węglowego z zachowaniem dużej odporności na badane czynniki degradacyjne. Beton z cementu CEM V nie spełnił natomiast kryterium mrozoodporności – po stu cyklach zamrażania i rozmrażania spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł 32%, przekraczając dopuszczalną wartość 20%. Ponadto stwierdzono zwiększoną podatność na karbonatyzację.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że korzystny bilans środowiskowy cementów o obniżonej zawartości klinkieru powinien być oceniany z uwzględnieniem nie tylko emisji CO_2 na etapie produkcji, ale również trwałości betonu i przewidywanego okresu użytkowania konstrukcji.

Summary

The most favorable properties were obtained for concrete made with CEM III/A 42.5 N cement. It exhibited very good mechanical properties and durability, while its carbon footprint was approximately 32% lower than that associated with Portland cement. A limitation of this solution is the slow development of strength resulting from the delayed activation of granulated blast furnace slag.

CEM V/A (S-V) 32.5 R multi-component cement also enables a reduction in CO_2 emissions of approximately 26%. However, the results indicate its lower resistance to freeze–thaw exposure. Cyclic freezing and thawing increased the susceptibility of the tested concretes to carbonation, with the most pronounced adverse changes observed for concrete made with CEM V/A (S-V) 32.5 R cement.

The environmental assessment of concrete with reduced clinker content should not be based solely on the carbon footprint associated with cement production. The results of the study confirm the need to consider material durability simultaneously, as adequate durability and service performance are essential for achieving actual environmental benefits throughout the entire life cycle of a structure.

Photos: authors
Received: 16.06.2026
Revised: 03.08.2026
Published: 21.10.2026

Podsumowanie

Najkorzystniejsze właściwości uzyskano w przypadku betonu wykonanego z cementu CEM III/A 42,5 N. Charakteryzował się on bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi i trwałością oraz mniejszym śladem węglowym (o ok. 32%) w porównaniu z cementem portlandzkim. Ograniczeniem tego rozwiązania jest wolny przyrost wytrzymałości wynikający z późniejszej aktywacji granulowanego żużla wielkopiecowego.

Cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5 R umożliwia również ograniczenie emisji CO_2 (o ok. 26%). Uzyskane wyniki wskazują jednak na jego mniejszą odporność na oddziaływanie mrozu. Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie zwiększyło podatność badanych betonów na karbonatyzację, przy czym najbardziej niekorzystne zmiany odnotowano w przypadku betonu z cementu CEM V/A (S-V) 32,5 R.

Ocena środowiskowa betonów o obniżonej zawartości klinkieru nie powinna polegać wyłącznie na analizie śladu węglowego związanego z produkcją cementu. Przeprowadzone badania potwierdzają konieczność jednoczesnego uwzględniania trwałości materiału, ponieważ dopiero odpowiednia odporność eksploatacyjna pozwala na osiągnięcie rzeczywistych korzyści środowiskowych w całym cyklu życia konstrukcji.

Fotografie: autorzy
Artykuł wpłynął do redakcji: 16.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.08.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z 24 maja 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona), 2024.

[2] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/3110 z 27 listopada 2024 r. w sprawie ustanowienia zharmonizowanych zasad wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylenia rozporządzenia (UE) nr 305/2011, 2024.

[3] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.

[4] PN-EN ISO 14025:2010 Etykiety i deklaracje środowiskowe – Deklaracje środowiskowe III typu – Zasady i procedury

[5] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. Supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Research. 2011; https://doi. org/10.1016/J. CEMCONRES. 2010.12.001.

[6] Giergiczny Z. Fly ash and slag. Cement and Concrete Research, vol. 124, 2019; https://doi. org/10.1016/j. cemconres. 2019.10582.

[7] Kumar R, Gopalakrishnan N, Bishnoi S. Influence of curing temperature on hydration kinetics, mechanical properties, and microstructural development of cementitious binders: A comprehensive review. Powder Technology. 2026; https://doi.org/10.1016/j.powtec.2026.122284.

[8] Koniorczyk M, Bednarska D, Omrani IAN, Wieczorek A, Gong F. On water freezing in slag-blended cementitious materials at early ages; Journal of Building Engineering. 2024; https://doi. org/10.1016/j.jobe. 2024.109778.

[9] PN-88/B-06250 Beton zwykły.

[10] PN-EN ISO 15148:2004 Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie współczynnika absorpcji wody przez częściowe zanurzenie.

[11] PN-EN 12504-4, Badania betonu – Część 4: Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej, 2021.

[12] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[13] PN-EN 12390-8, Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, 2019.

[14] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Metoda przyspieszonej karbonatyzacji.

[15] Liu D, Tu Y, Sas G, Elfgren L. Freeze-thaw damage evaluation and model creation for concrete exposed to freeze–thaw cycles at early-age. Construction and Building Materials. 2021; https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT. 2021.125352.

[16] Wang R, Hu Z, Li Y, Wang K, Zhang H. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment. Construction and Building Materials. 2022; https://doi. org/10.1016/j. conbuildmat. 2022.126371.

[17] Herterich J, Richardson I, Moro F, Marchi M, Black L. Microstructure and phase assemblage of low-clinker cements during the early stages of carbonation. Cement and Concrete Research. 2022; https://doi.org/10.1016/j.cemconres. 2021.106643.

[18] Czarnecki L, Woyciechowski P, Adamczewski G. Risk of Concrete Carbonation with Mineral Industrial By-Products. J. Civ. Eng. 2018; https://doi.org/10.1007/s12205-017-1623-5.

[19] Marciniak A, Grymin W, Margiewicz T, Koniorczyk M. Influence of freezing-induced damage on the carbonation rate of concrete. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2017; https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1167781.

[20] Instytut Techniki Budowlanej – ITB, Deklaracja Środowiskowa Produktu (EPD) Typu III dla cementów CEM I – CEM V wyprodukowanych w Polsce, Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej – ITB, 2025.

[21] PN-EN ISO 14067:2018-10 Gazy cieplarniane – Ślad węglowy wyrobów – Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji.

[22] PN-EN 15978, Zrównoważone obiektybudowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania, 2012.

[23] D. Bartosz (PLGBC), W. Kowalski (Buro Happold), Szacowanie śladu węglowego budynków – mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do 2050 r., Gliwice: PLGBC – Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, 2022.