

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: Jan Deja
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: AD-LINE.PL

Projekt: Artur Darłak

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:



Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

PREFABRYKACJA BETONOWA

PRECAST CONCRETE

Michael van de Koppel,
DMC, The Netherlands

Andrzej Makowski,
NDI S.A., Polska

Andrzej Wilczyński,
Sika Poland Sp. z o.o., Polska

Pierwsze międzynarodowe zastosowanie XblocPlus na Przekopie Mierzei Wiślanej w Polsce.

First international application of XblocPlus at Vistula Spit, Poland.

Streszczenie

Projekt Przekopu Mierzei Wiślanej w Polsce stanowi pierwsze międzynarodowe zastosowanie nowej jednostki betonowej XblocPlus. Opracowany przez DMC w latach 2015-2018, XblocPlus bazuje na oryginalnym Xbloc, wprowadzając wzór umieszczania, który zwiększa stabilność hydrauliczną, upraszcza instalację i oferuje korzyści estetyczne. Projekt Mierzei Wiślanej, realizowany przez wspólne przedsięwzięcie firm Besix i NDI, wykorzystał prawie 10 000 jednostek XblocPlus do wzmocnienia falochronów, co stanowi znaczący kamień milowy w zastosowaniu tej technologii poza granicami Holandii.

Treść szczegółowo opisuje procesy projektowania, produkcji i wdrażania XblocPlus, podkreślając jego zalety w porównaniu z tradycyjnymi jednostkami umieszczanymi losowo. Kluczowe korzyści obejmują zwiększenie szybkości budowy, zmniejszenie złożoności oraz zwiększenie bezpieczeństwa dzięki jednolitemu wzorowi umieszczania. Uwzględniono również aspekty środowiskowe, a projekt systemu przyczynia się do celów zrównoważonego rozwoju poprzez zmniejszenie zapotrzebowania na materiały i niższą emisję CO₂.

Udane zastosowanie XblocPlus w projekcie Mierzei Wiślanej pokazuje jego potencjał jako wartościowego elementu przyszłych projektów ochrony morskiej i przeciwpowodziowej, oferując solidne, efektywne i przyjazne dla środowiska rozwiązanie.

Abstract

The Vistula Spit project in Poland represents the first international application of the new XblocPlus concrete armour unit. Developed by DMC between 2015 and 2018, XblocPlus builds upon the original Xbloc by introducing a pattern-placed design that enhances hydraulic stability, simplifies installation, and offers aesthetic benefits. The Vistula Spit project, executed by a joint venture of Besix and NDI, utilized nearly

10,000 XblocPlus units to reinforce breakwaters, marking a significant milestone in the technology's deployment outside the Netherlands.

This paper describes the design, manufacturing, and implementation processes of XblocPlus, emphasizing its advantages over traditional randomly placed units. Key benefits include increased construction speed, reduced complexity, and enhanced safety due to the uniform placement pattern. Environmental considerations are also addressed, with the system's design contributing to sustainability goals through reduced material requirements and lower CO₂ emissions.

The successful application of XblocPlus at the Vistula Spit project demonstrates its potential as a valuable component for future marine and flood protection projects, offering a robust, efficient, and environmentally friendly solution

1. WSTĘP

Projekt Przekopu Mierzei Wiślanej, wspólny wysiłek BESIX i Grupy NDI, jest znaczącą inicjatywą w zakresie infrastruktury morskiej w Polsce. Projekt zakładał budowę nowego kanału żeglugowego łączącego Zalew Wiślany z Zatoką Gdańską. Głównym celem jest zwiększenie ruchu morskiego i pobudzenie działalności gospodarczej portu w Elblągu.

Kluczowe cechy projektu to stworzenie falochronów, nabrzeży, kanału, infrastruktury śluzowej z obrotowymi mostami i bramami śluzowymi, a także rozwój sztucznej wyspy. Kanał rozciąga się na prawie 23 kilometry, o głębokości 5 metrów, ułatwiając przejście większych statków.

Falochrony, niezbędne do ochrony nowego kanału przed trudnymi warunkami morskimi, są zbudowane przy użyciu prefabrykatów XblocPlus. Te innowacyjne, rozmieszczone według określonego wzoru betonowe jednostki zapewniają solidną ochronę przed działaniem fal, minimalizując zużycie materiału i wpływ na środowisko. Zastosowanie XblocPlus nie tylko zwiększa trwałość i stabilność falochronów, ale także przyczynia się do bardziej zrównoważonego procesu budowlanego.

Budowa oficjalnie rozpoczęła się w 2019 roku, a pierwsze jednostki XblocPlus zostały umieszczone w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej w 2020 roku. Cały projekt został ukończony w 2022 roku.



Zdjęcie 1: Lokalizacja projektu Przekopu Mierzei Wiślanej na Zatoce Gdańskiej

Betonowe jednostki ochronne mogą być produkowane lokalnie i są bardziej stabilne podczas sztormów w porównaniu do bloków litej skały o równej wadze. Xbloc to zaawansowana prefabrykowana jednostka stosowana w projektach budowlanych przybrzeżnych i morskich w celu ochrony konstrukcji takich jak falochrony przed działaniem fal. Wprowadzony na rynek w 2003 roku został szeroko przyjęty w wielu projektach na całym świecie. Do chwili obecnej użyto ponad 600.000 szt. Opierając się na tym doświadczeniu, DMC opracowało nowy prefabrykat: XblocPlus.

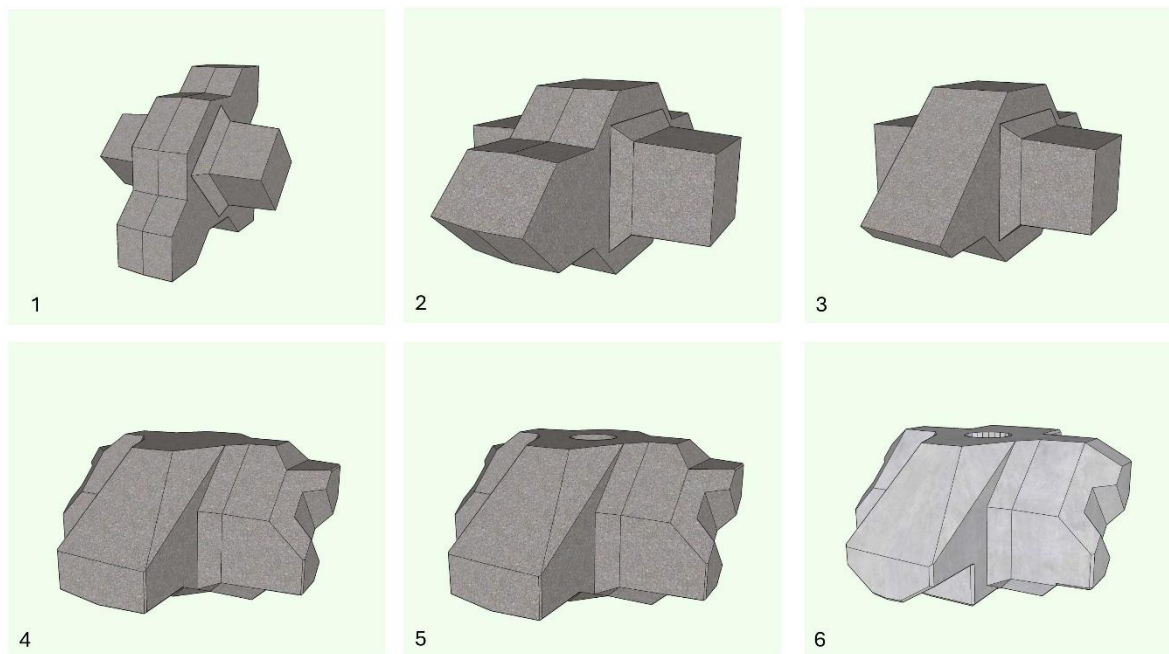
Ta ulepszona wersja globalnie używanego Xbloc debiutowała w Polsce na arenie międzynarodowej. Do produkcji 10.000 szt. XblocPlus zastosowało ok. 22.000 m³ betonu. Bloki wzmacniają strukturę dwóch falochronów. Falochron wschodni ma długość ok. 900m, wschodni ok. 300m.

Bloki ważą od 2.34 do 9.6 ton każdy i mają trzy różne objętości, 1m³, 3m³ i 4m³.

2. Rozwój XblocPlus

Rozwój XblocPlus rozpoczął się w 2015 roku. W poprzednich projektach z użyciem prefabrykatów Xbloc zauważono, że operatorzy żurawi wolą regularne umieszczanie elementów, ponieważ jest to łatwiejsze i szybsze. Dlatego regularne rozmieszczenie elementów Xbloc było testowane w modelu w skali fizycznej. Jeśli jednostki Xbloc są rozmieszczone w regularnym wzorze, mogą być ułożone bliżej

siebie. Zwiększa to ilość potrzebnego betonu i śladu CO₂. W związku z tym zbadano opcje optymalizacji gęstości ich ułożenia. Głównymi zaletami nowej jednostki XblocPlus są: lepsza stabilność hydrauliczna, , łatwość produkcji i układania oraz mniejsze zużycie mieszanki betonowej.



Rysunek 2: Etapy rozwoju od Xbloc do XblocPlus

Kształt XblocPlus można opisać jako ptaka, z dziobem, ogonem i dwoma skrzydłami. Ważnym etapem rozwoju kształtu była modyfikacja dzioba, w celu zminimalizowania ciśnienia podnoszenia, modyfikacja skrzydeł w celu zwiększenia odległości bloków od siebie, stworzenie szczeliny w skrzydłach w celu rozpraszania energii fal, dodanie otworu w środku bloku w celu uwolnienia ciśnień podnoszenia fali (rysunek 2, blok 5).

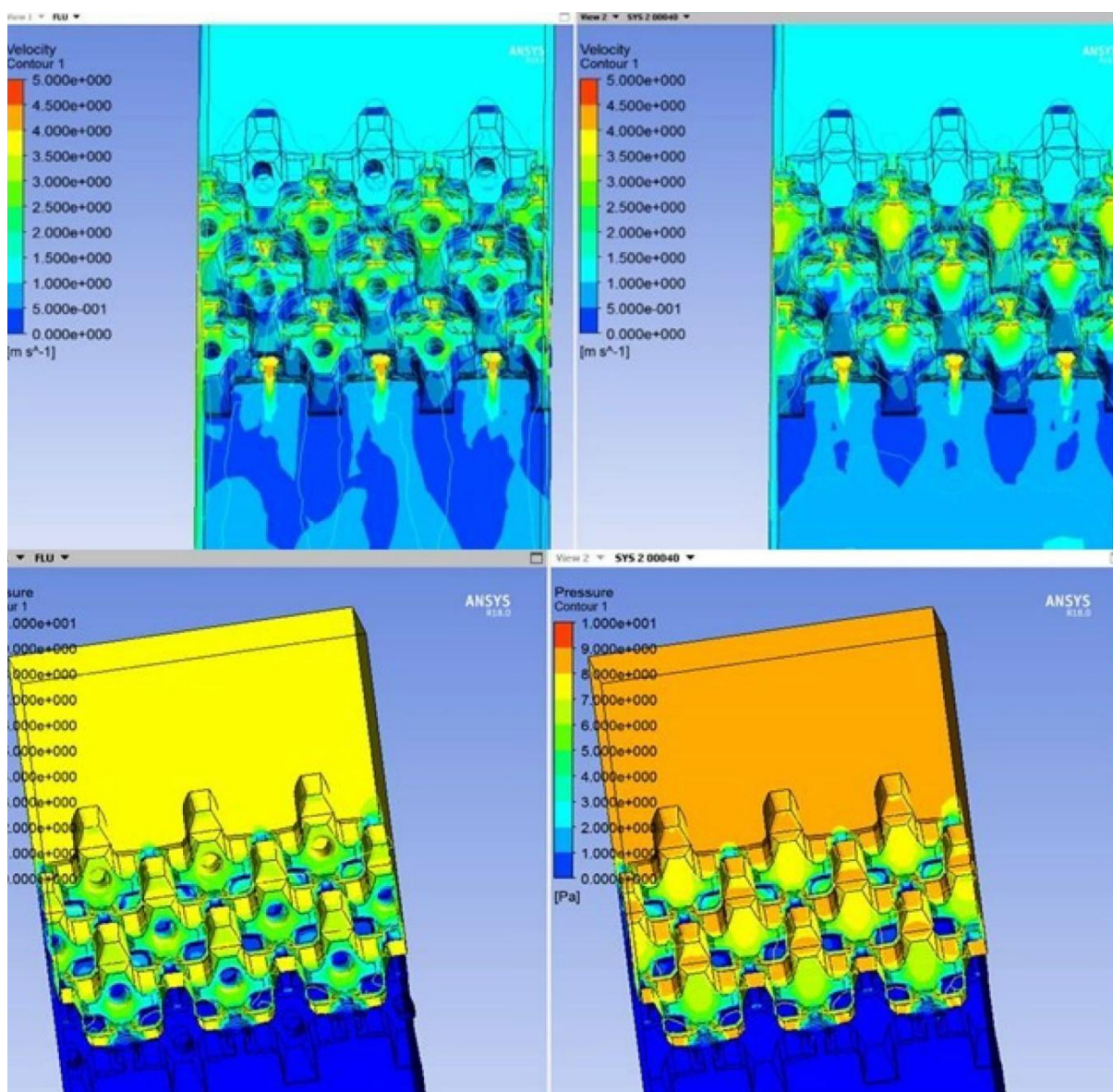
Każda modyfikacja kształtu została po raz pierwszy przetestowana w laboratorium falowym o długości 25 m w zakładowym laboratorium wodnym DMC. Zdjęcie 3 przedstawia typową konfigurację testu podczas falowania.



Zdjęcie 3: Fizyczne testowanie modelu w laboratorium wewnętrznym

Wprowadzenie otworu w środku bloku nastąpiło po zaobserwowaniu niestabilności z powodu ciśnienia podnoszenia fali podczas testów modelu. Otwory zostały wywiercone w blokach modelu i wykonano ponowny test. Wprowadzenie otworu znacznie zwiększyło stabilność hydrauliczną [2] i zmniejszyło zużycie mieszanki betonowej.

Modelowanie numeryczne zostało wykonane przy użyciu programu ANSYS CFD, w celu zbadania prędkości i ciśnień falowych. Również w modelu numerycznym siły destabilizujące zostały znacznie zmniejszone poprzez wprowadzenie centralnego otworu. Przykład wyników obliczeń przedstawiono na rysunku 4 [3].



Rysunek 4: Porównanie ciśnień falowych z i bez otworu centralnego przy użyciu programu ANSYS CFD

2.1 Właściwości betonu

Elementy Xbloc i XblocPlus wykonane były z betonu niezbrojonego, w klasie C35/45, w klasach ekspozycji XA1, XC4, XS3, XF4. Betonowe prefabrykaty są zwykle zaprojektowane tak, aby wytrzymać 100-letnią burzę (SLS), ale często są również testowane z 20% wyższym obciążeniem falą (ULS).

W przypadku nieregularnie rozmieszczonych elementów zawsze jest kilka sztuk, które mogą poruszać się lekko podczas burzy projektowej. To nazywa się kołysaniem. Kiedy kołysanie odbywa się regularnie, może spowodować zderzenia elementów, co prowadzi do uszkodzenia prefabrykatów [5]. Ze względu na regularne umieszczanie XblocPlus ryzyko kołysania jest mniejsze niż w przypadku Xbloc, a tym samym zmniejsza się ryzyko uszkodzenia całego systemu ochronnego falochronów.

2.2 Stabilność hydrauliczna

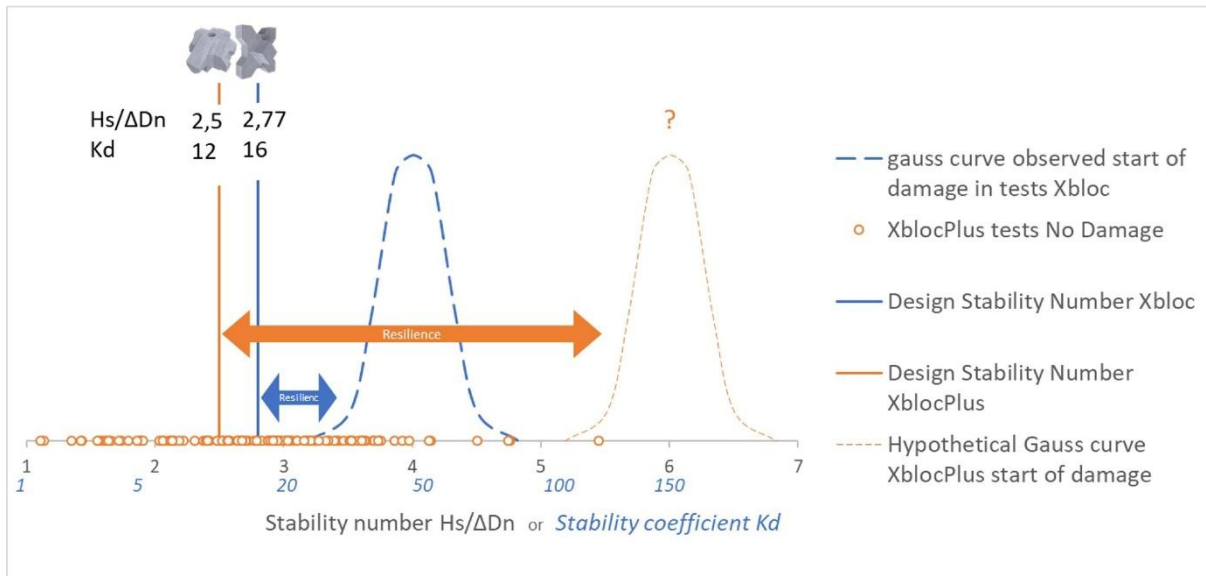
Chociaż przy ostatecznym kształcie XblocPlus nie obserwuje się kołysania podczas fizycznego testowania modelu, testy przeprowadzono z kilkoma elementami ręcznie usuniętymi, aby upewnić się, że nie wystąpią żadne postępujące uszkodzenia, jak pokazano na zdjęciu 5 [5]. Testy wykazały, że celowo usunięte prefabrykaty nie spowodowały awarii.



Zdjęcie 5: Test modelu z dwoma usuniętymi elementami

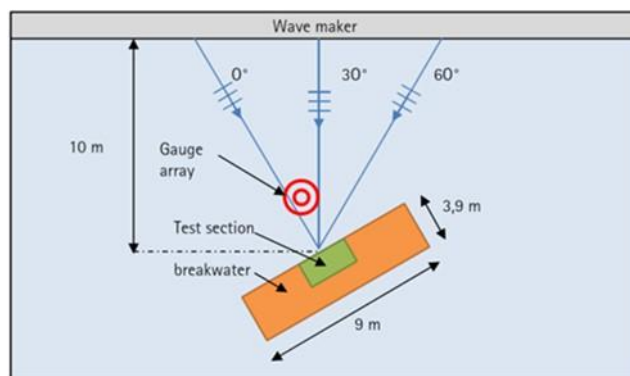
Stabilność betonowych jednostek ochronnych jest określona przez parametr stabilności $H_s/\Delta D_n$. Liczba ta, to wysokość fali (H_s) podzielona przez gęstość względną (Δ) razy średnicę nominalną elementu (D_n). Na podstawie testów fizycznych modelu Xbloc stwierdzono, że Xbloc może być stosowany ze współczynnikiem stabilności wynoszącym 2.77. Ubytki jednostek z warstwy ochronnej przez obciążenie falowe może wystąpić przy wartościach $H_s/\Delta D_n$ powyżej 3.5, co daje 25% marginesu bezpieczeństwa. Jest to pokazane na rysunku 6 [4].

Przy ostatecznym kształcie XblocPlus nie wystąpiły uszkodzenia podczas fizycznego testowania modelu, nawet w przypadku 200% przeciążenia. Pomimo wyższej stabilności XblocPlus niż Xbloc, zdecydowano się na zastosowanie niższego współczynnika stabilności $H_s/\Delta D_n = 2.5$. Ten niższy współczynnik stabilności prowadzi do większej odporności i bezpieczeństwa w projektowaniu [6]. Gdy wysokość fali wzrasta z powodu zmian klimatycznych, ochrona nadal jest wystarczająca.

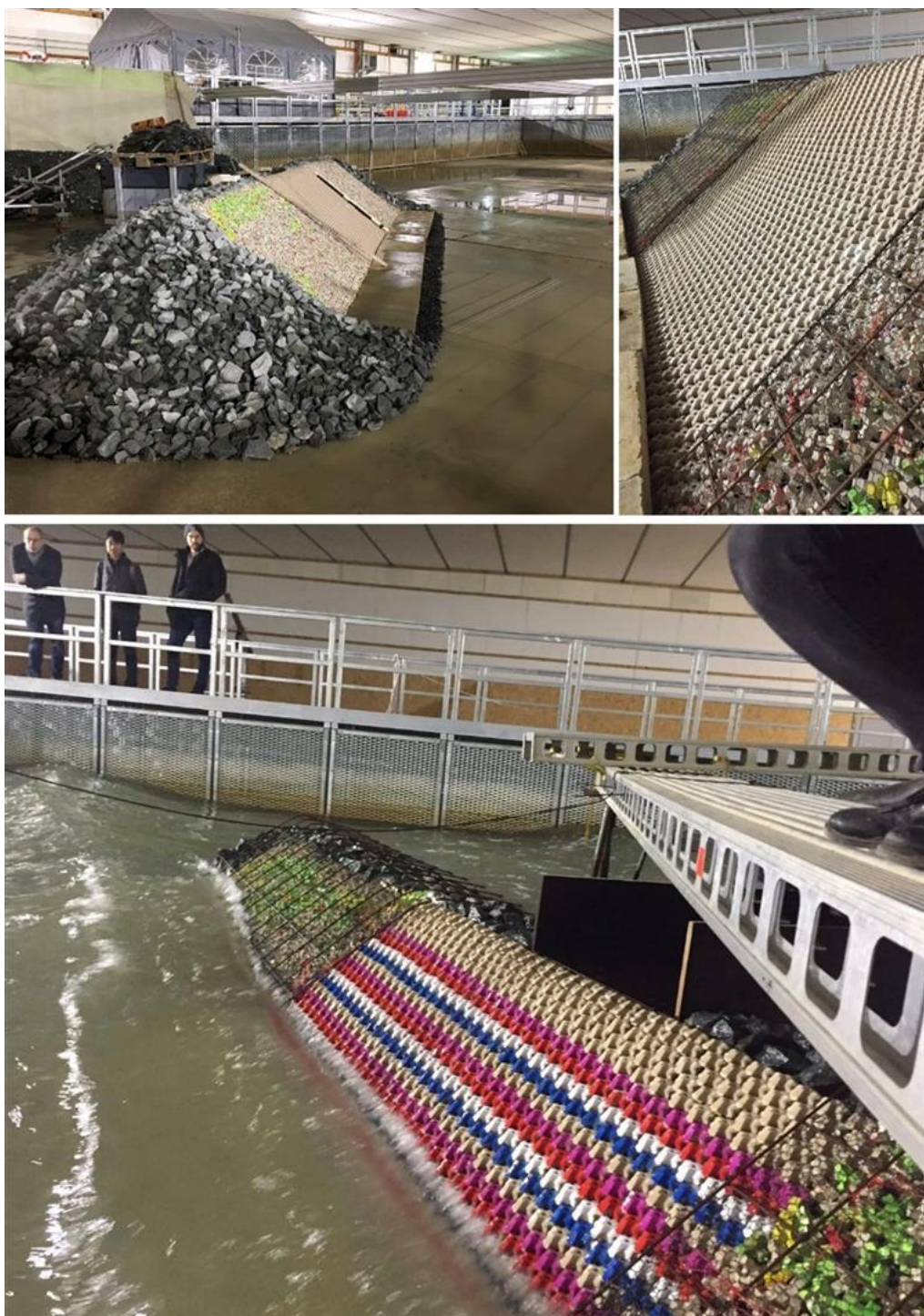


Rysunek 6: Wyniki fizycznych testów modelu i współczynnika stabilności

Oprócz testowania modelu fizycznego 2D w laboratorium falowym przeprowadzono również testy 3D w Instytucie Franzius w Hanowerze, aby sprawdzić stabilność w uderzeniu skośnej fali. Testy te nie doprowadziły do wyrwania elementów ochronnych i potwierdziły wysoką stabilność hydrauliczną. Jedną z konfiguracji testowych w Hanowerze jest pokazana na rysunku 7 i zdjęciu 8 [2].



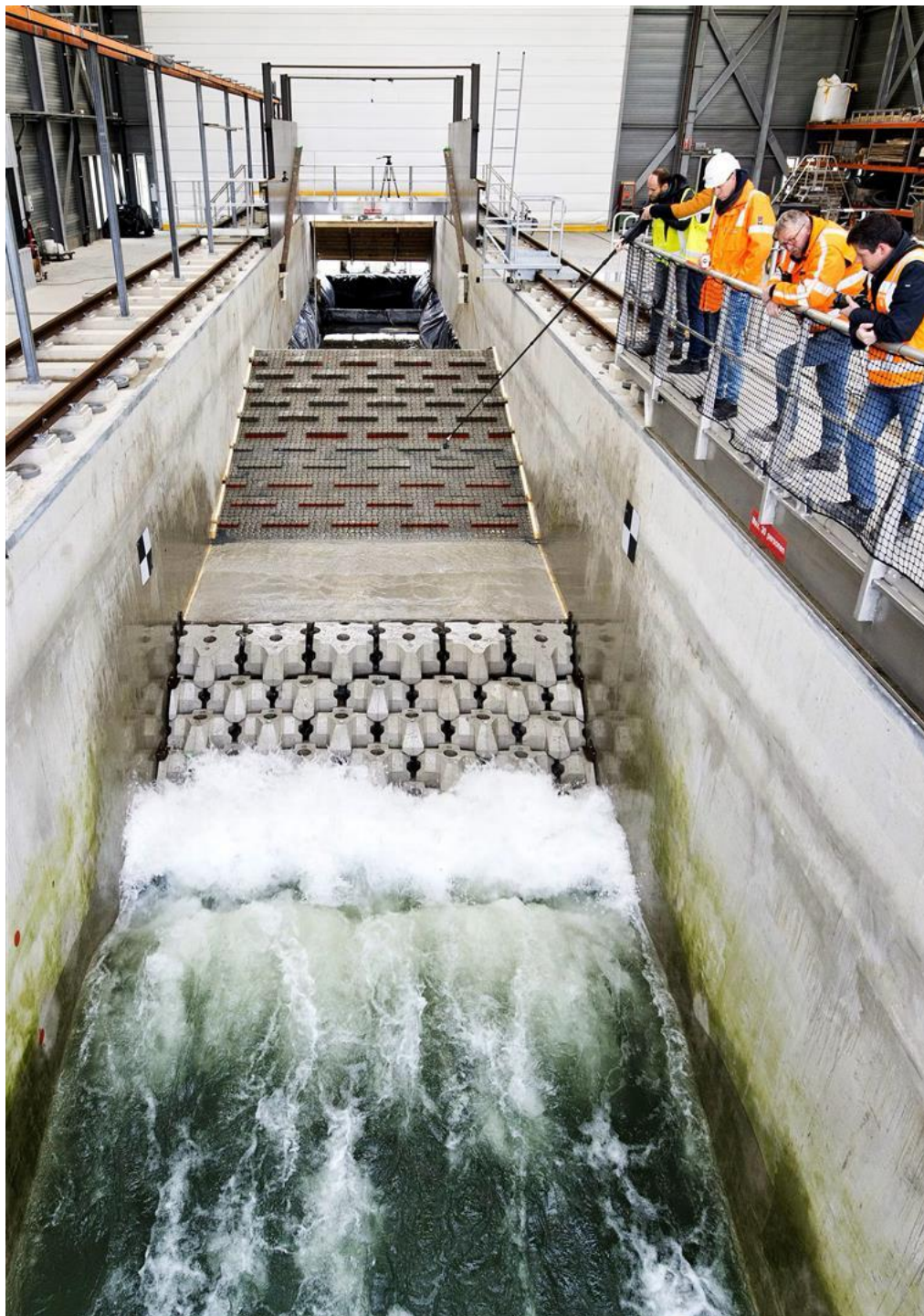
Rysunek 7: Układ badania fal skośnych



Zdjęcie 8: Testy 3D w Hanowerze

Testy modeli w skali 1:3 zostały przeprowadzone w Delta Flume w Deltares w Holandii w ramach weryfikacji projektu Afsluitdijk. Delta Flume jest jednym z największych laboratoriów falowych na świecie. W tym laboratorium wygenerowano znaczne wysokości fal do 1.5 m. Testowano przypadek przeciążenia z 10% wyższą wysokością fali. Testowano również o 10% słabszą strukturę elementów. Zostało to zrealizowane dzięki zastosowaniu zmniejszonej gęstości betonu dla bloków

modelowych. Monitorowano stabilność hydrauliczną całego układu. Zdjęcie 9 pokazuje wygaszanie fal.



Zdjęcie 9: Testy hydrauliczne na dużą skalę w laboratorium Delta Flume.

3. Zastosowanie w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej

Oba falochrony zaprojektowano tak, aby chronić kanał wejściowy do portu wewnętrznego od strony Zatoki Gdańskiej. Falochron wschodni ma długość 900 m i podąża łagodną krzywą. Wschodni falochron rozciąga się po linii prostej od plaży do morza, na długości ok. 300m. Ze względu na głębokość wody i dominujący wschodni kierunek fal falochron wschodni narażony jest na ataki najwyższych fal. W związku z tym użyto przy jego wznoszeniu największe bloki XblocPlus, o wymiarach 4 m³ i wadze 9.6 ton.

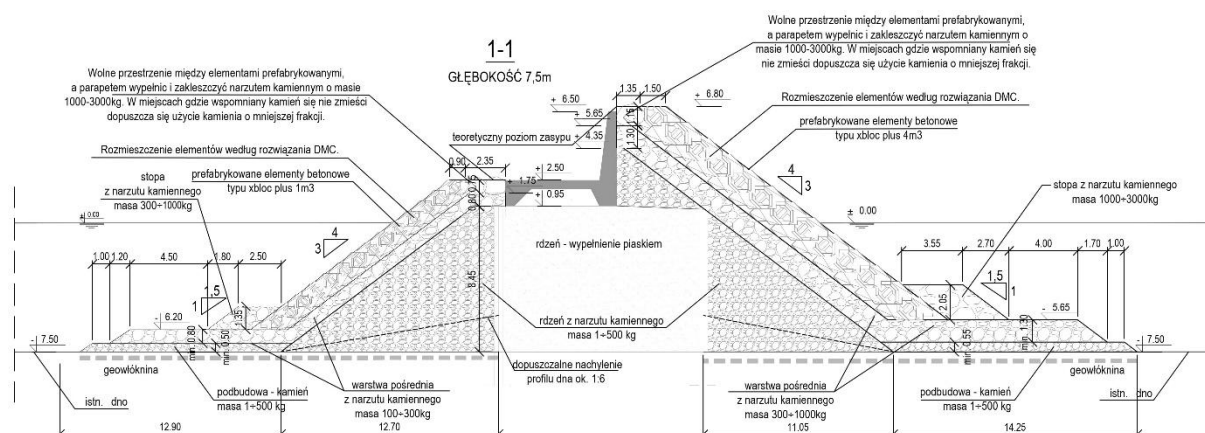


Zdjęcie 10: Budowa falochronu wschodniego



Zdjęcie 11: Budowa falochronu wschodniego

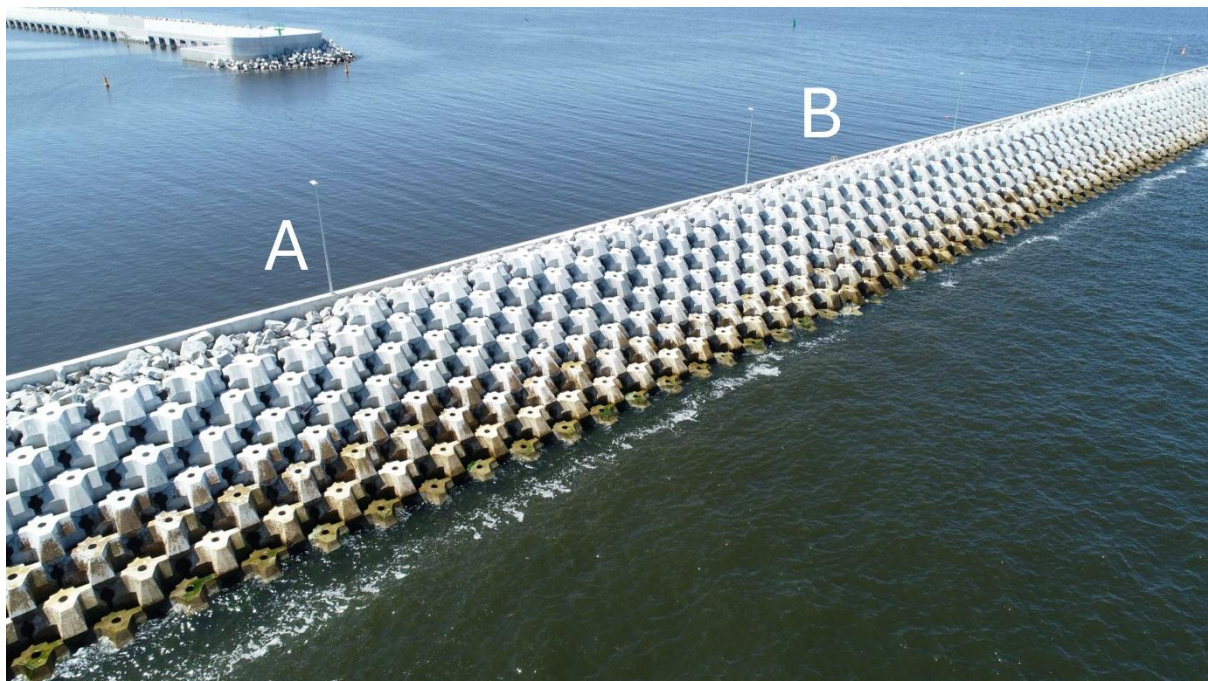
Na wewnętrznej stronie falochronu wschodniego występuje mniejsze falowanie, co pozwoliło na użycie mniejszych bloków XblocPlus o objętości 1 m³. Krótszy falochron zachodni znajduje się również częściowo w strefie ochronnej falochronu wschodniego, co pozwoliło na zastosowanie bloków objętości 3m³.



Rysunek 12: Typowy przekrój falochronu wschodniego

Podstawy falochronów podążają za poziomem dna morskiego, powodując, że poziom pierwszej warstwy elementów XblocPlus zmniejsza się wzdłuż długości

falochronu. Aby pokryć nachylenie falochronu, liczba rzędów XblocPlus zwiększa się wzdłuż jego długości. Początek dodatkowej warstwy XblocPlus jest oznaczony punktem A na zdjęciu 13.



Zdjęcie 13: Dodatkowy rząd (punkt A) i przejście z bloków o objętości 3m³ do 4m³ (punkt B)

Jednostki XblocPlus, są umieszczane na wstępnie określonej siatce, aby zapewnić spójne odstępy i punkty styku pomiędzy blokami. Te aspekty są kluczowe dla tworzenia blokującej się warstwy pancerza ochronnego. Wynikające z tego wzajemne blokowanie elementów znacznie zwiększa stabilność całego układu.

XblocPlus może być umieszczony na delikatnych krzywych (promień w zależności od wielkości bloku i liczby rzędów). W przypadku ostrzejszych krzywych można użyć zmodyfikowanego kształtu XblocPlus lub oryginalnego Xbloc. Do projektu Przekopu Mierzei Wiślanej zastosowano regularne elementy Xbloc (o objętościach 3 m³ i 5 m³) na głowicach falochronów ze względu na ich niewielki promień.

Maksymalna wysokość fali przy falochronie wzrasta wraz ze wzrostem głębokości wody. Dlatego w głębszych częściach falochronu wschodniego potrzebne były większe jednostki XblocPlus, aby zapewnić stabilne rozwiązanie w porównaniu z płytszymi częściami w pobliżu brzegu. Projekt przewidział użycie dwóch rozmiarów XblocPlus: objętości 4m³ w najgłębszych częściach zewnętrznej krzywej falochronu wschodniego i objętości 3m³ XblocPlus dla płytszych części w pobliżu brzegu. Ponieważ bloki różnią się wielkością, nie pasują do siebie płynnie. Pomiędzy dwiema częściami utworzono przejście z nowo opracowanym blokiem przejściowym. Przejście jest pokazane z góry na zdjęciu 14 i jest widoczne od strony morza na zdjęciu 13 (punkt B). Blok przejściowy został zastosowany po raz pierwszy w

projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej po wykazaniu stabilności przejścia podczas testów modelu fizycznego.



Zdjęcie 14: Przejście z elementów o objętości 3 m^3 na 4 m^3

Głowica falochronu jest skonstruowana z regularnych Xbloc.



Zdjęcie 15: Przejście z XblocPlus na Xbloc

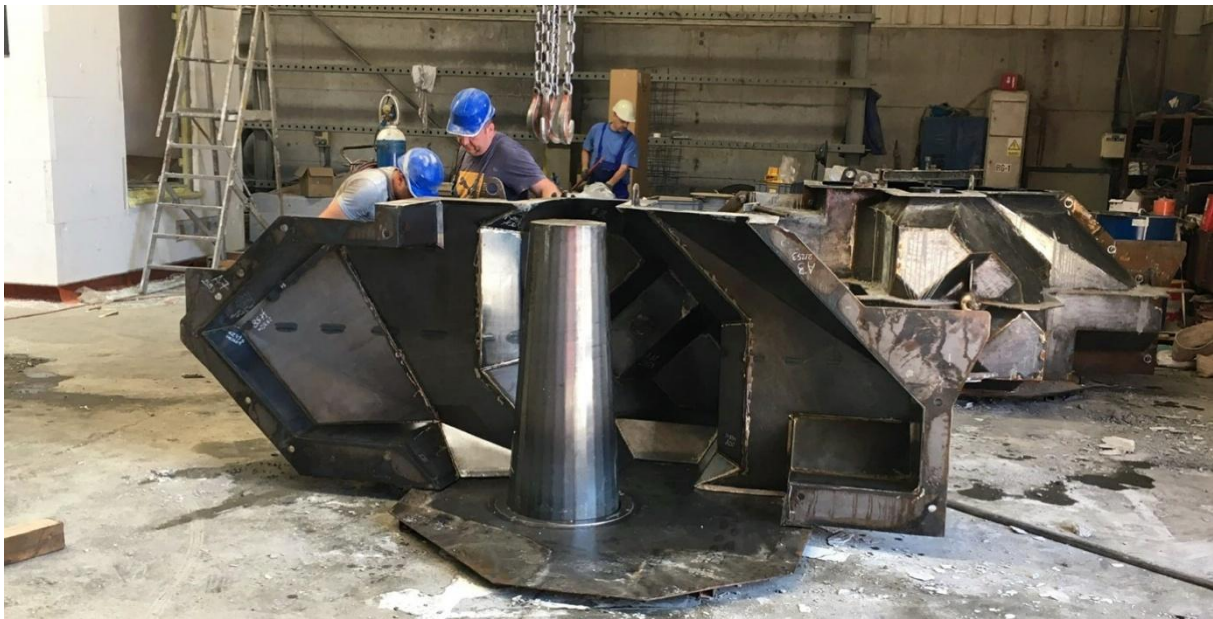


Zdjęcie 16: Głowica falochronu zachodniego

3.1 Produkcja

Produkcję prefabrykatów wykonano w zakładzie Zbych-Pol & Mobet w Mogilnie.

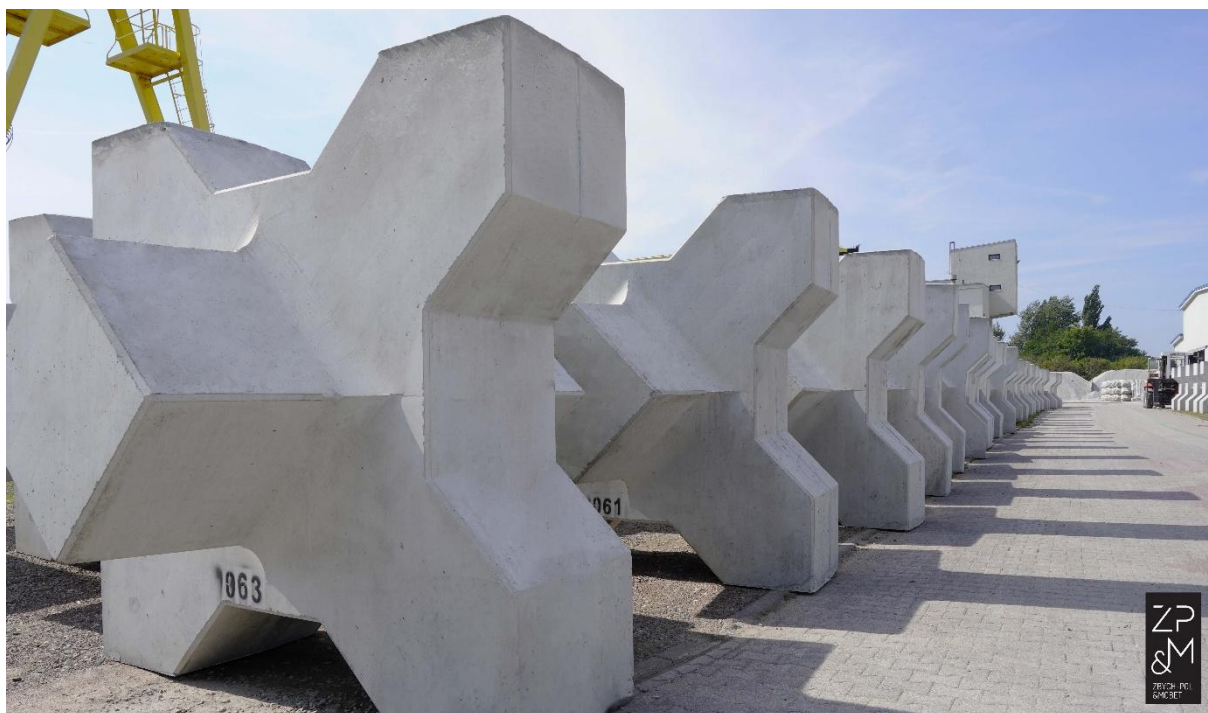
Prefabrykaty były produkowane w formach składających się z trzech części. Każda forma składa się dwóch części pionowych, oraz stożka dla ukształtowania otworu. W przypadku elementów XblocPlus monitorowany jest rozwój temperatury bloku oraz różnice między temperaturami wewnętrznymi i powierzchniowymi.



Zdjęcie 17: Formy produkcyjne

Do produkcji elementów użyto betonu C35/45, w klasach ekspozycji XA1, XC4, XS3, XF4 oraz mrozoodporności F150 i wodoszczelności W8.

Mieszanka była zaprojektowana w oparciu o cement CEM II/A-V 42,5R, kruszywa łamane ze skały litej, oraz domieszki Sika Viscocrete 3225 i Sika LPSA-94.



Zdjęcie 18: Wyprodukowane prefabrykaty Xbloc – plac składowy producenta

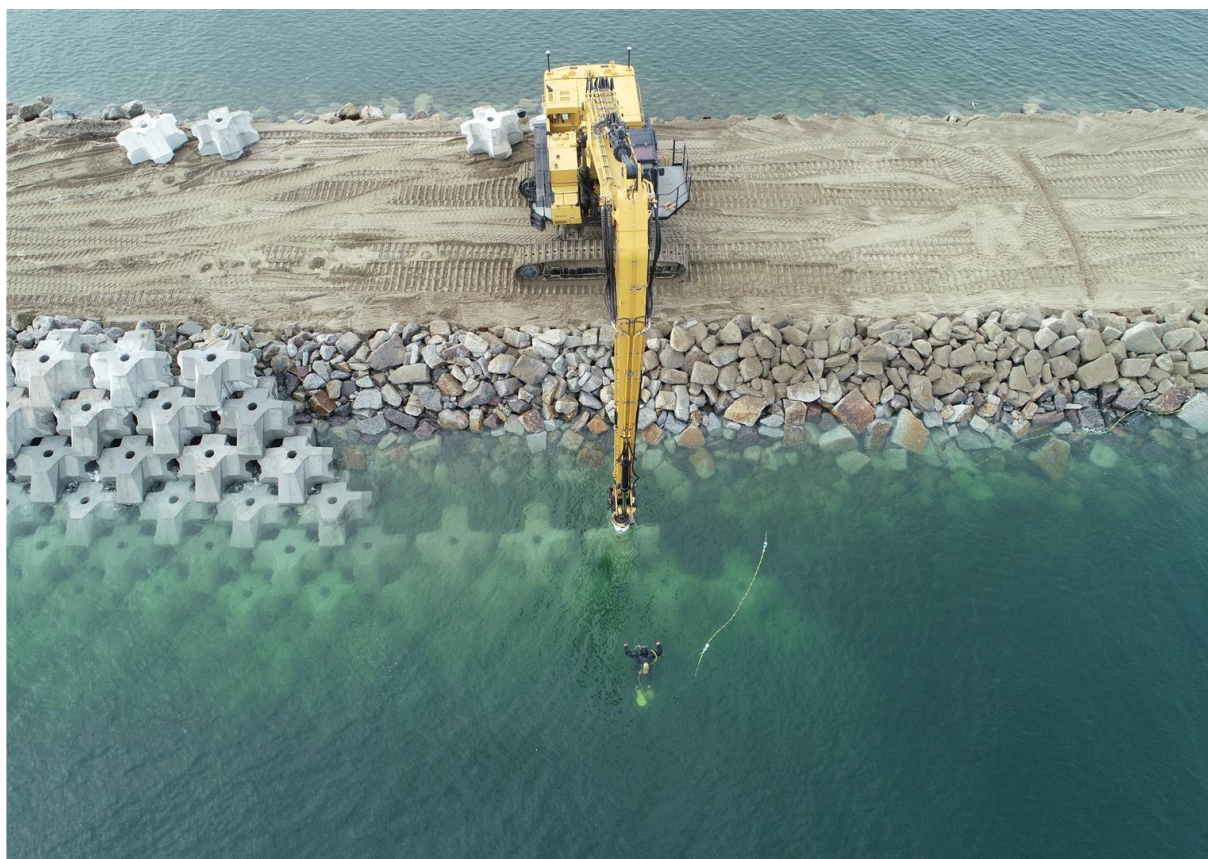


Zdjęcie 19: Wyprodukowane prefabrykaty XblocPlus – plac składowy producenta

3.2 Wbudowanie

Obsługa bloków odbywa się za pomocą chwytaka mocowanego do koparki (zdjęcie nr 20). Podnosi on bloki, wykorzystując okrągły otwór w środku XblocPlus. Chwytak hydrauliczny z rotatorem zapewnia pełną kontrolę nad położeniem układanych elementów. Taki system układania umożliwia umieszczanie prefabrykatów z dużą wydajnością do 100 bloków dziennie. Dodatkowo praca staje się bezpieczniejsza ze względu na brak konieczności podwieszania elementów.

Koparka jest zawsze wyposażona w system GPS, który umożliwia operatorowi maszyny umieszczenie bloków na zaprojektowanych współrzędnych. Na budowie Przekopu Mierzei Wiślanej umieszczanie elementów realizowane było z pomocą nurków dla podwodnej części elementów, którzy weryfikowali układanie bloków.



Zdjęcie 20: Koparka z chwytakiem umieszczająca prefabrykaty z pomocą nurka

3.3 Ekologia

Warstwa pancerza z blokami XblocPlus ma wysoką jamistość ok 60% i znajduje się w strefie zmiennego poziomu wody. Dlatego stanowi siedlisko dla życia morskiego, takiego jak rośliny, ryby i skorupiaki.



Zdjęcie 21: Siedlisko życia na prefabrykacie XblocPlus

4. Podsumowanie

Nowy typ betonowej jednostki ochronnej falochronów został z powodzeniem zastosowany w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej, co oznacza międzynarodowy debiut systemu XblocPlus. Te elementy charakteryzują się regularnym wzorem rozmieszczenia. Zapewniają wysoką rezerwę stabilności hydraulicznej i dlatego będą odporne na zmiany warunków brzegowych układu hydraulicznego z powodu zmian klimatu. Mają niski ślad CO₂ w porównaniu do tradycyjnych betonowych prefabrykatów typu gwiazdobloki (wymagają mniejszej ilości mieszanki betonowej). Przenoszenie i umieszczanie jest bezpieczniejsze i łatwiejsze dzięki środkowemu otworowi w połączeniu z chwytakiem hydraulicznym układarki. Zastosowanie systemu XblocPlus w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej pokazuje, że jest on cennym elementem budowlanym dla przyszłych projektów ochrony środowiska morskiego i przeciwpowodziowego.

5. Literatura

- [1] Donnelly, J., Bakker P., Reedijk B., Yang Z. XblocPlus the interlocking pattern placed and efficient armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* (36v) Structures 18, 2020
- [2] Reedijk B, Eggeling, T. Bakker, P, Jacobs R., Muttray M. Hydraulic stability and overtopping performance of a new type of regular placed armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* 1(36);54, 2018.
- [3] Jacobs R., Bakker, P., Vos-Rover I., and Reedijk B. XblocPlus development of a regular placed interlocking armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* 1(36);45, 2018.
- [4] Muttray M., Reedijk B., Design of concrete armour layers. Hansa, International Maritime Journal, Vol. 146, No. 6 pp. 111-118, 2009
- [5] Bakker, P., de Hoop T., Muttray, M., Stability of XblocPlus armour layers after initial damage. *Coastal Engineering Proceedings* (36v) Structures 16, 2020

-
- [6] Reedijk J.S., Muttray M., Bergmann H. Risk awareness, key to a Sustainable Design Approach for Breakwater Armouring. Proceedings Coasts, Marine Structures and Breakwaters, Edinburgh, 2009
- [7] Van den Berg I., Hofland, B., Reedijk, B. Influence of irregularities in the underlayer on the stability of XblocPlus. Coastal Engineering 157:103637, 2020

dr inż. Michał Talaś
mgr inż. Konrad Fita
mgr inż. Michał Woźniak
inż. Marcin Kwaśniewski
Mapei Polska Sp. z o.o.

Optymalizacja i obniżenie śladu węglowego betonów w prefabrykacji przy zastosowaniu domieszek przyspieszających twardnienie

Optimization and reduction of carbon footprint of concrete in precast through the use of hardening accelerating admixtures

Streszczenie

Rynek prefabrykacji betonowej w Polsce od kilku lat dynamicznie się rozwija sukcesywnie zwiększając swój udział w gospodarce krajowej. Wzrost popularności prefabrykacji betonowej jest wynikiem rosnącego zapotrzebowania na szybkie i efektywne rozwiązania budowlane, które jednocześnie oferują wysoką jakość i precyzję wykonania. Ponadto, prefabrykacja umożliwia redukcję kosztów pracy oraz czasu realizacji projektów, co sprawia, że staje się ona coraz bardziej atrakcyjna w kontekście rosnącej urbanizacji i potrzeby zrównoważonego budownictwa. Co więcej, biorąc pod uwagę wielkość tego segmentu budownictwa np. w państwach skandynawskich czy Niemczech wydaje się, że polski rynek prefabrykacji betonowej ma ciągle bardzo duży potencjał do wzrostu.

Beton na potrzeby prefabrykacji musi charakteryzować się wysokim przyrostem wytrzymałości wczesnych, aby umożliwić szybkie rozformowanie wykonywanych elementów oraz rotację szalunków. W tradycyjnych rozwiązaniach takie wymaganie wiąże się jednak z koniecznością stosowania dużych ilości wysokoemisyjnych cementów portlandzkich CEM I w składach mieszanek betonowych, co prowadzi do wysokich kosztów jednostkowych oraz znacznego śladu węglowego. Z tego samego powodu betony w prefabrykacji najczęściej są „przeprojektowane” (z ang. over-designed), to znaczy, że ich wytrzymałości po 28 dniach znacznie wykraczają poza wymaganą klasę wytrzymałości na ściskanie.

W artykule przedstawiono możliwości optymalizacji i redukcji śladu węglowego betonów na potrzeby prefabrykacji poprzez redukcję zawartości cementu i/lub zastosowanie cementu o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego przy utrzymaniu jego kluczowych właściwości, tj. właściwości reologicznych oraz wysokich wytrzymałości wczesnych. W tym

celu zastosowano wysoce efektywne domieszki upłynniające oraz przyspieszające twardnienie, szczególnie w pierwszych 8-16 godzinach.

Uzyskane wyniki pokazują znaczny potencjał zarówno ograniczenia zużycia cementu w betonie do prefabrykacji, jak i szerszego zastosowania cementów innych niż cement portlandzki CEM I, a co się z tym wiąże jego optymalizację i redukcję śladu węglowego.

Abstract

The precast concrete market in Poland has been developing dynamically for several years, steadily increasing its share in the national economy. The growing popularity of precast concrete is a result of the rising demand for fast and efficient construction solutions that simultaneously offer high quality and precision. In addition, precast technology allows for the reduction of labor costs and project execution time, making it increasingly attractive in the context of growing urbanization and the need for sustainable construction. Moreover, considering the size of this construction segment in countries such as the Nordic states or Germany, it appears that the Polish precast concrete market still holds significant growth potential.

Concrete used for precast applications must achieve high early strength gain to allow for quick demolding of elements and rapid formwork rotation. In traditional solutions, meeting these requirements typically involves the use of large amounts of high-emission Portland cement (CEM I) in concrete mixes, leading to high unit costs and a significant carbon footprint. For the same reason, precast concrete mixes are often “over-designed,” meaning their 28-day compressive strengths significantly exceed the required strength class.

The article presents opportunities for optimizing and reducing the carbon footprint of concrete used in precast applications by lowering cement content and/or using cement with a reduced Portland clinker content, while maintaining key performance characteristics such as rheological properties and high early strength. To achieve this, highly effective superplasticizers and hardening accelerators were used, particularly active within the first 8 to 16 hours.

The results obtained show significant potential for both reducing cement consumption in precast concrete and promoting the broader use of cements other than CEM I, thereby enabling optimization and reduction of the associated carbon footprint.

1. Wprowadzenie

Projektowanie mieszanek betonowych jest procesem złożonym, który rozpoczyna się od określenia wymagań stawianych zarówno mieszance betonowej, jak i betonowi stwardniałemu. Priorytety projektowe mogą się znacząco różnić w zależności od docelowego zastosowania betonu. O ile klasa konsystencji oraz wytrzymałość na ściskanie, zgodnie z PN-EN 206 [1], należą do podstawowych i zawsze definiowanych właściwości, to coraz większą rolę odgrywa trwałość betonu rozpatrywana w kontekście całego jego cyklu życia. Podstawowym narzędziem służącym do projektowania trwałości betonu są klasy ekspozycji, określone w normach PN-EN 206 [1] oraz krajowym uzupełnieniu PN-B-06265 [2]. W zależności od przypisanej klasy ekspozycji, normy te definiują wymagania dotyczące m.in. minimalnej klasy wytrzymałości, maksymalnego stosunku wodno-cementowego, minimalnej zawartości cementu oraz jego rodzaju, przez co to trwałość, a nie wytrzymałość na ściskanie, staje się głównym kryterium projektowym. W praktyce jednak, poza systemem klas ekspozycji,

projektowanie trwałości betonu może uwzględniać również inne parametry – takie jak mrozoodporność (np. F150) czy szczelność określona jako głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [3]. Niekiedy ograniczenia projektowe mieszanek betonowych wynikają z logistyki transportu, geometrii elementu lub technologii wykonania. W przypadku betonów masywnych konieczna jest redukcja ilości cementu ze względu na ciepło hydratacji [4], natomiast przy betonowaniu podwodnym mieszanka musi być odporna na wypłukiwanie składników, cechować się odpowiednią lepkością i stabilnością [5], co wymusza zastosowanie specjalnych domieszek i odpowiednio dobranych udziałów poszczególnych składników.

W przypadku produkcji elementów prefabrykowanych kluczowym kryterium stają się wytrzymałości wczesne, osiągane już po 12 lub 16 godzinach dojrzewania, a niekiedy nawet szybciej. Jest to warunek niezbędny do szybkiego rozformowania elementów, zwiększenia rotacji form oraz optymalizacji całego procesu produkcyjnego. Aby sprostać tym wymaganiom, mieszanki betonowe do prefabrykacji projektuje się z naciskiem na bardzo szybki przyrost wytrzymałości. Tradycyjnie cel ten realizowany jest poprzez wysokie dozowanie cementu portlandzkiego (CEM I), co jednak wiąże się zarówno z podwyższonymi kosztami produkcji, jak i istotnym śladem węglowym. Co więcej, takie podejście często prowadzi do „przeprojektowania” betonu, czyli uzyskiwania 28-dniowych wytrzymałości znacznie przekraczających wymagania stawiane dla przyjętej klasy wytrzymałości na ściskanie, co skutkuje niepotrzebnym obciążeniem środowiskowym i ekonomicznym.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości optymalizacji składu mieszanki betonowej na potrzeby prefabrykacji poprzez zastosowanie domieszek chemicznych przyspieszających twardnienie, umożliwiających redukcję ilości cementu CEM I lub zastosowanie cementu o mniejszej zawartości klinkieru portlandzkiego w składzie przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów wczesnej wytrzymałości na ściskanie. Takie rozwiązanie pozwala na obniżenie kosztów, zmniejszenie emisji CO₂ i racjonalniejsze wykorzystanie surowców bez wpływu na proces produkcyjny oraz finalną jakość produktów.

2. Zastosowane materiały i składy mieszanek betonowych

2.1 Kruszywa

W badanych betonach zastosowano kruszywo drobne (piasek naturalny) frakcji 0/2 mm oraz kruszywo grube żwirowe frakcji 2/8 mm i 8/16 mm. Kruszywa spełniały wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [6]. W tabeli 1 przedstawiono uziarnienie kruszyw oznaczone wg PN-EN 931-1:2012 [7].

Tabela 1. Wyniki analizy sitowej stosowanych kruszyw

Oznaczenie kruszywa	Zawartość frakcji przechodzącej przez sito [% mas.]										
	0,00 mm	0,063 mm	0,125 mm	0,250 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm	16,0 mm	22,4 mm
Piasek 0/2 mm	0,0	0,4	3,8	23,5	62,3	82,5	98,4	100	100	100	100
Żwir 2/8 mm	0,0	0,3	1,3	2,5	4,2	7,9	23,6	62,5	98	100	100
Żwir 8/16 mm	0,0	0,1	0,5	0,8	1,2	1,6	2,7	4,9	26,6	94,9	100

2.2 Cementy i mączka wapienna

W badaniach zastosowano cementy o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R zgodne z normą PN-EN 197-1 [8]. Cecha ta jest kluczowa dla betonów stosowanych w prefabrykacji. Umożliwia ona szybkie rozszalowanie form z produkowanymi elementami, a dzięki temu oszczędność czasu, kosztów oraz ogólne zwiększenie efektywności zakładów prefabrykacji. Cement CEM I 52,5 R to od wielu lat podstawowy rodzaj cementu stosowany w mieszankach betonowych stosowanych w prefabrykacji. Wyzwania związane z koniecznością obniżenia śladu węglowego cementu i betonu zmusza do szukania nowych rozwiązań takich jak zastosowanie nowoczesnych cementów wieloskładnikowych typu drugiego (CEM II). W tabeli 2 przedstawiono właściwości ww. cementów (dane od producentów na Q2 2025).

Tabela 2. Właściwości stosowanych cementów

Właściwości	CEM I 52,5 R	CEM II/A-V 52,5 R
Początek czasu wiązania [min]	208	181
Koniec czasu wiązania [min]	266	219
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	41,1	32,4
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	65,8	61,3
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	4612	5030
GWP brutto (A1-A3) [kg eq CO ₂]	812	581

Jako kruszywo wypełniające stosowano mączkę wapienną spełniającą wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [6]. W tabeli 3 zestawiono jej podstawowe właściwości.

Tabela 3. Właściwości stosowanej mączki wapiennej

Właściwości	Deklarowane właściwości użytkowe
Uziarnienie - wymiar oczka sita kontrolnego	% masy przechodzącej
2 mm	100
0,125 mm	97±3
0,063 mm	90±10
Gęstość ziarn [Mg/m ³]	2,60-2,75
Pyły, f [%]	70-100

2.3 Domieszki chemiczne

Zastosowano dwa rodzaje domieszek chemicznych Mapei Polska dedykowanych do mieszanek betonowych na potrzeby prefabrykacji: wysoce efektywny superplastyfikator Dynamon NRG 1037 oraz domieszkę przyspieszającą twardnienie Mapecube 1. Mapecube 1 to bezchlorkowa domieszka nowej generacji, opracowana w celu przyspieszenia rozwoju wytrzymałości wczesnej, bez negatywnego wpływu na trwałość betonu. Działa poprzez intensyfikację procesu hydratacji, co umożliwia szybsze rozformowanie elementów oraz skrócenie cyklu produkcyjnego. Szczególnie sprawdza się w przypadku betonów produkowanych w niskich temperaturach lub tam, gdzie wymagane są wysokie parametry mechaniczne już w ciągu pierwszych godzin dojrzewania. W kolejnych rozdziałach domieszka Mapecube 1 będzie oznaczana jako MC1.

Tabela 4. Właściwości fizykochemiczne zastosowanych domieszek

Właściwości	Domieszka chemiczna	
	Dynamon NRG 1037	Mapecube 1
Składnik podstawowy	Eter polikarboksylowy	Nanokrystaliczne fazy C-S-H
Barwa	Bursztynowy	Fioletowy
Gęstość (w 20 °C)	1,05 ± 0,02	1,14 ± 0,03
Odczyn pH (w 20 °C)	5,5 ± 1,0	11 ± 0,1
Zawartość części stałych [% mas.]	32	30
Zawartość jonów chlorkowych [% mas.]	< 0,1	< 0,1

2.4 Składy badanych betonów

Zaprojektowano beton samozagęszczalny C50/60 o konsystencji SF2. Beton referencyjny zawierał w swoim składzie 430 kg CEM I 52,5R i 70 kg mączki wapiennej (beton REF.). Celem badań było zredukowanie ilości cementu oraz zamiany CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5R z zachowaniem właściwości betonu tj. wytrzymałości wczesnej, klasy wytrzymałości po 28 dniach oraz klasy konsystencji SF2. Przyjęto redukcję ilości cementu na poziomie 30 kg oraz 60 kg względem receptury bazowej. Dla zachowania właściwości betonu SCC w recepturach zoptymalizowanych zwiększono zawartość mączki wapiennej do 100 kg. Zawartość superplastyfikatora Dynamon NRG 1037 dobrano na podstawie badań w sposób zapewniający utrzymanie konsystencji SF2, a zawartość domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 ustalono na poziomie 2% oraz 4% masy cementu. Przedstawiona w tabeli 5 zawartość wody efektywnej obejmuje wodę wprowadzoną przez domieszki chemiczne zgodnie z PN-EN 206 1.

Tabela 5. Skład badanych betonów

Składniki	Jedn.	Warianty mieszanek								
		ref.	Ref. + MC1			-30 kg cementu			- 60 kg cementu	
Cement	kg/m³	430	430	430	400	400	400	370	370	370
Mączka wapienna	kg/m³	70	70	70	100	100	100	100	100	100
Woda efektywna	kg/m³	165	165	165	165	165	165	165	165	165
Piasek 0-2 mm	kg/m³	626	626	626	631	631	631	641	641	641
Żwir 2/8	kg/m³	445	445	445	449	449	449	456	456	456
Żwir 8/16	kg/m³	577	577	577	582	582	582	591	591	591
NRG 1037 – CEM I 52,5 R	% m.c.	1,08	-	-	1,08	1,1	1,12	1,15	1,15	1,25
NRG 1037 – CEM II/A-V 52,5 R	% m.c.	0,95	1,01	1,04	0,95	0,95	1,04	1,02	1,11	1,13
Mapecube 1	% m.c.	-	2,0	4,0	-	2,0	4,0	-	2,0	4,0
w/c	-	0,38	0,38	0,38	0,41	0,41	0,41	0,45	0,45	0,45

3. Właściwości badanych betonów

3.1 Zastosowane metody badawcze

Badane mieszanki betonowe zbadano pod kątem ich gęstości, zawartości powietrza oraz konsystencji. Dla betonów stwardniałych sprawdzana była wytrzymałość na ściskanie po 12, 16 i 24 godzinach oraz 28 dniach (kostki 100x100x100 mm). Ponadto wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach sprawdzano dla betonów dojrzewających zarówno w warunkach laboratoryjnych ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) oraz w obniżonej temperaturze (5°C). W tabeli 6 zestawiono zastosowane metody badawcze.

Tabela 6. Zastosowane metody badawcze do określenia właściwości mieszanek betonowych oraz betonów stwardniałych

Badany materiał	Właściwość	Oznaczenie według normy
Mieszanka betonowa	Gęstość	PN-EN 12350-6:2019-08 [9]
	Zawartość powietrza	PN-EN 12350-7:2019-08 [10]
	Konsystencja	PN-EN 12350-8:2019-07 [11]
Beton stwardniały	Wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12390-3:2019-07 [12]

3.2 Właściwości mieszanek betonowych

Tabela 7 przedstawia zestawienie właściwości mieszanek betonowych wykonanych z dwóch rodzajów cementu: CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R. Wszystkie mieszanki zostały zaprojektowane tak, aby uzyskać i utrzymać porównywalną konsystencję odpowiadającą klasie SF2 według metody rozplywu (tj. rozplyw w zakresie 660–750 mm, zgodnie z normą EN 12350-8 [11]) do 25 minut, co jest czasem wystarczającym dla procesu technologicznego w większości zakładów prefabrykacji. Warianty mieszanek różniły się nie tylko ilością cementu i mączki wapiennej, ale również obecnością oraz dozowaniem domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1. Mieszanki zawierające domieszkę przyspieszającą twardnienie wymagały zwiększania ilości superplastyfikatora w celu utrzymania założonej konsystencji (rysunek 1). Mieszanki wykonane z cementu CEM II/A-V 52,5 R wymagały znacznie niższych dozowań superplastyfikatora w porównaniu do odpowiadających im mieszanek z cementem CEM I 52,5 R (tabela 5). Napowietrzenie mieszanek utrzymywało się na stałym i niskim poziomie (1,7–2,2% obj.), nie wykazując istotnego wpływu domieszki przyspieszającej na ten parametr.



Rys. 1. Badanie konsystencji betonu metodą rozplywu stożka wg PN-EN 12350-8 [11]

Tabela 7. Właściwości mieszanek betonowych

Wariant betonu	CEM I 52,5 R				CEM II/A-V 52,5 R			
	Gęstość mieszanki [kg/m³]	Napowietrzenie mieszanki [% obj.]	Rozplyw [mm]		Gęstość mieszanki [kg/m³]	Napowietrzenie mieszanki [% obj.]	Rozplyw [mm]	
			5 min.	25 min.			5 min.	25 min.
430+70 referencja	2400	1,8	720	700	2380	2,1	760	740
430+70 2% m.c. MC1	nie badano				2400	1,7	740	720
430+70 4% m.c. MC1					2390	1,9	710	690
400+100 0% m.c. MC1	2410	1,9	730	700	2350	2,2	740	670
400+100 2% m.c. MC1	2400	2,0	690	660	2350	2,1	720	650
400+100 4% m.c. MC1	2400	1,8	700	700	2380	2,0	720	670
370+100 0% m.c. MC1	2390	2,1	750	730	2370	1,9	750	730
370+100 2% m.c. MC1	2390	2,0	670	660	2380	2,0	750	700
370+100 4% m.c. MC1	2390	2,2	730	700	2370	1,8	740	700

MC1 – domieszka przyspieszająca twardnienie Mapecube 1

3.3 Wytrzymałość na ściskanie

W tabeli 8 zestawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich zbadanych betonów. Każdy z wariantów zostanie szczegółowo omówiony w kolejnych podpunktach.

Tabela 8. Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów [MPa]

Wariant betonu	CEM I 52,5 R					CEM II/A-V 52,5 R				
	12h	16h	16h 5°C	24h	28d	12h	16h	16h 5°C	24h	28d
430+70 referencja	19,8	27,5	11,1	37,1	91,2	16,3	22,9	8,4	31,9	72,3
430+70 2% m.c. MC1	-					22,4	28,3	12,6	33,0	77,2
430+70 4% m.c. MC1						23,9	30,1	16,7	35,2	79,0
400+100 0% m.c. MC1	18,0	26,3	9,8	32,8	84,5	14,5	21,7	7,6	27,3	67,8
400+100 2% m.c. MC1	24,2	33,6	13,2	38,1	81,1	19,7	24,5	11,3	30,9	70,1
400+100 4% m.c. MC1	26,8	35,2	18,3	39,9	77,3	21,8	26,3	16,1	32,4	70,9
370+100 0% m.c. MC1	14,3	24,1	8,1	30,1	79,9	10,9	19,0	6,8	25,7	65,0
370+100 2% m.c. MC1	22,6	30,1	12,1	34,8	76,2	17,1	21,5	9,7	27,6	66,9
370+100 4% m.c. MC1	24,6	32,4	16,5	36,7	73,1	18,9	23,7	13,1	29,3	68,5

MC1 – domieszka przyspieszająca twardnienie Mapecube 1

3.2.1 Wytrzymałości wczesne

Na rysunkach 2,3 i 4 przedstawiono porównanie wytrzymałości na ściskanie po 12,16 oraz 24 godzinach dojrzewania dla badanych betonów. We wszystkich przypadkach te same warianty betonów z cementem CEM I 52,5 R osiągnęły wyższe wytrzymałości wczesne niż ich odpowiedniki na bazie cementu CEM II/A-V 52,5 R. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają, że cement CEM I 52,5 R charakteryzuje się lepszymi parametrami wytrzymałościowymi w pierwszych godzinach dojrzewania i twardnienia, co czyni go najbardziej efektywnym rozwiązaniem w zastosowaniach prefabrykacyjnych w przypadku braku stosowania domieszek przyspieszających twardnienie.

Uzyskane w badaniach wyniki można analizować w trzech podejściach:

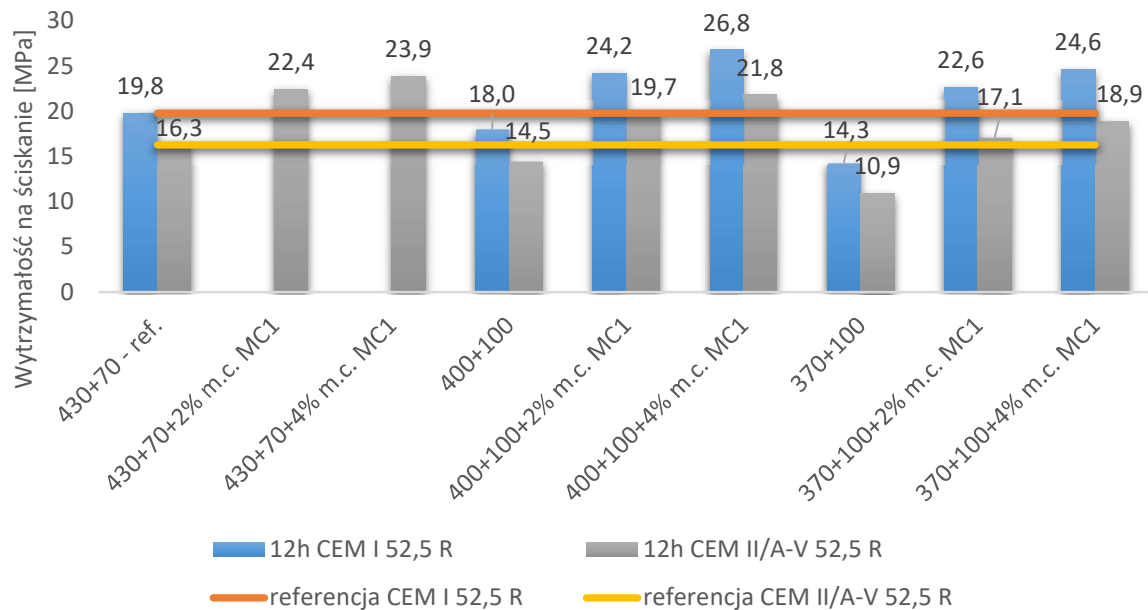
- 1) możliwość redukcji cementu przy zachowaniu tego samego rodzaju cementu;
- 2) możliwość zastąpienia cementu CEM I 52,5 R cementem CEM II/A-V 52,5 R przy utrzymaniu właściwości referencyjnych;
- 3) jednoczesna zamiana cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R oraz redukcja ilości cementu.

Wyniki po 12 godzinach dojrzewania

Po 12 godzinach dojrzewania referencyjny beton z cementem CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³ uzyskał wytrzymałość na ściskanie równą 19,8 MPa (rysunek 2). Zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 2% masy cementu, przy jednoczesnym obniżeniu ilości cementu o 60 kg/m³, pozwoliło osiągnąć wyższą wytrzymałość na ściskanie - 22,6 MPa. Zwiększenie dozowania domieszki do 4% m.c. przyniosło jeszcze lepszy rezultat – 24,6 MPa, co wskazuje na możliwość dalszej optymalizacji składu mieszanki, jeśli kluczowym kryterium projektowym byłaby wytrzymałość po 12 godzinach.

W przypadku zastąpienia cementu CEM I 52,5 R cementem CEM II/A-V 52,5 R w mieszance referencyjnej (bez zmiany całkowitej zawartości cementu) i dodaniu 2% Mapecube 1 odnotowano wzrost wytrzymałości do poziomu 22,4 MPa. Przy 4% m.c. dozowania Mapecube 1 wynik ten wzrósł do 23,9 MPa, co potwierdza skuteczność domieszki w kompensowaniu wolniejszego przyrostu wytrzymałości charakterystycznego dla cementów o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego w ich składzie.

Najbardziej wymagający wariant – czyli jednoczesna redukcja cementu (o 30 lub 60 kg/m³) oraz jego zamiana na CEM II – okazał się możliwy do realizacji. Dla układu z 400 kg/m³ cementu (30 kg/m³ redukcji) i dodatkiem 2% lub 4% m.c. domieszki przyspieszającej twardnienie uzyskano odpowiednio 19,7 i 21,8 MPa. Nawet w najbardziej zoptymalizowanej mieszance (redukcja 60 kg/m³, 4% m.c. Mapecube 1) uzyskano wynik 18,9 MPa – zaledwie 0,9 MPa poniżej referencji na CEM I 52,5 R, co można uznać za równoważny rezultat z punktu widzenia praktycznego.



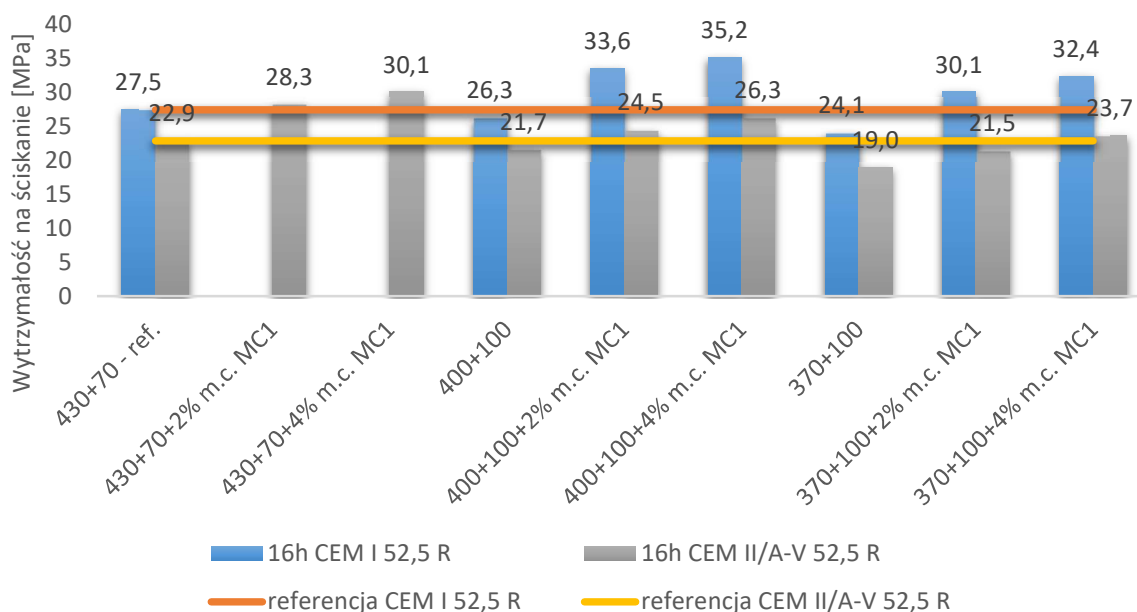
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie po 12 godzinach dojrzewania

Wyniki po 16 godzinach dojrzewania

Po 16 godzinach dojrzewania referencyjny beton z cementem CEM I 52,5 R (430 kg/m^3) osiągnął wytrzymałość na poziomie 27,5 MPa (rysunek 3). Zastosowanie domieszki Mapecube 1 w ilości 2% m.c. i jednoczesna redukcja cementu o 60 kg/m^3 pozwoliły na uzyskanie wyższej wytrzymałości – 30,1 MPa. Zwiększenie dozowania do 4% m.c. dało jeszcze lepszy efekt: 32,4 MPa, czyli aż o 4,9 MPa więcej niż referencja. Wskazuje to na bardzo wysoką skuteczność działania domieszki przyspieszającej i otwiera możliwość dalszej optymalizacji ekonomiczno-technologicznej.

Podobny efekt obserwuje się przy zamianie cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R bez zmiany jego ilości. Z dodatkiem 2% m.c. domieszki przyspieszającej uzyskano 28,3 MPa, a przy 4% – 30,1 MPa, a więc oba warianty przewyższają poziom wytrzymałości betonu referencyjnego z CEM I.

Wariant zakładający jednoczesną zamianę cementu i jego redukcję także przyniósł bardzo dobre rezultaty. W przypadku redukcji o 30 kg/m^3 i zastosowania 4% m.c. Mapecube 1 uzyskano wytrzymałość 26,3 MPa, co było niższe od referencji na CEM I o 1,2 MPa. Nawet przy większej redukcji cementu (o 60 kg/m^3) i 4% m.c. domieszki wytrzymałość wyniosła 23,7 MPa, co oznacza tylko 3,8 MPa różnicy względem referencji, przy jednoczesnym znacznie niższym zużyciu cementu i niższym śladzie węglowym.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach dojrzewania

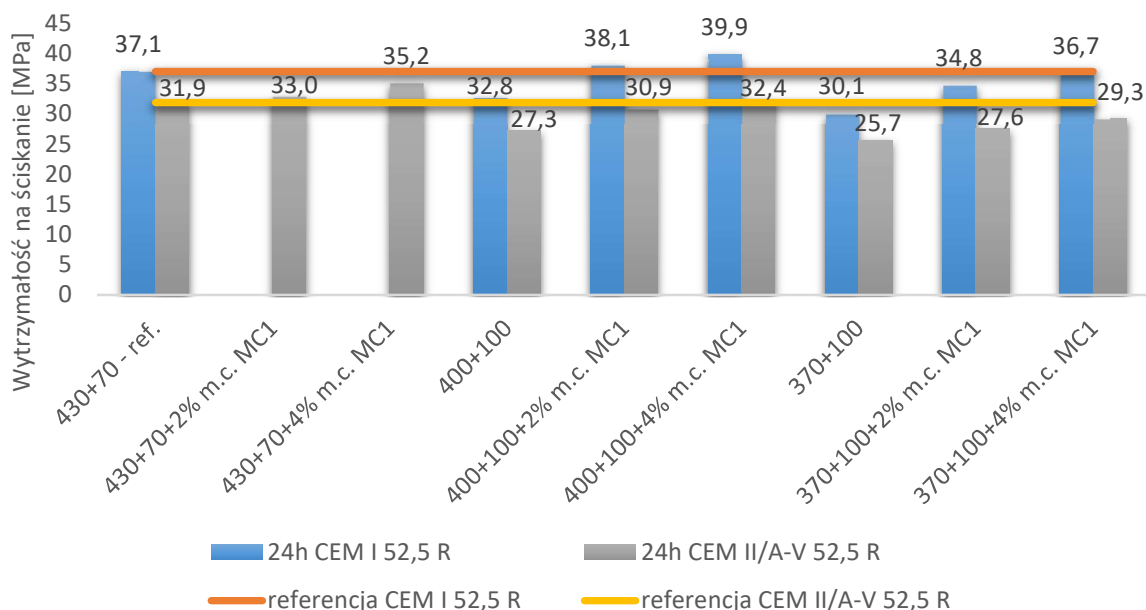
Wyniki po 24 godzinach dojrzewania

Po 24 godzinach dojrzewania referencyjna mieszanka betonowa wykonana z cementu CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m^3 osiągnęła wytrzymałość na ściskanie równą $37,1 \text{ MPa}$ (rysunek 4). Redukcja ilości cementu o 60 kg/m^3 i zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 4% m.c. pozwoliły na uzyskanie wytrzymałości $36,7 \text{ MPa}$, niższą zaledwie o $0,4 \text{ MPa}$ od wartości referencyjnej.

W przypadku zamiany cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R bez redukcji ilości cementu, dodanie 4% m.c. Mapecube 1 pozwoliło osiągnąć wytrzymałość $35,2 \text{ MPa}$ – nieznacznie niższą (o $1,9 \text{ MPa}$) od referencji na CEM I.

W najbardziej wymagającym scenariuszu – zakładającym jednoczesną zamianę cementu CEM I 52,5 R na CEM II/A-V 52,5 R oraz jego redukcję – nie udało się uzyskać wytrzymałości porównywalnych z mieszanką referencyjną. Dla składu zredukowanego o 30 kg/m^3 (do 400 kg/m^3) i dodatkiem 4% Mapecube 1, uzyskano wytrzymałość $32,4 \text{ MPa}$, natomiast przy dalszej redukcji do 370 kg/m^3 wynik spadł do $29,3 \text{ MPa}$. Oznacza to, dla badanych cementów i zastosowanym dozowaniu przyspieszacza, jednoczesna zmiana typu cementu oraz ograniczenie jego ilości nie zapewniają osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie zbliżonych do referencyjnych po 24 godzinach.

Skuteczność działania domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 maleje wraz z wydłużeniem czasu dojrzewania w temperaturze normowej. Największe różnice względem betonu referencyjnego obserwowane są po 12 i 16 godzinach, natomiast po 24 godzinach różnice w wytrzymałości między optymalizowanym składem a referencją stają się mniejsze. Może to wynikać z faktu, że mechanizm działania Mapecube 1 oparty jest głównie na przyspieszeniu początkowych reakcji hydratacyjnych cementu – co przekłada się na intensywny przyrost wytrzymałości w pierwszych kilkunastu godzinach. W miarę upływu czasu, wpływ domieszki ulega naturalnemu ograniczeniu, ponieważ tempo hydratacji staje się kontrolowane przez inne czynniki, a efekt przyspieszenia jest już w dużej mierze wykorzystany.



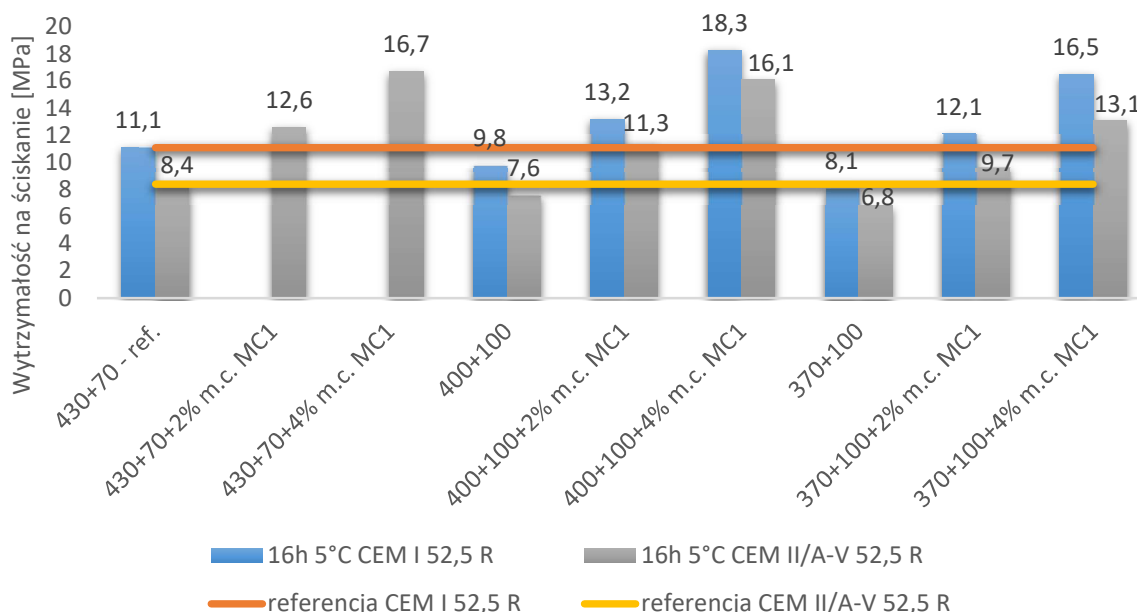
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie po 24 godzinach dojrzewania

3.2.2 Wytrzymałości wczesne w obniżonej temperaturze

W warunkach dojrzewania w obniżonej temperaturze (5°C) referencyjna mieszanka betonowa wykonana z cementu CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³ osiągnęła po 16 godzinach wytrzymałość na ściskanie równą 11,1 MPa (rysunek 5). Dodatek 2% domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 przy redukcji cementu o 60 kg/m³ pozwolił uzyskać 12,1 MPa, natomiast zwiększenie dozowania do 4% m.c. przyniosło znaczący wzrost do poziomu 16,5 MPa. Oba wyniki są wyraźnie wyższe od wyników betonu referencyjnego. Świadczy to o dużej skuteczności domieszki Mapecube w warunkach obniżonych temperatur, która standardowo spowalnia hydratację cementu.

Mieszanka referencyjna z cementem CEM II/A-V 52,5 R w ilości 430 kg/m³ uzyskała wytrzymałość 8,4 MPa, czyli o 2,7 MPa mniej niż analogiczna mieszanka na CEM I. Zastosowanie 2% m.c. Mapecube 1 poprawiło wynik do 12,6 MPa, a 4% m.c. – do 16,7 MPa, co oznacza przekroczenie poziomu referencyjnego (11,1 MPa) uzyskanego na CEM I bez dodatku domieszki. Pokazuje to, że Mapecube 1 pozwala efektywnie kompensować wolniejsze tempo narastania wytrzymałości typowe dla cementów typu CEM II w niskich temperaturach.

Zastosowanie cementu CEM II/A-V 52,5 R w ilości 370 kg/m³ z dodatkiem 4% m.c. domieszki przyspieszającej pozwoliło uzyskać 13,1 MPa, czyli o 2,0 MPa więcej od betonu referencyjnego z CEM I 52,5 R (430 kg/m³). Porównując to do wyniku tego betonu bez dodatku domieszki (6,8 MPa) przyrost wytrzymałości uzyskany na skutek jej zastosowania okazał się niemal dwukrotny.



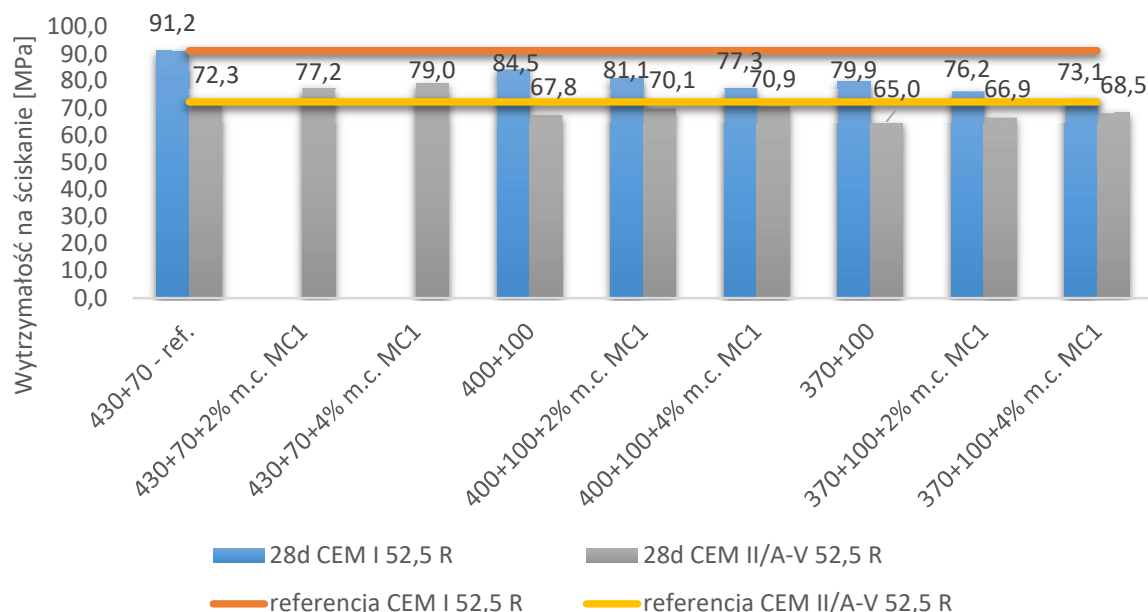
Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie po 16 godzinach dojrzewania w temperaturze 5°C.

3.2.3 Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Analiza wyników wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wykazuje na wyraźny wpływ zarówno rodzaju cementu, jak i poziomu jego redukcji oraz zastosowanego dozowania domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1.

W przypadku cementu CEM I 52,5 R najwyższą wytrzymałość – aż 91,2 MPa – osiągnięto w mieszance referencyjnej bez dodatku domieszki przyspieszającej. Po optymalizacji składu, polegającej na redukcji ilości cementu do 400 i 370 kg/m³ oraz wprowadzeniu Mapecube 1 w dozowaniach 2% i 4% m.c. zaobserwowano zauważalny spadek wytrzymałości po 28 dniach. Wartości te malały wraz ze wzrostem dozowania domieszki – od 84,5 MPa przy 400 kg cementu bez domieszki, przez 81,1 MPa (2% m.c.) i 77,3 MPa (4% m.c.), aż do 76,2 MPa i 73,8 MPa przy najniższym poziomie cementu (370 kg/m³). Wydaje się, że przyspieszenie procesu hydratacji w początkowej fazie prowadzi do szybkiego przyrostu wytrzymałości, ale jednocześnie może ograniczać dalszy rozwój mikrostruktury w późniejszym czasie, co skutkuje obniżeniem potencjału wytrzymałościowego po 28 dniach. Odmienny obraz wyłania się w przypadku cementu CEM II/A-V 52,5 R. Mieszanka referencyjna osiągnęła wytrzymałość 72,3 MPa, a dodatek Mapecube 1 – odwrotnie niż w przypadku CEM I – przyniósł wzrost wytrzymałości: do 77,2 MPa przy 2% oraz do 79,0 MPa przy 4%. Oznacza to, że domieszka przyspieszająca może sprzyjać nie tylko wczesnemu twardnieniu, ale również poprawie ogólnego stopnia hydratacji cementu z dodatkiem mineralnym, co przekłada się na lepsze wyniki długoterminowe. Zagadnienie to wymaga jednak dalszych badań.

Pomimo zastosowanej optymalizacji – obniżenia ilości cementu oraz zamiany jego rodzaju na mniej emisyjny – wszystkie badane mieszanki po 28 dniach spełniają wymagania klasy wytrzymałości C50/60 wg PN-EN 206 [1], co jest poziomem wystarczającym dla zdecydowanej większości aplikacji betonu w obszarze prefabrykacji. Potwierdza to skuteczność kombinacji domieszki przyspieszającej z cementem CEM II w zrównoważonym projektowaniu mieszanek betonowych dla tego sektora.



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

4. Obniżenie śladu węglowego betonu na skutek optymalizacji składu

W tabeli 9 zestawiono emisyjności badanych betonów obliczone na bazie deklarowanych przez producentów emisyjności zastosowanych cementów (tabela 1). Według różnych źródeł [13,14] cement odpowiada za 83-88% całego śladu węglowego betonu, dlatego dla ułatwienia obliczeń przyjęto niniejszą metodologię.

Tabela 9. Ślad węglowy badanych betonów

Cement	Emisja CO ₂ brutto [kg/m ³ betonu]		
	Referencja (430+70)	-30 kg cementu (400+100)	-60 kg cementu (370+100)
CEM I 52,5 R	349,2	324,8	300,4
CEM II/A-V 52,5 R	249,8	232,4	215,0

W tabeli 10 zestawiono najbardziej efektywne warianty składu mieszanek betonowych pod względem redukcji emisji CO₂, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych w określonym czasie dojrzewania (12h, 16h, 16h w 5°C oraz 24h). Za punkt odniesienia przyjęto beton referencyjny z cementem CEM I 52,5 R w ilości 430 kg/m³.

Każdy z przedstawionych wariantów optymalizacyjnych uwzględnia zastosowanie cementu CEM II/A-V 52,5 R, redukcję zawartości cementu oraz dozowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 (MC1) w ilości 4% masy cementu. Kluczowym kryterium doboru było osiągnięcie porównywalnej lub wyższej wytrzymałości na ściskanie – dopuszczając jedynie niewielkie odchylenia (do ok. 2 MPa), które w warunkach produkcji mają ograniczone znaczenie praktyczne. W każdym przypadku udało się uzyskać istotne ograniczenie emisji CO₂ – od blisko 100 do ponad 130 kg/m³, co przekłada się na redukcję śladu węglowego rzędu 28–38%. Szczególnie efektywnym okazał się wariant w temperaturze obniżonej (5°C), gdzie dzięki synergii działania domieszki i optymalizacji składu, mimo niekorzystnych warunków dojrzewania uzyskano wyższe wytrzymałości niż w referencji, przy największym wskaźniku redukcji emisji (38,4%).

Tabela 10. Efektywność optymalizacji składu betonów i emisyjności przy zachowaniu właściwości użytkowych

Czas dojrzewania [godziny]	Referencja (430 kg/m ³ CEM I 52,5 R)		Optymalizacja – wariant maksymalny			Redukcja CO ₂ [kg/m ³]	Redukcja CO ₂ [%]
	fc [MPa]	Emisja [kg/m ³]	Wariant betonu	fc [MPa]	Emisja [kg/m ³]		
12h	19,8	349,2	CEM II 370+100 4% m.c. MC1	18,9	215,0	134,2	38,4
16h	27,5		CEM II 400+100 4% m.c. MC1	26,3	232,4	116,8	33,4
16h 5°C	11,1		CEM II 370+100 4% m.c. MC1	13,1	215,0	134,2	38,4
24h	37,1		CEM II 430+70 4% m.c. MC1	35,2	249,8	99,4	28,5

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule opisano możliwości ograniczenia emisji CO₂ w produkcji betonów na potrzeby sektora prefabrykacji poprzez zastosowanie domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 oraz optymalizację składu mieszanek betonowych. Rosnące znaczenie prefabrykacji w Polsce wiąże się z potrzebą szybkiego tempa realizacji inwestycji i wysokiej jakości wykonania, jednak dotychczasowe podejście, polegające na stosowaniu dużych ilości cementu portlandzkiego CEM I, generuje wysoki ślad węglowy oraz niepotrzebne „przeprojektowanie” mieszanek w przypadku docelowej klasy wytrzymałości na ściskanie.

W badaniach przeanalizowano różne warianty betonów wykonanych na bazie cementów CEM I 52,5 R oraz CEM II/A-V 52,5 R, w tym z zastosowaniem domieszki przyspieszającej twardnienie Mapecube 1 w ilości 2% i 4% masy cementu. Sprawdzano wpływ tych modyfikacji na wytrzymałość betonu po 12, 16 i 24 godzinach dojrzewania oraz po 28 dniach, a także w warunkach obniżonej temperatury (5°C). Wyniki wykazały, że Mapecube 1 istotnie przyspiesza przyrost wytrzymałości wczesnej, szczególnie w pierwszych 16 godzinach, co ma kluczowe znaczenie dla efektywności procesów na zakładach prefabrykacji.

Zastosowanie Mapecube 1 pozwoliło na redukcję ilości cementu nawet o 60 kg/m³ bez utraty parametrów wytrzymałościowych (wczesnych), a w niektórych przypadkach osiągnięto lepsze wyniki niż w betonie referencyjnym. Co istotne, domieszka skutecznie kompensowała wolniejszy przyrost wytrzymałości charakterystyczny dla cementów CEM II w porównaniu do cementów CEM I, umożliwiając ich zastosowanie bez strat technologicznych.

Skuteczność domieszki Mapecube 1 maleje wraz z wydłużaniem czasu dojrzewania betonu. Największy wpływ na przyrost wytrzymałości obserwowany był w ciągu pierwszych 12–16 godzin, co potwierdza jej efektywne działanie w fazie wczesnego twardnienia. W miarę

postępu procesu hydratacji różnice w wytrzymałościach pomiędzy betonami z domieszką a mieszanką referencyjną stają się coraz mniejsze.

Analiza wytrzymałości po 28 dniach wykazała, że w przypadku cementu CEM I wprowadzenie Mapecube 1 może prowadzić do lekkiego spadku wytrzymałości końcowej, co prawdopodobnie wynika z szybkiej inicjalizacji hydratacji, ograniczającej dalszy rozwój mikrostruktury. Odwrotnie było w przypadku cementu CEM II – tam domieszka nie tylko przyspieszała twardnienie, ale także poprawiała końcową wytrzymałość, co może świadczyć o korzystnej aktywacji nieklinkierowych składników głównych cementu przez Mapecube 1. Wymaga to jednak dalszych badań.

W warunkach obniżonej temperatury domieszka wykazała szczególną skuteczność – betony z jej dodatkiem osiągały wyższe wytrzymałości niż beton referencyjny, nawet przy zmniejszonej ilości cementu. To ważne z punktu widzenia prefabrykacji w okresach obniżonych temperatur lub w nieogrzewanych halach produkcyjnych.

Pod względem środowiskowym przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na redukcję śladu węglowego betonu o 28–38%, głównie dzięki obniżeniu ilości cementu i zastosowaniu cementu o niższej emisyjności (CEM II/A-V). Każda z optymalizowanych mieszanek spełniała wymagania wytrzymałościowe dla klasy C50/60 według normy PN-EN 206, co jest klasą wystarczającą dla większości aplikacji w segmencie prefabrykacji.

Podsumowując, zastosowanie domieszki przyspieszającej Mapecube 1 w połączeniu z cementem CEM II i redukcją wyjściowej zawartości cementu stanowi skuteczne narzędzie w dążeniu do bardziej zrównoważonej prefabrykacji. Umożliwia ono ograniczenie kosztów, zwiększenie efektywności produkcji, a przede wszystkim – istotne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla przy zachowaniu wymaganych właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego.

6. Bibliografia

- [1] *PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.*
- [2] *PN-B-06265:2022-08 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie normy PN-EN 206+A2:2021-08.*
- [3] *PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.*
- [4] W. Kiernożycki, *Betonowe konstrukcje masywne*. Kraków: Polski Cement, 2003.
- [5] J. F. Daczko, *Self-Consolidating Concrete: Applying What We Know*, CRC Press, 2012.
- [6] *PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.*
- [7] *PN-EN 931-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Określanie uziarnienia.*
- [8] *PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- [9] *PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 6: Gęstość.*
- [10] *PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe.*
- [11] *PN-EN 12350-8:2019-08 – Badania mieszanki betonowej – Część 8: Badanie rozplywu betonu samozagęszczalnego (SCC).*
- [12] *PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.*

-
- [13] Irfan M., *Carbon footprint of ready mix concrete and the role of environmental classification systems*, *ESA Report No. 2011:16*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011
- [14] J.R. Prusinski, M.L. Marceau, M.G. Vangeem, *Life cycle inventory of slag cement concrete*, Eighth CANMET/ACI Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag, Nat. Pozzolans Concr. (2004) 1–33.

Cementy niskoklinkierowe w prefabrykacji: Wpływ na właściwości betonu i optymalizację procesów produkcyjnych

Streszczenie

W obliczu postępujących zmian klimatycznych, prefabrykacja betonowa zyskuje na znaczeniu jako technologia sprzyjająca zrównoważonemu budownictwu. Nowoczesna prefabrykacja, oparta na precyzji produkcji, cyfrowych technologiach (BIM, AI) oraz betonie wysokiej jakości, umożliwia realizację obiektów o niskim śladzie węglowym przy zachowaniu wysokiej funkcjonalności i estetyki. Przemysł cementowy, będący znaczącym emitentem CO₂, intensyfikuje działania w kierunku dekarbonizacji. Kluczową rolę w obniżeniu emisyjności odgrywają cementy zawierające dodatki mineralne. Choć ograniczenie zawartości klinkieru w cemencie wiąże się z koniecznością optymalizacji receptur i stosowania dodatków poprawiających urabialność oraz wytrzymałość, stanowi ono fundamentalny kierunek rozwoju branży w kontekście realizacji celów Europejskiego Zielonego Ładu i transformacji przemysłu w kierunku niskoemisyjnym. W niniejszym referacie podjęto próbę analizy właściwości cementów niskoklinkierowych CEM II A-LL 42,5 R oraz CEM V/A (S-V) 42,5 N. W tym celu przeprowadzono ocenę równoważnych właściwości użytkowych z wykorzystaniem parametrów takich jak wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, mrozoodporność w roztworze soli odladzających oraz wodoszczelność. Przedstawiono również ocenę świeżej mieszanki betonowej. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań umożliwia sformułowanie wniosków końcowych, które – poza analizą parametrów technicznych – uwzględniają również potencjalne korzyści oraz zagrożenia związane z wdrożeniem cementów niskoemisyjnych jako standardowych spoiw stosowanych w technologii betonu.

Abstract

With climate change on the rise, concrete prefabrication is gaining importance as a technology that promotes sustainable construction. Modern prefabrication, based on precision manufacturing, digital technologies (BIM, AI) and high-quality concrete, enables the realization of buildings with a low carbon footprint while maintaining high functionality and aesthetics. The cement industry, a significant CO₂ emitter, is stepping up efforts to decarbonize. Cements containing mineral additives play a key role in decarbonization. Although reducing the clinker content of cement involves optimizing formulations and using additives to improve workability and strength, it represents a fundamental direction for the industry in the context of achieving the goals of the European Green Deal and the industry's low-carbon transformation. This paper attempts to analyze the properties of low-clinker cements CEM II A-LL 42.5 R and CEM V/A (S-V) 42.5 N. For this purpose, an evaluation of equivalent performance properties was carried out using parameters such as compressive strength, water absorption, resistance to cyclic freezing and thawing, frost resistance in de-icing salt solution and water resistance. An assessment of the fresh concrete mix was also presented. The comparison of the obtained test results enables the formulation of final conclusions which—beyond the analysis of technical parameters—also take into account potential benefits and risks related to the implementation of low-emission cements as standard binders used in concrete technology.

1. Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne i ich skutki dla codziennego życia ludzi stanowią jedno z najpoważniejszych wyzwań współczesności. Zastosowanie prefabrykacji w budownictwie i architekturze otwiera możliwości wdrażania rozwiązań ograniczających negatywny wpływ obiektów budowlanych na środowisko. Tym samym prefabrykacja może odegrać istotną rolę zarówno w łagodzeniu skutków zmian klimatu, jak i w przystosowywaniu się do ich następstw [1].

Prefabrykacja ma w Polsce długoletnią tradycję, a jej intensywny rozwój przypada na lata 70. i 80. XX wieku, głównie w sektorze mieszkaniowym i przemysłowym. Choć ówczesne realizacje budziły zastrzeżenia pod względem funkcjonalnym i estetycznym, ich stan techniczny pozostaje na ogół dobry, a trwałość często przekracza zakładany okres eksploatacji. W ostatnich dwóch dekadach obserwujemy dynamiczny rozwój prefabrykacji nowej generacji, opartej na jakości, precyzji i elastyczności projektowej. Nowoczesna prefabrykacja korzysta z cyfrowych technologii (BIM, automatyzacja produkcji, technologii sztucznej inteligencji (AI)), betonu wysokiej jakości i domieszek chemicznych pozwalających osiągać bardzo dobrą powtarzalność właściwości betonu. Dzięki temu możliwe jest łączenie industrializacji z wysoką estetyką oraz zaawansowaną funkcjonalnością architektoniczną. [2][3].

Rozwój budownictwa zrównoważonego i zielonej architektury wynika ze wzrostu świadomości ekologicznej oraz wdrażania innowacyjnych metod ochrony środowiska. Sektor cementowy odpowiada za około 8% globalnych emisji CO₂, z czego większość generowana jest podczas procesu klinkieryzacji w piecach cementowych, przy czym w Polsce jego udział w rocznej emisji CO₂ wynosi 3,8%. Emisje te mają charakter zarówno procesowy (rozpad węglanu wapnia $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), jak i energetyczny (spalanie paliw kopalnych). W związku z rosnącym znaczeniem polityki klimatycznej Unii Europejskiej, przemysł cementowy znalazł się w centrum działań dekarbonizacyjnych [4].

Pierwsze inicjatywy sektora cementowego w obszarze redukcji emisji pojawiły się około 1970 roku, kiedy to udzielono pierwszych patentów na niskoemisyjne cementy.

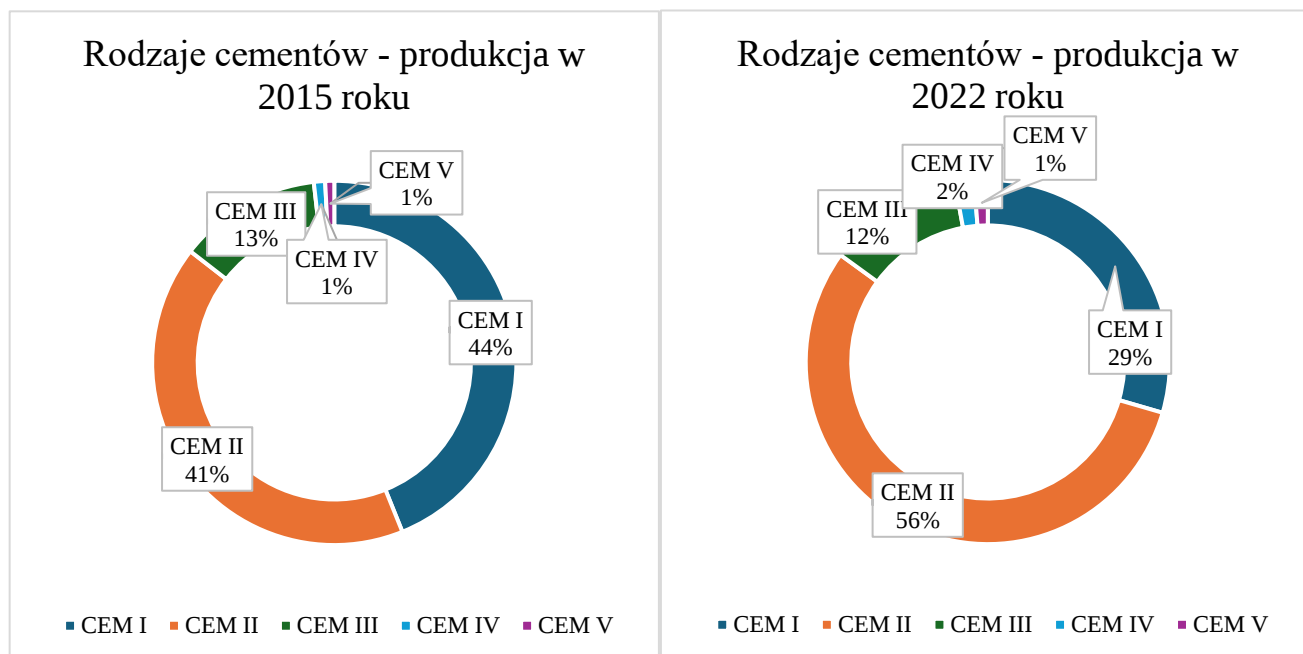
Zintensyfikowane działania nastąpiły w latach 2008–2009, a przełomowym momentem był szczyt klimatyczny w Kopenhadze w grudniu 2009 roku, który znacząco przyspieszył globalne działania na rzecz ochrony klimatu [5]. W obliczu narastającego kryzysu klimatycznego społeczność międzynarodowa podjęła w 2015 roku kluczową decyzję o przyjęciu porozumienia mającego na celu ograniczenie globalnego ocieplenia – tzw. Porozumienia paryskiego [6]. Dokument ten, przyjęty podczas Konferencji Stron (COP21), stał się fundamentem dla dalszych działań legislacyjnych i strategii klimatycznych, zarówno na poziomie globalnym, jak i unijnym. W odpowiedzi na zobowiązania wynikające z Porozumienia paryskiego, Unia Europejska ogłosiła 11 grudnia 2019 roku Europejski Zielony Ład (European Green Deal), którego głównym celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050 [7]. Strategia ta obejmuje szeroki zakres działań mających na celu transformację gospodarki w kierunku niskoemisyjnym, ze szczególnym uwzględnieniem sektorów o wysokim poziomie emisji gazów cieplarnianych, takich jak przemysł cementowy i budowlany. W ramach Zielonego Ładu opracowano kompleksowy pakiet legislacyjny pod nazwą „Fit for 55”, który zakłada redukcję emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku względem poziomów z 1990 roku, przy równoczesnym zachowaniu celu osiągnięcia zerowej emisji netto do 2050 roku [8].

W odpowiedzi na nowe regulacje i rosnącą presję społeczną oraz rynkową, producenci cementu rozpoczęli intensywne działania modernizacyjne i badawczo-rozwojowe w kierunku ograniczenia emisyjności produkcji. Działania te obejmują szerokie spektrum rozwiązań, takich jak:

- Zwiększenie udziału cementów niskoklinkierowych (np. CEM II, CEM III, CEM V) [9]
- Zastępowanie paliw kopalnych paliwami alternatywnymi (np. RDF, biomasa) – już dziś niektóre zakłady w Polsce osiągają >80% udziału paliw alternatywnych[10]
- Zwiększanie efektywności energetycznej pieców cementowych – modernizacja linii produkcyjnych, optymalizacja parametrów wypału [15]
- Wykorzystanie technologii wychwytu i składowania CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage/CCU – Carbon Capture and Utilization) [11] [12][15]
- Wykorzystanie cementów geopolimerowych [13]
- Recykling materiałów budowlanych jako surowców wtórnych – np. drobno zmielone kruszywa recykulowane lub stary beton [14]
- Cyfryzacja i monitoring śladu węglowego (LCA, EPD) – dokładne monitorowanie i redukcja emisyjności produktów prefabrykowanych.
- Lokalizacja produkcji blisko placu budowy – ograniczenie emisji transportowych. [5]

2. Cementy niskoklinkierowe

Współczesna produkcja cementu zmierza w kierunku zmniejszenia zawartości klinkieru portlandzkiego poprzez zastosowanie dodatków mineralnych, co jest odpowiedzią na wyzwania związane z dekarbonizacją przemysłu cementowego oraz ograniczoną dostępnością tradycyjnych surowców (Rys 1)



Rys 1. Produkcja cementów w roku 2015 oraz 2022 [9]

Najczęściej stosowane dodatki to granulowany żużel wielkopiecowy oraz popiół lotny krzemionkowy, które od lat są podstawą do produkcji cementów wieloskładnikowych o obniżonym śladzie węglowym. Granulowany żużel wielkopiecowy, zalicza się do grupy

materiałów hydraulicznych, które po aktywacji chemicznej wykazują zdolność wiązania i twardnienia pod wodą, tworząc fazy C-S-H analogiczne do powstających w wyniku hydratacji klinkieru portlandzkiego. W związku z planowaną dekarbonizacją przemysłu hutniczego, zakładającą wykorzystanie wodoru w procesie produkcji surowki żelaza, prognozuje się znaczny spadek dostępności granulowanego żużla wielkopiecowego. Cementy z wysokim udziałem żużla charakteryzują się niższą wytrzymałością wczesną, lecz lepszą trwałością długoterminową, wyższą odpornością chemiczną i niższym ciepłem hydratacji, co czyni je korzystnymi w zastosowaniach maszynowych.

Do materiałów pucolanowych zalicza się dodatki zawierające reaktywną krzemionkę, która w obecności wody i wodorotlenku wapnia w temperaturze pokojowej tworzy fazę C-S-H.

Naturalne pucolany pochodzą głównie z materiałów wulkanicznych i osadowych, jednak największe znaczenie praktyczne mają pucolany sztuczne, takie jak popioły lotne. Popioły krzemionkowe zawierają fazy glinokrzemianowe, które reagując z Ca(OH)_2 , przyczyniają się do wzrostu wytrzymałości betonu, natomiast popioły wapienne mogą dodatkowo wykazywać właściwości hydrauliczne. Kluczowy wpływ na aktywność pucolanową popiołów ma zawartość fazy szklistej oraz stopień ich rozdrobnienia. Im wyższa zawartość fazy szklistej i wyższy stopień rozdrobnienia popiołów tym te właściwości są lepsze.

Jako materiał wypełniający klasyfikuje się wapienie, uznawane za dodatek inertny, choć może wykazywać ograniczoną aktywność chemiczną w zaczynie cementowym. Wapienie stosowane w cemencie przyczyniają się głównie do poprawy urabialności mieszanki i obniżenia zawartości klinkieru, jednak nie mają istotnego wpływu na rozwój wytrzymałości. Ich jakość, ilość i skład chemiczny determinują odporność betonu na agresję chemiczną oraz mrozoodporność. Ze względu na dużą dostępność wapienia, prowadzi się badania nad zwiększeniem jego udziału w cemencie powyżej wartości normowych, nawet do 50% masy. W celu utrzymania odpowiednich właściwości mechanicznych betonu z wysoką zawartością wapienia, konieczne jest stosowanie niskiego wskaźnika wodno-cementowego oraz zaawansowanych domieszek uplastyczniających.

Materiałami, które są przedmiotem intensywnych badań, są także kalcynowane gliny, drobne frakcje (pyły) z recyklingu betonu oraz mieszanki popiołowo-żużłowe zalegające na starych składowiskach.

Należy jednak zauważyć, że zmniejszenie zawartości klinkieru, choć korzystne z punktu widzenia środowiskowego, może wpływać na właściwości mechaniczne i trwałościowe cementu. Klinkier jest głównym składnikiem decydującym o wytrzymałości, odporności chemicznej i trwałości materiału, a jego ograniczenie wiąże się z koniecznością szczegółowego badania wpływu nowych receptur na właściwości użytkowe betonu [5].

Cechy cementu, takie jak: wysoka dynamika narastania wytrzymałości wczesnych są kluczowe z punktu widzenia zastosowania cementu w segmentach takich jak: szeroko rozumiana prefabrykacja, beton komórkowy, czy betony towarowe stosowane w warunkach obniżonych temperatur otoczenia. Chcąc stosować bardziej ekologiczne rozwiązania w szerokim zakresie, również w przytoczonych segmentach, należy położyć duży nacisk na rozwój rozwiązań technologicznych, które umożliwią stosowanie cementów z niską zawartością klinkieru w tego typu segmentach.

3. Metodyka badań

Dobór materiałów do badań

W badaniach zastosowano dwa różne rodzaje cementów: cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA oraz cement portlandzki wapienny CEM II A-LL 42,5 R-NA. Skład przedstawiono w tabeli 1. Celem było porównanie ich wpływu na właściwości mieszanek betonowych dedykowanych do prefabrykacji

Skład chemiczny cementu	jednostki miary	Wyniki	
		CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA	CEM II A-LL 42,5 R-NA CEMEX RUDNIKI
SiO ₃	%	29,10	20,84
Al ₂ O ₃	%	9,70	5,51
Fe ₂ O ₃	%	3,00	3,22
CaO	%	46,90	61,71
MgO	%	2,70	2,35
Siarczany SO ₃	%	2,34	2,71
Na ₂ O	%	0,36	0,48
Cl ⁻	%	0,05	0,04

Tabela 1 Skład chemiczny badanych cementów

Cementy te różnią się zarówno zawartością klinkieru, jak i typem dodatków mineralnych, co może przekładać się na przebieg hydratacji, reologię świeżej mieszanki i parametry mechaniczne stwardniałego betonu.

wymiar otworów sita [mm]	piasek 0/2	żwir 2/8	żwir 8/16
	przechodzi przez sito [%]	przechodzi przez sito [%]	przechodzi przez sito [%]
13,5	-	-	100,0
16	-	100,0	95,5
8	-	88,2	4,5
4	100,0	33,6	0,9
2	97,8	1,7	0,7
1	85,1	0,6	0,6
0,5	46,4	0,4	0,4
0,25	5,3	0,3	0,3
0,125	0,2	0,2	0,2
0,063	0,1	0,1	0,1

Tabela 2 Uziarnienie kruszyw zastosowanych w mieszance betonowej

Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano naturalne kruszywa: piasek frakcji 0/2 mm, żwir 2/8 mm oraz żwir 8/16 mm. Uziarnienie poszczególnych frakcji przedstawiono w tabeli 2. W składzie mieszanki betonowej zastosowano domieszkę upłynniającą nowej generacji na bazie eterów polikarboksylowych (PCE) – Admitex HP 2,5. Użycie jej pozwoliło na znaczne obniżenie stosunku W/C i uzyskanie odpowiedniej klasy konsystencji.

Projektowanie mieszanek betonowych

Opracowano dwa warianty składu mieszanki betonowej, różniące się rodzajem zastosowanego cementu – pozostałe składniki oraz ich proporcje utrzymano bez zmian, co pozwoliło na bezpośrednie porównanie wpływu rodzaju spoiwa na właściwości betonu. Składy mieszanek zestawiono w tabeli 3.

skład testowanych betonów			
surowce	jednostka	mieszanka I	mieszanka II
cement CEM V/A (S-V) 42,5 N LH/HSR/NA	kg	350	-
cement CEM II A-LL 42,5 R-NA	kg	-	350
popiół	kg	157	
piasek 0/2	kg	721	
żwir 2/8	kg	469	
żwir 8/16	kg	484	
Domieszka Admitex HP2,5	kg	2,7	
Woda	kg	150	

Tabela 3 Skład testowanych mieszanek betonowych

Projektując receptury, uwzględniono warunki procesu prefabrykacji, takie jak krótki czas formowania, wymagania co do powierzchni elementów oraz oczekiwana wytrzymałość wczesna, umożliwiającą szybkie rozformowanie. Szczególną uwagę poświęcono optymalizacji stosunku W/C oraz dozowaniu domieszek upłynniających, w celu zapewnienia odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki, ograniczenia segregacji składników, a także uzyskania wysokiej wytrzymałości wczesnej i odpowiedniej jakości powierzchni prefabrykowanego elementu.

Procedura badań

W pierwszej kolejności oceniono właściwości świeżej mieszanki betonowej. Pomiary obejmowały temperaturę świeżej mieszanki (Rys. 2), zawartość powietrza zgodnie z PN-EN 12350-7 (Rys. 3) oraz opad stożka według PN-EN 12350-2 wraz z analizą zmian konsystencji w czasie 30 minut (Rys. 4). Parametry te mają istotne znaczenie w kontekście technologii prefabrykacji, gdzie wymagane jest zachowanie odpowiednich właściwości roboczych mieszanki w ograniczonym przedziale czasowym między jej przygotowaniem a formowaniem elementów.

Wykonano pomiary własności fizycznych, w tym wykonano oznaczenia wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3 dla okresów dojrzewania 1, 2, 7, 28, 56 i 90 dni (Rys. 5). Przewidziano również badania trwałościowe po 56 oraz 90 dniach, zgodnie z zasadami oceny czasu równoważnego zawartymi w PN-EN 206 i krajowym uzupełnieniu PN-B-06265, co pozwoli określić długoterminowy potencjał wytrzymałościowy i trwałość na betonach z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych. Badania trwałościowe obejmują odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (mrozoodporność F150 wg PN-B-06265), mrozoodporność w roztworach soli odladzających (PN-B-06265), nasiąkliwość (PN-B-06250) oraz wodoszczelność (PN-B-06250).

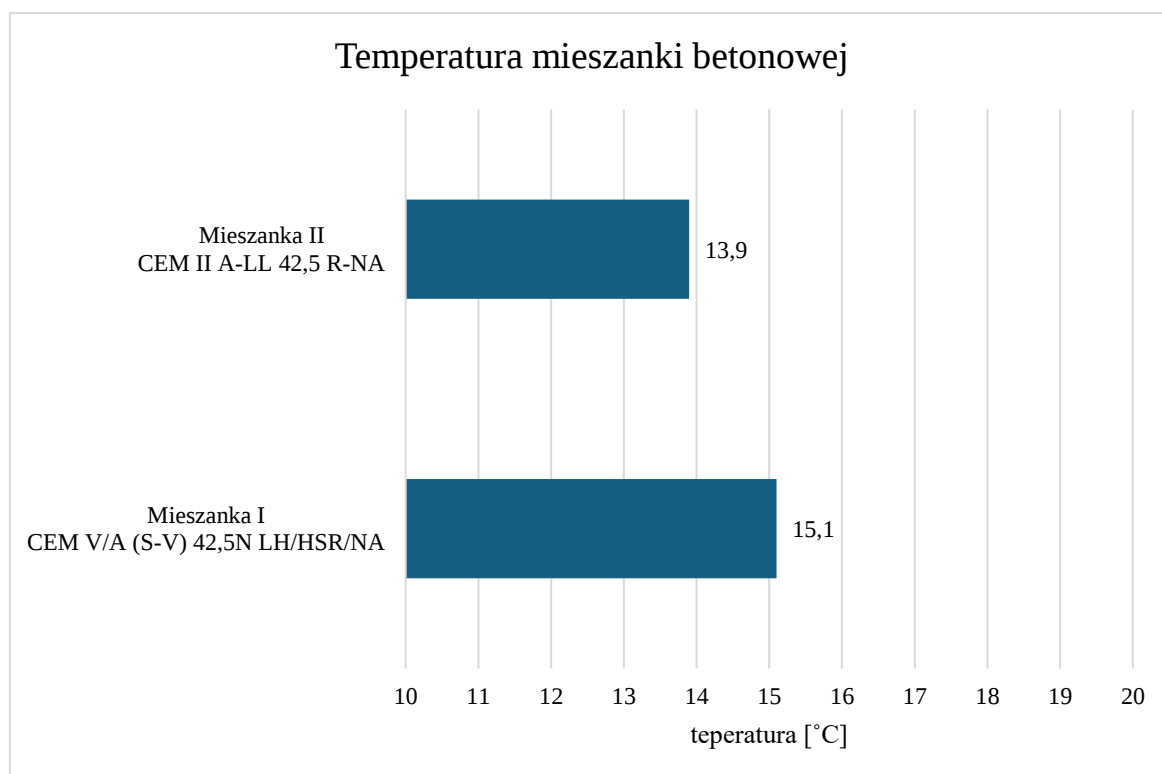
Równolegle oceniano jakość powierzchni elementów prefabrykowanych po rozformowaniu oraz czas niezbędny do osiągnięcia wytrzymałości pozwalającej na bezpieczne rozformowanie prefabrykatu, co jest kluczowym parametrem przy seryjnej produkcji elementów prefabrykowanych i wysokoestetycznych. Uzyskane wyniki będą stanowiły

podstawę do wyboru optymalnej mieszanki betonowej z zastosowaniem cementu niskoklinkierowego, dostosowanej do wymagań technologii prefabrykacji.

4. Wyniki badań i ich analiza

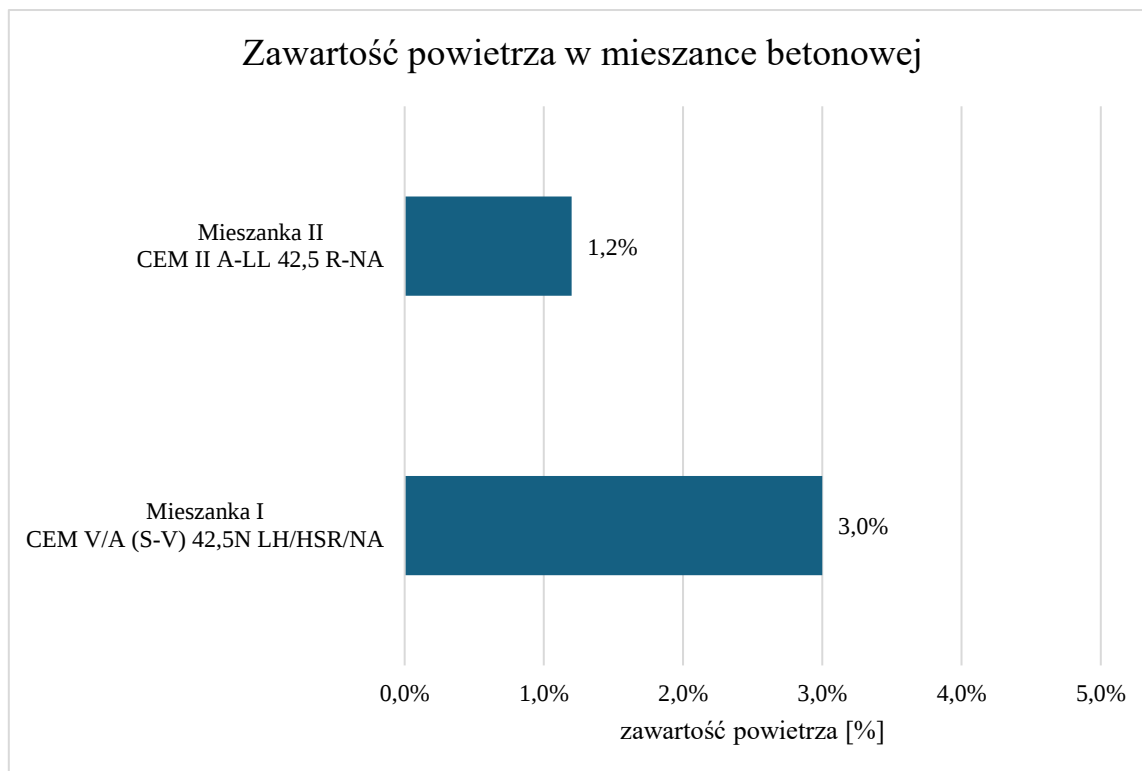
Wpływ cementów niskoklinkierowych na właściwości mieszanki betonowej

W badaniach mieszanek betonowych wykonanych z użyciem dwóch rodzajów cementu – CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA oraz CEM II A-LL 42,5 R-NA – zaobserwowano wyraźne różnice w reologii i parametrach świeżej mieszanki. Temperatura świeżej mieszanki betonowej bezpośrednio po wymieszaniu wynosiła 15,1 °C dla betonu na CEM V/A (S-V) 42,5 N oraz 13,9 °C dla betonu na CEM II A-LL 42,5 R (Rys.2). Betony były przygotowywane na węźle betoniarskim w trakcie bieżącej produkcji prefabrykatów, w warunkach wczesnowiosennych, przy niskich temperaturach otoczenia – co miało bezpośredni wpływ na temperaturę mieszanki betonowej.



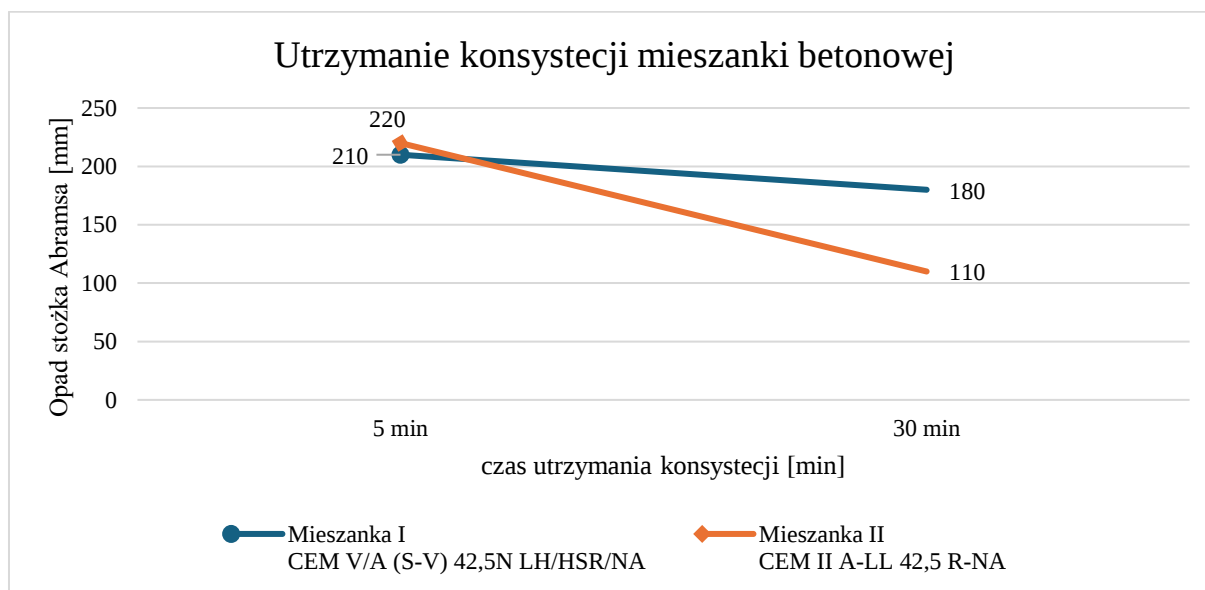
Rys. 2 Temperatura mieszanki betonowej z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

Zawartość powietrza, oznaczona zgodnie z PN-EN 12350-7, wyniosła 3,0% dla betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N oraz 1,2% w przypadku betonu na CEM II A-LL 42,5 (Rys. 3). Różnica ta może wpływać na gęstość, urabialność oraz wytrzymałości stwardniałego betonu.



Rys. 3 Zawartość powietrza w mieszance betonowej zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

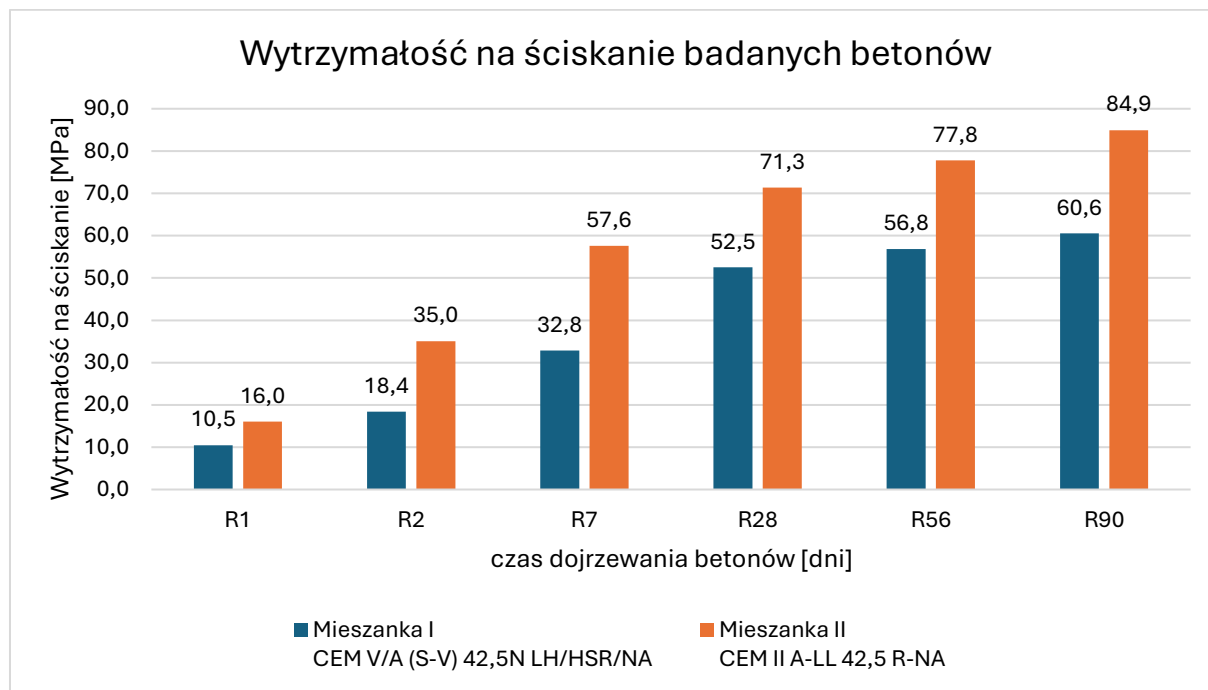
W zakresie utrzymania konsystencji, oznaczonej metodą stożka opadu wg PN-EN 12350-2, mieszanka na CEM II A-LL 42,5 R wykazała spadek opadu z 220 mm do 110 mm w ciągu 30 minut, natomiast mieszanka z CEM V/A (S-V) 42,5 N zachowała opad stożka w zakresie od 210 mm do 180 mm (Rys.4). Dane te jednoznacznie wskazują na większą stabilność reologiczną mieszanki z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N, co może być istotne w warunkach wydłużonego czasu układania lub transportu mieszanki betonowej w zakładach prefabrykacji.



Rys. 4 Utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej w zastosowaniu cementów niskoklinkierowych

Porównanie wytrzymałości betonu z cementami niskoklinkierowymi

Wytrzymałość na ściskanie badano zgodnie z PN-EN 12390-3 w sześciu terminach: po 1, 2, 7, 28, 56 oraz 90 dniach dojrzewania (Rys. 5). Beton z cementem CEM II A-LL 42,5 R wykazał wyraźnie wyższe przyrosty wytrzymałości w porównaniu do mieszanki na CEM V/A (S-V) 42,5 N. Dla cementu wapiennego wartości wyniosły odpowiednio: 16,0 MPa (R1), 35,0 MPa (R2), 57,6 MPa (R7), 71,3 MPa (R28), 77,8 MPa (R56) oraz 84,9 MPa (R90). W tym samym czasie mieszanka z cementem wieloskładnikowym osiągnęła: 10,5 MPa, 18,4 MPa, 32,8 MPa, 52,5 MPa, 56,8 MPa oraz 60,6 MPa. Największa różnica widoczna była po 2 dniach – beton z CEM II A-LL osiągnął o 90% wyższą wytrzymałość niż beton z cementem CEM V/A. Po 28 dniach różnica ta wynosiła 36%, a po 90 dniach nadal utrzymywała się na poziomie 40%.

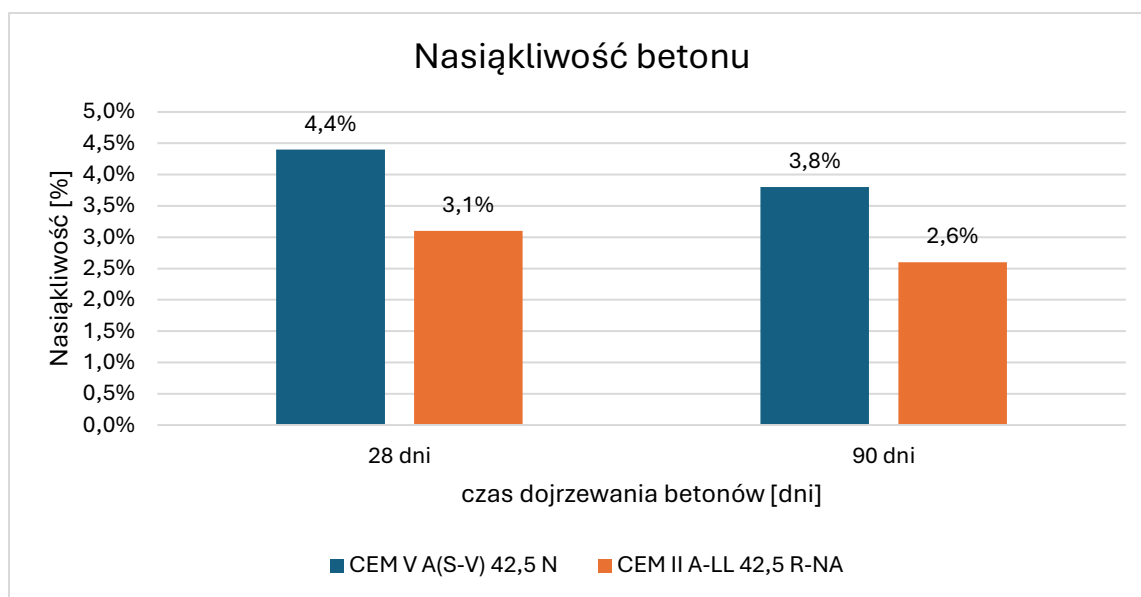


Rys. 5 Wytrzymałość na ściskanie betonów z zastosowaniem cementów niskoklinkierowych

W przypadku betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5 N uzyskano niższe, ale stabilnie rosnące wartości wytrzymałości na ściskanie.

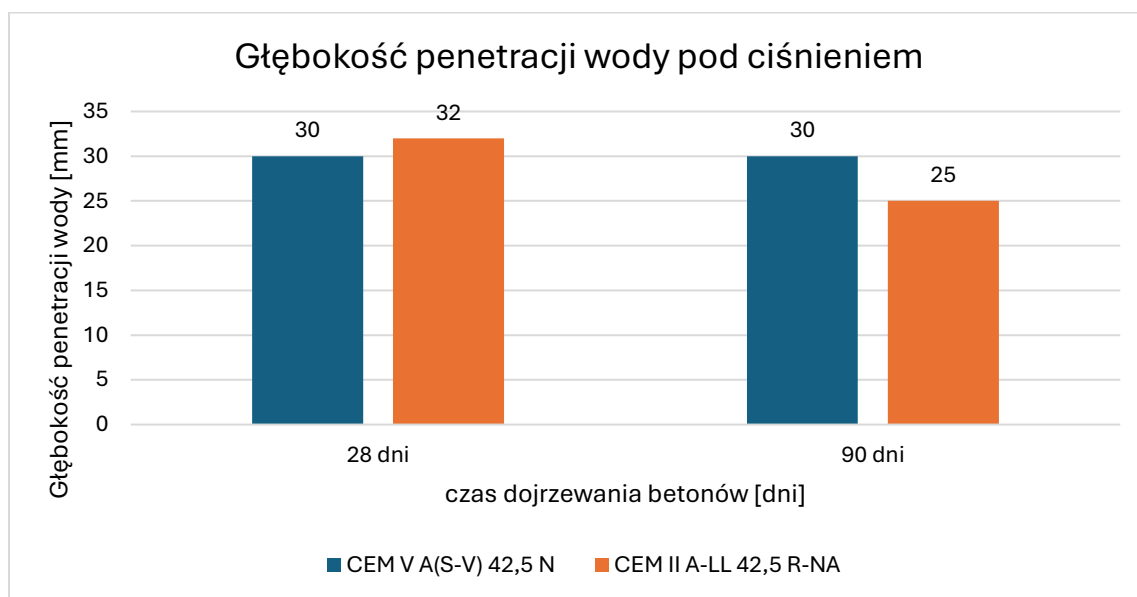
Ocena trwałości betonu prefabrykowanego

W ramach badań wykonano próbki do oceny parametrów trwałościowych, obejmujących nasiąkliwość objętościową, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie (mrozoodporność), odporność na działanie soli odladzających oraz odporność na karbonatyzację. Badania przeprowadzono zgodnie z odpowiednimi normami: PN-B-06265, PN-EN 12390-8, PN-B-06250 oraz PN-EN 12390-12.



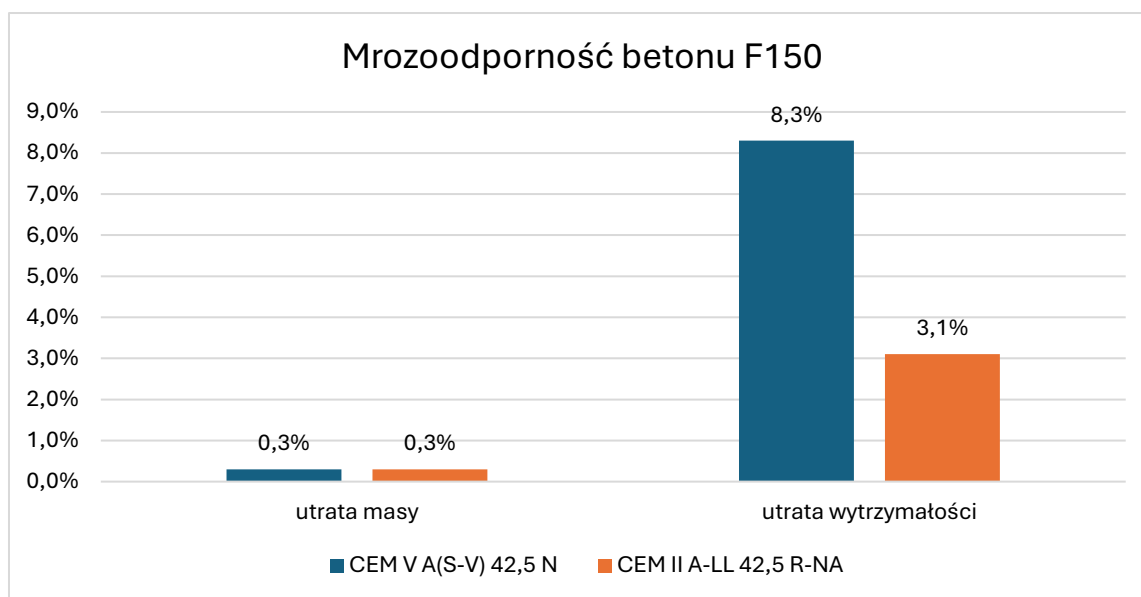
Rys. 6 Nasiąkliwość betonu

Nasiąkliwość betonu (Rys. 6) po 28 i 90 dniach wykazała różnice pomiędzy analizowanymi mieszankami. Beton wykonany na bazie cementu CEM II A-LL 42,5 R-NA charakteryzował się niższą nasiąkliwością: odpowiednio 3,1% (28 dni) oraz 2,6% (90 dni). Dla betonu z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N wartości te wyniosły 4,4% oraz 3,8%.



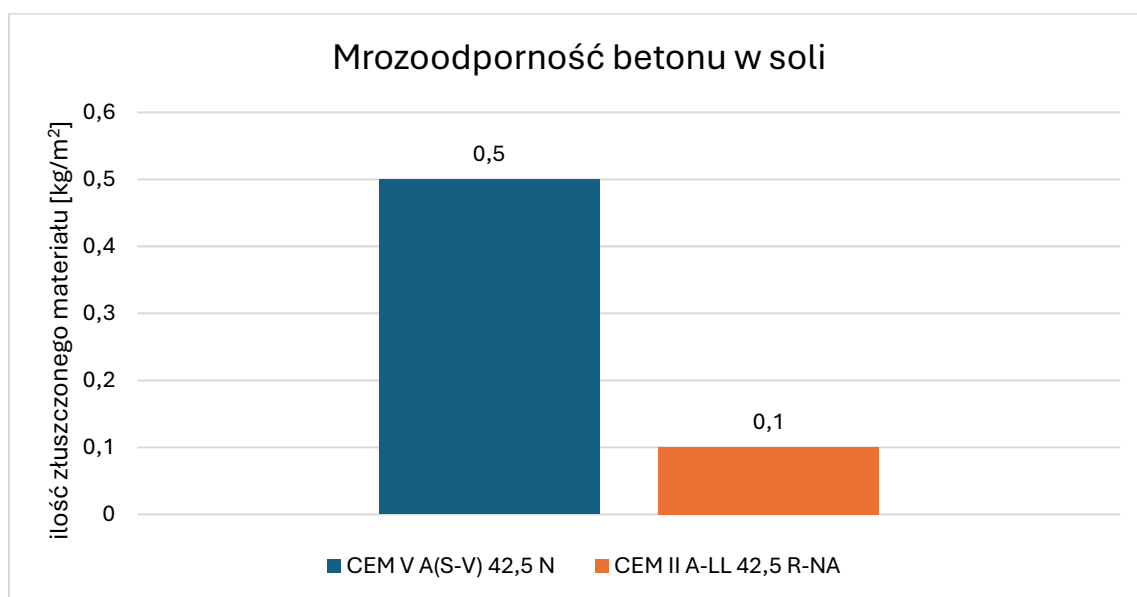
Rys. 7 Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Głębokość penetracji (Rys. 7) wody pod ciśnieniem została określona zgodnie z normą PN-EN 12390-8. Po 28 dniach dojrzewania wartości wyniosły: 32 mm dla mieszanki z CEM II A-LL oraz 30 mm dla mieszanki z CEM V/A. Po 90 dniach uzyskano wartości odpowiednio: 25 mm i 30 mm. W przypadku cementu wapiennego obserwowano wyraźny spadek głębokości penetracji o 22%.



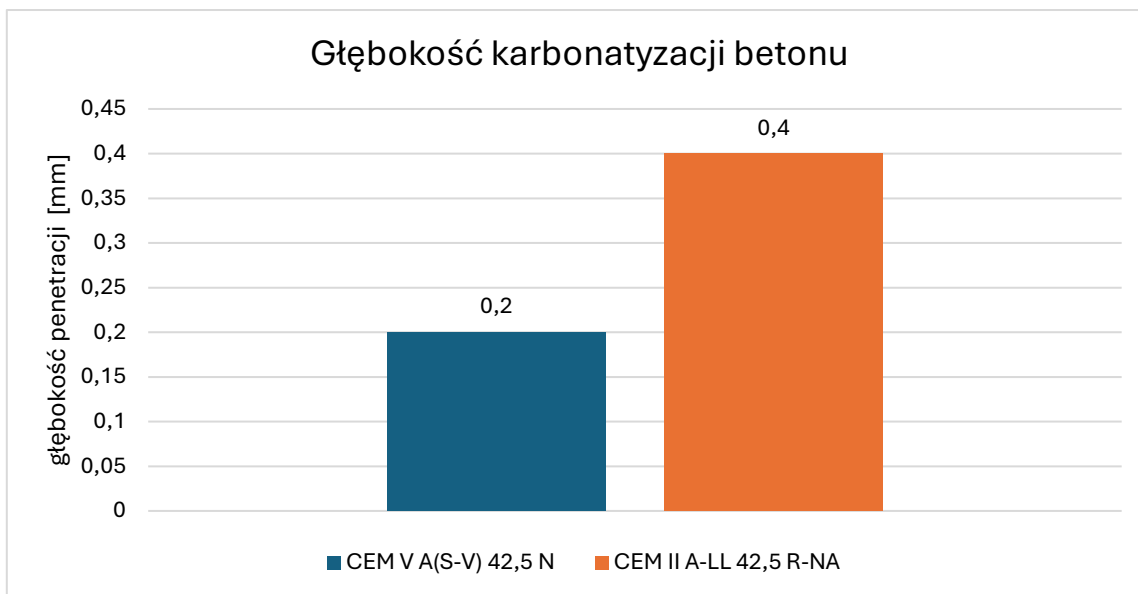
Rys. 8 Mrozoodporność betonu F150

Mrozoodporność betonu (Rys. 8) określono po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Obie mieszanki spełniły wymagania klasy F150, jednak zauważono różnice w poziomie utraty wytrzymałości na ściskanie. Dla mieszanki z CEM V/A (S-V) 42,5N odnotowano 8,3% spadku wytrzymałości, natomiast dla CEM II A-LL 42,5 R-NA wartość ta wyniosła 3,1%. Utrata masy dla obu betonów była na niskim poziomie i wyniosła 0,3%.



Rys. 9 Mrozoodporność betonu w soli

Odporność na działanie soli odladzających (Rys. 9) określono na podstawie ubytku materiału po ekspozycji na roztwór 3% NaCl. Beton na CEM V/A (S-V) 42,5N wykazał 0,5 kg/m² złuszczonego materiału, natomiast beton wapienny tylko 0,1 kg/m².



Rys. 10 Głębokość karbonatyzacji betonu

Karbonatyzację betonu (Rys. 10) badano zgodnie z normą PN-EN 12390-12. Dla mieszanki z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N uzyskano wartość 0,2 mm, natomiast dla betonu CEM II A-LL 42,5 R-NA 0,4 mm.

Optymalizacja technologii prefabrykacji

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że oba analizowane rodzaje cementu umożliwiają uzyskanie betonu spełniającego wymagania technologiczne stosowane w prefabrykacji. Beton na bazie cementu CEM II A-LL 42,5 R charakteryzował się wyraźnie szybszym przyrostem wytrzymałości wczesnej, co pozwala na potencjalne skrócenie czasu formowania i zwiększenie rotacji form w zakładzie prefabrykacji. Mieszanka ta wykazała również niższą nasiąkliwość i mniejszą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 90 dniach, co potwierdza korzystne właściwości w zakresie szczelności. Dodatkowo odnotowano mniejsze ubytki wytrzymałości na ściskanie po cyklach zamrażania i mniejsze złuszczenie powierzchni w kontakcie z solą odladzającą, co wskazuje na dobrą odporność materiału na czynniki środowiskowe. Z kolei beton z cementem CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA, ze względu na stopniowy przyrost wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania, wykazał bardzo dobrą stabilność reologiczną, co może być korzystne w przypadku produkcji elementów o dużej powierzchni lub złożonej geometrii, gdzie czas transportu lub układania mieszanki ulega wydłużeniu. Cement ten pozwalał na utrzymanie parametrów roboczych mieszanki w dłuższym czasie, co może mieć znaczenie przy prefabrykacji elementów wielkogabarytowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że przy zastosowaniu cementu CEM V/A trudniejsze może być rozformowanie elementu już w kolejnym dniu po betonowaniu, zwłaszcza w warunkach obniżonej temperatury otoczenia. Pomimo tego, cement ten wykazał wysoką odporność na karbonatyzację oraz dobrą trwałość po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Klasa HSR (High Sulfate Resistance) sprawia, że może być stosowany w produkcji prefabrykatów narażonych na agresję chemiczną, np. w kanalizacji sanitarnej, zbiornikach na gnojowicę czy elementach infrastruktury rolniczej i przemysłowej.

W świetle powyższych obserwacji należy podkreślić, że cementy różnią się istotnie pod względem zastosowania właściwości technologicznych. Dlatego ich dobór powinien być świadomy i dostosowany do specyfiki danego zakładu prefabrykacji oraz rodzaju produkowanych elementów i środowiska ich eksploatacji

5. Wnioski i rekomendacje

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę wpływu wybranych cementów niskoklinkierowych na właściwości mieszanki betonowej oraz parametry stwardniałego betonu w kontekście ich zastosowania w prefabrykacji. Zarówno cement CEM II A-LL 42,5 R-NA, jak i cement CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA umożliwiają uzyskanie mieszanek betonowych spełniających wymagania technologiczne stosowane w produkcji elementów prefabrykowanych. Z uwagi na odmienną charakterystykę ich działania, stosowanie każdego z cementów wymaga dopasowanego podejścia recepturowego i technologicznego.

Cement CEM II A-LL 42,5 R-NA pozwala na szybki przyrost wytrzymałości wczesnej, co może znacząco skrócić czas potrzebny na rozformowanie elementów oraz zwiększyć efektywność rotacji form w zakładach prefabrykacji. Mieszanki na tym cemencie charakteryzowały się również niższą nasiąkliwością i mniejszą głębokością penetracji wody, a także korzystniejszymi wynikami w zakresie mrozoodporności i odporności na działanie soli odladzających. Może to mieć szczególne znaczenie przy produkcji prefabrykatów przeznaczonych do eksploatacji w środowiskach narażonych na cykliczne zawilgocenie oraz zamarzanie.

Cement CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA, ze względu na stopniowy przyrost wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania, może nie być optymalnym wyborem w produkcji o wysokiej rotacji form, jednak wykazał bardzo dobrą stabilność właściwości reologicznych oraz korzystne wyniki w badaniu karbonatyzacji, co czyni go wartościowym rozwiązaniem przy prefabrykacji elementów wielkogabarytowych lub o złożonej geometrii. Odporności na siarczan (HSR) wskazuje na jego przydatność w środowiskach agresywnych chemicznie, w tym w infrastrukturze kanalizacyjnej i rolniczej.

Zastosowanie cementów niskoklinkierowych stanowi odpowiedź na wyzwania związane z redukcją emisji CO₂ w budownictwie i wpisuje się w strategię dekarbonizacji sektora materiałów budowlanych. Oprócz korzyści środowiskowych, cementy tego typu umożliwiają zagospodarowanie surowców wtórnych, co w określonych przypadkach może przynieść również oszczędności ekonomiczne, pod warunkiem zachowania powtarzalności parametrów i odpowiedniego nadzoru technologicznego.

W kontekście wdrażania cementów niskoklinkierowych w zakładach prefabrykacji zaleca się:

- dobór spoiwa w zależności od wymagań czasowych procesu rozformowania, typu produkcji oraz warunków eksploatacji,

- optymalizację receptur pod kątem trwałości i odporności środowiskowej,

- bieżące monitorowanie właściwości mieszanki i gotowych wyrobów, w tym odporności na działanie środowisk agresywnych.

Ze względu na różnice w parametrach fizykochemicznych, reologii i długoterminowym zachowaniu betonu, wybór odpowiedniego cementu niskoklinkierowego powinien być każdorazowo poprzedzony analizą technologicznych uwarunkowań danego zakładu prefabrykacji oraz oczekiwanych właściwości użytkowych projektowanego elementu.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że właściwie zaprojektowane mieszanki z udziałem cementów niskoklinkierowych pozwalają na uzyskanie betonów o wysokiej trwałości,

spełniających wymagania środowiskowe i eksploatacyjne stawiane prefabrykatom stosowanym w nowoczesnym budownictwie.

Literatura:

- [1] Tofiluk A., Płoszaj M. Prefabrykacja betonowa, Builder 10/2022,
- [2] Adamczewski G., Woyciechowski P., Perspektywy Prefabrykacji, Builder 10/2024,
- [3] Adamczewski G., Woyciechowski P.: Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność. Zeszyt 1. Stowarzyszenie Producentów Betonów. Warszawa 2014.
- [4] <https://www.polskicement.pl/technologie-ccs-jedyna-szansa-na-zachowanie-konkurencyjnosc-sektora-cementowego-w-polsce/>
- [5] Nowicka-Semen J., Jak trwałe jest bycie „eko”? Analiza trwałości betonów z cementami niskoemisyjnymi, Materiały z Konferencji „Dni Betonu”. 2023
- [6] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Paris Agreement, 2015.
- [7] European Commission, The European Green Deal, COM(2019) 640 final.
- [8] European Commission, Fit for 55 Package, 2021.
- [9] Informator SPC – Przemysł Cementowy w liczbach, <https://www.polskicement.pl/informatory/>
- [10] Przemysł cementowy w Polsce ogranicza emisję CO₂, Magazyn Biomasa, 2019
- [11] Miniszewski, M., Pilszyk, M., Czas na polski CCS? Szanse i wyzwania wychwytu i składowania CO₂ w polskim przemyśle, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa, 2024
- [12] Nowak Wojciech, Strojny M., Gładysz P., Ściążko M., Wychwyt, wykorzystanie i składowanie dwutlenku węgla: przegląd rozwiązań i perspektywa dla Polski, Przegląd Odlewnictwa, 2023
- [13] Gołdek Ł., Geopolimery: nadchodząca rewolucja czy ślepy zaułek?, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2024
- [14] Szafranko E., Recykling jako jeden z etapów cyklu życia obiektu budowlanego, Builder, 06/2020
- [15] Siemienuk J., Szatyłowicz E., Zmniejszenie emisji CO₂ w procesie produkcji cementu, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2018
- [16] Środa B., Cement i jego skład w erze dekarbonizacji, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2024

Dr hab. inż. Gabriela Rutkowska

Instytut Inżynierii Lądowej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

Dr inż. Filip Chyliński

Instytut Technik Budowlanych, Filtrowa 1, 00-611 Warszawa

Mgr inż. Michał Musiał

Kerakoll Polska Sp. z o.o., ul. Katowicka 128, 95-030 Rzgów

Beton zwykły z dodatkiem cementu glinowego CAC do elementów prefabrykowanych

Ordinary concrete with the addition of calcium aluminate cement (CAC) for precast elements.

Streszczenie

Cement glinowy (CAC) to specjalistyczny materiał budowlany, stosowany głównie w betonach ogniotrwałych i niektórych zastosowaniach konstrukcyjnych. Charakteryzuje się szybkim twardnieniem, wysoką wczesną wytrzymałością oraz odpornością na agresję chemiczną. Wady, takie jak wysokie koszty i ryzyko obniżenia wytrzymałości w wyniku konwersji hydratów, ograniczają jego zastosowanie. Układy hybrydowe z cementem portlandzkim (OPC) pozwalają łączyć zalety obu materiałów, co jest szczególnie korzystne w prefabrykacji. Przeprowadzone badania wskazują, że cement glinowy sprawdza się w środowiskach o niskiej temperaturze. Badania wykazują, że cement glinowy może być skutecznie używany jako dodatek do cementu portlandzkiego w niewielkich ilościach. Udział CAC na poziomie 5% korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i trwałość betonu, co sprawia, że jest szczególnie przydatny w aplikacjach wymagających szybkiego uzyskania wytrzymałości oraz odporności na działanie mrozu. Jednakże, wyższe stężenia CAC wymagają ostrożności ze względu na potencjalne obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu w dłuższym okresie użytkowania.

Słowa kluczowe: cement glinowy, wytrzymałość na ściskanie, mikrostruktura betonu

Abstract

Calcium aluminate cement (CAC) is a specialized construction material primarily used in refractory concretes and certain structural applications. It is characterized by rapid setting, high early strength, and excellent resistance to chemical attack. However, its use is limited by drawbacks such as high cost and the risk of strength reduction over time due to the conversion of hydrates. Hybrid systems combining CAC with ordinary Portland cement (OPC) can merge the benefits of both materials, which is particularly advantageous in precast concrete applications. Research has shown that CAC performs well in low-temperature environments and can be effectively used as an additive to OPC in small quantities. A CAC content of around 5% has a positive effect on the mechanical properties and durability of concrete, making it especially suitable for applications requiring rapid strength gain and resistance to freeze-thaw cycles. Nevertheless, higher concentrations of CAC should be approached with caution due to the potential for reduced long-term strength and durability.

Keywords: alumina cement, compressive strength, concrete microstructure

1. Wprowadzenie - Hydratacja i konwersja cementu glinowego

Cement glinowy (CAC) to specjalistyczny rodzaj cementu, stanowiący jedynie niewielką część globalnej produkcji cementów. W zależności od zawartości tlenku glinu w składzie wyróżnia się jego różne odmiany, takie jak CAC 40, CAC 50 oraz CAC 70-80. Odmiany o wyższej zawartości Al_2O_3 znajdują zastosowanie głównie w materiałach ogniotrwałych, natomiast te o większej zawartości tlenku żelaza mogą być wykorzystywane w konstrukcjach budowlanych. Do kluczowych zalet cementu glinowego należą szybkie twardnienie, wysoka początkowa wytrzymałość, odporność na działanie siarczanów i innych czynników chemicznych oraz właściwości ogniotrwałe. Jego szersze zastosowanie ogranicza jednak wysoka cena oraz ryzyko osłabienia wytrzymałości mechanicznej w wyniku konwersji heksagonalnych hydratów glinianów wapnia. Podczas hydratacji cementu glinowego fazy bezwodne, zwłaszcza glinian jednowapniowy, rozpuszczają się, powodując uwolnienie jonów Ca^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ i OH^- . Następnie tworzą się zarodki hydratów, a kolejnym etapem jest masowe wytrącanie produktów hydratacji [1,3]. Charakterystyczną cechą tego cementu jest zależność rodzaju powstających hydratów od temperatury [1-7]. Jak zauważył Bensted [2], w temperaturach poniżej 15°C głównym produktem hydratacji jest CAH_{10} , w zakresie $15\text{--}25^\circ\text{C}$ powstaje mieszanka C_2AH_8 i CAH_{10} , a powyżej 25°C dominują C_2AH_8 i żelowy tlenek glinu, który następnie krystalizuje w gibbsyt AH_3 . W temperaturach przekraczających 40°C , zwłaszcza 60°C , zachodzi formowanie hydrogranatu C_3AH_6 oraz uwodnionego tlenku glinu, który również przechodzi w gibbsyt. Cement glinowy wykazuje tzw. „nienormalne wiązanie” – w temperaturze powyżej 20°C czas wiązania wydłuża się do około $28\text{--}30^\circ\text{C}$, po czym gwałtownie skraca się przy dalszym wzroście temperatury [7]. Ważnym aspektem jest temperatura wewnętrzna zaczynu, ponieważ cement ten wydziela $70\text{--}90\%$ ciepła twardnienia ($460\text{--}500\text{ J/g}$) w ciągu pierwszej doby przy 20°C , co prowadzi do znacznego samonagrzewania. W dużych elementach temperatura w rdzeniu może osiągnąć $70\text{--}80^\circ\text{C}$ już po $8\text{--}10$ godzinach hydratacji [1]. Fazy hydratacyjne powstające w niższych temperaturach (CAH_{10} , C_2AH_8 , C_4AH_{13}) są nietrwałe – jedyną stabilną fazą uwodnioną w układzie $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ jest C_3AH_6 [9]. Proces konwersji, czyli przekształcania faz heksagonalnych w regularny hydrogranat, zachodzi spontanicznie i jest przyspieszany przez wzrost temperatury, wilgotności oraz pH. Skutkuje to zwiększeniem porowatości i przepuszczalności materiału, co prowadzi do osłabienia wytrzymałości i trwałości betonu [2]. W niższych temperaturach metastabilne uwodnione glinianiany wapnia mogą pozostawać w strukturze przez dłuższy czas, natomiast w wyższych stabilizują się głównie C_3AH_6 i gibbsyt AH_3 [10]. Badania wykazały, że rozpuszczalność C_3AH_6 maleje wraz ze wzrostem temperatury, podczas gdy CAH_{10} , $\text{C}_2\text{AH}_{7,5}$ i C_4AH_{19} stają się bardziej rozpuszczalne. Mechanizm konwersji opiera się na procesie „przez roztwór”, czyli rozpuszczaniu faz heksagonalnych i rekrytalizacji w postaci stabilnych produktów [1,6]. W niektórych badaniach sugeruje się, że pośrednimi etapami tej przemiany mogą być formy $\alpha\text{-C}_2\text{AH}_8$ i $\beta\text{-C}_2\text{AH}_8$, przy czym $\beta\text{-C}_2\text{AH}_8$ pełni rolę zarodków dla C_3AH_6 [9].

Hybrydowe układy, łączące cement portlandzki (OPC) z cementem glinowym (CAC), wykorzystują zalety obu tych materiałów – trwałość i stabilność chemiczną OPC oraz szybkie twardnienie CAC. Takie połączenie jest szczególnie korzystne w prefabrykacji, gdzie kluczowe znaczenie mają krótki czas uzyskania wymaganej wytrzymałości oraz elastyczność technologiczna. Zastosowanie mieszanek CAC-OPC pozwala na optymalizację procesu produkcji elementów betonowych – cement glinowy przyspiesza wiązanie, a cement

portlandzki zapewnia długoterminową trwałość. Dodatkowo ogranicza to koszty, które byłyby znacznie wyższe w przypadku wykorzystania wyłącznie CAC, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich parametrów mechanicznych i eksploatacyjnych betonu. Jednak stosowanie hybrydowych układów cementowych wiąże się z pewnymi wyzwaniem, zwłaszcza ryzykiem niższych wytrzymałości końcowych. Interakcje chemiczne pomiędzy spoiwami mogą prowadzić do wzrostu porowatości, co negatywnie wpływa na trwałość betonu. Dodatkowo, konwersja hydratów cementu glinowego może powodować osłabienie mikrostruktury oraz zwiększone ryzyko powstawania spękań w stwardniałym materiale. Problem ten wynika z różnic w gęstości poszczególnych faz hydratacyjnych – metastabilne formy, takie jak CAH_{10} ($1,72 \text{ g/cm}^3$) i C_2AH_8 ($1,95 \text{ g/cm}^3$), są mniej gęste niż stabilne fazy, takie jak C_3AH_6 ($2,52 \text{ g/cm}^3$) i AH_3 ($2,44 \text{ g/cm}^3$) [1-3]. W wyniku przemiany fazowej zmniejsza się objętość faz stałych i uwalnia się woda, co prowadzi do wzrostu porowatości i przepuszczalności betonu, obniżając jego wytrzymałość i trwałość. Taki beton jest bardziej podatny na przenikanie jonów, działanie wilgoci i agresywnych substancji chemicznych, co przyspiesza jego degradację. Zgodnie z normą PN-EN 14647 [5], aby zminimalizować skutki konwersji, należy stosować współczynnik w/c poniżej 0,40 oraz minimalną zawartość cementu na poziomie 400 kg/m^3 . Mimo to niektórzy badacze uważają, że te wytyczne są niewystarczające [4].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wykorzystanie cementu glinowego w budownictwie napotyka pewne trudności, choć równolegle prowadzone są badania wskazujące na potencjalne możliwości jego zastosowania w konstrukcjach inżynierskich. Prace [11–13] sugerują, że cement glinowy (CAC) może sprawdzić się w konstrukcjach zlokalizowanych w środowisku morskim, zwłaszcza na dużych głębokościach, gdzie temperatura wynosi od 2 do 4°C . W takich warunkach proces konwersji hydratów w CAC przebiega bardzo powoli, co może pozytywnie wpłynąć na stabilność materiału. Można więc przypuszczać, że układy oparte na CAC są bardziej stabilne niż tradycyjne systemy bazujące na cemencie portlandzkim lub spoiwach trójskładnikowych, co czyni je bardziej odpowiednimi do zastosowań w warunkach głębiny. Obecnie jednak brakuje jeszcze pełnych badań dotyczących trwałości CAC w tak specyficznych warunkach. Zauważono również, że betony na bazie cementu glinowego mogą ograniczać reakcje elektrochemiczne zachodzące na powierzchni stali, co przekłada się na mniejsze ryzyko korozji przy określonym stężeniu chlorków w otoczeniu zbrojenia. Wyniki badań [14] potwierdzają tę obserwację, wskazując jednocześnie, że efekt ten można wzmocnić, stosując domieszki zeolitowe lub łącząc CAC z cementem portlandzkim (OPC) [15,16]. Tego typu mieszanki mogą istotnie obniżyć koszty, które w przypadku zastosowania wyłącznie CAC są relatywnie wysokie. Warto zaznaczyć, że betony na bazie cementu portlandzkiego mogą być stosowane w temperaturze do 250°C . Przy wyższych temperaturach stosuje się specjalistyczne betony, opracowywane na bazie ogniotrwałych spoiw. Wyróżnia się tu betony żaroodporne – działające w podwyższonych temperaturach (powyżej 250°C) oraz ogniotrwałe, które mogą funkcjonować nawet w ekstremalnych warunkach dochodzących do 2000°C . W literaturze naukowej nie ma jednoznacznej granicy pomiędzy tymi kategoriami – spotyka się wartości progowe takie jak 1000°C , 1200°C czy nawet 1500°C [17]. Cement glinowy odgrywa istotną rolę w produkcji betonów odpornych na wysokie temperatury, co potwierdzają liczne badania prowadzone w różnych ośrodkach badawczych [18,19].

Celem badań eksperymentalnych było przeprowadzenie szczegółowej analizy układów hybrydowych cementu glinowego i portlandzkiego w zastosowaniach prefabrykacyjnych. Badania skupiono na ocenie właściwości mechanicznych, mikrostrukturalnych oraz trwałości takich układów. Na przykładzie wybranego case study przeanalizowano, jak optymalizować

proporcje i parametry technologiczne, aby minimalizować ryzyko związane z niższymi wytrzymałościami końcowymi. Nowością jest szczegółowe studium przypadku, które dostarcza praktycznych wniosków dotyczących możliwości zastosowania cementu glinowego w prefabrykacji. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które weryfikują wpływ warunków środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność, na wytrzymałość i trwałość układów CAC-OPC. Zidentyfikowano kluczowe parametry umożliwiające maksymalizację korzyści wynikających z zastosowania cementu glinowego, przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka wynikającego z jego specyficznych właściwości hydratacyjnych. W badaniu uwzględniono również mikrostrukturę betonu, co pozwala na lepsze zrozumienie procesów zachodzących w układach hybrydowych i ich wpływu na jakość końcową produktu prefabrykowanego.

2. Materiał badawczy i metodyka

Do badań eksperymentalnych zaprojektowano mieszanki betonowej betonu klasy C70/85 o konsystencji SF3 metodą empiryczno-doświadczalną, zgodnie z PN-EN 206+A2:2021-08 [20] dla klasy ekspozycji XC4 - dla standardowych konstrukcji zewnętrznych w klimacie umiarkowanym. Do mieszanek zastosowano cement portlandzki CEM I 52.5 R (Chorula, Poland – tab.1), cement glinowy Ternal White, mączka wapienna Lhoist Bukowa o gęstości $2,67\text{kg/m}^3$, kruszywo drobne frakcji 0-2mm o gęstości $2,65\text{kg/m}^3$, kruszywo grube granitowe o uziarnieniu 2-8 i 8-16mm o gęstości $2,79\text{kg/m}^3$ oraz wodę. Cement glinowy spełnia wymogi PN-EN 14647:2016-07 [21] dla cementów glinowych. Cechą charakterystyczną jest normalny czas wiązania i szybki twardnienia oraz wysoka wytrzymałość początkowa. Cement składa się z glinianów wapnia o wysokiej odporności na ścieranie, wysokiej wytrzymałości początkowej, ogniotrwałości oraz odporności na biogeniczne korozyjne działanie kwasu siarkowego (BSAC). Gęstość nasypowa wynosi około 1.5 g/cm^3 , powierzchnia właściwa (wg Blaine'a) $3900\text{ cm}^2/\text{g}$, ciężar właściwy $3.2\text{-}3.3\text{ g/cm}^3$, ogniotrwałość 1270°C . Główną fazą mineralną jest CA, fazami towarzyszącymi jest C_4AF , C_2AS oraz C_{12}A_7 . Tabela 2 przedstawia dane techniczne cementu glinowego.

Tabela 1. Właściwości fizyko-chemiczne i skład fazowy cementu CEM I 52.5% [22]

Table 1. Physico-chemical properties and phase composition of CEM I 52.5% cement [22]

SiO ₂ [%]	Zawartość siarczanów SO ₃ [%]	Strata prażenia [%]	Zawartość chlorków Cl [%]	Zawartość alkaliów Na ₂ O _{eq} [%]
20,20	3,03	3,20	0,08	0,60
CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO _w
65,21	4,34	2,37	1,51	1,76
	Początek czasu wiązania [min]	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Powierzchnia właściwa Blaine'a [cm ² /g]
	232	33,6	62,6	4554
Udział faz mineralnych CEM I [5 mass]				
	C ₃ S - 61,8	C ₂ S - 12,3	C ₃ A - 7,6	C ₄ AF - 4,1

Tabela 2. Właściwości chemiczne cementu glinowego [23]

Table 2. Chemical properties of calcium aluminate cement [23]

SiO ₂ [%]	Zawartość siarczanów SO ₃ [%]	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
6.0	0.4	38	40	15	1,5

Do badań laboratoryjnych przygotowano następujące rodzaje próbek:

- CON – bez dodatku cementu glinowego,
- ALU – z dodatkiem cementu glinowego.

Cement portlandzki wymieniany był na cement glinowy w ilości od 5 do 20% masy. Skład przygotowanych mieszanek betonowych na 1m³ przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skład poszczególnych mieszanek na 1m³

Table 3. Composition of individual mixes per 1 m³

Składniki	Ilość składników mieszanki betonowej [kg]				
	CON	ALU 5	ALU 10	ALU 15	ALU 20
Cement	408	393	370	349	324
Woda	182	185	184	183	181
Mączka wapienna	102	103	103	103	101
Kruszywo	0-2 mm	658	667	664	662
	2-8 mm	520	526	524	522
	8-16 mm	530	537	535	533
Cement glinowy	-	21	41	62	81
Superplastifikator SIKA 99pol	3.27	3.31	3.30	3.30	4.72

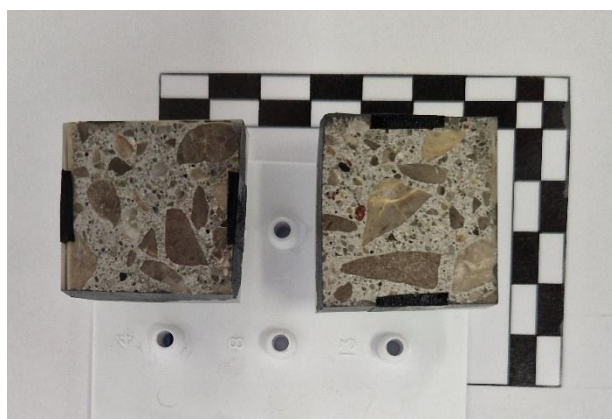
Na mieszance betonowej sprawdzono: konsystencję metodą stożka opadowego (PN-EN 12350-2:2011) [24], lepkość mieszanki metodą T₅₀₀ (PN-EN 12350-8:2019-08) [26], gęstość pozorną metodą pomiaru masy i objętości (PN-EN 12350-6:2019-08) [25]. Po 2 i 28 dniach dojrzewania próbek o wymiarach 10x10x10cm zgodnie z PN-EN 12390-3:2019-07 [27] sprawdzono wytrzymałość na ściskanie. Badania mrozoodporności wykonano na próbkach o wymiarach 10x10x10 cm metodą bezpośrednią według procedury opisanej w PN-B-06265:2022-08 [28]. Badanie nasiąkliwości przeprowadzona według PN-B-06265:2022-08 [28] na próbkach 10x10x10cm natomiast badanie głębokości penetracji wody według EN 12390-8:2019-08 [29] na próbkach 15x15x15cm. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest, a mrozoodporność w komorze firmy Toropol. Wszystkie próbki przeznaczone do badań pielęgnowano w wodzie. Badania przeprowadzono w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w Instytucie Inżynierii Lądowej. Na podstawie otrzymanych średnich wytrzymałości wynik przeliczono na próbki sześciennie o boku 15 cm (wg wzoru 1) i ustalono klasy betonu.

$$f_{c,cub\ 150} = 0.90 \cdot f_{c,cub\ 100} \quad , \quad (1)$$

gdzie:

$f_{c,cub150}$ i $f_{c,cub100}$ - wytrzymałość na ściskanie obserwowana na próbkach sześciennych o długości krawędzi odpowiednio 15 i 10 cm.

Celem przeprowadzonych analiz mikrostrukturalnych była ocena wpływu dodatku cementu glinowego na zmiany w mikrostrukturze betonu. Badania wykonano w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie (Polska). Analizie poddano dwie próbki: beton referencyjny oznaczony jako CON, w którym zastosowano wyłącznie cement portlandzki jako spoiwo, oraz próbkę ALU 20, w której 20% cementu portlandzkiego zastąpiono cementem glinowym. Z betonowych sześciątów o wymiarach 100 mm wycięto próbki o rozmiarach około $25 \times 25 \times 5$ mm. Następnie poddano je procesowi przygotowania, obejmującemu suszenie, impregnację żywicą pod zmniejszonym ciśnieniem, szlifowanie i polerowanie. Szczegółowy opis metodyki przygotowania próbek znajduje się we wcześniejszych publikacjach [30–31]. Na Fot. 1 zaprezentowano zglądy polerowane przygotowane do badań mikroskopowych.



Fot. 1. Przygotowane zglądy polerowane próbek (od lewej CON i ALU 20)

Fig. 1. Prepared polished sections of the samples (from the left: CON and ALU 20)

Badania mikroskopowe przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności mikrostrukturę analizowano za pomocą mikroskopii optycznej w świetle odbitym, wykorzystując stereoskopowy mikroskop ZEISS Stemi 508. Następnie, po napyleniu próbek złotem, wykonano dalsze obserwacje przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego ZEISS Sigma 500 VP, rejestrując obrazy za pomocą detektora BDS. Analizę składu pierwiastkowego w mikroobszarach oraz mapowanie rozkładu pierwiastków przeprowadzono z wykorzystaniem detektora EDX Oxford Instruments UltimMax 40.

3. Wyniki i dyskusja

Właściwości mieszanki betonowej

W tabeli 4 przedstawiono zbiorcze wyniki właściwości mieszanek betonowych.

Tabela 4. Właściwości mieszanki betonowej

Table 4. Properties of the concrete mix

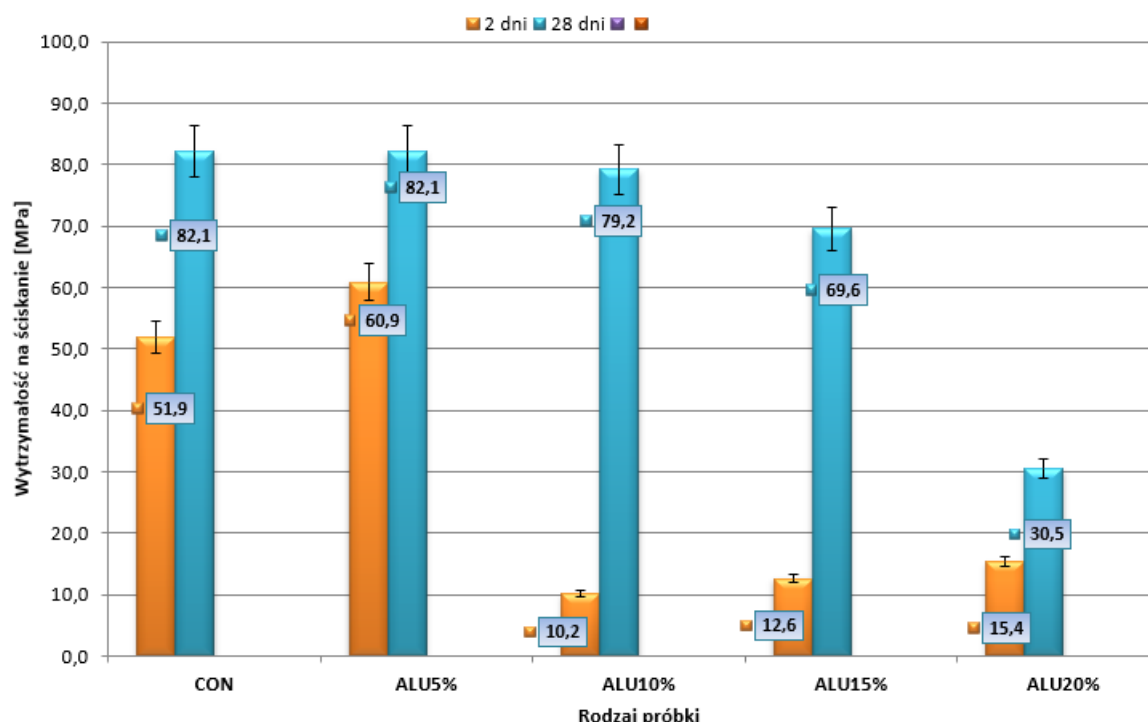
Właściwości	Rodzaj mieszanki betonowej				
	CON	ALU5	ALU10	ALU15	ALU20
Konsystencja [mm]	770	625	560	630	725
Gęstość [kg/m^3]	2404	2435	2424	2412	2389
Lepkość [s]	4.0	11.0	13.7	7.5	5.0

Mieszanka referencyjna CON charakteryzuje się największym opadem (770mm), co oznacza, że jest najbardziej płynna i łatwa do aplikacji w porównaniu do pozostałych. Wprowadzenie dodatku cementu glinowego ALU obniża konsystencję, osiągając najniższą wartość dla ALU10 (560 mm). Przy dalszym zwiększaniu zawartości ALU konsystencja wzrasta (ALU15 – 630 mm, ALU20 – 725 mm). Może to sugerować, że przy niższej zawartości ALU mieszanka staje się bardziej sztywna, natomiast większe ilości dodatku poprawiają urabialność. Gęstość mieszanki betonowej odzwierciedla jej ciężar jednostkowy, co może mieć znaczący wpływ na wytrzymałość oraz trwałość materiału. Dla mieszanki referencyjnej CON uzyskano gęstość 2404 kg/m^3 , co stanowi wartość bazową dla porównań z mieszankami zawierającymi cement glinowy. Dodanie niewielkiej ilości cementu glinowego (próbka ALU5) skutkuje wzrostem gęstości, co może być związane z lepszym zagęszczeniem mieszanki wynikającym ze zmian w mikrostrukturze. Jednak wraz ze zwiększaniem udziału cementu glinowego, obserwuje się stopniowy spadek gęstości. Najniższą wartość, równą 2389 kg/m^3 , odnotowano dla mieszanki ALU20, co sugeruje, że większy udział cementu glinowego może przyczyniać się do zmniejszenia masy mieszanki, prawdopodobnie w wyniku powstawania mikroporów w strukturze matrycy betonowej. Lepkość określa zdolność mieszanki do oporu wobec płynięcia i związana jest z konsystencją oraz zagęszczeniem. Mieszanka CON uzyskała najniższą lepkość równą 4.0 s, co oznacza jej dużą płynność. Dodatek cementu glinowego w ilości 5 i 10% zwiększa lepkość osiągając maksimum dla ALU10 (13,7 s), co sugeruje, że mieszanka staje się bardziej oporna na przepływ. Przy wyższych zawartościach dodatku lepkość zmniejsza się, co może wynikać z właściwości smarujących ALU przy wyższych dawkach. ALU15 i ALU20 wykazują lepkość zbliżoną do CON.

Właściwości dojrzałego betonu

Wytrzymałość na ściskanie

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania.



Rys. 1 Wytrzymałość na ściskanie po 2 (wczesna) i 28 dniach dojrzewania
Fig. 1. Compressive strength after 2 days (early) and 28 days of curing

Wyniki badań wykazały, że po 2 dniach dojrzewania beton referencyjny (CON) osiągnął wytrzymałość na ściskanie na poziomie 51,9 MPa. Dodanie 5% cementu glinowego (ALU5%) spowodowało wzrost wytrzymałości o około 17% w porównaniu do próbek referencyjnych, co może być związane z przyspieszonym procesem wiązania lub korzystnymi zmianami mikrostruktury we wczesnej fazie dojrzewania. W przypadku wyższych zawartości cementu glinowego zaobserwowano jednak znaczny spadek wytrzymałości. Próbkę ALU10% osiągnęły wartość 10,2 MPa, co oznacza spadek o około 80% względem betonu referencyjnego. Dla ALU15% wytrzymałość wyniosła 12,6 MPa, a dla ALU20% 15,4 MPa. Otrzymane wyniki wskazują, że przekroczenie 5% cementu glinowego prowadzi do istotnego obniżenia wczesnej wytrzymałości, prawdopodobnie z powodu zakłóceń w procesach hydratacji cementu. Po 28 dniach dojrzewania zarówno beton referencyjny (CON), jak i próbki z 5% cementu glinowego (ALU5%) osiągnęły taką samą wytrzymałość na ściskanie, wynoszącą 82,1 MPa. Oznacza to, że dodatek 5% ALU nie ma negatywnego wpływu na długoterminową wytrzymałość betonu i sugeruje prawidłowy rozwój jego mikrostruktury. Dla wyższych zawartości cementu glinowego zaobserwowano spadek wytrzymałości: ALU10% – niewielkie obniżenie o około 3,5% względem betonu referencyjnego, ALU15% – spadek o 15%, ALU20% – znaczące obniżenie o 63%, co wskazuje na negatywny wpływ dużej ilości cementu glinowego na długoterminową wytrzymałość betonu. Gęstość mieszanki betonowej jest istotnym czynnikiem wpływającym na jej wytrzymałość na ściskanie. Wyższa gęstość zwykle oznacza lepsze zagęszczenie matrycy cementowej, mniejszą ilość porów i bardziej zwartą strukturę, co przekłada się na wyższą wytrzymałość mechaniczną. Z kolei mniejsza gęstość (np. w wyniku wprowadzenia lekkich dodatków lub nieprawidłowego zagęszczenia) wiąże się z większą ilością pustek powietrznych, które mogą osłabiać beton i obniżać jego wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, że próbki betonu

referencyjnego i z najmniejszą zawartością cementu glinowego (CON i ALU5) przy odpowiednich gęstościach zaobserwowano (2404–2435 kg/m³) najwyższą wytrzymałość. Wskazuje to na dobrą korelację pomiędzy zwartą strukturą a nośnością. Próbkę betonu ALU 20 pomimo niewielkiego spadku gęstości, wytrzymałość zmniejszyła się w mniejszym stopniu, co sugeruje, że struktura nadal jest wystarczająco zwarta. Znaczący spadek gęstości (dla ALU 15 i ALU20) jest powiązany z dużym obniżeniem wytrzymałości. Wysokie dawki ALU mogą wprowadzać porowatość lub zakłócać rozwój mikrostruktury.

Nasiąkliwość i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

W tabeli 5 przedstawiono wyniki nasiąkliwości oraz głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

Tabela 5. Wyniki nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Table 5. Water absorption and depth of water penetration under pressure results

Rodzaj mieszanki	Nasiąkliwość [%]	Głębokość penetracji wody [mm]
CON	4.40	12.0
ALU5%	5.07	14.3
ALU10%	3.98	22.0
ALU15%	4.47	16.3
ALU20%	4.46	22.3

Próbki bazowe CON (bez cementu glinowego) wykazały nasiąkliwość na poziomie 4,40%, co stanowi wartość odniesienia. Dodatek 5% cementu glinowego (ALU5%) spowodował wzrost nasiąkliwości do 5,07%, co może wynikać ze zwiększonej porowatości struktury betonu i wzrostu kapilarności. Natomiast przy 10% zawartości ALU nasiąkliwość zmniejszyła się do 3,98%, co sugeruje, że cement glinowy może działać uszczelniająco na mikrostrukturę betonu. W przypadku próbek ALU15% i ALU20% wartość nasiąkliwości wyniosła odpowiednio 4,47% i 4,46%, co wskazuje, że dalsze zwiększanie ilości cementu glinowego nie wpływa istotnie na tę właściwość. Analiza wyników głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykazała, że beton referencyjny (CON) osiągnął głębokość 12 mm, co świadczy o stosunkowo zwartej strukturze mieszanki z cementem portlandzkim 42,5. W przypadku próbek z 5% cementu glinowego (ALU5%) głębokość ta wzrosła do 14,3 mm, co może być efektem zwiększonej liczby kanałów kapilarnych i wyższej nasiąkliwości. Dla ALU10% zaobserwowano gwałtowny wzrost głębokości penetracji do 22,0 mm, mimo spadku nasiąkliwości, co może wynikać z nierównomiernego rozkładu produktów hydratacji lub obecności większych porów w strukturze betonu. Przy wyższych zawartościach ALU, tj. 15% i 20%, głębokość penetracji nadal utrzymywała się na wysokim poziomie (16,3 mm i 22,3 mm), co może wskazywać na dalsze zmiany w mikrostrukturze betonu, takie jak pojawienie się większych porów lub mikropęknięć. Cement glinowy charakteryzuje się szybszą hydratacją, co prowadzi do intensywnego powstawania produktów reakcji w krótkim czasie. Jednak w dłuższej perspektywie może to skutkować bardziej porowatą strukturą, co tłumaczy zwiększoną głębokość penetracji wody. Przy niskich zawartościach cementu glinowego (5–10%) struktura betonu wydaje się bardziej kapilarna, co objawia się wzrostem nasiąkliwości i głębokości penetracji. Natomiast przy wyższych zawartościach ALU dominują większe pory, które ułatwiają wnikanie wody.

Mrozoodporność

Tabela 6 przedstawia uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek betonu referencyjnego oraz próbek po 150 cyklach mrożenia. Według normy PN-88/B-06250 próbki poddane zamrażaniu nie powinny mieć pęknięć i uszkodzeń, a ubytek ich masy nie powinien przekroczyć 5%. Dodatkowo spadek wytrzymałości na ściskanie nie powinien być większy niż 20%. [28]

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności

Table 6. Freeze resistance test results

Próbka	Średnia wytrzymałość na ściskanie		Średni spadek wytrzymałości próbek poddanych mrożeniu	Średnia masa		Średni ubytek masy
	Świadka	po 150 cyklach mrożenia		przed mrożeniem	po 150 cyklach mrożenia	
		[MPa]		[MPa]	[g]	
CON	78.05	65.98	- 15.46	2440	2435	- 0.205
ALU5	79.36	76.05	- 4.17	2467	2460	-0.284
ALU10	78.98	72.28	-8.48	2468	2459	-0.364
ALU15	77.87	70.68	- 9.23	2448	2437	-0.449
ALU20	72.83	65.53	- 10.02	2438	2426	-0.492

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie analizowane próbki spełniają wymagania dotyczące ubytku masy — żadna z nich nie przekroczyła dopuszczalnej granicy 5%. Zaobserwowane różnice były niewielkie, a największy ubytek masy odnotowano dla próbki ALU20 (-0,492%), co może świadczyć o jej większej wrażliwości na procesy degradacyjne, choć nadal mieści się to w akceptowalnym zakresie. Również pod względem wytrzymałości wszystkie próbki spełniają kryterium dopuszczalnego spadku, który nie powinien przekraczać 20%. Największy spadek wytrzymałości zanotowano dla próbki referencyjnej COM (-15,46%), co może wynikać z braku cementu glinowego, który poprawia szczelność struktury i zwiększa odporność na działanie cyklicznych zmian temperatury. Najlepsze parametry odporności na działanie mrozu wykazała mieszanka z 5% dodatkiem cementu glinowego (ALU5), charakteryzując się zarówno najmniejszym ubytkiem masy (-0,284%), jak i najniższym spadkiem wytrzymałości (-4,17%). Mieszanki z wyższymi dodatkami cementu glinowego (10% i 15%) również wykazały dobrą odporność na mróz, choć odnotowano nieco większe straty w porównaniu do próbki ALU5. Z kolei przy zawartości 20% cementu glinowego odnotowano najwyższy ubytek masy (-0,492%) oraz spadek wytrzymałości (-10,02%) wśród próbek zawierających ten dodatek — jednakże wynik ten nadal mieści się w granicach wymaganych norm mrozoodporności.

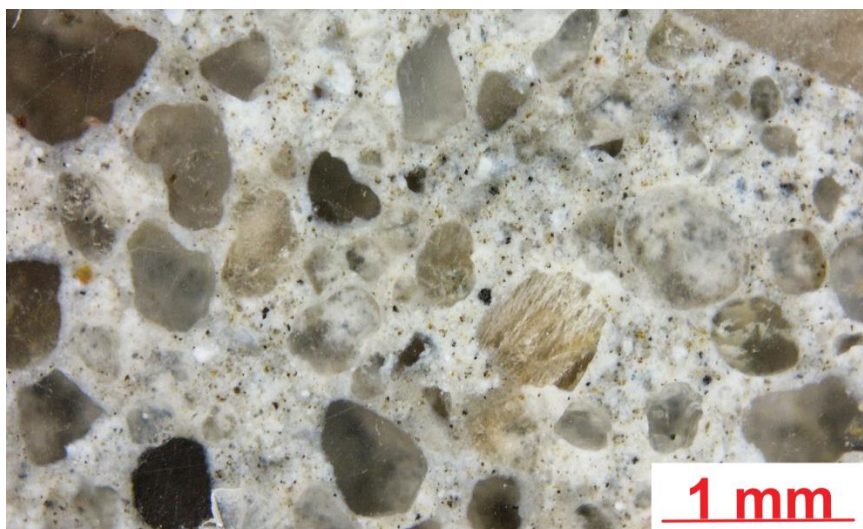
Mikrostruktura - Mikroskopia optyczna

Na Fot 2 i 3 przedstawiono przykładowe zdjęcie mikrostruktury próbki betonu CON oraz ALU 20 uzyskane z wykorzystaniem mikroskopu optycznego.



Fot. 2. Mikrostruktura próbki CON – mikroskopia optyczna

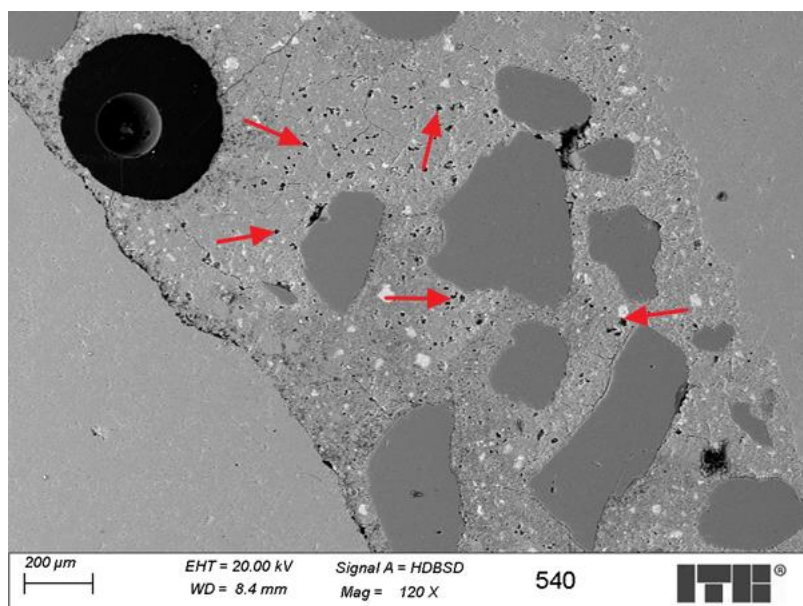
Fig. 2. Microstructure of the CON sample – optical microscopy



Fot. 3. Mikrostruktura próbki ALU 20 – mikroskopia optyczna

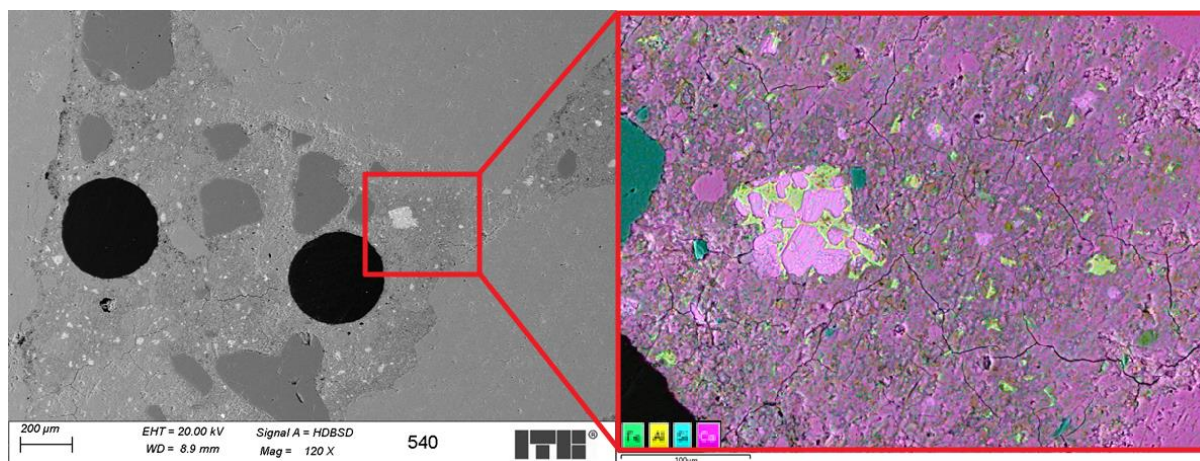
Fig. 3. Microstructure of the ALU 20 sample – optical microscopy

Analiza mikrostruktury betonów CON oraz ALU 20 z wykorzystaniem mikroskopii optycznej nie wykazała istotnych, wzajemnych różnic. Zaczyn w obu betonach był stosunkowo szczelny i zwarty. Obserwowano jedynie nieliczne makropory powietrzne. W zaczynach obserwowano drobne ciemne ziarna niewiadomego pochodzenia lub mikropory. Jaśniejsze obszary zaczynu mogą wynikać ze zwiększonej zawartości mączki wapiennej zastosowanej w betonie. Na Fot. 4 przedstawiono przykładowy obraz mikrostruktury betonu CON.



Fot. 4. Mikrostruktura betonu CON – zaznaczono mikropory
Fig. 4. Microstructure of CON concrete – micropores highlighted

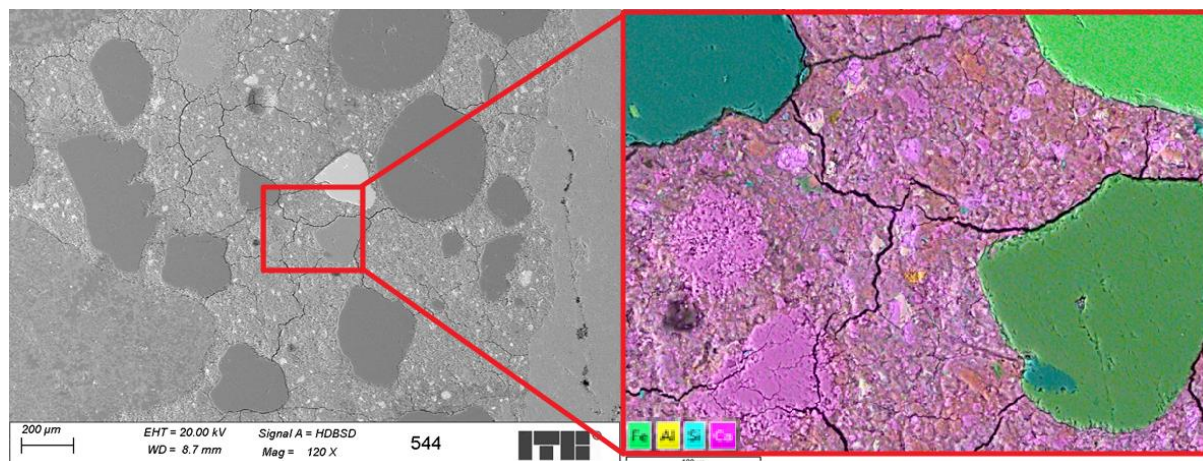
Mikrostruktura betonu CON była szczelna i zwała. Obserwowano nieliczne makropory. W niektórych obszarach zaczynu cementowego obserwowano skupiska licznych makroporów o średnicach rzędu 10 µm jak przedstawiono na Fot. 4. Fot. 5 przedstawia przykładowy obraz mikrostruktury betonu CON z mapą rozkładu stężenia głównych pierwiastków w fazie C-S-H w otoczeniu reliktu klinkieru.



Fot 5. Mikrostruktura betonu CON
Fig. 5. Microstructure of CON concrete

Analizowany beton składał się z grubego kruszywa węglanowego oraz drobnego kruszywa kwarcowego. Faza C-S-H w betonie referencyjnym (CON) charakteryzowała się zwartą i szczelną strukturą, co było efektem wysokiej zawartości cementu oraz niskiego stosunku wodno-spoiwowego. W zaczynie zaobserwowano drobne spękania, które najprawdopodobniej powstały podczas przygotowywania próbek. Obecne były również liczne ziarna reliktów klinkieru. Strefa kontaktowa między zaczynem a kruszywem była w większości dobrze związana i zwała. Jednak po jednej stronie ziaren kruszywa grubego zauważono

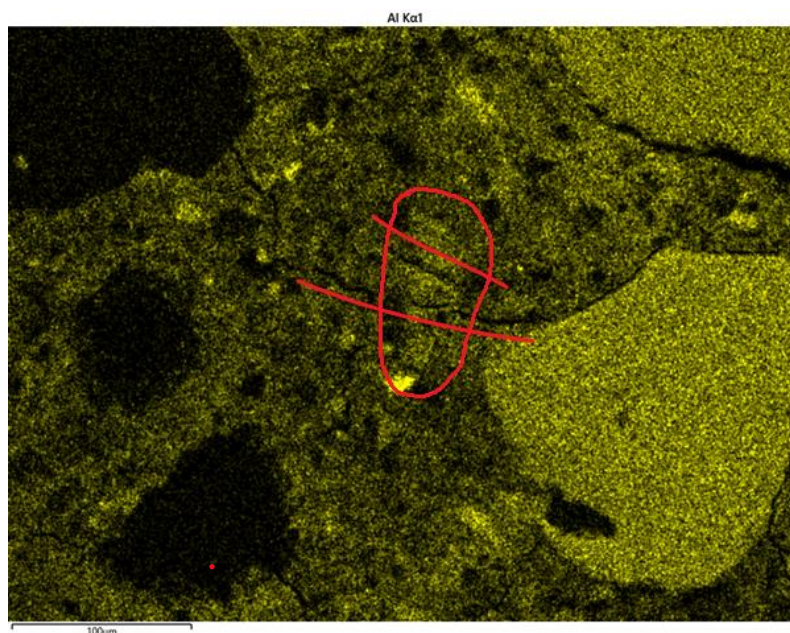
osłabienia tej strefy, co mogło wynikać z procesu formowania mieszanki betonowej. W zaczynie znajdowały się również ziarna wypełniacza wapiennego o średnicy kilkudziesięciu mikrometrów, które były równomiernie rozmieszczone i dobrze wbudowane w strukturę matrycy cementowej. Na Fot. 6 przedstawiono przykładowe zdjęcie mikrostruktury betonu ALU 20 razem z mapą rozkładu stężenia pierwiastków.



Fot 6. Mikrostruktura betonu ALU 20

Fig. 6. Microstructure of ALU 20 concrete

Kruszywa w próbce ALU20 były identyczne jak w próbce kontrolnej. W matrycy cementowej widoczne były liczne ziarna reliktyw klinkieru portlandzkiego, natomiast nie zaobserwowano bezpośrednich pozostałości klinkieru cementu glinowego. Zamiast tego wykryto obszary o podwyższonym stężeniu glinu, które mogły stanowić ślady po ziarnach klinkieru cementu glinowego. Faza C-S-H zachowała zwartą i szczelną strukturę. Porównując mikrostrukturę betonu ALU20 z próbką referencyjną CON, zauważono liczne spękania zaczynu o znacznie większej rozwarości i długości niż typowe rysy powstające podczas przygotowywania próbek. Pęknięcia te mogą być skutkiem zwiększonego skurczu matrycy cementowej, który wynika z wysokiej zawartości cementu glinowego (20%) oraz przyspieszonego procesu twardnienia. Dodatkowo, efekt ten może być potęgowany w warunkach niewystarczającej pielęgnacji próbek. Na Fot. 6 przedstawiono mapę rozkładu stężenia glinu, na której zaznaczono zarówno spękania, jak i pozostałości po ziarnach cementu glinowego.



Fot. 7. Rozkład stężenia glinu w zaczynie – zaznaczono spękania oraz pozostałość po ziarnie cementu glinowego

Fig. 7. Distribution of aluminum concentration in the paste – cracks and remnants of calcium aluminate cement grain highlighted

Analizując przebieg spękań na podstawie mapy stężenia glinu w zaczynie można zaobserwować, że spękania często przebiegają w strefach o zwiększonym stężeniu glinu, co może wskazywać na osłabienie tego obszaru zaczynu.

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają, że cement glinowy może być skutecznym dodatkiem do cementu portlandzkiego, jednak tylko w ograniczonych ilościach. Dodatek 5% korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i trwałość betonu, co czyni go szczególnie przydatnym w aplikacjach wymagających szybkiego uzyskania wytrzymałości oraz zwiększonej odporności na niskie temperatury. Z kolei wyższe zawartości cementu glinowego mogą prowadzić do obniżenia długoterminowej wytrzymałości i trwałości betonu, dlatego ich stosowanie wymaga szczególnej uwagi. Wpływ cementu glinowego na właściwości betonu nie jest liniowy. Przy niskiej zawartości (ALU5%) obserwuje się korzystny balans pomiędzy nasiąkliwością a gęstością, co przekłada się na dobrą wytrzymałość mechaniczną. Jednak dalsze zwiększanie ilości CAC powoduje defekty w mikrostrukturze betonu, prowadząc do wzrostu porowatości i zwiększonej podatności na penetrację wody. Dlatego odpowiednie proporcje cementu glinowego powinny być dostosowane do wymagań dotyczących nasiąkliwości, trwałości i wytrzymałości na ściskanie. Zastosowanie cementu glinowego przyspiesza czas wiązania zaprawy, co może być korzystne w specjalistycznych rozwiązaniach, takich jak zaprawy naprawcze. Jednak mieszanka cementu portlandzkiego i glinowego wykazuje niższą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w porównaniu do betonu wykonanego wyłącznie na bazie cementu portlandzkiego, co może stanowić istotne ograniczenie. Dlatego stosując cement glinowy w kompozytach cementowych, należy zachować ostrożność. Optymalna ilość CAC, która nie wpłynie znacząco na spadek końcowej wytrzymałości, zależy

głównie od zawartości siarczanu(VI) wapnia w cemencie portlandzkim oraz jego formy (anhydryt, hemihydrat, dwuwodny). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. Optymalnym dodatkiem cementu glinowego wydaje się być 5% (ALU5%), ponieważ zapewnia wysoką gęstość i wytrzymałość mechaniczną przy umiarkowanym wpływie na nasiąkliwość i głębokość penetracji wody. ALU10% wykazuje najniższą nasiąkliwość, ale kosztem niekorzystnego wzrostu penetracji wody, co może ograniczać jego zastosowanie w betonach narażonych na działanie wody pod ciśnieniem.

2. Wyższe zawartości ALU (15% i 20%) prowadzą do znacznego pogorszenia parametrów mechanicznych i zwiększenia głębokości penetracji wody. Wysokie dawki cementu glinowego wprowadzają defekty w mikrostrukturze, takie jak większe pory i mikrospękania, co negatywnie wpływa na właściwości użytkowe betonu.

3. Gęstość betonu jest kluczowym czynnikiem determinującym wytrzymałość i odporność na penetrację wody. Wyższa gęstość próbek referencyjnych i ALU5% świadczy o zwartym zagęszczeniu mieszanki, co ogranicza liczbę pustek powietrznych i zwiększa nośność.

5. Bibliografia

1. W. Kurdowski, (2010): Chemia cementu i betonu. Warszawa: PWN/Polski Cement.
2. J. Bensted, (2004): Naukowe aspekty cementów glinowych, Cement Wapno Beton, vol. 3, 109 – 133.
3. K.L. Scrivener, (1998): Capmas A. Calcium aluminate cements, Chapter 13. In: P.C. Hewlett (Ed.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete, John Wiley & Sons, New York.
4. A.M. Neville, (2000): Właściwości betonu, PWN.
5. EN 14647: 2007- Cement glinowo-wapniowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
6. B. Lothenbach, L. Pelletier-Chaignat, (2012): Winnefeld F. Stability in the system CaO–Al₂O₃–H₂O. Cement and Concrete Research vol. 42, 1621–1634.
7. S.H. Bushnell-Watson, J.H. Sharp, (1990): On the cause of the anomalous setting behaviour with respect to temperature of calcium aluminate cements, Cement and Concrete Research, vol. 20, 677-686.
8. M. Nowacka, B. Pacewska, (2015): Rozszerzona metoda konduktometryczna w badaniach procesu hydratacji cementu glinowego, Cement Wapno Beton, vol. 4, 225-234.
9. S. Rashid, S. (1994): Conversion of calcium aluminate cement hydrates conversion re-examined with synchrotron energy dispersive diffraction, Journal of Materials Science Letters vol. 13, 1232-1234.
10. B. Pacewska, M. Nowacka, (2014): Studies of conversion progress of calcium aluminate cement hydrates by thermal analysis method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 117, 653-660, DOI 10.1007/s10973-014-3804-5.
11. Q. Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, D. Deng, (2009): Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review Construction and Building Materials, vol. 23, 1-13 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.004>
12. T. Aye, C. T. Oguchi, Y. Takaya, (2010): Evaluation of sulfate resistance of Portland and high alumina cement mortars using hardness test Construction and Building Materials, vol 24, 1020-1026 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.016>

13. K. Takahashi, T. Akitou, M. Kobayashi, (2023): Changes in the physicochemical properties of calcium aluminate cement paste with high alumina content under deep seas Construction and Building Materials [vol. 398](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132495), 132495 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132495>
14. G.K. Glass, N.R. Buenfeld The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete Corrosion Science, [vol. 42](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9), 2000; 329-344 [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
15. K. Y. Ann, H.W. Song, (2007): Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete Corrosion Science [vol. 49](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007), 4113-4133 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007>
16. K.Y. Ann, T.-S. Kim, J.H. Kim, S.-H. Kim, (2010): The resistance of high alumina cement against corrosion of steel in concrete. Construction and Building Materials [vol. 24](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.022), 1502-1510 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.022>
17. A. Halicka, P. Ogrodnik, B. Zegardlo, (2013): Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate Construction and Building Materials [vol. 48](#), 295-305
18. B. Zegardlo, M. Szlag, P. Ogrodnik, (2016): Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone, Construction and Building Materials. [Vol. 122](#), 736–742.
19. G. Peng, Q. Ma, H. Hu, R. Gao, Q. Yao, Y. Liu, (2007): The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60 MPa grade concrete, Construction and Building Materials, [vol.21](#), 1034–1039.
20. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
21. PN-EN 14647:2016-07 Cement glinowo-wapniowy -- Skład, wymagania i kryteria zgodności
22. Dane producenta cementu portlandzkiego (data dostępu 12 maj 2024)
23. Dane producenta cementu glinowego (data dostępu 12 maj 2024)
24. PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
25. PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 6: Gęstość
26. PN-EN 12350-8:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 8: Beton samozagęszczalny -- Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka
27. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
28. PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
29. PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu - Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
30. G. Rutkowska, P. Ogrodnik, A. Powęzka, M. Żółtowski, F. Chyliński, K. Kaszewska, (2024): Effect of cenospheres on the proprieties of plain concrete exposed to elevated temperature, Clean Technologies and Environmental Policy, 1-15, DOI:10.1007/s10098-024-03034-3
31. F. Chyliński, K. Kuczynski, (2020): Ilmenite Mud Waste as an Additive for Frost Resistance in Sustainable Concrete, Materials [vol. 13](https://doi.org/10.3390/ma13132904), 2904, doi.org/10.3390/ma13132904

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



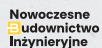
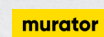
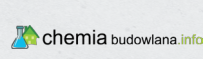
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3