



Równoważne właściwości użytkowe betonów z cementami
CEM II/B-V 32,5 R - HSR i CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R Cemex
Polska w aspekcie ich zastosowań do klas ekspozycji
akceptowanych i wymagających potwierdzenia przydatności
zgodnie z PN-B-06265:2022-08; Tablica F2

Kwiecień 2023

Strona 1 z 11

**Równoważne właściwości użytkowe betonów z cementami
CEM II/B-V 32,5 R - HSR i CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R Cemex
Polska w aspekcie ich zastosowań do klas ekspozycji
akceptowanych zgodnie z PN-B-06265:2022-08; Tablica F2**

Badania wykonano:	Raport opracował:
<ul style="list-style-type: none">• Cemex Polska Laboratorium Betonu w Rudnikach• AGH w Krakowie - Laboratorium Betonu - Katedra Technologii Materiałów Budowlanych, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki	Zespół Doradztwa Technicznego Cemex Polska Sp. o.o.

Spis treści

1. Wstęp

2. Założenia projektu

2.1. Materiały do badań

2.2. Składy betonów z porównywanymi cementami

3. Wyniki Badań

3.1. Wyniki badań betonów – wytrzymałość na ściskanie

3.2. Wyniki badań odporności betonu na penetrację wody

3.3. Wyniki badań trwałościowych - karbonatyzacja

4. Wnioski

5. Dokumenty odniesienia

1. Wstęp

W roku 2021 została wydana nowa norma: *PN-EN 197-5:2021-07 Cement - Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i Cement wieloskładnikowy CEM VI*; wprowadzająca możliwość produkcji nowych rodzajów cementu.

Możliwości aplikacyjne cementów zgodnych z nową normą zostały określone w Krajowym uzupełnieniu normy PN-EN 206+A2:2021-08, czyli normie PN-B-06265:2022-08. W Tablicy F2 tej normy podane są „**Obszary zastosowań cementów zgodnych z PN-EN 197-1 lub PN-B-19707 lub PN-EN 197-5 do produkcji betonu w poszczególnych klasach ekspozycji**”

Celem projektu, który posłużył za podstawę niniejszego raportu było porównanie właściwości betonów wykonanych z użyciem cementu CEM II/B-V 32,5 R - HSR – stosowanego od wielu lat – cement referencyjny i nowego rodzaju cementu CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R – cement badany; oraz sprawdzenie przydatności nowego cementu do innych klas ekspozycji niż akceptowalne dla niego w normie PN-B-06265:2022-08.

W Tabeli 1 umieszczone są zapisy z Tablicy F2 w/w normy co do akceptowalnego zakresu zastosowania obu rodzajów cementu.

Tabela 1. Obszary zastosowań cementów do projektu.

Klasy Ekspozycji	Brak ryzyka korozji	Korozja zbrojenia										Agresja wobec betonu									Interakcja ze strony stali sprężającej	
		Korozja spowodowana karbonatyzacją					Korozja wywołana chlorkami					Zamrażanie / rozmrażanie				Środowisko chemicznie agresywne			Agresja wywołana ścieraniem			
							niepochodzącymi z wody morskiej			pochodzącymi z wody morskiej												
X-akceptowalny zakres stosowania O-wymagane potwierdzenie przydatności	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3	
CEM II/B-V - HSR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	X	X	X	X	X	X	X
CEM II/C-M (W-LL)	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Widzimy tutaj zdecydowaną różnicę w akceptowanym zakresie zastosowań obu cementów, ponieważ CEM II/B-V - HSR można stosować wszędzie poza klasami XF3 i XF4, a CEM II/C-M (W-LL) jedynie w klasie XC0, XC1 i XC2.

Jednakże czytając dalej powyższą tabelę widzimy, że znak „O” nie oznacza braku możliwości zastosowania, a jedynie **konieczność potwierdzenia przydatności**. Zatem cementy, których stosowania nie przewidziano w danych klasach ekspozycji w Tablicy F2 mogą być zastosowane **po potwierdzeniu możliwości ich stosowania** za pomocą metod powiązanych z oceną i porównaniem właściwości użytkowych (pkt. 5.2.5.3 lub 5.2.5.4 PN-EN 206+A2:2021-08).

2. Założenia do projektu

Aby potwierdzić przydatność, a tym samym poszerzyć możliwość stosowania cementu CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R do betonów innych niż X0, XC1 i XC2 wykonano porównawcze serie betonów na obu cementach dla klas ekspozycji, gdzie może wystąpić korozja spowodowana karbonatyzacją, czyli:

- CX1, XC2, gdzie oba cementy mogą być stosowane,
- XC3 i XC4, gdzie akceptowany jest tylko CEM II/B-V.
- Dodatkowo klasa X0

Betony na każdym z cementów w klasach ekspozycji od X0 do XC4 zostały zaprojektowane i wykonane z zachowaniem podanych w Tablicy F1 normy PN-B-06265:2022-08 wartości granicznych:

- minimalna zawartość cementu
- maksymalny wskaźnik w/c

Tabela 2. Wartości graniczne dla klas ekspozycji.

Klasa ekspozycji	Rodzaj agresji	Klasa wytrzymałości	Max. w/c	Min. ilość cementu
X0	Brak ryzyka korozji	C8/10	-	-
XC1	Korozja spowodowana karbonatyzacją	C16/20	0,70	260
XC2	Korozja spowodowana karbonatyzacją	C16/20	0,65	280
XC3	Korozja spowodowana karbonatyzacją	C20/25	0,60	280
XC4	Korozja spowodowana karbonatyzacją	C25/30	0,55	300

Betony wykonane zgodnie z powyższymi założeniami będą poddane badaniom:

- Wytrzymałość na ściskanie betonów wszystkich klas ekspozycji w terminach 2, 7, 28 i 56 dni od zaformowania
- Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem – po 28 dniach - dla betonów wszystkich klas ekspozycji
- Głębokość karbonatyzacji - dla betonów XC2 i XC4

2.1. Materiały do badań

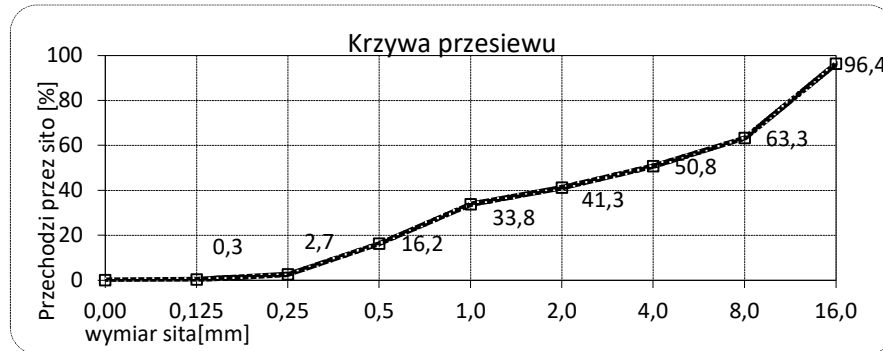
Do projektu zastosowano cementy: **CEM II/B-V 32,5 R - HSR – cement referencyjny** - produkowany w cementowni Chełm zgodnie z PN-EN 197-1:2012 i **CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R – cement badany** - produkowany w cementowni Rudniki zgodnie z PN-EN 197-5:2021-07

Tabela 3. Parametry cementów.

Właściwość		CEM II/ B-V 32,5 R - HSR	CEM II/ C-M (W-LL) 32,5 R
Wytrzymałość wczesna 2 dniowa	MPa	16,7	14,1
Wytrzymałość normowa 28 dniowa	MPa	40,2	43,5
Powierzchnia Blaine	cm ² /g	4330	5230
Wodoządnosc	%	31,0	29,2
Początek wiązania	min	220	330
Koniec wiązania	min	280	390
Zawartość SO ₃	%	2,97	2,89
Zawartość chlorków Cl ⁻	%	0,052	0,010

W projekcie użyto kruszywo naturalne (piasek 0/2, żwir 2/8, żwir 8/16), z których skomponowano mieszankę kruszywową o zawartości rozkładzie frakcji jak na Rysunku 1.

Rysunek 1. Uziarnienie mieszanki kruszywowej.



2.2. Składy betonów z porównywanymi cementami

Z cementu CEM II/B-V 32,5 R - HSR – cement referencyjny i CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R – cement, którego przydatność chcemy potwierdzić wykonano dla klas ekspozycji od X0 do XC4 5 par betonów o identycznym składzie co do proporcji kruszyw, zawartości cementu i wskaźnika w/c.

Zgodnie z krajowym uzupełnieniem normy PN-EN 206 – PN-B-06265:2022 cement CEM II/C-M (W-LL) jest akceptowany do zastosowania w klasach ekspozycji XC1 i XC2. Pozostałe klasy wymagają potwierdzenia przydatności

Tabela 4. Receptury betonów z cementem CEM II/B-V 32,5 R - HSR dla klas ekspozycji

Klasa ekspozycji	Klasa betonu	Rodzaj cementu	Cement [kg/m ³]	Woda efektywna [kg/m ³]	w/c
X0	C8/10	CEM II/B-V 32,5 R - HSR	245	182	0,74
XC1	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R - HSR	260	182	0,70
XC2	C16/20	CEM II/B-V 32,5 R - HSR	280	182	0,65
XC3	C20/25	CEM II/B-V 32,5 R - HSR	280	169	0,60
XC4	C25/30	CEM II/B-V 32,5 R - HSR	300	166	0,55

Tabela 5. Receptury betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R dla klas ekspozycji

Klasa ekspozycji	Klasa betonu	Rodzaj cementu	Cement [kg/m ³]	Woda efektywna [kg/m ³]	w/c
X0	C8/10	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	245	182	0,74
XC1	C16/20	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	260	182	0,70
XC2	C16/20	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	280	182	0,65
XC3	C20/25	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	280	169	0,60
XC4	C25/30	CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	300	166	0,55

3. Wyniki badań

Mieszanki betonowe oraz badania betonu zostały wykonane w Laboratorium Betonu CEMEX Polska w Rudnikach.

Próbki do badań zostały wykonane i pielęgnowane zgodnie z:

- PN-EN 12350-1:2019-07 Badanie mieszanki betonowej – Część 1 Pobieranie próbek,
- PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2 Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

Próbki zostały poddane badaniu wytrzymałości na ściskanie po 2, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania zgodnie z:

- PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3 Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

Próbki poddano badaniom innym niż wytrzymałość zgodnie z:

- PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem,

W ramach projektu zlecono badania trwałościowe w laboratorium zewnętrznym:

- PN-EN 12390-12:2020-06 Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację - Przyspieszona metoda karbonatyzacji,

Wyniki badań betonów wykonanych zgodnie z założeniami zestawiono w Tabelach 3 i 4.

Tabela 6. Wyniki betonów z CEM II/B-V 32,5 R – HSR dla klas ekspozycji X0, XC1, XC2, XC3, XC4.

Oznaczenie serii:	B-V3R-X0	B-V3R-XC1	B-V3R-XC2	B-V3R-XC3	B-V3R-XC4
Cement [kg]	245	260	280	280	300
w/c	0,74	0,70	0,65	0,60	0,55
Klasa ekspozycji	X0	XC1	XC2	XC3	XC4
Klasa wytrzymałości	C8/10	C16/20	C16/20	C20/25	C25/30
f_{c2} [MPa]	4,3	5,3	6,6	8,5	9,3
f_{c7} [MPa]	7,7	9,4	11,4	15,2	17,9
f_{c28} [MPa]	12,4	14,6	19,5	24,1	27,3
f_{c56} [MPa]	16,4	19,6	26,6	29,2	33,7
Głębokość pen. wody pod ciśnieniem, śr. [mm]	140	115	55	50	35,5
Głębokość pen. wody pod ciśnieniem, max. [mm]	140	130	70	50	40,0
Głębokość karbonatyzacji po 70 dniach [mm]	n/b	n/b	30,2	n/b	21,2

Tabela 7. Wyniki betonów z CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R dla klas ekspozycji X0, XC1, XC2, XC3, XC4.

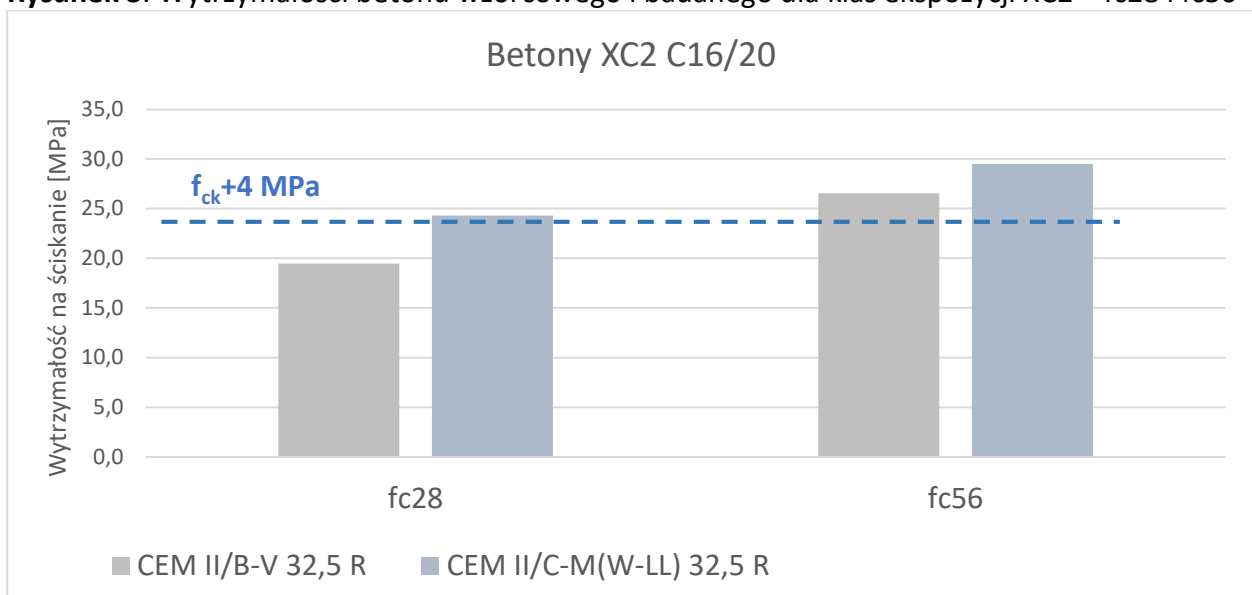
Oznaczenie serii:	C-M3R-X0	C-M3R-XC1	C-M3R-XC2	C-M3R-XC3	C-M3R-XC4
Cement [kg]	245	260	280	280	300
w/c	0,74	0,70	0,65	0,60	0,55
Klasa ekspozycji	X0	XC1	XC2	XC3	XC4
Klasa wytrzymałości	C8/10	C16/20	C16/20	C20/25	C25/30
f_{c2} [MPa]	4,4	4,8	5,1	7,1	8,9
f_{c7} [MPa]	9,6	11,4	13,6	18,3	21,3
f_{c28} [MPa]	18,4	20,0	24,3	31,1	35,2
f_{c56} [MPa]	24,1	27,1	29,5	36,8	43,0
Głębokość pen. wody pod ciśnieniem, max. [mm]	53,1	45	33,8	25	31,8
Głębokość pen. wody pod ciśnieniem, śr. [mm]	75	60	45	25	35
Głębokość karbonatyzacji po 70 dniach [mm]	n/b	n/b	22,1	n/b	15,9

W dalszej części raportu zostaną szczegółowo omówione porównywane właściwości betonów dla klasy ekspozycji XC2 – gdzie oba cementy są akceptowane do stosowania oraz klasy ekspozycji XC4 – gdzie akceptowany jest tylko cement CEM II/B-V 32,5 R - HSR.

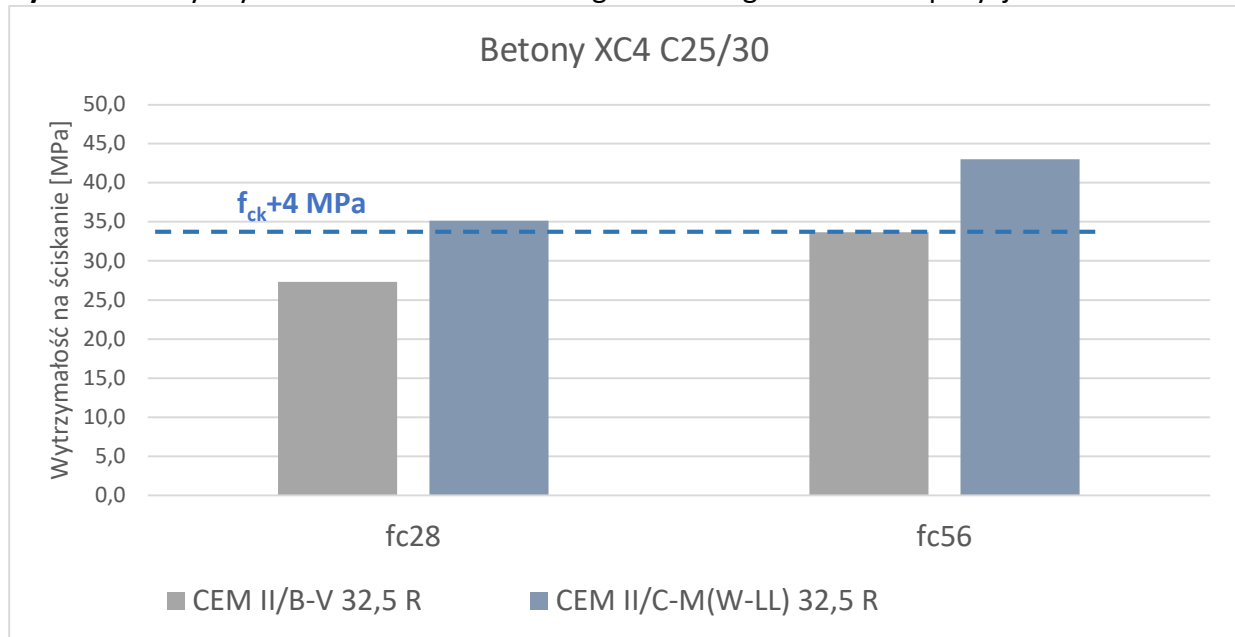
3.1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie i ocenę uzyskanej klasy betonu przeprowadzono po 28 i 56 dniach wiązania i twardnienia. Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-03:2019-07 *Badania betonu – Część 3 Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.*

Rysunek 3. Wytrzymałości betonu wzorcowego i badanego dla klas ekspozycji XC2 – f_{c28} i f_{c56}



Rysunek 4. Wytrzymałości betonu wzorcowego i badanego dla klas ekspozycji XC4 – f_{c28} i f_{c56}

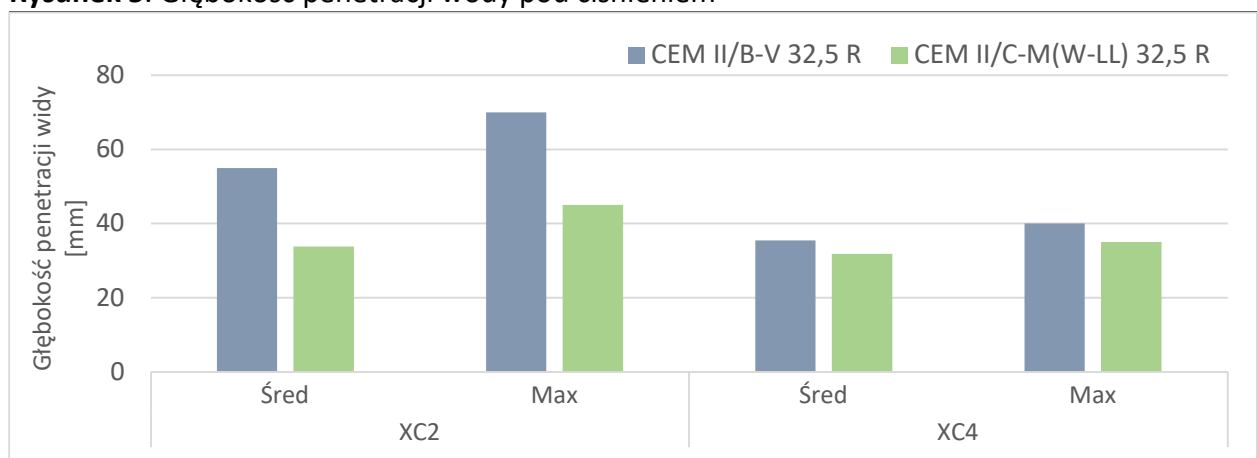


Z porównania widać, że betony z CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R osiągają wyższe wartości, a minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie wymagana dla XC2 w przypadku cementu CEM II/B-V 32,5 R – HSR została osiągnięta dopiero po 56 dniach, a dla XC4 nawet po 56 dniach zabrakło 0,3 MPa, natomiast betony z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R wymaganą wytrzymałość $f_{ck}+4$ osiągnęły już po 28 dniach.

3.2. Wyniki badań odporności betonu na penetrację wody pod ciśnieniem

Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przeprowadzono po 28 dniach wiązania i twardnienia betonu. Badanie wykonano zgodnie z normą *PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem*

Rysunek 5. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem



Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem dla betonów z CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R jest wyraźnie mniejsza dla klasy ekspozycji XC2 i nieco mniejsza dla klasy XC4

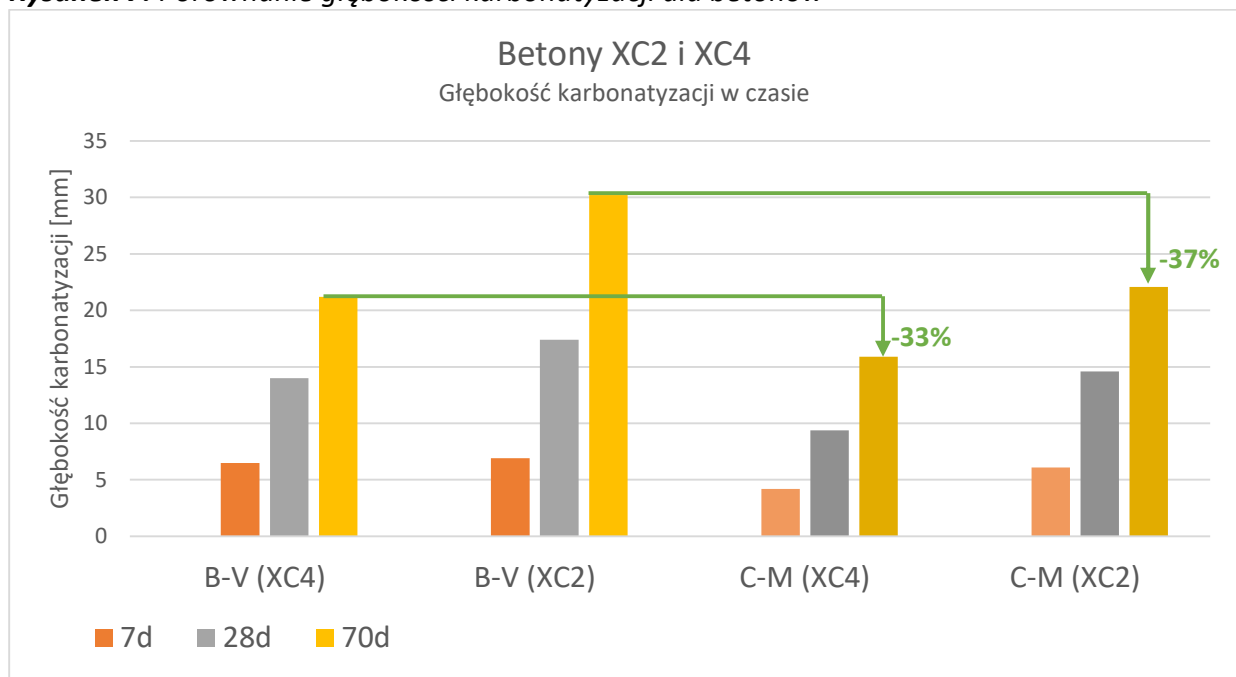
3.3. Wyniki badań trwałościowych – karbonatyzacja

Badanie głębokości karbonatyzacji przeprowadzono wg normy PN-EN 12390-12. Określono głębokość oraz szybkość postępu karbonatyzacji dla betonów XC2 i XC4 z cementem referencyjnym i badanym. Wyniki badania przedstawiono w tabeli i na wykresie.

Tabela 8. Wyniki badań karbonatyzacji.

Rodzaj cementu	Oznaczenie serii	Średnie wielkości oznaczeń głębokości karbonatyzacji d_k po czasach:, mm				Stała szybkości karbonatyzacji K_{AC} , mm/d ^{0,5}	Współczynnik determinacji, R^2
		0d	7d	28d	70d		
CEM II/B-V 32,5 R - HSR	B-V (XC4)	0	6,5	14	21,2	2,56	0,999
	B-V (XC2)	0	6,9	17,4	30,2	3,66	0,990
CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R	C-M (XC4)	0	4,2	9,4	15,9	1,92	0,996
	C-M (XC2)	0	6,1	14,6	22,1	2,69	0,996

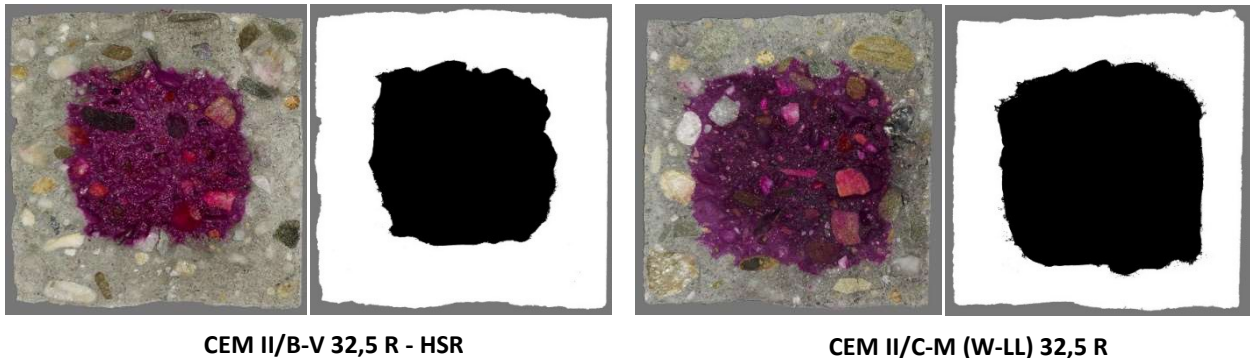
Rysunek 7. Porównanie głębokości karbonatyzacji dla betonów



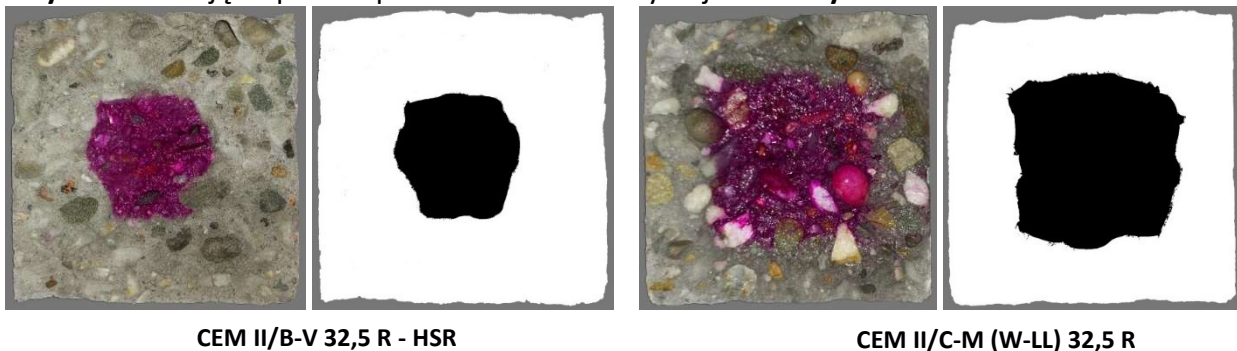
Przedstawione powyżej wyniki badania głębokości karbonatyzacji pokazują, że dla obu betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R końcowa głębokość karbonatyzacji (po 70 dniach) jest o ponad 30% mniejsza w porównaniu z cementem referencyjnym. Również tempo karbonatyzacji wyrażone przez stałą K_{AC} (Tabela 8) dla betonów z CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R jest mniejsze niż z cementem referencyjnym CEM II/B-V 32,5 R - HSR.

Na rysunkach 8 i 9 dla lepszego zobrazowania zjawiska karbonatyzacji zamieszczono dodatkowo zdjęcia próbek (kolorowe) po badaniu karbonatyzacji w 70 dniu. Obok fotografii umieszczono wygenerowany komputerowo obraz skarbonatyzowanej próbki.

Rysunek 8. Zdjęcia próbek po badaniu karbonatyzacji – **betony XC4.**



Rysunek 9. Zdjęcia próbek po badaniu karbonatyzacji – **betony XC2.**



Widać tu wyraźnie większą odporność na karbonatyzację betonów z cementem CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R, zwłaszcza dla klasy ekspozycji XC2

4. Wnioski

Porównywane **właściwości betonów z cementem badanym – CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R** uzyskane dla każdej z analizowanych klas ekspozycji (Tabela 7) **były lepsze od** właściwości betonów z **cementem referencyjnym CEM II/B-V 32,5 R - HSR** (Tabela 6).

- Minimalna klasa wytrzymałości betonu na ściskanie wymagana dla poszczególnych klas ekspozycji została uzyskana wcześniej dla betonów z cementem badanym
- Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem była mniejsza dla betonów poszczególnych klas ekspozycji z cementem badanym
- Głębokość, jak i tempo postępu karbonatyzacji były mniejsze dla betonów poszczególnych klas ekspozycji z cementem badanym

Tym samym można stwierdzić, że analizowane w niniejszym raporcie betony z cementem badanym – CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R **uzyskały co najmniej równoważne a tak naprawdę lepsze właściwości użytkowe** w porównaniu do równorzędnych betonów z cementem referencyjnym CEM II/B-V 32,5 R - HSR. Z uwagi na to nie zachodzi konieczność dalszego analizowania wyników metodą zaproponowaną w CEN /TR 16639:2014 w celu potwierdzenia równoważności.

Wyniki powyższych badań potwierdziły przydatność cementu CEM II/C-M (W-LL) 32,5 R z cementowni Rudniki do zastosowania w klasach ekspozycji od X0 do XC4 zgodnie z zapisami normy PN-B-06265:2022-08 - Tablica F2.

5. Dokumenty odniesienia

- 5.1. PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- 5.2. PN-EN 197-5:2021-07 Cement - Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i Cement wieloskładnikowy CEM VI;
- 5.3. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 5.4. PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- 5.5. CEN /TR 16639:2014 Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept
- 5.6. PN-EN 12350-1:2019-07 Badanie mieszanki betonowej – Część 1: Pobieranie próbek
- 5.7. PN-EN 12350-7:2019-08 Badanie mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- 5.8. PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- 5.9. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- 5.10. PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- 5.11. PN-EN 12390-12:2020-06 – wersja angielska Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- 5.12. Sprawozdanie z badań: *Badanie karbonatyzacji w dostarczonych próbkach stwardniałego betonu* - Katedra Technologii Materiałów Budowlanych, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo–Hutniczej w Krakowie