

Autorzy:

mgr inż. Jarosław Gaudy Cemex Polska sp. z o.o.

mgr inż. Kacper Hima Cemex Polska sp. z o.o.

inż. Paweł Głaz Cemex Polska sp. z o.o.

mgr inż. Jarosław Organa Cemex Polska sp. z o.o.

mgr inż. Zbigniew Wojtysiak Cemex Polska sp. z o.o.

Beton sprężony wykonany z użyciem cementów o obniżonej zawartości klinkieru w elementach drogowego obiektu inżynierskiego– doświadczenia badawcze.

Prestressed concrete made with cements of reduced clinker content in road infrastructure elements – research experience

Streszczenie

Poszerzający się w ostatnich latach zakres zastosowań cementów o obniżonej zawartości klinkieru w różnych segmentach budownictwa spowodował zmianę w podejściu Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad do stosowania takich cementów w betonach sprężonych. W nowelizacji Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v05 z roku 2025, do stosowania w elementach z betonu sprężonego dopuszczone zostały cementy CEM II/A, a pod pewnymi warunkami również CEM II/B jak i CEM III/A. Zgodnie z wcześniejszą wersją w/w dokumentu z roku 2022 jedynymi dopuszczonymi cementami były cementy CEM I.

Długoletnia tradycja i przyzwyczajenie do stosowania cementów CEM I do tego typu konstrukcji sprawiają, że otwartość wykonawców na zmiany w tym względzie jest niewielka. Wynika to między innymi z niewielkiej ilości doświadczeń potwierdzających osiągnięcie odpowiednich parametrów oraz zachowanie wymaganej trwałości betonu, co jest warunkiem możliwości zastosowania cementów o obniżonej emisyjności do betonów sprężonych w obiektach inżynierskich.

Formalne dopuszczenie do stosowania cementów innych niż CEM I, oraz niewielka ilość doświadczeń w tym zakresie skłoniła autorów niniejszego opracowania do podjęcia próby sprawdzenia i porównania właściwości betonów wykonanych z cementami CEM II/A, CEM II/B i CEM III/A w referencji do cementu CEM I ze szczególnym uwzględnieniem ich trwałości oraz ochrony stali sprężającej.

We wnioskach uwzględniono również porównanie emisyjności rozwiązań sprawdzanych w ramach projektu.

Abstract

The expanding scope of applications for cements with reduced clinker content in various construction segments in recent years, has led to a change in the approach of the General Directorate for National Roads and Motorways to the use of such cements in prestressed concrete. In the amendment to the Conditions for the Execution and Acceptance of Construction Works M-13.01.00 v05 from 2025, CEM II/A cements were permitted for use in prestressed concrete elements, and under certain conditions CEM II/B and CEM III/A cements were also permitted. According to the previous version of the aforementioned document from 2022, the only permitted cements were CEM I cements.

The long-standing tradition and habit of using CEM I cements for this type of construction mean, that contractors are not very open to changes in this regard. This is due, among other things, to the small amount of experience confirming the achievement of appropriate parameters and maintaining the required durability of concrete, which is a condition for the possibility of using cements with reduced emission for prestressed concrete in engineering structures.

The formal approval for the use of cements other than CEM I, and the small amount of experience in this area, prompted the authors of this study to attempt to verify and compare the properties of concretes made with CEM II/A, CEM II/B and CEM III/A cements in reference to CEM I cement, with particular emphasis on their durability and protection of prestressing steel.

The conclusions also included a comparison of the emissivity of solutions tested within the project.

1. Wstęp

Mówiąc o trwałości elementów wykonanych z betonu mamy na myśli ich odporność na działanie czynników korozyjnych, która pozwala na ich bezpieczną eksploatację w założonym okresie użytkowania.

Drogowe obiekty inżynierskie są budowlami o planowanym długim okresie użytkowania przekraczającym niejednokrotnie 50 lat.

W odniesieniu do konstrukcji żelbetowych i sprężonych w okresie eksploatacji mogą wystąpić następujące mechanizmy destrukcji:

- korozja zbrojenia w wyniku karbonatyzacji warstwy ochronnej (otuliny)
- korozja zbrojenia zainicjowana przez chlorki wnikające w beton
- zniszczenie spowodowane działaniem mrozu – cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.

Zatem zgodnie z normą PN-EN 206 [1], beton przeznaczony na tego typu konstrukcje powinien spełniać wymagania klas ekspozycji XC4, XD3 i XF4.

Z zapisów w Tablicy F.2 z normy PN-B-06265 [2] wynika, że oprócz cementu CEM I do w/w klas ekspozycji, można zastosować bez potwierdzania przydatności cementy CEM II/A-S, A-V, A-LL, A-M(S-V), (S-LL) i (V-LL); cementy CEM II/B-S, B-V, B-M(S-V) oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5.

W Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych - WWiORB M-13.01.00 v05 z roku 2025 [8] do betonów konstrukcyjnych dopuszczone są wszystkie wymienione powyżej cementy z tabeli F.2 [2]. Natomiast do betonów sprężonych bez żadnych zastrzeżeń dopuszczone są spośród wymienionych tylko cementy CEM I i CEM II/A. Co do cementów CEM II/B i CEM III/A, to zgodnie z zapisami tego dokumentu [8] za zgodą Inżyniera/ Inspektora Nadzoru możliwe jest również ich zastosowanie do betonów sprężonych pod warunkiem udokumentowania przez Wykonawcę wcześniejszych, krajowych pozytywnych zastosowań.

Dotychczasowa praktyka budowy obiektów inżynierskich z betonu sprężonego odnosząca się do ustrojów nośnych, można powiedzieć że jest oparta wyłącznie o cementy CEM I. Jednakże bazując na dostępnych wynikach badań betonów stosowanych zwłaszcza do prefabrykowanych elementów żelbetowych można stwierdzić, że jest potencjał uzyskania pozytywnych wyników również z zastosowaniem cementów CEM II/A, CEM II/B a nawet CEM III/A.

2. Część badawcza - Założenia

W projekcie przewidziano wykonanie betonów klasy C45/55 XC4/XD3/XF4 z wykorzystaniem cementów CEM II/A i CEM II/B w klasach wytrzymałości 52,5 R oraz 42,5 R a także cementów CEM III/A w klasie wytrzymałości 42,5 R i 42,5 N. Jako referencję wybrano cement CEM I 52,5 R-NA.

Wszystkie betony zaprojektowano z jednakową zawartością cementu wynoszącą 440 kg/m³. Założono klasę konsystencji S5 - najczęściej stosowaną przez producentów prefabrykowanych elementów z betonu sprężonego. Założono, że zawartość powietrza w mieszance badana metodą ciśnieniową powinna wynosić 5,5% (+/-0,5%).

Z uwagi na zróżnicowanie klas wytrzymałości cementu założono, że betony z cementami klasy 42,5 będą miały niższy stosunek w/c.

2.1 Materiały

2.1.1. Materiały - Cement

Wybrano do sprawdzenia dwa cementy typu CEM II/A.

- CEM II/A-V 52,5 R - NA
- CEM II/A-LL 42,5 R – NA

Trzy cementy typu CEM II/B

- CEM II/B-S 52,5 R
- CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA
- CEM II/B-M (S-V) 42,5 R

Dwa cementy typu CEM III/A

- CEM III/A 42,5 R-NA
- CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA

Jako cement referencyjny wybrano stosowany powszechnie w praktyce budowlanej cement CEM I 52,5 R-NA

Właściwości cementów użytych do zarobów laboratoryjnych przedstawiono w Tablicy 1

Tablica 1. Właściwości fizyko-chemiczne cementów.

Właściwości		CEM I 52,5 R- NA	CEM II/ A-V 52,5 R - NA	CEM II/ B-S 52,5 R	CEM II/ A-LL 42,5 R-NA	CEM II/ B-V 42,5 R- HSR/NA	CEM II/ B-M(S-V) 42,5 R	CEM III/ A 42,5 R- NA	CEM III/A 42,5 N- LH/HSR/ NA
Zawartość SO ₃	%	2,80	2,90	3,48	2,74	2,78	2,83	2,80	2,10
Zawartość Cl	%	0,07	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	0,09
Zawartość Na ₂ O _{eq}	%	0,54	0,68	0,87	0,5	0,85	0,82	0,84	0,94
Powierzchnia właściwa wg Blaina	cm ² /g	5110	5520	5140	5580	5090	4970	4640	4720
Wodozadržność	%	29,0	33,5	30,2	28,4	33,0	34,8	30,5	30,8
Początek wiązania	min	90	135	120	170	190	270	180	180
Koniec wiązania	min	120	165	200	220	215	300	280	230
Wytrzymałość na ściskanie	D2	MPa	33	37	32	27	26	25	22
	D28	MPa	64	66	62	57	55	56	57

2.1.2. Materiały - Domieszki

Na potrzeby niniejszej pracy, do betonów ze wszystkimi cementami zastosowano jeden zestaw domieszek, aby jedyną zmienną w recepturach był rodzaj cementu. Wybrano zestaw domieszek produkcji CEMEX Admixtures składający się z superplastyfikatora ISOCASST 9200 na bazie modyfikowanych eterów polikarboksylowych oraz domieszki napowietrzającej ISOSPHERE 60 opartej na bazie syntetycznych surfaktantów.

2.1.3. Materiały - Kruszywo

Do każdej mieszanki z użyciem różnych rodzajów cementów zastosowano stały układ stosu okruczowego kruszywa składający się z:

- Piasek naturalny 0-2 – 39,6%
- Grys granitowy 2-8 – 21,0%
- Grys granitowy 8-16 – 39,3%



Rysunek 1. Krzywa przesiewu mieszanki kruszyw.

2.2. Receptury i wymagania dla mieszanki betonowej i stwardniałego betonu

Zestaw receptur zaprojektowanych jak dla klasy C45/55 XC4/XD3/XF4 przedstawiono w Tablicy 2

Tablica 2. Receptury mieszanek zaprojektowanych do wykonania w laboratorium.

Kod receptury	Rodzaj cementu	Ilość cementu [kg/m ³]	Woda całk. [kg/m ³]	W/C	Domieszki [% m.c.]	
					ISOCAST 9200	ISOSPHERE 60
CI5R	CEM I 52,5 R-NA	440	165	0,348	Dobierane	Dobierane
II/AV5R	CEM II/A-V 52,5 R-NA	440	165	0,375	Dobierane	Dobierane
II/BS5R	CEM II/B-S 52,5 R	440	165	0,375	Dobierane	Dobierane
II/ALL4R	CEM II/A-LL 42,5 R-NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
II/BV4R	CEM II/B-V 42,5 R - HSR/NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
II/BM4R	CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
III/A4R	CEM III/A 42,5 R-NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane
III/A4N	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	440	153	0,348	Dobierane	Dobierane

Mieszanki betonowe i betony wykonane według w/w receptur mają spełnić następujące wymagania:

- Mieszanka betonowa
 - konsystencja – opad stożka 220-240mm
 - zawartość powietrza – metodą ciśnieniową 5,5% (+/-0,5)
 Poziom dozowania domieszek ustalany dla każdej receptury do uzyskania wymaganych parametrów mieszanki
- Stwardniały beton
 - Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm1} \geq 0,7f_{ck}$, $f_{cm28} \geq f_{ck}+4\text{MPa}$.
 - Penetracja wody pod ciśnieniem – max 40mm – zgodnie z [8]
 - Mrozoodporność F200 - Jako sprawdzenie dodatkowe wykonano pomiar charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie zgodnie z normą PN-EN 480-11.

Dla oceny i porównania właściwości trwałościowych poszczególnych betonów przewidziano badania:

- odporności na karbonatyzację – zgodnie z normą PN-EN 12390-12.

- odporności na korozję chlorkową – zgodnie z normą PN-EN 12390-18.

3. Część badawcza – wyniki

3.1. Właściwości mieszanek betonowych

Właściwości mieszanek betonowych z poszczególnymi cementami przedstawiono w Tablicy 3.

Oprócz konsystencji mierzonej wartością opadu stożka oraz zawartości powietrza metodą ciśnieniową zbadano również wartość średnicy swobodnego rozplywu stożka. Do uzyskania założonych parametrów zastosowano odpowiednie dozy domieszek.

Tablica 3 Parametry mieszanek betonowych i dozy domieszek

Kod receptury	Konsystencja opad stożka [mm]	Konsystencja swobodny rozplyw stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Domieszki [% m.c.]	
				ISOCAST 9200	ISOSPHERE 60
CI5R	220	370	5,6	0,45	0,10
II/AV5R	240	400	6,0	0,55	0,30
II/BS5R	230	420	5,6	0,78	0,35
II/ALL4R	220	360	5,9	0,61	0,44
II/BV4R	220	370	6,0	1,20	0,85
II/BM4R	220	320	5,4	0,65	0,63
III/A4R	240	570	5,8	0,98	0,38
III/A4N	230	400	5,9	0,49	0,34

Wszystkie mieszanki uzyskały założoną ciekłość – konsystencja mierzona opadem stożka na poziomie S5 (220-240mm). Zawartość powietrza sprawdzona metoda ciśnieniową dla wszystkich mieszanek mieści się w założonym zakresie 5,5% (+/- 0,5%)

3.2. Właściwości fizyko-mechaniczne stwardniałego betonu

Tablica 4 zawiera zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie po 1, 2 i 28 dniach dojrzewania w warunkach normowych zgodnie z PN-EN 12390-3. W Tablicy 4 umieszczono również wyniki badania penetracji wody pod ciśnieniem wg normy PN-EN 12390-8.

Tablica 4 Wytrzymałości na ściskanie i penetracja wody pod ciśnieniem

Kod receptury	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Maksymalna penetracja wody [mm]
	f_{cm1}	f_{cm2}	f_{cm28}	
CI5R	40,6	45,1	62,4	20
II/AV5R	38,6	49,7	74,1	10
II/BS5R	35,7	43,4	59,5	10
II/ALL4R	40,1	49,9	71,1	15
II/BV4R	32,6	43,4	79,2	15
II/BM4R	31,4	40,0	75,8	20
III/A4R	31,4	42,5	75,4	10
III/A4N	18,6	25,5	66,8	15

Wytrzymałość wczesna betonów f_{cm1} jak i f_{cm2} koreluje z wytrzymałością wczesną cementów.

Zakładając, że do sprężenia betonu potrzebna jest wytrzymałość na poziomie $0,7f_{ck}$ czyli 38,5 MPa, to odpowiednie wytrzymałości po 1 dniu zostały uzyskane tylko przez 3 betony – CI5R, II/AV5R i II/ALL4R. Po 2 dniach - przez kolejne 4 betony II/BS5R, II/BV4R, II/BM4R i III/A4R, natomiast beton III/A4N zgodnie z przewidywaniami musi dojrzewać dłużej niż 2 dni dla uzyskania wytrzymałości odpowiedniej do sprężenia.

Wszystkie betony uzyskały wytrzymałość f_{cm28} spełniającą warunki dla klasy betonu C45/55

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wskazuje na bardzo dobrą szczelność wszystkich betonów. Wszystkie wartości sytuują się znacznie poniżej 40 mm, co jest wartością graniczną dla betonów przeznaczonych dla tej klasy betonów [8].

W Tablicy 5 umieszczono wyniki odporności na zamrażanie i rozmrażanie uzupełnione o charakterystykę rozkładu porów w stwardniałym betonie.

Tablica 5. Wyniki badania struktury napowietrzenia i mrozoodporności F200

Kod receptury	Struktura napowietrzenia betonów według PN-EN 480-11		Mrozoodporność F200 według PN-B 06265	
	A300 [%]	L [mm]	Spadek wytrzymałości Δf_{cm}	Ubytek masy Δm
CI5R	2,09	0,202	< 20%	< 5%
II/AV5R	2,44	0,170		
II/BS5R	2,44	0,198		
II/ALL4R	2,54	0,159		
II/BV4R	2,90	0,152		
II/BM4R	2,39	0,206		
III/A4R	2,67	0,181		
III/A4N	3,16	0,179		

Zawartość mikroporów A300um dla wszystkich betonów sytuuje się powyżej 2%, natomiast maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów L dla 2 betonów nieco przekracza wartości 0,200 mm, dla pozostałych zaś jest poniżej 0,200 mm. Wyniki te wskazują na właściwą charakterystykę porów powietrznych, co zostało potwierdzone przez pozytywne wyniki badania mrozoodporności F200 dla wszystkich badanych betonów.

Mając na uwadze powyższe wyniki można stwierdzić, że właściwości fizyko-mechaniczne betonów ze wszystkimi cementami spełniają wymagania dla betonów konstrukcyjnych.

Jedynie wytrzymałości wczesne potrzebne do sprężenia betonu są osiągane w różnym tempie - stosownie do dynamiki narastania wytrzymałości cementów.

3.3. Odporność na korozję zbrojenia wywołaną karbonatyzacją

Zgodnie z zapisami normy PN-EN 12390-12 – punkt 7 UWAGA 1: „Przy normalnych składach betonu głębokość karbonatyzacji po 70 dniach szacunkowo powinna wynosić ≥ 4 mm. Wartość niższa niż ta wskazuje na **beton o wysokiej odporności na karbonatyzację**, ale w przypadku bardzo małych głębokości karbonatyzacji szacunki dokładności podane w rozdziale 10 nie mają zastosowania do określenia szybkości karbonatyzacji [6].

Przedstawione w Tablicy 6 wyniki głębokości karbonatyzacji wskazują, że betony z cementami CEM II/A mieszczą się w zakresie poniżej 4mm podobnie jak beton z cementem CEM I. Również betony z cementami CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 52,5 R wykazują wysoką odporność na karbonatyzację

Tablica 6 Wyniki badań głębokości karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12.

Kod receptury	Średnia wartość pomiarów głębokości karbonatyzacji dk [mm]				Stała szybkości karbonatyzacji K_{AC} [mm/√dni]	Stała „a” [mm]	Współczynnik determinacji R²
	po czasie t [dni]						
	0	7	28	70			
CI5R	0	0	0,3	0,6	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/AV5R	0	0,2	0,6	2,3	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/BS5R	0	0,4	0,6	1,4	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/ALL4R	0	0	0,3	0,6	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
II/BV4R	0	1,2	4,8	6,1	1,21	0,42	0,95
II/BM4R	0	0,2	0,7	1,9	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm		
III/A4R	0	0,4	2,3	4,3	1,77	0,98	0,95
III/A4N	0	0,8	3,8	5,0	1,46	0,56	0,95

Betony z cementem CEM II/B-V42,5 R-HSR/NA i cementami hutniczymi CEM III/A 42,5 R-NA, CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA po 70 dniach wykazują głębokość karbonatyzacji od 4,3 do 6,1mm, czyli niewiele, ale przekraczającą poziom 4mm, zatem nie można ich zaliczyć do tej samej grupy odporności na karbonatyzację co pozostałe 5 betonów.

3.4. Odporność na korozję zbrojenia zainicjowana przez chlorki

Metoda pomiaru współczynnika migracji jonów chlorkowych zawarta w normie PN-EN 12390-18 uważana jest za porównywalną z metodą NT Build 492 stosowaną od wielu lat.

W literaturze [9] powoływane są 4 poziomy odporności na wnikanie chlorków uzależnione od wartości współczynnika D_{nss} – podane w Tablicy 7.

Tablica 7. Ocena odporności betonu na wnikanie chlorków [9]

Współczynnik migracji jonów chlorkowych D_{nss}	Odporność na wnikanie chlorków
$< 2 \times 10^{-12} m^2/s$	Bardzo dobra
$2 - 8 \times 10^{-12} m^2/s$	Dobra
$8 - 16 \times 10^{-12} m^2/s$	Dopuszczalna
$> 16 \times 10^{-12} m^2/s$	Niedopuszczalna

Wyniki pomiaru współczynnika migracji chlorków uzyskane dla badanych betonów przedstawiono w Tablicy 8. Uzyskane wartości wskazują, że betony z cementami CEM III oraz z cementami CEM II/B mieszczą się w zakresie poniżej $2 \times 10^{-12} m^2/s$ – wykazują zatem bardzo

dobrą odporność na migracje chlorków. Betony z użytymi do projektu cementami CEM II/A oraz CEM I odznaczają się dobrą odpornością na wnikanie chlorków

Tablica 8 – Wyniki badania odporności betonów na migracje chlorków wg PN-EN 12390-18

Kod receptury	Średnia wartość penetracji	Współczynnik migracji chlorków	Ocena odporności na wnikanie chlorków
	X_d [mm]	D_{nssm} [$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]	[-]
CI5R	9,5	4,035	Dobra
II/AV5R	10,6	2,255	Dobra
II/BS5R	6,5	1,323	Bardzo dobra
II/ALL4R	9,2	3,896	Dobra
II/BV4R	7,5	1,548	Bardzo dobra
II/BM4R	7,6	1,581	Bardzo dobra
III/A4R	12,6	1,358	Bardzo dobra
III/A4N	5,3	0,529	Bardzo dobra

4. Obliczenie śladu węglowego dla sprawdzanych rozwiązań

Ślad węglowy stał się jednym z parametrów uwzględnianych przez odbiorców w ocenie składanych ofert i zaczyna mieć wpływ na wybór konkretnego dostawcy. Biorąc pod uwagę przedmiot na którym skupiał się niniejszy referat stosownym wydaje się porównanie śladu węglowego generowanego przez poszczególne rozwiązania. Skupiono się wyłącznie na różnicach wynikających z rodzaju zastosowanego cementu, ponieważ pozostałe surowce były identyczne dla wszystkich rozwiązań. Dane dla cementów zostały przyjęte w oparciu o Deklaracje Środowiskowe III Typu z roku 2023 umieszczone na stronie producenta – CEMEX Polska sp. z o.o. [11]. W Tablicy 9 przedstawiono wartości (kg/m^3) i różnice procentowe wielkości śladu węglowego jako $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Dla dwu cementów nie zostały opracowane EPD, stąd brak stosownych wartości w zestawieniu

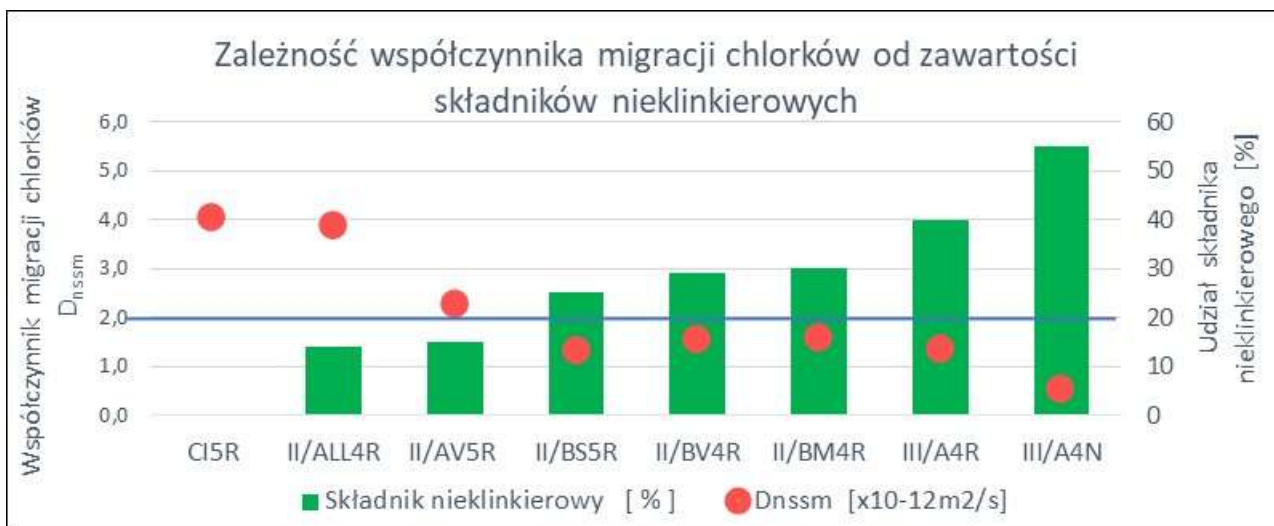
Tablica 9 Porównanie śladu węglowego z cementu w sprawdzanych rozwiązaniach

Cement	Jednostkowy ślad węglowy [$\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}$ cementu]	Udział cementu, [kg/m^3]	Ślad węglowy z Cementu, [$\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$ betonu]	Ślad węglowy Cement [%]
CEM I 52,5 R-NA	0,482	440	212,1	100%
CEM II/A-V 52,5R-NA	0,449	440	197,6	93% (-7%)
CEM II/A-LL 42,5R-NA	0,447	440	196,7	93% (-7%)
CEM II/B-S 52,5 R	-	440	-	-
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	0,376	440	165,4	78% (-22%)
CEM II/B-M(S-V) 42,5 R	0,381	440	167,6	79% (-21%)
CEM III/A 42,5 R-NA	-	440	-	-
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	0,231	440	101,6	48% (-52%)

5. Podsumowanie i wnioski

5.1. Podsumowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu:

1. Uzyskano założone parametry mieszanek betonowych, jakkolwiek ilości zastosowanych domieszek były zróżnicowane dla każdego z użytych cementów. Betony z cementami innymi niż CEM I wymagały znacznie większych dawek domieszki napowietrzającej w stosunku do referencji.
2. Potrzebną do sprężenia wytrzymałość 38,5 MPa ($0,7f_{ck}$) po 1 dniu uzyskano tylko dla cementów CEM I, CEM II/A-V 52,5R-NA oraz CEM II/A-LL 42,5R-NA. Beton z Cementem CEM II/B-S 52,5 R uzyskał wytrzymałość 35,7 MPa, zatem warunek $0,7f_{ck}$ nie został spełniony po jednym dniu a dopiero po 2 dniach. Betony z cementami klasy 42,5R potrzebną wytrzymałość uzyskiwały również dopiero po 48 godzinach pomimo obniżenia wskaźnika w/c w stosunku do cementów klasy 52,5R. Beton z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA – zgodnie z przewidywaniami – nawet po 48 godzinach nie uzyskał wytrzymałości potrzebnej do sprężenia.
3. Wszystkie betony charakteryzują się bardzo dobrą szczelnością. Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w żadnym przypadku nie przekracza 20mm.
4. Wszystkie betony wykazują odporność na zamrażanie i rozmrażanie, na co wskazują: bezpośrednio wynik badania mrozoodporności F200, a pośrednio uzyskane wartości charakteryzujące rozkład porów powietrznych w stwardniałym betonie.
5. Odporność betonów na karbonatyzację
 - a. Wysoką odporność na karbonatyzację – głębokość karbonatyzacji po 70 dniach poniżej 4 mm [6] - wykazują betony z cementami CEM II/A, podobnie jak beton z cementem CEM I.
 - b. Również betony z cementami CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 42,5 R wykazują wysoką odporność na karbonatyzację.
 - c. Pozostałe betony - z cementem CEM II/B-V42,5 R-HSR/NA i cementami hutniczymi CEM III/A po 70 dniach wykazują głębokość karbonatyzacji od 4,3 do 6,1mm, czyli niewiele, ale jednak przekraczającą poziom 4 mm.
6. Odporność betonów na korozję chlorkową – mierzona współczynnikiem migracji chlorków
 - a. Betony z użyciem cementów hutniczych CEM III/A oraz CEM II/B charakteryzują się najniższymi wartościami współczynnika D_{nssm} zatem wykazują **bardzo dobrą odporność na wnikanie chlorków**[8],
 - b. Pozostałe betony - z CEM I i CEM II/A mają wskaźnik odporności na poziomie max $4,035 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, zatem mieszczą się dolnej części przedziału (od 2 do $8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) ustalonego dla **dobrej odporności** na wnikanie chlorków [9].
 - c. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości nieklinkierowych składników cementu wartość współczynnika D_{nssm} dla betonu maleje, zatem jego odporność na wnikanie chlorków rośnie - zwłaszcza kiedy nieklinkierowymi składnikami są popiół V oraz żużel S Rysunek 2.



Rysunek 2 Zależność współczynnika migracji chlorków od udziału składników nieklinkierowych

5.2. Wnioski

Traktując trwałość betonu jako odporność na korozyjne oddziaływania środowiska, betony konstrukcyjne drogowego obiektu inżynierskiego muszą być odporne łącznie na 3 rodzaje korozji: mrozową, chlorkową oraz wywołaną karbonatyzacją.

Zabezpieczenie przed korozją mrozową – uzyskanie klasy XF4 – uzyskuje się przez odpowiednie napowietrzenie betonu, czyli dobór efektywnego zestawu domieszek, który umożliwia uzyskanie odpowiedniej charakterystyki rozkładu porów powietrznych.

Przeprowadzone testy wykazały, że mrozo odporne betony uzyskano dla wszystkich rodzajów cementu, jednak dla mieszanek z cementami zawierającymi składniki nieklinkierowe - zwłaszcza popiół lotny krzemionkowy- dozowanie domieszek, a szczególnie napowietrzacza musiało zostać znacznie zwiększone.

W świetle uzyskanych wyników badania odporności na wnikanie chlorków można stwierdzić, że każde obniżenie zawartości klinkieru w cemencie zastosowanym do betonu powoduje poprawę tej odporności w stosunku do betonu z cementem CEM I. Biorąc pod uwagę tę tendencję dla zabezpieczenia przed korozją chlorkową nie ma przeciwwskazań, a nawet wskazane jest stosowanie cementów obniżonej zawartości klinkieru w tym również cementów CEM III/A.

Sytuacja wygląda nieco inaczej jeśli chodzi o odporność na karbonatyzację. Tutaj pomimo bardzo wysokiej szczelności wszystkich betonów - mierzonej odpornością na penetrację wody pod ciśnieniem[8] - głębokość karbonatyzacji betonów z cementami CEM III/A i CEM II/B-V jest większa niż w przypadku cementu CEM I. Za to wszystkie betony z cementami CEM II/A mieszczą się w przedziale głębokości karbonatyzacji poniżej 4 mm podobnie jak beton z cementem CEM I, co zgodnie z zapisem normy PN-EN 12390-12 – punkt 7 UWAGA 1: „Przy normalnych składach betonu głębokość karbonatyzacji po 70 dniach szacunkowo powinna wynosić ≥ 4 mm. Wartość niższa niż ta wskazuje na **beton o wysokiej odporności na karbonatyzację** [6].

Potwierdza to słuszność dopuszczenia cementów CEM II/A do betonów sprężonych w Warunkach Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych - WWiORB M-13.01.00 v05 [8].

Dodatkowo betony z projektu do których zastosowano cementy z grupy CEM II/B: CEM II/B-S 52,5 R i CEM II/B-M(S-V) 42,5 R również wykazują wysoką odporność na karbonatyzację – skarbonatyzowana warstwa znacznie poniżej 4mm.

Można zatem stwierdzić, że betony o wysokiej szczelności wykonane z:

- CEM II/A-LL – zawierającym kamień wapienny LL w ilości 14%
- CEM II/A-V zawierającym popiół lotny krzemionkowy V w ilości 15%,
- CEM II/B-S zawierającym granulowany żużel wielkopiecowy S w ilości 25%
- CEM II/B-M(S-V) zawierającym popiół (V) i żużel (S) - ilościach po 15%,

wykazują odporność na karbonatyzację porównywalną do odporności betonu o wysokiej szczelności wykonanego z cementem CEM I; a jednocześnie mają większą odporność na wnikanie chlorków, zwłaszcza dla cementów zawierających żużel S i popiół V.

Reasumując - zastosowanie cementów CEM II/A i niektórych cementów CEM II/B wykorzystanych w projekcie do betonów sprężonych w elementach drogowego obiektu inżynierskiego może stanowić alternatywę dla cementów CEM I. Uzyskane wyniki dla sprawdzanych właściwości decydujących o trwałości tych betonów nie są gorsze od właściwości betonu wykonanego z CEM I. Co do cementów hutniczych i cementu CEM II/B-V ewentualna możliwość ich zastosowania wymaga dalszych badań, pozwalających na określenie czy grubości otuliny zbrojenia zalecane w Eurokodzie PN-EN 1992-1-1, zapewnią skuteczną ochronę stali sprężającej w założonym okresie użytkowania. Dostępne obecnie metody badawcze umożliwiają jedynie porównywanie właściwości uzyskiwanych dla nowych rozwiązań z właściwościami rozwiązań stosowanych dotychczas - traktowanymi jako referencyjne.

Literatura:

- [1] PN-EN 206+A2: 2021 Beton Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [2] PN-B 06265:2022-08 Beton Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2
- [3] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [4] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [5] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [6] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu Część 12:Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację. Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [7] Norma PN-EN 12390-18:2021 Badania betonu Część 18:Oznaczanie współczynnika migracji chlorków
- [8] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v05:2025 Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich
- [9] Daria Józwiak-Niedźwiedzka „Wpływ napowietrzenia na współczynnik migracji chlorków w betonach z popiołem fluidalnym” Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczo-rozwojowy nr R04 013 01 MNiSW.
- [10] NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [11] Deklaracje środowiskowe www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe-iii-typu-epd-cement
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków