

# Cementy wieloskładnikowe CEM II/A, B jako kierunek w drodze do ograniczenia śladu węglowego w prefabrykacji cz. 2

## Streszczenie

Niniejszy artykuł stanowi uzupełnienie części 1 artykułu, który ukazał się w nr. 3/2023 kwartalnika BTA [1], o wyniki badań trwałościowych betonów do produkcji sprężonych elementów mostowych. Przeprowadzone badania wykazały, że betony wykonane z cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL 52,5R i portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5N charakteryzują się bardzo dobrą szczelnością (niska głębokość penetracji wody pod ciśnieniem), odpornością na karbonatyzację oraz mrozoodpornością. Właściwości trwałościowe tych betonów są porównywalne lub lepsze niż betony wykonane z cementu portlandzkiego CEM I 52,5R (cement referencyjny) przy jednocześnie mniejszym śladzie węglowym. Cementy CEM II/A-LL 52,5R i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N mogłyby być z powodzeniem stosowane w betonowych elementach sprężanych w drogowym obiekcie inżynierskim, co przy obecnych zapisach specyfikacji GDDKiA „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich” [2] nie jest możliwe.

## Słowa kluczowe:

ślad węglowy, prefabrykacja, cement, domieszki, trwałość

## Abstract

This article complements Part 1 of the article that was published in no. 3/2023 of the BTA Quarterly [1] with the results of durability tests on concretes for prestressed bridge elements. The tests carried out showed that concretes made of Portland limestone cement CEM II/A-LL 52,5R and Portland composite cement CEM II/A-M (S-LL) 52,5N are characterised by very good tightness (low depth of water penetration under pressure), resistance to carbonation and frost-thaw resistance. The durability properties of these concretes are comparable or better than concretes made with Portland cement CEM I 52,5R (reference cement) with a lower carbon footprint. CEM II/A-LL 52,5R and CEM II/A-M (S-LL) 52,5N cements could be successfully used in prestressed concrete elements in a road engineering structure, which is not possible with the current provisions of the GDDKiA specification „Structural concrete in road engineering structures” [2].

## Keywords:

carbon footprint, prefabrication, cement, admixtures, durability

## 1. Wstęp

Artykuł jest kontynuacją pierwszej części artykułu, która ukazała się w nr 3/2023 kwartalnika „Budownictwo, Technologie, Architektura” (BTA) [1] i w której opisano wyniki badań w skali laboratoryjnej i próby przemysłowe obejmujące właściwości mieszanki betonowej oraz właściwości mechaniczne betonu dla elementów wibroprasowanych (kostka brukowa) oraz prefabrykacji cięż-

Tabela 1. Składy betonów i zawartość efektywnych alkaliów

Materiał	Źródło	Zawartość składnika [kg/m <sup>3</sup> ]		
		Beton 1 ref.	Beton 2	Beton 3
CEM I 52,5 R	Góraždze	440	-	-
CEM II/A-LL 52,5 R	Góraždze	-	440	-
CEM II/A-M(S-LL) 52,5 N	Góraždze	-	-	440
Piasek 0/2	Otalež	650	650	650
Wapień 2/8	Trzuskawica	455	455	455
Wapień 8/16	Trzuskawica	660	660	660
Woda	Wodociągowa	151	151	151
Efektywne w/c <sup>1)</sup>	-	0,35	0,35	0,35
MasterSure HES 1515	MBS	3,30	3,52	2,64
MasterAir 107	MBS	0,79	1,01	0,88
Zawartość Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub>	-	2,282	2,284	1,878

1) z uwzględnieniem wody z domieszek

kiej (sprężona belka mostowa typu T). Właściwości trwałościowe kostki brukowej zostały opisane w artykule opublikowanym w nr 4/2023 kwartalnika BTA [3]. W obecnym artykule skupiono się na omówieniu wyników badań właściwości trwałościowych betonu, który posłużył do produkcji belki sprężonej typu T. Beton, z którego wyprodukowano w/w belkę, został wykonany z 3 różnych cementów: portlandzkiego CEM I 52,5R (referencja), portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL 52,5R oraz portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5N. Betony z nich wykonane charakteryzowały się zbliżonymi właściwościami mieszanki betonowej i betonu w okresie normowym (28 dni) [1]. Jednakże celem badań było również wykazanie, że betony wykonane z cementów CEM II/A-LL 52,5R oraz CEM II/A-M (S-LL) 52,5N o niższym śladzie węglowym niż CEM I 52,5R mogą charakteryzować się porównywalnymi właściwościami trwałościowymi i mogłyby być z powodzeniem stosowane w betonowych elementach sprężanych w drogowym obiekcie inżynierskim, co przy obecnych zapisach specyfikacji GDDKiA „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich” [1] nie jest możliwe.

## 2. Zakres badań

Zakres badań betonu obejmował swoim zakresem:

- konsystencję po 10 min metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [4],
- zwartość powietrza po 10 min wg PN-EN 12350-7 [5],
- wytrzymałość na ściskanie po 18 godz., 24 godz. oraz 28 dniach wg PN-EN 12390-3 [6],
- głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach wg PN-EN 12390-8 [7],
- głębokość karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12 [8],
- odporność na działanie mrozu wg PN-B-06265 zał. N [9] – stopień F150.

W tabeli 1 przedstawiono składy betonów.

## 3. Wyniki badań laboratoryjnych

Właściwości mieszanki betonowej i wytrzymałość na ściskanie przedstawiono odpowiednio w tabeli 2 i na rys. 1. Betony z cementem portlandzkim CEM I 52,5R (Beton 1) i cementem portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL 52,5R (Beton 2) charakteryzowały się podobnym rozwojem wytrzymałości wczesnej, co jest istotne ze względu na możliwość szybkiego sprężania elementów betonowych. Beton z cementem CEM II/A-M (S-LL) 52,5N (Beton 3) charakteryzował się niższą wytrzymałością na ściskanie po 18 i 24 godzinach od betonu referencyjnego odpowiednio o ok. 30% i ok. 16%. Konsystencja mieszanek betonowych była zbliżona do siebie, ale wymagało to zastosowania różnych ilości plastyfikatora w zależności od ilości i rodzaju nieklinkierowych składników (tabela 1). Wszyst-

kie mieszanki betonowe były napowietrzane, gdyż w założeniach miały być odporne na działanie mrozu (klasa ekspozycji XF4) i charakteryzowały się zbliżoną zawartością powietrza ok.  $5 \pm 0,5\%$ . Wszystkie betony przed badaniami trwałościowymi były pielęgnowane przez 28 dni w wodzie, a następnie poddane badaniu lub dalszej pielęgnacji zgodnie z wymogami odpowiednich norm badawczych. Wszystkie badane betony charakteryzowały się bardzo dobrą szczelnością i spełniły wymagania dotyczące głębokości penetracji wody pod ciśnieniem zawarte w WWiORB GDDKiA [2] – głębokość penetracji wody pod ciśnieniem była  $\leq 40$  mm (rys. 2). Warto podkreślić, że betony wykonane z cementów CEM II/A-LL 52,5R i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N miały głębokość wnikania wody niższą odpowiednio o ok. 33% i 45% niż beton referencyjny z cementem CEM I 52,5R. Duża szczelność betonów znalazła potwierdzenie również w badaniach karbonatyzacji, gdzie nie zaobserwowano postępu karbonatyzacji (tabela 3). Badane betony charakteryzowały się dobrą mrozoodpornością, zarówno spadek wytrzymałości był  $\leq 20\%$ , jak i ubytek masy był  $\leq 5\%$  po 150 cyklach zamarzania-rozmrażania czyniąc zadość kryteriom zawartym w normie PN-B-06265 zat. N [9]. Używanie dobrej mrozoodporności zwłaszcza przez betony wykonane z cementów CEM II/A-LL 52,5R i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N wynika z prawidłowego napowietrzania (tabela 4) zarówno pod kątem całkowitej zawartości powietrza  $\geq 4,5\%$  [2], jak i zawartości mikroporów  $> 1,5\%$  [10]-[11] oraz wskaźnika rozmieszczenia porów  $\leq 0,250$  mm [11].

#### 4. Badania w skali przemysłowej

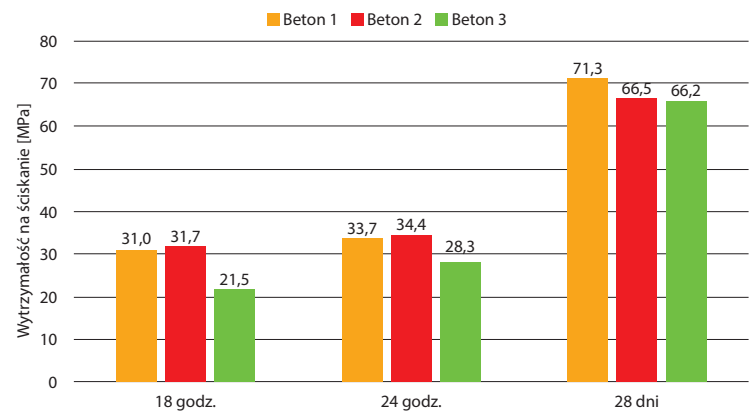
Zakład prefabrykacji, w którym przeprowadzono próby, pracuje wg 24-godzinnego schematu (rys. 4), a wymagana wytrzymałość na ściskanie betonu pozwalająca na zwalnianie naciągów i przeniesienie siły na beton musi zostać osiągnięta po upływie 16 godzin od zakończenia betonowania. Nie można doprowadzić do sytuacji, w której rozpoczęcie kolejnego cyklu produkcji będzie opóźnione w wyniku braku wytrzymałości betonu, ponieważ znacząco zaburzy to harmonogram produkcji i wpłynie negatywnie na koszty. Z tego powodu do wykonania próby przemysłowej wybrano 2 receptury betonu z cementem portlandzkim CEM I 52,5R oraz z cementem portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL 52,5R ze względu na ich

Tabela 4. Struktura napowietrzania wg PN-EN 480-11 [12]

Oznaczenie próbki	Struktura napowietrzania		
	Zawartość powietrza A [%]	Wskaźnik rozmieszczenia porów L [mm]	Zawartość mikroporów A300 [%]
Beton 1 CEM I 52,5 R	4,52	0,222	2,26
Beton 2 CEM II/A-LL 52,5 R	5,75	0,194	2,86
Beton 3 CEM II/A-M(S-LL) 52,5 N	5,00	0,218	2,08

Tabela 2. Właściwości mieszanki betonowej

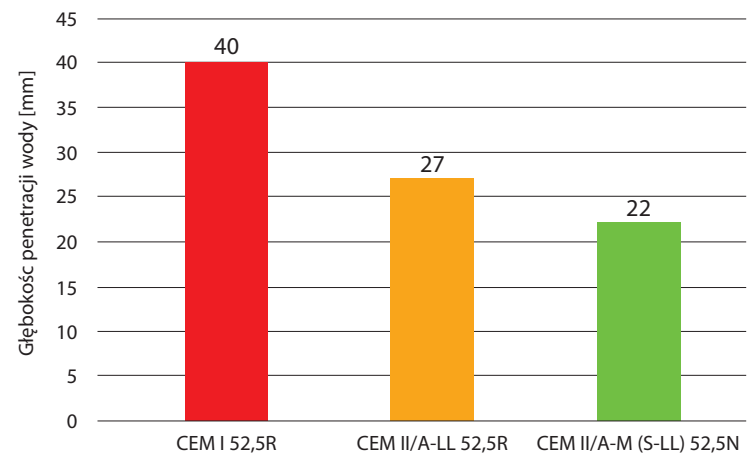
Właściwość	Beton 1 CEM I 52,5 R	Beton 2 CEM II/A-LL 52,5 R	Beton 3 CEM II/A-M(S-LL) 52,5 N
Opad stożka po 5 min. [mm]	240	245	245
Rozptył po 5 min. [mm]	420	485	500
Zawartość powietrza po 5 min. [%]	4,9	5,0	5,2



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonu

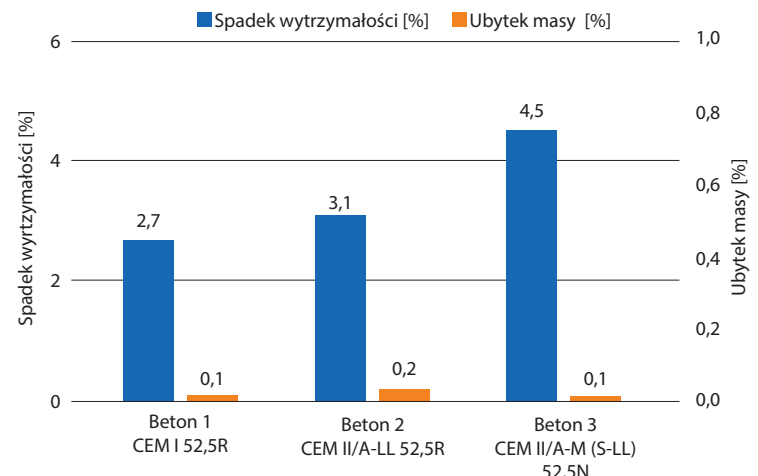
Tabela 3. Karbonatyzacja

Oznaczenie próbki	Karbonatyzacja [mm] po:		
	7 dniach	28 dniach	70 dniach
Beton 1 - CEM I 52,5 R	0,0	0,0	0,0
Beton 2 - CEM II/A 52,5 R	0,0	0,0	0,0
Beton 3 - CEM II/A-M(S-LL) 52,5 N	0,0	0,0	0,0



Rys. 2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem po 28 dniach pielęgnacji

Rys. 3. Odporność betonu na działanie mrozu wg [9]





Rys. 4. Schemat produkcji

szybkie przyrosty wytrzymałości wczesnej. Z wytypowanych betonów w celach porównawczych wyprodukowano belki typu T. Są one zaprojektowane na obciążenia ruchome klasy I wg PN-EN 1992-1-1 [13] oraz PN-EN 1991-2 [14]. W przekroju poprzecznym belki mają kształt litery „T” (rys. 5). Szerokości górna  $B_2$  zawsze jest stała i wynosi

Rys. 5. Szkic belki typu T

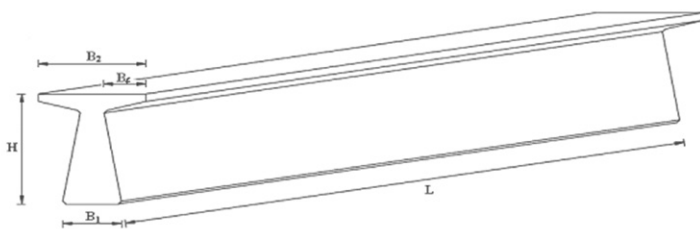


Tabela 6. Właściwości mieszanki betonowej z prób produkcyjnych

Właściwość	Beton 1	Beton 2
Rozptyw [mm]	550	560
Zawartość powietrza [%]	4,5	4,4

Fot. 1. Belki wykonane podczas próby przemysłowej z betonu z cementem:  
a) CEM I 52,5R (referencyjna),  
b) CEM III/A-LL 52,5R



89 cm, natomiast wysokość i grubość środnika w dole belki jest zmienna w zależności od rodzaju. W prezentowanym przypadku (fot.1 i 2) belka T27 ma wysokość  $H=110$  cm, a grubość środnika w dole belki  $B_1 = 46,5$  cm.

W pierwszym etapie jeden z torów został zabudowany mieszanką betonową wyprodukowaną z cementu portlandzkiego CEM I 52,5R. Po 16 godzinach dojrzewania, w tym 6 godzin stanowiła obróbka cieplna w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$ , uzyskano wytrzymałość na ściskanie  $42,7$  MPa. Po zwolnieniu naciągów uzyskano przeciw-strzałkę w zakresie od  $18$  mm do  $20$  mm, a po 14 dniach ponowny pomiar strzałek wykazał wartości od  $25$  mm do  $29$  mm. W drugim etapie w produkcji belek zastosowano mieszankę betonową wyprodukowaną z cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL 52,5R. Po tym samym czasie dojrzewania i po 6 godzinnej obróbce cieplnej w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$  uzyskano wytrzymałość na ściskanie  $41,1$  MPa. Natomiast po zwolnieniu naciągów uzyskano przeciw-strzałkę w zakresie  $19$  mm do  $21$  mm, a po 14 dniach składowania wartość przeciw-strzałek mieściła się od  $26$  mm do  $28$  mm. W obu przypadkach zostały spełnione założenia projektowe, gdzie maksymalne dopuszczalne ugięcie belek po sprężeniu wynosi  $46$  mm. Zaleca się, aby belki były zamontowane i obciążone w miejscu docelowym nie wcześniej niż po 30 dniach od wyprodukowania oraz nie później niż 180 dni.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A wysokich klas wytrzymałościowych, np. CEM II/A-LL 52,5R i CEM II/A-M (S-LL) 52,5N, mogą być z powodzeniem stosowane w produkcji sprężonych elementów w drogowych obiektach inżynierskich jako alternatywna dla powszechnie stosowanych cementów portlandzkiego CEM I. Odpowiedni dobór rodzaju i ilości domieszek pozwala uzyskać mieszanki betonowe z cementami CEM II/A-M (S-LL) 52,5N lub CEM II/A-LL 52,5R charakteryzujące się porównywalnymi właściwościami reologicznymi [1] istotnymi w kontekście prawidłowej ich zabudowy, zbliżonym stopniem napowietrzenia, co



jest ważne w kontekście uzyskania odpowiedniej mrozoodporności. Betony z nich uzyskane charakteryzują się również zbliżonym przyrostem wytrzymałości wczesnych w przypadku cementu CEM II/A-LL 52,5R lub umiarkowanym w przypadku cementu CEM II/A-M (S-LL) 52,5N [1], co pozwala dobrać tempo prac do wymagań placu budowy czy zakładu prefabrykacji. Również cementy te pozwalają uzyskać betony o wysokich wytrzymałościach normowych (po 28 dniach) > 65 MPa. Betony z cementami CEM II/A-M (S-LL) 52,5N lub CEM II/A-LL 52,5R charakteryzowały się wysoką szczelnością (niska penetracja wody pod ciśnieniem), a także bardzo dobrą odpornością na karbonatyzację i mrozoodpornością.

Zawartość alkaliów aktywnych  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  w betonach z cementami CEM II/A-M (S-LL) 52,5N i CEM II/A-LL 52,5R nie przekroczyła  $2,4 \text{ kg/m}^3$  pomimo wysokiej zawartości tych cementów w składzie betonu i była porównywalna z betonem z cementu CEM I 52,5R. Spełniając równocześnie wymagania WWiORB GDDKiA [2] dla betonu stosowanego w obiektach najwyższej klasy S4 oraz najwyższej kategorii oddziaływania środowiska E3 w kontekście zapobiegania reakcji alkalia-reaktywne kruszywo.

Dopuszczalne ugięcia belek wykonanych podczas próby przemysłowej z betonu zawierającego cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL 52,5R mieściły się w dopuszczalnych granicach normowych oraz były na poziomie belek wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I 52,5R, co pokazuje, że cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A mogą być z powodzeniem stosowane jako składnik betonu do produkcji elementów sprężonych.

Wartym podkreślenia jest, że stosowanie cementów CEM II/A-M (S-LL) 52,5N lub CEM II/A-LL 52,5R pozwala ograniczyć ślad węglowy betonu sprężonego przy zbliżonych właściwościach użytkowych, co jest zgodne z filozofią zrównoważonego rozwoju i ideą gospodarki w obiegu zamkniętym [1].

**dr inż. Maciej Batóg**  
**mgr inż. Jakub Bakalarz**

**Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.**

**mgr inż. Michał Zapata**  
**MBS Polska Sp. z o.o.**

**mgr inż. Krzysztof Zychowicz**  
**Betard Sp. z o.o.**

#### Literatura

1. Batóg M., Bakalarz J., Oleksik M., Ignierowicz A., Fornal A., Wojtkiewicz W., Zapata M., Zychowicz K.; *Cementy wieloskładnikowe CEM II/A, B jako kierunek w drodze do ograniczenia śladu węglowego w prefabrykacji cz. 1; Budownictwo, Technologie, Architektura*, nr 3/2023,
2. *Wzorcowe Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad M-13.01.00 v04 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich”, Warszawa, sierpień 2022*
3. Batóg M., Bakalarz J., Oleksik M., Ignierowicz A., Fornal A., Wojtkiewicz W.; *Wpływ stosowania cementów niskoemisyjnych na właściwości betonu oraz trwałość drobnowymiarowych dwuwarstwowych elementów wibroprasowanych; Budownictwo, Technologie, Architektura*, nr 3/2023,



Źródło: Archiwum BTA

4. PN-EN 12350-2:2019-07 „Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”
5. PN-EN 12350-7:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe”
6. PN-EN 12390-3: 2019-07 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”
7. PN-EN 12390-8: 2019-08 „Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
8. PN-EN 12390-12:2020-06 „Badania betonu – Część 12: Oznaczenie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji”
9. PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
10. *Wzorcowe Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad D-05.03.04 v02 „Nawierzchnia z betonu cementowego”, Warszawa, sierpień 2019*
11. Neville A. M., *Właściwości betonu*, Polski Cement, 2012
12. PN-EN 480-11:2008 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie*
13. PN-EN 1992-1-1:2008/A1:2015-03 *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*
14. PN-EN 1991-2:2007 – *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 2: Obciążenia ruchome mostów*