

**mgr. inż. Damian Zawół<sup>1)</sup>**  
**mgr. inż. Łukasz Osuch<sup>1)</sup>**  
**mgr. inż. Paweł Mofina<sup>2)</sup>**  
**dr inż. Piotr Górak<sup>2)</sup>**  
**mgr inż. Konrad Grzesiak<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> PBI Beton Sp. z o.o.

<sup>2)</sup> Cemex Polska Sp. z o.o.

<sup>3)</sup> MC-Bauchemie Sp. z o.o.

## **Obwodnica Opatowa w ciągu drogi S74 na zrównoważonych rozwiązaniach materiałowych**

Opatów bypass along the S74 road using sustainable material solutions

### **Streszczenie**

Wpływ środowiskowy realizowanych inwestycji infrastrukturalnych w przyszłości będzie stawał się jednym z kluczowych aspektów oceny projektów w ramach programu zielonych zamówień publicznych. Dlatego niezmiernie ważne wydaje się, aby dobre praktyki z kontraktów infrastrukturalnych prowadzonych z uwzględnieniem zrównoważonych rozwiązań materiałowych wyznaczały nowe standardy dla przyszłych inwestycji drogowych realizowanych ze środków KPO.

W niniejszym artykule zostały przedstawione doświadczenia praktyczne z realizacji dużego kontraktu infrastrukturalnego jakim była budowa obwodnicy Opatowa w ciągu drogi S74 w aspekcie doboru zrównoważonych materiałów w zakresie wykorzystania lokalnych źródeł kruszyw łamanych, cementów o obniżonej emisyjności oraz specjalnie dobranych domieszek chemicznych umożliwiających produkcję i dostawy mieszanki betonowej w różnych warunkach temperaturowych przy zachowaniu stałych właściwości reologicznych. Zastosowanie nowych rozwiązań recepturowych dla betonów konstrukcyjnych w drogowych obiektach inżynierskich wymaga przede wszystkim sprawdzenia materiałów i ich kompatybilności w całym układzie kompozycji receptur, a także weryfikacji poprawności przyjętych założeń w trakcie realizacji dostaw betonów przy wykorzystaniu pełnej palety metod badawczych. Badania wstępne prowadzone dla weryfikacji słuszności założeń materiałowych okazały się być kluczowe dla potwierdzenia wysokiego poziomu odporności na zagrożenie reakcją ASR dla kompozycji receptur betonowych oraz pomogły w odpowiednim doborze układu cement-zestaw domieszek pod kątem nie tylko reologii mieszanki, ale przede wszystkim pod kątem zapewnienia odpowiedniej trwałości mrozowej i oczekiwanego tempa rozwoju wytrzymałości betonu. Statystyka ilości wykonanych badań wraz z analizą zależności niektórych parametrów to ujęcie badawcze, natomiast obliczenia realnych oszczędności emisji dwutlenku węgla dzięki zastosowaniu kruszyw lokalnych oraz cementów o obniżonej emisyjności to ujęcie inwestycji w aspektach wpływu na środowisko.

## Abstract

The environmental impact of infrastructure investments in the future will become one of the key aspects of project assessment under the green public procurement program. Therefore, it seems extremely important that good practices in infrastructure contracts carried out taking into account sustainable material solutions set new standards for future road investments implemented with KPO funds.

This article presents practical experience from the implementation of a large infrastructure contract, which was the construction of the Opatów bypass along the S74 road, in terms of the selection of sustainable materials in terms of the use of local sources of crushed aggregates, cements with reduced emission and specially selected chemical admixtures enabling the production and delivery of concrete mix in various temperature conditions while maintaining constant rheological properties. The use of new recipe solutions for structural concrete in road engineering facilities requires, first of all, checking the materials and their compatibility in the entire recipe composition system, as well as verifying the correctness of the assumptions made during the delivery of concrete using a full range of research methods. Preliminary tests conducted to verify the validity of the material assumptions turned out to be crucial in confirming the high level of resistance to the risk of ASR reaction for the concrete formulation compositions and helped in the appropriate selection of the cement-admixture set system in terms of not only the rheology of the mixture, but primarily in terms of ensuring appropriate frost durability and the expected rate of development of concrete strength. Statistics on the number of tests performed together with an analysis of the relationship between certain parameters is a research approach, while calculations of real savings in carbon dioxide emissions thanks to the use of local aggregates and low-emission cements are a presentation of the investment in terms of environmental impact.

## 1. Wprowadzenie

Obwodnica Opatowa, realizowana w ciągu drogi ekspresowej S74 oraz drogi krajowej nr 9, stanowi istotną inwestycję infrastrukturalną, która znacząco wpłynie na poprawę jakości życia mieszkańców Opatowa i okolic. Dzięki wyprowadzeniu ruchu tranzytowego poza centrum miasta, zmniejszy się natężenie hałasu, emisji spalin oraz poprawi bezpieczeństwo na lokalnych drogach.

Przedsięwzięcie polegało na budowie obwodnicy, o łącznej długości 13,8 km w ramach dwóch kontraktów: Budowa obwodnicy Opatowa w ciągu drogi S74 i DK9 o dł. 10,8 km oraz łącznika północnego obwodnicy Opatowa w ciągu DK74 o dł. 3 km. W ramach tej budowy wybudowano kilkanaście obiektów inżynierskich mostowych: 4 estakady, 2 mosty, jedną kładkę dla pieszych, kilka wiaduktów, przejście dla średnich zwierząt.

Inwestycja została zrealizowana z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju.

W ramach budowy zastosowano cement CEM II/B-S 42,5 N-NA, który zawiera dodatek żużla wielkopiecowego, co przekłada się na mniejsze zużycie klinkieru i tym samym obniżenie emisji CO<sub>2</sub> w porównaniu z tradycyjnym cementem CEM I 42,5 R-NA. To świadome działanie proekologiczne, które ma na celu zmniejszenie śladu węglowego inwestycji. Dodatkowo wykorzystanie lokalnych surowców – grysów dolomitowych pochodzących z pobliskich złóż – nie tylko ograniczyło potrzebę transportu materiałów z odległych miejsc (co również przekłada się na mniejsze emisje), ale również wsparło lokalną gospodarkę.

Obwodnica będzie stanowiła ważny odcinek drogi ekspresowej S74, która w przyszłości połączy województwa łódzkie, świętokrzyskie i podkarpackie i przyniesie wiele korzyści mieszkańcom miasta i regionu, poprawiając jakość życia, ułatwiając podróżowanie i wspierając rozwój gospodarczy.

## 2. Beton konstrukcyjny o obniżonej emisyjności w odniesieniu do zastosowanych materiałów

### 2.1. Cement jako główny składnik emisyjności betonu

Pisząc o betonie o obniżonej emisyjności CO<sub>2</sub> w pierwszej kolejności zwraca się uwagę na emisyjność cementu, który odpowiada w zależności od przeznaczenia i klasy wytrzymałości betonu od 75% do 90% całej wartości śladu węglowego wbudowanego. Przystępując do porównania rozwiązań materiałowych w zakresie zmian cementu, a co za tym idzie redukcji śladu węglowego założono, że ilości cementu w recepturach betonu tej samej klasy są takie same. Zostały przeanalizowane dwa podejścia do rozwiązań recepturowych. W pierwszym założono, że receptury betonu przeznaczone dla klas C30/37 i C35/45 są wykonane na cementach klasy 42,5 odpowiednio przyjmując referencyjne (tradycyjne podejście) na CEM I 42,5 R-NA, natomiast w drugim uwzględniającym aspekty środowiskowe na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA. Dodatkowo wykonana została kalkulacja śladu węglowego pochodzącego od cementu przy założeniu potencjalnej zamiany cementu CEM I 52,5 R-NA na cement CEM II/B-S 42,5 N-NA dla betonu C50/60.

Dane dla cementów zostały przyjęte w oparciu o wartości GWP netto zawartych w deklaracjach środowiskowych III Typu z roku 2023 opracowanych przez ITB na zlecenie producenta – CEMEX Polska sp. z o.o. [1].

Rzeczywista zamiana rodzaju cementu w obrębie tych samych projektowanych właściwości betonu dla klas C30/37 i C35/45 oraz potencjalna dla klasy C50/60 pozwala osiągnąć redukcję emisji od 57 do 65 kg CO<sub>2</sub> w 1 m<sup>3</sup> betonu.

Tabela 1. Porównanie emisyjności rozwiązań w aspekcie zastosowanego cementu

| Klasa wytrzymałości betonu                                                                  | C30/37          |                      | C35/45          |                      | C50/60          |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| Rodzaj cementu                                                                              | CEM I 42,5 R-NA | CEM II/B-S 42,5 N-NA | CEM I 42,5 R-NA | CEM II/B-S 42,5 N-NA | CEM I 52,5 R-NA | CEM II/B-S 42,5 N-NA |
| Ilość cementu [kg/m <sup>3</sup> betonu]                                                    | 370             | 370                  | 390             | 390                  | 420             | 420                  |
| Emisja [kg eqCO <sub>2</sub> / t cementu]                                                   | 481             | 327                  | 481             | 327                  | 482             | 327                  |
| Emisja na 1 m <sup>3</sup> betonu od cementu [kg eqCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> betonu] | 178             | 121                  | 188             | 128                  | 202             | 137                  |
| Różnica emisji przy zastosowaniu cementu [kg eqCO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> betonu]     | 57              |                      | 60              |                      | 65              |                      |

## 2.2. Kruszywa ważny składnik w kalkulacji śladu węglowego

Kruszywa w betonie stanowią 80-90% objętości. To kluczowy składnik, który pozwala na osiągnięcie przez beton projektowanych właściwości mechanicznych oraz odpowiedniej trwałości. Przez wiele lat do produkcji betonów z przeznaczeniem dla inżynierskich obiektów drogowych stosowane były kruszywa łamane pozyskiwane ze skał magmowych lub metamorficznych pochodzące z jednego regionu Polski. Przełomowym momentem było pojawienie się zaktualizowanych WWiORB-ów [2], które stanowiły podstawę dla nowo opracowywanych specyfikacji technicznych stosowanych do projektowania rozwiązań materiałowych w budownictwie infrastrukturalnym. Nikt dotąd nie postrzegał stosowania kruszyw łamanych w aspekcie potencjalnej redukcji śladu węglowego w betonie. Przyjmując, że ślad węglowy dla kruszywa łamanego pozyskiwanego przez odstrzał skały macierzystej i proces kruszenia w modułach A1-A3 (cradle to gate) jest podobny, to niebagatelną rolę odrywa ślad węglowy pochodzący od transportu materiału do miejsca zastosowania. Podejście polegające na zastosowaniu kruszyw lokalnych jest zatem słuszne z punktu widzenia zrównoważonych rozwiązań materiałowych. W przypadku opisywanego w artykule kontraktu Producent betonu – Grupa PBI oraz PBI Beton zdecydowali się wykorzystać do betonów konstrukcyjnych mostowych kruszywa dolomitowe pochodzące z lokalnych kamieniołomów należących do Grupy i oddalonych od miejsca produkcji betonu o 10 km, zamiast kruszyw łamanych produkowanych na Dolnym Śląsku – średnia odległość około 400 km.

Znaczna różnica w odległości przekłada się na różnicę w śladzie węglowym określonym dla 1 tony kruszywa – Tabela 2.

Tabela 2. Porównanie emisyjności transportu kruszywa

| Rodzaj kruszywa                                                    | Grys dolomitowy                | Grys Granitowy              |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Odległość do miejsca zastosowania – WBT [km]                       | 10 km                          | 400 km                      |
| Założona emisja dla transportu kruszywa [6]<br>[26 ton/ 1 km]      | 1,08114 kg CO <sub>2</sub> /km |                             |
| Emisja CO <sub>2</sub> dla dostawy kruszyw w miejsce wykorzystania | 10,8114 kg CO <sub>2</sub>     | 432,4560 kg CO <sub>2</sub> |

### 3. Rozwiązania materiałowe zastosowane w mieszankach betonowych

Przed przystąpieniem do realizacji, producent betonu PBI Beton Sp. z o. o., wraz z dostawcami materiałów CEMEX Polska Sp. z o. o. oraz MC Bauchemie Sp. z o. o. przeprowadzili badania wstępne w celu dobrania optymalnego rozwiązania. Założeniem do projektowania było spełnienie wymagań kontraktowych z uwzględnieniem aspektu środowiskowego. Kluczowymi parametrami przy doborze składników było zaprojektowanie mieszanki betonowej dla klasy obiektu S4 w kategorii oddziaływania środowiska E3. Podstawowe rozwiązania materiałowe przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Receptury betonu konstrukcyjnego

| Składnik                                      | Producent                           | C30/37     | C35/45 | C50/60 |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|------------|--------|--------|
|                                               |                                     | Skład [kg] |        |        |
| CEM II B-S 42,5 N- NA                         | CEMEX Polska Sp. z o. o.            | 370        | 390    |        |
| CEM I 52,5 R-NA                               |                                     |            |        | 420    |
| Kruszywo drobne 0/2                           | Kopalnie Dolomitu SA<br>(Grupa PBI) | 1820       | 1804   | 1802   |
| Kruszywo grube 2/8 - grys dolomitowy          |                                     |            |        |        |
| Kruszywo grube 8/16 - grys dolomitowy         |                                     |            |        |        |
| Domieszka uplastyczniająca - Centrament N11   | MC Bauchemie Sp. z o. o.            | 4,6        | 4,9    | 5,7    |
| Domieszka upłynniająca - MC PowerFlow evo 508 |                                     |            |        |        |
| Domieszka napowietrzająca Centrament Air 220  |                                     |            |        |        |
| Woda                                          | Wodociągowa                         | 155        | 154    | 151    |

### 3.1. Cement

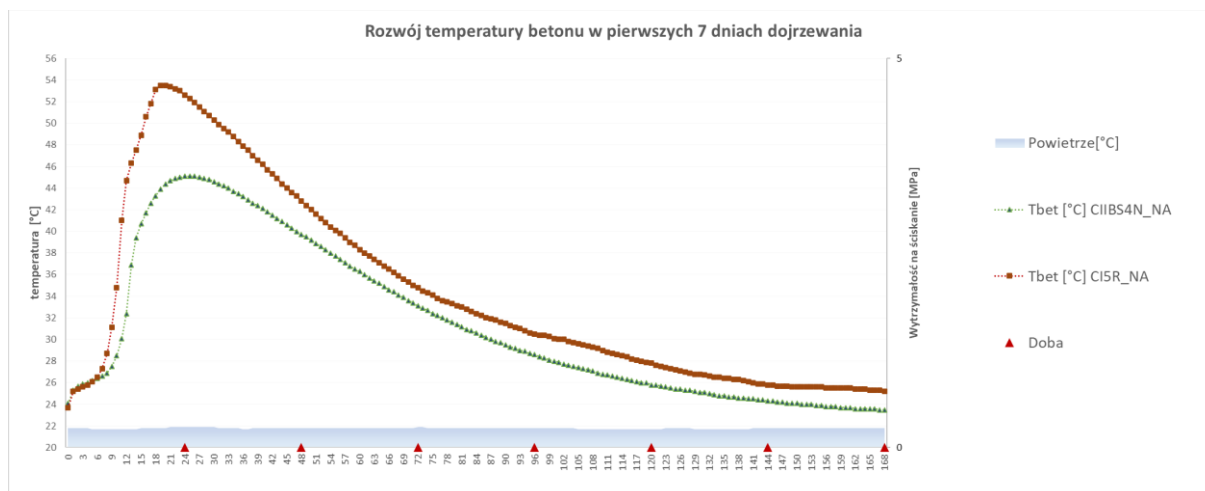
Do całości projektu wykorzystano dwa rodzaje cementu tj. CEM I 52,5 R-NA i CEM II/B-S 42,5 N-NA z Cementowni Rudniki o podstawowych właściwościach zestawionych w tabeli 4.

CEM I 52,5 R-NA zastosowano w betonie C50/60 tylko i wyłącznie do ustroju nośnego jednej z estakad. Jednakże poprzez szereg badań które zostały przeprowadzone dla betonu C50/60 z zastosowaniem cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA z łatwością można by zastąpić CEM I lecz ze względów formalno-prawnych ciężko było przekonać Odbiorcę do w/w rozwiązania. Przedstawione poniżej badania dobrze obrazują, że w dzisiejszych czasach obiekty sprężane można łatwo wykonywać na cementach innych niż CEM I. Potrzebne bezpieczne wczesne wytrzymałości są osiągalne na CEM II/B-S a dodatkowym atutem jest wyższa trwałość konstrukcji ze względu na niższe ciepło hydratacji.

Tabela 4. Podstawowe właściwości zastosowanych cementów

| Właściwość                        | Jednostka            | CEM II/B-S 42,5 N-NA | CEM I 52,5 R-NA |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Początek wiązania                 | [min]                | 172                  | 107             |
| Koniec wiązania                   | [min]                | 218                  | 139             |
| Woda do konsystencji normowej     | [%]                  | 29,7                 | 29,3            |
| Stałość objętości                 | [mm]                 | 1                    | 1               |
| Powierzchnia właściwa             | [cm <sup>2</sup> /g] | 4464                 | 5011            |
| <i>Wytrzymałość na ściskanie:</i> |                      |                      |                 |
| po 2 dniach                       | [MPa]                | 18,3                 | 32,8            |
| po 28 dniach                      | [MPa]                | 57,5                 | 63,2            |
| <i>Analiza chemiczna:</i>         |                      |                      |                 |
| SO <sub>3</sub>                   | [%]                  | 2,55                 | 2,81            |
| Cl                                | [%]                  | 0,07                 | 0,064           |
| Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>   | [%]                  | 0,6                  | 0,48            |

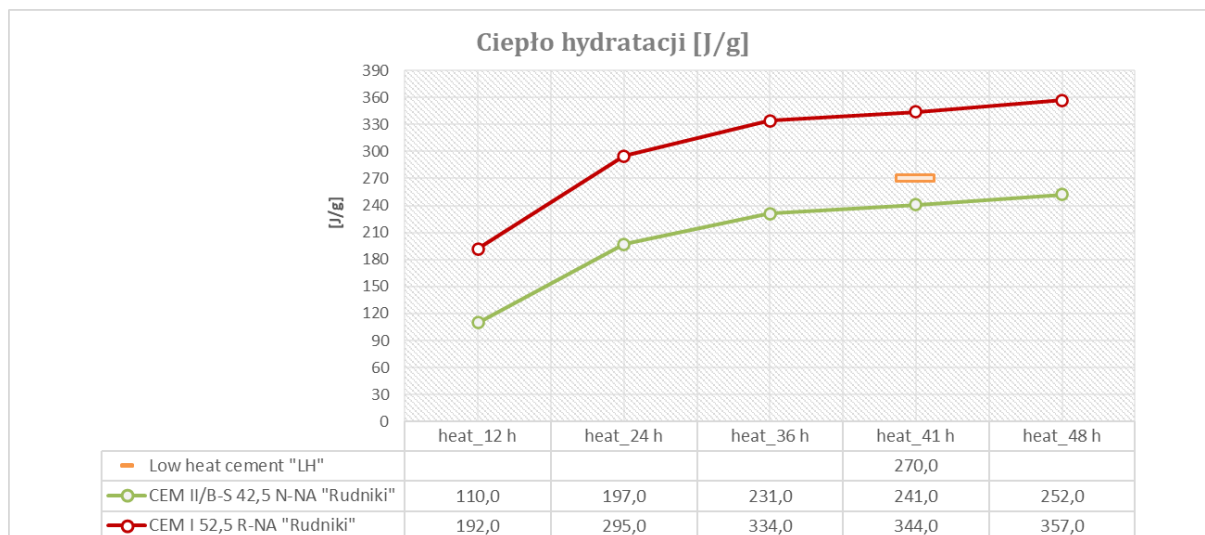
W betonach konstrukcyjnych ważną rolę odgrywa ciepło hydratacji, a w zasadzie ilość i szybkość wydzielania ciepła z egzotermicznej reakcji uwodnienia cementu. Przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, badanie ciepła hydratacji polegało na umieszczeniu zalanej mieszanką betonową formy w walcowej w izolowanej „kabinie” hydratacyjnej i prowadzeniu rejestracji temperatury dojrzewającego betonu przez okres pierwszych 7 dni. Oprócz rejestracji temperatury w mieszance betonowej prowadzony był również monitoring temperatury powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym. W trakcie trwania badania rejestracja temperatury odbywała się za pomocą dwukanałowego rejestratora firmy TESTO model 175 T3 i termopar typu T, przy czym kanał nr 1 rejestrował temperaturę panującą w otoczeniu beczki hydratacyjnej, a kanał nr 2 temperaturę dojrzewającego i twardniejącego betonu. Rejestracja temperatur odbywała się przez 7 dni z interwałem 60 minutowym co umożliwiło wyznaczenie krzywej rozwoju temperatury w dojrzewającym betonie. Pozyskane dane pozwoliły na wykreślenie krzywej rozwoju ciepła hydratacji mieszanek betonowych – przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Ciepło hydratacji mieszanek betonowych C 50/60 przez 7 dni

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na znaczącą różnicę w wartości maksymalnej zarejestrowanej temperatury. W przypadku mieszanki wykonanej przy zastosowaniu cementu CEM I 52,5 R-NA wynosi 52,6 °C i pojawia się po 24 godzinach natomiast w przypadku mieszanki wykonanej na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA wynosi 45,1 °C i pojawia się w okresie 24-26 godzin.

Powyższa analiza znajduje potwierdzenie w badaniu normowym ciepła hydratacji cementów wg PN-EN 196-9. Cement CEM II/B-S 42,5 N-NA nie posiada oznaczenia LH jednakże regularnie uzyskiwane wyniki oznaczeń ciepła uwodnienia kształtują się na poziomie poniżej 270 J/g (rys. 2).

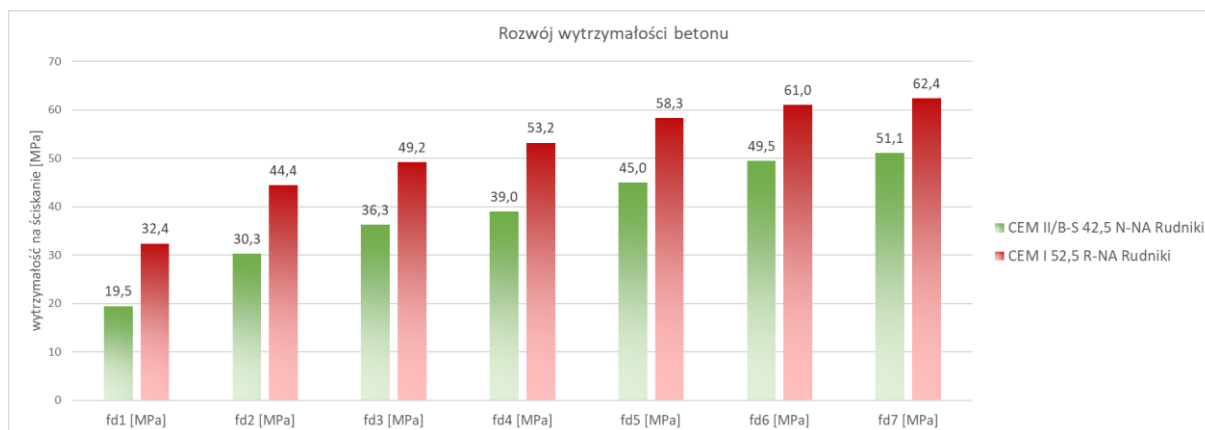


Rys. 2. Ciepło hydratacji cementów wg PN-EN 196-9

Niższe ciepło uwodnienia i wolniejsza dynamika rozwoju wytrzymałości w niewielkim stopniu wpływa na uzyskiwane wytrzymałości w pierwszych dobach twardnienia betonu.

Czas osiągnięcia wymaganej bezpiecznej wytrzymałości betonu do zwolnienia naciągu siły sprężającej jest przesunięty tylko o 3 dni. Dla betonu klasy C 50/60

przyjmujemy, że wytrzymałość ta stanowić powinna 80 %  $f_{ck}$  czyli 48 MPa. Wytrzymałość ta gwarantowana jest dla betonu wykonanego na cemencie CEM I 52,5 R-NA po 3 dniach natomiast dla betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA po 6 dniach (rys. 3).



Rys. 3. Dynamika rozwoju wytrzymałości betonu C 50/60 dla pierwszych 7 dni dojrzewania

W przypadku elementów klasyfikowanych jako masywne, analiza ciepła hydratacji mieszanki betonowej ma krytyczne znaczenie dlatego też, zawsze powinna być uwzględniana na etapie projektowanego rozwiązania.

Zastosowanie cementu CEM I, wnoszące potencjalne korzyści wynikające z szybszej rotacji szalunków czy wcześniejszego sprężenia może prowadzić, szczególnie w przypadku niekorzystnych warunków temperaturowych i braku właściwej pielęgnacji, do wystąpienia znacznych gradientów temperatur w elemencie lub na styku powierzchnia elementu / otoczenie. To z kolei, może spowodować powstanie naprężeń, których młody beton nie będzie w stanie przenieść w konsekwencji doprowadzając do powstania zarysowań lub spękań elementu. Nie zawsze zatem szybkość narastania wytrzymałości jest korzystna dla konstrukcji, zwłaszcza jeżeli skutkiem może być ryzyko uszkodzenia elementu, a co za tym idzie dodatkowy czas i koszty napraw. W takiej sytuacji wydłużenie czasu pielęgnacji betonu w szalunkach o nawet 3 doby z racji zastosowania rozwiązania alternatywnego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA, może okazać się rozwiązaniem optymalnym finalnie przynoszącym wyłącznie korzyści dla całkowitych kosztów i jakości betonu w konstrukcji.

### 3.2. Kruszywa

Stos okruszowy został zaprojektowany z trzech frakcji kruszyw. Jako kruszywo drobne przyjęto piasek naturalny, płukany o kategorii reaktywności R0 spełniający zapisy STWiORB. Kruszywo grube o frakcji 2/8 oraz 8/16 stanowiło grys dolomitowy z lokalnej kopalni Kopalnie Dolomitu S.A. która znajdowała się dosłownie kilka kilometrów od wytwórni betonu. W tabeli 5, przedstawiono podstawowe charakterystyki kruszywa grubego.

Tabela 5. Podstawowe właściwości zastosowanych kruszyw grubych

| Właściwości                                   | Kruszywo grube                |      |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|------|
|                                               | 2/8                           | 8/16 |
| Pochodzenie                                   | Kopalnie Dolomitu (Grupa PBI) |      |
| Kategoria uziarnienia                         | Gc85/20                       |      |
| Zawartość pyłów                               | f <sub>1,5</sub>              |      |
| Odporność na rozdrabnianie                    | LA <sub>25</sub>              |      |
| Mrozoodporność                                | F <sub>1</sub>                |      |
| Mrozoodporność w soli                         | F <sub>NaCl</sub> 6           |      |
| Nasiąkliwość                                  | WA <sub>24</sub> 1            |      |
| Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie | AS <sub>0,2</sub>             |      |
| Zawartość siarki całkowitej                   | ≤1                            |      |
| Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie   | <0,001                        |      |
| Reaktywność alkaliczna PB/1/18 (ASR)          | R0                            |      |
| Reaktywność alkaliczna PB/2/18 (ASR)          | R0                            |      |
| Reaktywność alkaliczna PB/2/18 (ACR)          | R0                            |      |

### 3.3. Domieszki

Domieszki zostały dobrane na etapie badań wstępnych jako rozwiązanie spełniające wszystkie przedstawione przez zamawiającego wymagania w zakresie utrzymania konsystencji, stabilności napowietrzenia, odpowiedniej struktury napowietrzenia oraz wpływu na uzyskiwane wytrzymałości wczesne i końcowe.

Do realizacji zastosowano takie produkty, jak:

- MC PowerFlow 508, który jest superplastyfikatorem utrzymanym w koncepcji zakładającej produkcję betonu o niskiej zawartości wody z zachowaniem wydłużonego czasu urabialności mieszanki betonowej oraz zapewnieniu jej jakości od produkcji na węźle, poprzez transport i zabudowę.
- Centrament Air 220 – napowietrzacz należący do grupy związków powierzchniowo czynnych na bazie żywic. Domieszka o wysoce efektywnym działaniu powoduje obniżenie napięcia powierzchniowego wody, co skutkuje podczas mieszania powstawaniem stabilnych mikroporów powietrza regularnie rozmieszczonych w całej objętości betonu.
- Centrament N 11 – uniwersalny plastyfikator, szczególnie przydatny w kombinacji z superplastyfikatorami MC-PowerFlow do betonów projektowych wyższych klas o długim czasie utrzymania konsystencji.

## 4. Uzyskane parametry betonu niskoemisyjnego z placu budowy

Betony konstrukcyjne dostarczone na plac budowy tytułowej inwestycji, zostały wyprodukowane w dużej części na cemencie CEM II B-S 42,5 N-NA oraz ze względu na wymóg kontraktowy CEM I 52,5 R-NA z Cementowni Cemex. Tak przyjęte rozwiązanie przyczyniło się do obniżenia śladu węglowego wyprodukowanego 1 m<sup>3</sup>

mieszanki betonowej co zostało opisane w pierwszej części referatu. Stosowanie tego typu rozwiązań, jest możliwe wyłącznie po potwierdzeniu, że mieszanka betonowa wbudowana w poszczególne elementy konstrukcyjne pozwoli przez założony okres projektowy bezpiecznie użytkować poszczególne obiekty. Dlatego ważnym, niezmiennym elementem jest kontrola na etapie produkcji mieszanki oraz betonu stwardniałego.

Podczas realizacji przedmiotowego zadania producent betonu PBI Beton, prowadził kontrolę betonu w ramach Zakładowej Kontroli Produkcji rozszerzając zakres ilości pobieranych prób do badań. Celem było uzyskanie jak największej ilości danych osiąganych parametrów w różnych warunkach.

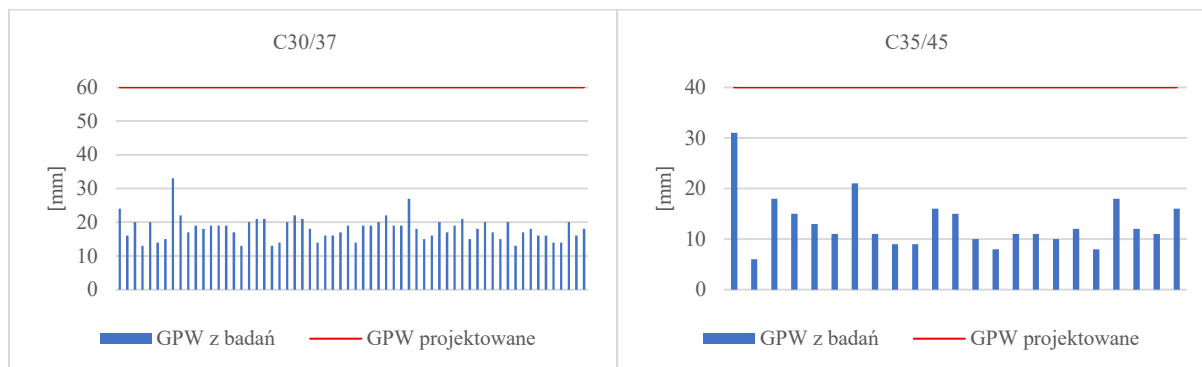
Największa produkcja przypadła na okres II kw. 2023 do III kw. 2024 roku. W tabeli 6 zestawiono projektowane parametry wraz ze średnimi uzyskanymi wynikami z dostarczonej mieszanki betonowej. W tym okresie, w szczególności rozszerzono zakres badania stopnia mrozoodporności, co przełożyło się na wykonanie 117 badań tego parametru.

Tabela 6. Parametry projektowane oraz z placu budowy

| a) Projektowane parametry                  |                                        |                                   |                                   |                                 |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Klasa betonu                               |                                        | C30/37                            | C35/45                            | C50/60                          |
| Klasa konsystencji                         |                                        | S3                                | S3                                | S3                              |
| Maksymalne uziarnienie                     |                                        | 16 [mm]                           | 16 [mm]                           | 16 [mm]                         |
| Zawartość powietrza                        |                                        | 5,5 [%]                           | 5,5 [%]                           | 5,5 [%]                         |
| Głębokość penetracji wody                  |                                        | 60 [mm]                           | 40 [mm]                           | 60 [mm]                         |
| Stopień mrozoodporności                    |                                        | F150                              | F200                              | F150                            |
| b) Wyniki otrzymane z realizacji           |                                        |                                   |                                   |                                 |
| Wytrzymałość w 28 dniu (średnia)           |                                        | 58 [MPa]                          | 62 [MPa]                          | 71 [MPa]                        |
| Zawartość powietrza                        |                                        | 4,3 ÷ 7,0 [%]                     | 4,4 ÷ 7,2 [%]                     | 4,5 ÷ 6,5 [%]                   |
| Stopień mrozoodporności                    | $\Delta fF$                            | - 4,3 ÷ 18 [%]                    | - 6,3 ÷ 18,4 [%]                  | - 8,4 ÷ 18,4 [%]                |
|                                            | $\Delta mF$                            | - 0,6 ÷ 0,3 [%]                   | - 0,5 ÷ 0,3 [%]                   | - 0,4 ÷ 0,3 [%]                 |
|                                            | Pęknięcia                              | brak                              | brak                              | brak                            |
| Głębokość penetracji wody                  |                                        | 13 ÷ 33 [mm]                      | 6 ÷ 31 [mm]                       | 4 ÷ 19 [mm]                     |
| Badania charakterystyki porów powietrznych | Całkowita zawartość powietrza - A      | 4,6 ÷ 7,7 [%]                     | 6,0 ÷ 7,8 [%]                     | 5,1 ÷ 5,7 [%]                   |
|                                            | Powierzchnia właściwa porów - $\alpha$ | 23,88 ÷ 29,63 [mm <sup>-1</sup> ] | 25,81 ÷ 31,05 [mm <sup>-1</sup> ] | 28,6 ÷ 35,1 [mm <sup>-1</sup> ] |
|                                            | Wskaźnik rozmieszczenia - L            | 0,15 ÷ 0,19 [mm]                  | 0,13 ÷ 0,18 [mm]                  | 0,14 ÷ 0,17 [mm]                |
|                                            | Zawartość mikroporów - A300            | 1,9 ÷ 3,0 [%]                     | 2,6 ÷ 3,4 [%]                     | 2,6 ÷ 3,8 [%]                   |

Badania trwałościowe, były prowadzone zgodnie z czasem równoważnym w odniesieniu do zastosowanego rodzaju cementu. Zgodnie z wymaganiami kontraktowymi w celu weryfikacji trwałości betonu prowadzono badania odporności na penetrację wody (GPW) oraz odporność na działanie mrozu (F).

Maksymalne wniknięcie wody GPW, w żadnym z betonów nie przekroczyło 40 mm. Na podstawie tego parametru, można stwierdzić, że przyjęte rozwiązania materiałowe, pod względem jakościowym i ilościowym, zostały poprawnie przyjęte, a beton uzyskał bardzo dobrą odporność na wnikanie cieczy.



Rys. 4. Maksymalne wniknięcie wody dla betonu klasy C30/37 oraz C35/45

Na potrzeby referatu oraz sprawdzenia jaką odporność na działanie mrozu uzyskają betony z niskoemisyjnym cementem CEM II B-S 42,5 N-NA, badaniom podawano próbki o różnym napowietrzeniu mieszanki. Cyklom zamrażania i rozmrażania, zostały poddane próbki z zawartością powietrza od 4,3 % do 7,2 % uzyskanych z badania za pomocą aparatu do badania zawartości powietrza w mieszance betonowej. W celu uzupełnienia uzyskiwanych wyników z metody bezpośredniej odporności na działanie mrozu, losowo pobierano próbki do badań charakterystyki porów powietrznych. Przykładowe uzyskane wyniki z tej samej partii mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Trwałość betonu konstrukcyjnego

|                                       |                                           |                      |     |         |                      |     |         |                 |     |         |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|-----|---------|----------------------|-----|---------|-----------------|-----|---------|
|                                       |                                           | C30/37               |     |         | C35/45               |     |         | C50/60          |     |         |
|                                       | Rodzaj cementu                            | CEM II B-S 42,5 N-NA |     |         | CEM II B-S 42,5 N-NA |     |         | CEM I 52,5 R-NA |     |         |
|                                       | Zawartość powietrza przed zaformowaniem   | 5,7 [%]              |     |         | 6,2 [%]              |     |         | 4,9 [%]         |     |         |
| Badanie odporności na działanie mrozu | Średnia wytrzymałość próbek mrożonych     | 62,1 [MPa]           | ΔfF | 7,6 [%] | 63,4 [MPa]           | ΔfF | 6,1 [%] | 72,2 [MPa]      | ΔfF | 4,2 [%] |
|                                       | Średnia wytrzymałość próbek porównawczych | 67,2 [MPa]           |     |         | 67,5 [MPa]           |     |         | 75,4 [MPa]      |     |         |
|                                       | Średnia masa próbek po badaniu            | 2417 [g]             | ΔmF | 0,1 [%] | 2397 [g]             | ΔmF | 0,0 [%] | 2414 [g]        | ΔmF | 0,1 [%] |
|                                       | Średnia masa próbek przed badaniem        | 2420 [g]             |     |         | 2398 [g]             |     |         | 2416 [g]        |     |         |
|                                       | Pęknięcia                                 | brak                 |     |         | Brak                 |     |         | brak            |     |         |
|                                       |                                           |                      |     |         |                      |     |         |                 |     |         |
| Badania charakterystyki porów         | Całkowita zawartość powietrza - A         | 5,5 [%]              |     |         | 6,8 [%]              |     |         | 5,2 [%]         |     |         |
|                                       | Powierzchnia właściwa porów - α           | 27,60 [mm-1]         |     |         | 31,05 [mm-1]         |     |         | 28,58 [mm-1]    |     |         |
|                                       | Wskaźnik rozmieszczenia - L               | 0,17 [mm]            |     |         | 0,14 [mm]            |     |         | 0,17 [mm]       |     |         |
|                                       | Zawartość mikroporów - A300               | 2,93 [%]             |     |         | 3,36 [%]             |     |         | 2,57 [%]        |     |         |
|                                       | Głębokość penetracji wody                 | 23 [mm]              |     |         | 18 [mm]              |     |         | 19 [mm]         |     |         |

Badanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, potwierdzało kompatybilność przyjętych rozwiązań materiałowych w szczególności działanie domieszek chemicznych z cementem niskoemisyjnym.

## 4. Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badań i analizy porównawcze potwierdzają trafność decyzję jaką był wybór cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA do zastosowania w produkcji betonu konstrukcyjnego. Uzyskane z kolei wyniki porównania receptury wysokiej klasy wytrzymałości betonu C 50/60 na obu cementach tj. CEM II/B-S 42,5 N-NA oraz CEM I 52,5 R-NA wskazują na możliwość aplikacji tego rodzaju cementu w betonach np. ustrojów nośnych oczywiście z uwzględnieniem czasu pielęgnacji i dojrzewania do uzyskania wymaganych wytrzymałości.

Odnosząc się do ilości wbudowanego cementu w elementy konstrukcyjne, zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA w klasach C30/37 oraz C35/45 ograniczyło emisję śladu węglowego wbudowanego, liczonego jako eqCO<sub>2</sub> o ponad 1000 ton, względem rozwiązania na CEM I 42,5 R-NA, co stanowi redukcję o ponad 30 %. Akceptacja możliwości zastosowania tego cementu w betonie klasy C50/60 przeznaczonym na elementy konstrukcyjne ustroju nośnego, zredukowała by ślad węglowy wbudowany o kolejne 230 ton eqCO<sub>2</sub>.

Referat pokazuje że podstawą sukcesu jest opracowanie właściwego rozwiązania materiałowego, wysoka jakość zastosowanych składników ale również powtarzalna pod względem jakościowym produkcja mieszanki. Dobór cementu, kruszyw i kompatybilnych domieszek chemicznych stanowić powinien zawsze pierwszy i zasadniczy krok w przygotowaniu optymalnych jakościowo, ale również kosztowo receptur betonowych. Również istotna jest współpraca dostawców surowców pozwalająca szybko i trafnie reagować na wyzwania z jakimi mierzy się budowa i dostawca mieszanki betonowej.

## Literatura

- [1] Deklaracje środowiskowe [www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe-iii-typu-epd-cement](http://www.cemex.pl/deklaracje-srodowiskowe-iii-typu-epd-cement),
- [2] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych, M-13-01-00 Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich,
- [3] PN EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność,
- [4] PN B 06265:2022 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność, Krajowe uzupełnienie PN EN 206+A2:2021-08
- [5] PN EN 196-9 Metody badania cementu. Część 9: Ciepło hydratacji. Metoda semiadiabatyczna.
- [6] Greenhouse gas reporting: conversion factors 2019 - GOV.UK