

**Adam Oziębły**

PORR S.A.

**Paweł Mofina**

Cemex Polska Sp. z o.o.

**Daniel Owsiak**

MC Bauchemie Sp. z o.o.

## **Doświadczenia z budowy placu postojowego dla jednostek ciężkiego sprzętu na terenie zamkniętego kompleksu wojskowego z wykorzystaniem betonu o obniżonej emisyjności.**

Experiences from the construction of a staging area for heavy equipment units within a closed military complex using low-emission concrete.

### **Streszczenie**

W obecnej sytuacji geopolitycznej Polski rozbudowa obiektów o znaczeniu militarnym jest jednym z kluczowych elementów strategii bezpieczeństwa narodowego. Nowe inwestycje w tym obszarze polegają na budowie, rozbudowie lub modernizacji co związane jest często z powstawaniem nowych placów dla sprzętu ciężkiego. Ze względu na wymagania funkcjonalne nawierzchnia z betonu cementowego jest w tym przypadku optymalnym rozwiązaniem pod względem trwałości, wytrzymałości i co bardzo ważne - szybkości realizacji oraz gotowości do obciążenia i prowadzenia dalszych robót.

Oprócz wymagań funkcjonalnych dotyczących nawierzchni betonowej przedstawionych przez Zamawiającego, istotne było również uwzględnienie rozwiązań ograniczających negatywny wpływ na środowisko. Obniżenie śladu węglowego wbudowanego to obecnie jedno z największych wyzwań branży budowlanej. Jednym z głównych źródeł emisji CO<sub>2</sub> w przypadku betonu jest cement, dlatego też sprostanie tym założeniom wymagało indywidualnego podejścia już na etapie projektowania.

W prezentowanej pracy przedstawiono proces projektowania, produkcji oraz układania maszynowego mieszanki betonowej o specjalnym przeznaczeniu z zastosowaniem zbrojenia rozproszanego oraz cementu o obniżonym śladzie węglowym CO<sub>2</sub> mianowicie CEM II/B-S 42,5 N-NA.

Odpowiednio zaprojektowana receptura na beton nawierzchniowy została dostosowana do uwarunkowań technologicznych powiązanych z możliwościami produkcyjnymi, właściwościami mieszanki betonowej i betonu oraz technologią układania, a to wymagało doskonałej współpracy między wszystkimi uczestnikami tego projektu. Jednym z istotnych doświadczeń zdobytych podczas realizacji tego projektu było potwierdzenie możliwości stosowania cementu o obniżonej emisji CO<sub>2</sub> w tego typu zastosowaniach, gdzie przyjęte rozwiązania materiałowe zapewniło uzyskanie zakładanych parametrów nośności i trwałości wykonywanej nawierzchni.

## Abstract

In Poland's current geopolitical situation, the expansion of facilities of military importance is one of the key elements of the national security strategy. New investments in this area consist of construction, expansion or modernization which is often associated with the creation of new yards for heavy equipment. Due to the functional requirements, cement concrete pavement is the optimum solution in this case in terms of durability, robustness and, very importantly, speed of implementation and readiness for loading and further work.

In addition to the functional requirements for the concrete pavement presented by the contracting authority, it was also important to consider solutions to reduce the negative impact on the environment. Reducing the embedded carbon footprint is currently one of the construction industry's biggest challenges. One of the main sources of CO<sub>2</sub> emissions for concrete is cement, so meeting these targets required a customised approach from the design stage.

This paper presents the design, production and machine placement of a special-purpose concrete mix using dispersed reinforcement and a cement with a reduced CO<sub>2</sub> footprint, namely CEM II/B-S 42.5 N-NA.

The respective formulation for the pavement concrete was adapted to the technological conditions related to production possibilities, the properties of the concrete mix and the concrete and the laying technology, and this required excellent cooperation between all participants in this project. One of the important lessons learned from this project is the confirmation of the feasibility of using CO<sub>2</sub>-reduced cement in this type of application, where the material solutions adopted ensured that the load-bearing capacity and durability of the pavement to be constructed were achieved.

## 1. Wprowadzenie

W ramach opisywanej inwestycji przewidziana była przebudowa istniejących dróg dojazdowych wewnętrznych, placów manewrowych oraz miejsc postojowych dla 600 jednostek ciężkiego sprzętu oraz pojazdów osobowych. Powierzchnia placu postojowego wynosiła ok. 72 000 m<sup>2</sup>, do ułożenia której wykorzystano 16 000 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej. W mieszance betonowej zastosowane zostało zbrojenie rozproszone w postaci włókien polipropylenowych. Prace betonowe trwały od lipca do listopada 2024 r.

## 2. Konstrukcja nawierzchni placu postojowego

Projektowane nawierzchnie przewidziane do ruchu musiały spełniać wymagania nośności dla: obciążeń 115 kN/oś oraz pojazdów gąsiennicowych o masie 67 ton. Dla nawierzchni placu postojowego przyjęto konstrukcję przedstawioną w tabeli 1.

Tabela 1. Konstrukcja nawierzchni placu postojowego.

|                                                                              |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| Warstwa ścieralna nawierzchni z betonu cementowego C30/37                    | 22 cm | 67 cm |
| Warstwa poślizgowa – emulsja kationowa wolnorozpadowa 0,4 kg/m <sup>2</sup>  |       |       |
| Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki stabilizowanej C <sub>5/6</sub>    | 15 cm |       |
| Warstwa ulepszanego podłoża z mieszanki niezwiązanej CNR                     | 30 cm |       |
| Podłoże gruntowe (G1)/ nasyp budowlany, zagęszczony do I <sub>s</sub> = 1.03 |       |       |

Projekt nawierzchni betonowej dla placu postojowego nie zakładał zastosowania dybli i kotew. Wymagane było użycie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowych mających wpływ na nośność elementu. Rozstaw szczelin dylatacyjnych wynosił 5 m.

## 3. Wymagania Specyfikacji Technicznej [1]

W tabeli 2 przedstawiono wymagania dla betonu nawierzchniowego przeznaczonego do budowy placu postojowego.

Tabela 2. Wymagania dla betonu nawierzchniowego.

| Lp. | Właściwości betonu nawierzchniowego                                 | Wymagania | Metoda badania    |
|-----|---------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|
| 1   | Klasa wytrzymałości na ściskanie wg PN – EN 206-1                   | C30/37    | PN-EN 12390-3[2]  |
| 2   | Gęstość, tolerancja do betonu wg zatwierdzonej recepty [%]          | ± 3,0     | PN-EN 12390-7 [3] |
| 3   | Wytrzymałość na zginanie [MPa]                                      | ≥ 5,5     | PN-EN 12390-5 [4] |
| 4   | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]                 | ≥ 3,0     | PN-EN 12390-6 [5] |
| 5   | Odporność na zamrażanie i odmrażanie w obecności soli odladzających | FT2       | PN-EN 12390-9 [6] |

| Lp. | Właściwości betonu nawierzchniowego                                                                                                                                     | Wymagania                  | Metoda badania                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 6   | Odporność betonu na działanie mrozu                                                                                                                                     | F150                       | PN-B-06265 [7]                                  |
| 7   | Charakterystyka porów powietrznych w betonie:<br>- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm ( $A_{300}$ ) [%]<br>- wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L [mm] | $\geq 1,5$<br>$\leq 0,200$ | PN-EN 480-11 [8]<br>PB/0/18 (dla odwiertów) [9] |
| 8   | Odporność na wnikanie benzyny i oleju [mm]                                                                                                                              | $\leq 30$                  | PN-EN 13877-2 [10]                              |

## 4. Projektowanie mieszanki betonowej

### 4.1. Dobór składników

Do betonu nawierzchniowego należy stosować materiały, które są oznakowane znakiem CE lub znakiem B i dla których Wykonawca (Producent) przedstawi Deklarację Właściwości Użytkowych (DWU) lub Krajową Deklarację Właściwości Użytkowych (KDWU), odniesione do Europejskiej Normy zharmonizowanej (ENh), Polskiej Normy wyrobu (PN), Europejskiej Oceny Technicznej (EOT) lub Krajowej Oceny Technicznej (KOT).

#### 4.1.1. Cement

Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5 N – NA jest cementem powszechnego użytku wg PN-EN 197-1 [11] i spełnia dodatkowo wymagania normy PN-B 19707 [12] jako cement niskoalkaliczny (NA). Jest to cement o normalnej wytrzymałości wczesnej (N) i klasie wytrzymałości 42,5. Jego głównymi składnikami są: klinkier cementu portlandzkiego i granulowany żużel wielkopiecowy (S).

Cement ten charakteryzuje szereg zalet, które przekładają się na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, co potwierdza wiele specjalistycznych aplikacji.

Mieszanka betonowa cechuje się:

- dobrą współpracą z domieszkami i dodatkami mineralnymi,
- bardzo dobrą urabialnością i utrzymaniem konsystencji w czasie,
- wysoką odpornością na segregację, dużą spoiistością mieszanki i więźliwością wody,
- wydłużonym czasem wiązania.

Natomiast stwardniały beton to:

- minimalizacja ryzyka destrukcji betonu jako skutku reakcji alkalicznej reaktywnego kruszywa z alkaliom,
- podwyższona odporność na agresję chemiczną środowiska,
- umiarkowany rozwój wytrzymałości wczesnej,
- wysoka wytrzymałość normowa (po 28 dniach),
- dobre i stabilne przyrosty wytrzymałości w dłuższym okresie dojrzewania (powyżej 28 dni),
- bardzo dobra stałość objętości i bardzo niski skurcz.

Zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA w przypadku najwyższych wymagań WWIORB (zarówno dotyczących nawierzchni betonowych D-05.03.04 jak i obiektów inżynierskich M-13.01.00, czyli dla obiektów budowlanych i inżynierskich klasy S4 i

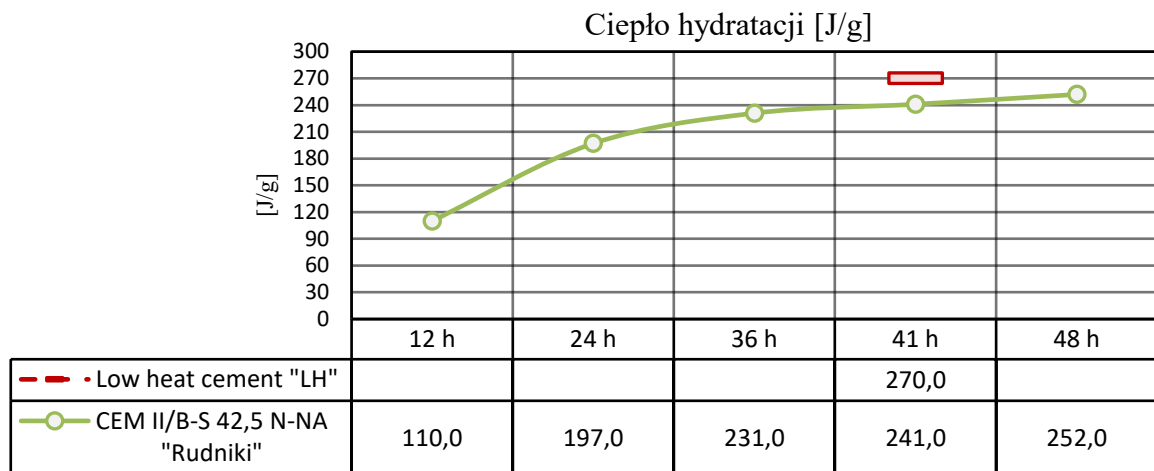
kategori oddziaływań środowiskowych E3) przekłada się na trwałość i bezpieczeństwo z uwagi na niską całkowitą zawartość alkaliów  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  w mieszance betonowej dla projektowanych receptur. Alkalia aktywne w mieszance betonowej gdzie zastosowano  $385 \text{ kg/m}^3$  cementu, osiągają wartość średnią  $1,59 \text{ kg/m}^3$ , a maksymalną (dla pojedynczych wyników) na poziomie nie przekraczającym  $2,0 \text{ kg/m}^3$ . Dopuszczalna wartość w przypadku nawierzchni betonowych to  $2,4 \text{ kg/m}^3$ , a dla elementów konstrukcji inżynierskich  $3,0 \text{ kg/m}^3$  (Tabela 3).

Tabela 3. Warunki zastosowania kruszywa do betonu w obiekcie klasy S4 w zależności od kategorii oddziaływania środowiska E oraz kategorii reaktywności kruszywa R.

| Kategoria oddziaływania środowiska | Kategoria reaktywności kruszywa                                                                                                                                                                      |                                                           |                     |                            |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
|                                    | Niereaktywne R0                                                                                                                                                                                      | Umiarkowane reaktywne R1                                  | Silnie reaktywne R2 | Bardzo silnie reaktywne R3 |
|                                    | Zawartość alkaliów aktywnych $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie w $\text{kg/m}^3$                                                                                                           |                                                           |                     |                            |
| E2                                 | maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$                                                                                                                                                                           |                                                           |                     |                            |
| E3                                 | 1. dla nawierzchni dróg maks. $2,4 \text{ kg/m}^3$<br>2. dla elementów drogowych obiektów inżynierskich oraz elementów konstrukcji bardzo trwałych do wymiany lub naprawy maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$ | Kruszyw o takiej kategorii reaktywności nie dopuszcza się |                     |                            |

Cement ten dopuszczony jest do stosowania w przypadku betonowych nawierzchni drogowych podlegających dużym obciążeniom (KR5-KR7) oraz konstrukcji obiektów inżynierskich w przypadku kategorii środowiska E3 oraz obiektów klasy S4. Zastosowanie w konstrukcji obiektów inżynierskich jest możliwe również z uwagi na umiarkowane ciepło hydratacji (Wykres 1).

Wykres 1 . Ciepło hydratacji CEM II/B-S 42,5 N – NA.



Zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N - NA pozwala zmniejszyć obciążenie dla środowiska poprzez znaczną redukcję śladu węglowego betonu. Cement ten posiada Deklarację Środowiskową III typu (EPD), która została wydana w 2021 roku i zweryfikowana w marcu 2023 przez Instytut Techniki Budowlanej (ITB). Emisja netto cementu CEM II/B-S 42,5 N - NA wynosi 327 kg CO<sub>2</sub>/t, a emisja brutto = 436 kg CO<sub>2</sub>/t. Tabela 4. ukazuje zestawienie emisji CO<sub>2</sub> na 1 tonę dwóch wybranych cementów.

Tabela 4. Porównanie emisji CO<sub>2</sub> dla produkcji CEM I 42,5 R-NA i CEM II/B-S 42,5 N-NA.

|                                                       | CEM I 42,5 R -NA<br>Rudniki | CEM II/B-S 42,5 N-<br>NA<br>Rudniki |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Emisja brutto [kg] eq CO <sub>2</sub> /[t]<br>cementu | 643                         | 436                                 |
| Emisja netto [kg] eq CO <sub>2</sub> /[t] cementu     | 481                         | 327                                 |
| Redukcja eq CO <sub>2</sub> [%] *                     | <b>32</b>                   |                                     |

\*wyliczenie dla wbudowanej ilości cementu równej – 6 tys. ton

Porównując emisję eqCO<sub>2</sub> brutto pochodzącą z cementu użytego do wyprodukowania betonu i odnosząc ją do teoretycznego wykonania takiego projektu placu na cementcie CEM I, otrzymujemy różnicę na poziomie niemal 1275 ton eqCO<sub>2</sub>. Jest to redukcja wbudowanego śladu węglowego o ponad 32 %. Za taką wartość emisji eqCO<sub>2</sub> odpowiada przykładowo 455 samochodów osobowych, które rocznie pokonują około 20 000 km.

#### 4.1.2. Kruszywo

Do produkcji mieszanki betonowej zastosowane zostało kruszywo grube pochodzenia granitowego, poddane obróbce mechanicznej w celu uzyskania trzech frakcji: 2/8 mm, 8/16 mm i 16/22 mm.

Jako kruszywo drobne zastosowany został piasek naturalny frakcji 0/2 mm.



Rys. 1. Grys granitowy.

#### 4.1.3. Domieszki

W produkcji betonów z cementami o zmniejszonym śladzie węglowym zawierających większą ilość dodatków, bardzo ważne jest zastosowanie domieszek chemicznych, które są kompatybilne z danym cementem. Dlatego do produkcji betonu nawierzchniowego użyto plastyfikator Centrament N11 i napowietrzacz Centrament Air 202T firmy MC-Bauchemie. Zastosowanie Centramentu N11 pozwoliło zmniejszyć ilość wody zarobowej, a co za tym idzie uzyskać bardziej zwarty i stwardniały zaczyn cementowy, co w rezultacie pozwala otrzymać beton o lepszych parametrach. W przypadku betonów nawierzchniowych (ze względu na ich specyfikę) niezwykle ważnym aspektem jest odpowiednie dobranie domieszki napowietrzającej dla uzyskania właściwej struktury napowietrzenia. Zastosowanie Centrament Air 202T pozwoliło na wprowadzenie do mieszanki równomiernie rozłożonych licznych mikropęcherzy o średnicy < 0,3 mm, co potwierdziły wyniki badań wstępnych. Obie domieszki posiadają Deklarację Środowiskową EPD.

#### 4.1.4. Dodatki

Zastosowanie włókien w nawierzchniach betonowych to skuteczny sposób na zwiększenie wytrzymałości, trwałości i odporności na uszkodzenia, co jest szczególnie istotne w przypadku nawierzchni, które są narażone na intensywne użytkowanie i zmienne warunki atmosferyczne. Dlatego w produkcji zastosowano włókna polimerowe MC-Fibre 4024 SP 24 mm w rozpuszczalnych 2 kg opakowaniach. Użycie MC-Fibre 4024 SP 24 mm w mieszance poprawia wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, jak również ograniczają skurcz plastyczny i skurcz wysychania, minimalizując tym samym ryzyko pęknięć. Ważnym aspektem jest również łatwość i

równomierne rozproszczenie włókna w całej objętości betonu oraz brak wystającego zbrojenia w ułożonej nawierzchni.



Rys. 2. Włókna w betonie.

#### 4.2. Skład receptury mieszanki betonowej

Jak pisał A. M. Neville w książce „Właściwości betonu” [13] - „Dobór składu mieszanki jest zatem, mówiąc najprościej, procesem wyboru dogodnych składników betonu i określenie ich wzajemnych stosunków w ten sposób, aby zapewnione było wykonanie betonu na tyle oszczędnie, na ile jest to możliwe przy zachowaniu minimalnych wymagań właściwości, zwłaszcza wytrzymałości, trwałości i potrzebnej konsystencji”. W opisywanym projekcie opracowanie składu mieszanki betonowej nie polegało tylko na spełnieniu wymagań zawartych w ST co do mieszanki i stwardniałego betonu, ale również miało gwarantować prawidłowe wbudowanie w element. Wiązało się to z zapewnieniem optymalnego składu ziarnowego dostosowanego m.in. do sposobu zagęszczania mieszanki oraz wykończenia górnej powierzchni. Dobór odpowiednich domieszek chemicznych miał gwarantować nie tylko prawidłową urabialność oraz właściwą strukturę napowietrzenia, ale również w jak największym stopniu usprawnienie układania nawierzchni. Ostateczny skład mieszanki (tabela 5) betonowej został opracowany na podstawie szeregu przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników laboratoryjnych.

Tabela 5. Skład mieszanki betonowej do układania maszynowego.

| Składnik        |                      |                      | Pochodzenie  | Ilość [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|----------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| Cement          | CEM II/B-S 42,5 N-NA |                      | Cemex        | 385                        |
| Woda            |                      |                      | -            | 143                        |
| Kruszywo drobne | piasek               | 0/2                  | -            | 574                        |
| Kruszywo grube  | grys granitowy       | 2/8                  | -            | 1219                       |
|                 |                      | 8/16                 |              |                            |
|                 |                      | 16/22                |              |                            |
| Domieszka       | uplastyczniająca     | Centrament N11       | MC-Bauchemie | 2,31                       |
|                 | napowietrzająca      | Centrament AIR 202 T |              | 1,16                       |
| Włókna          | polipropylenowe      | MC-Fibre 4024        |              | 2,00                       |

## 5. Realizacja

### 5.1. Produkcja

Wytwórnia betonu usytuowana była obok placu budowy. Składała się ona z 4 silosów na cement, 8 zasobników szeregowych na kruszywo oraz magazynu na dodatki i domieszki chemiczne. Dwa mieszalniki, każdy o pojemności 3,5 m<sup>3</sup>, uzyskiwały wydajność maksymalną 200 m<sup>3</sup>/h.

### 5.2. Transport i wbudowanie

Transport mieszanki betonowej odbywał się samochodami ze skrzyniami stalowymi. Odległość od wytwórni betonu do miejsca wbudowania wynosiła maksymalnie 1 km. Liczba środków transportowych zapewniała ciągłość pracy zespołu układającego. Wbudowywanie mieszanki betonowej odbywało się w opcji jednowarstwowej. Praca wykonywana była przez zespół rozkładarek Wirtgen Sp 1500. Pierwsza maszyna z zestawu układała mieszankę betonową w pasie o szerokości od 8 m do 10 m, a druga z pomostem roboczym nadawała teksturę i наносiła preparat ochronny na nawierzchnię. Średnia prędkość układania wynosiła 0,9 m.b./min.



Rys. 3. Układanie nawierzchni.

W celu zapewnienia odpowiedniej makrotekstury poprawiającej bezpieczeństwo ruchu, zastosowano teksturowanie powierzchni betonu przy użyciu automatycznej szczotki stanowiącej integralną część maszyny układającej. Uzyskano w ten sposób rysę w kierunku poprzecznym.



Rys. 4. Tekstura nawierzchni.

### 5.3. Pielęgnacja

Na górną powierzchnię świeżo ułożonej mieszanki betonowej naniesiono maszynowo środek do pielęgnacji betonu. Powierzchnie boczne zabezpieczone zostały przy użyciu opryskiwacza ręcznego. Preparat na bazie dyspersji parafinowej tworząc ciekłą i szczelną warstwę zapewniał ochronę przed szybkim odparowaniem wody z

powierzchni betonu. Pozwoliło to na optymalny przebieg procesu hydratacji we wierzchniej warstwie betonu oraz zminimalizowało ryzyko powstania wczesnych rys skurczowych.

## 6. Właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu

### 6.1. Właściwości mieszanki betonowej

Parametry mieszanki betonowej takie jak konsystencja, zawartość powietrza oraz temperatura kontrolowane były z częstotliwością nie rzadszą niż raz na godzinę, natomiast gęstość raz na działkę roboczą. Konsystencja mieszanki betonowej uzależniona była m.in. od warunków atmosferycznych oraz szybkości realizacji robót. W tabeli 6 przedstawiono wyniki badań kluczowych parametrów mieszanki betonowej.

Tabela 6. Wyniki badań mieszanki betonowej

| Lp. | Właściwości mieszanki betonowej | Wymagania            | Wyniki badań |
|-----|---------------------------------|----------------------|--------------|
| 1   | Konsystencja, metoda Vebe [s]   | 3÷20                 | 10÷20        |
| 2   | Zawartość powietrza [%]         | 4,5÷6,0 (-0,5; +1,0) | 4,5÷5,9      |

### 6.2. Właściwości stwardniałego betonu

Kontrola parametrów wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzana była na serii 3 próbek dla każdego badania z działki roboczej. Pozostałe parametry trwałościowe kontrolowane były co 30 000 m<sup>2</sup> ułożonej nawierzchni. Przedstawione w tabeli 7 wyniki badań potwierdzają spełnienie zakładanych w recepturze parametrów stwardniałego betonu.

Tabela 7. Wyniki badań betonu.

| Lp. | Właściwości betonu nawierzchniowego                                                                                                                                                                                                        | Wymagania             | Wyniki badań                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1   | Wytrzymałości na ściskanie [MPa]                                                                                                                                                                                                           | ≥ 41,0                | 46,0÷56,1                         |
| 2   | Wytrzymałość na zginanie [MPa]                                                                                                                                                                                                             | ≥ 5,5                 | 5,9÷6,0                           |
| 3   | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]                                                                                                                                                                                        | ≥ 3,0                 | 3,75÷4,45                         |
| 4   | Odporność na zamrażanie i odmrażanie w obecności soli odładzających:<br>- ubytek masy po 28 cyklach ( $m_{28}$ ) [kg/m <sup>2</sup> ]<br>- ubytek masy po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) [kg/m <sup>2</sup> ]<br>- stopień ubytku $m_{56}/m_{28}$ | ≤ 0,5<br>≤ 1,0<br>≤ 2 | 0,12÷0,14<br>0,22÷0,27<br>1,8÷1,9 |
| 5   | Odporność betonu na działanie mrozu<br>- ubytek masy [%]<br>- spadek wytrzymałości na ściskanie [%]                                                                                                                                        | ≤ 5<br>≤ 20           | 0,1<br>4,8÷8,4                    |
| 6   | Charakterystyka porów powietrznych w betonie:                                                                                                                                                                                              | ≥ 1,5                 | 2,6÷3,0                           |

| Lp. | Właściwości betonu nawierzchniowego                                                                                    | Wymagania    | Wyniki badań |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
|     | - zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm ( $A_{300}$ ) [%]<br>- wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L [mm] | $\leq 0,200$ | 0,113÷0,162  |
| 7   | Odporność na wnikanie benzyny i oleju [mm]                                                                             | $\leq 30$    | 23÷25        |

## 7. Podsumowanie

Przyjęcie odpowiednich rozwiązań materiałowych i wysoki reżim produkcyjny zagwarantował powtarzalność reologiczną mieszanki. W zestawieniu z prawidłowym jej wbudowaniem, zapewnił uzyskanie zakładanych parametrów nośności i trwałości wykonywanej nawierzchni. W dobie zmian wynikających z ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w produkcji cementu, Generalni Wykonawcy, coraz częściej sięgają po cementy o mniejszym wskaźniku klinkierowym i większej ilości dodatków mineralnych. Głównym celem autorów referatu było pokazanie, że w dobrze zaplanowanym procesie technologicznym, poczynając od projektowania recepty aż do wykonania elementu, można stosować rozwiązania niskoemisyjne w nawierzchniach betonowych. Takie podejście znakomicie sprawdza się nie tylko na drogach eksploatowanych przez tradycyjny transport kołowy, ale również w nawierzchniach infrastruktury wojskowej. Wybór cementu, kruszyw i kompatybilnych domieszek chemicznych to zaledwie pierwszy krok w przygotowaniu mieszanek betonowych. Całą realizację poprzedziły liczne badania świeżej mieszanki i stwardniałego betonu, których wyniki potwierdziły możliwość zastosowania projektowanego rozwiązania. Proces układania nawierzchni przebiegał w sposób przewidywalny i powtarzalny, a wyniki badań próbek odwierconych z gotowej nawierzchni potwierdziły spełnienie założonych parametrów jakościowych. Przeglądając się aktualnej sytuacji geopolitycznej w naszym kraju, można założyć, że w perspektywie najbliższych lat pojawi się zwiększone zapotrzebowanie na tego typu realizacje. Wykonywana praca i zdobyte doświadczenie pozwolą z większą pewnością i w szerszym zakresie wykorzystywać składniki o zredukowanym śladzie węglowym w przyszłych inwestycjach.

## 8. Literatura

- [1] Specyfikacje Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. ST-12. Nawierzchnia betonowa.
- [2] PN -EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [3] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu.
- [4] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu -Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- [5] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.

- [6] PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu - Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie.
- [7] PN-B-06265 Beton-Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 26+A2:2021-08.
- [8] PN -EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zapraw i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [9] Procedura badawcza GDDKiA PB/0/18.
- [10] PN-EN 13877-2:2024-05 Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dotyczące nawierzchni betonowych.
- [11] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [12] PN-B 19707:2023 Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [13] A.M. Neville: Właściwości betonu. V edycja, Kraków 2012.