

mgr inż. Paula Karwowska

Budimex S.A

mgr inż. Patryk Chmura

P.P.M.B. „Bosta Beton” Sp. z o.o.

"Projektowanie betonu o obniżonej migracji jonów chlorkowych – studium przypadku z realizacji kontraktu Baltic Hub T3 Terminala w Gdańsku"

“Design of concrete with reduced chloride ion migration - a case study based on the Baltic Hub T3 Terminal in Gdańsk.”

Streszczenie

Budowa terminala Baltic Hub T3 w Gdańsku stanowi jedną z kluczowych inwestycji infrastrukturalnych w rejonie Morza Bałtyckiego, zwiększając możliwości przeładunkowe i umacniając pozycję Polski w międzynarodowej wymianie handlowej. W niniejszym artykule przedstawiono studium przypadku projektowania betonu o obniżonej migracji jonów chlorkowych dla potrzeb konstrukcyjnych tego obiektu, ze szczególnym uwzględnieniem surowych wymagań dotyczących trwałości w agresywnym środowisku morskim, zwłaszcza w strefie rozbryzgu, gdzie mgły i aerozole bogate są w chlorki, poddane cyklicznemu rozmrażaniu i zamrażaniu. Zaprezentowano podejście i wyzwania, które stawiane są przed Wykonawcą oraz Dostawcą betonu towarowego.

W artykule omówiono główne założenia technologiczne, w tym dobór rodzaju cementu, ograniczenie stosunku wodno-cementowego oraz zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych, co pozwoliło na uzyskanie niskiej porowatości i wysokiej szczelności matrycy cementowej. Istotną część opracowania stanowią badania laboratoryjne i terenowe, w tym testy przepuszczalności metodą NT Build 492, prowadzone w trakcie rocznego okresu dostaw betonu, które potwierdziły skuteczność projektowanej mieszanki. W pracy zwrócono również uwagę na praktyczne wyzwania związane z poborem próbek do badań.

Uzyskane wyniki mogą być cenną wskazówką w zakresie doboru materiałów i metod badawczych w innych realizacjach, gdzie istnieje istotne ryzyko korozji zbrojenia wywołanej migracją jonów chlorkowych. Studium przypadku pokazuje, że kompleksowe podejście do doboru składników betonu oraz jego kontroli pod kątem agresji chlorkowej pozwala zapewnić długookresową trwałość konstrukcji, obniżając koszty utrzymania i przekładając się na bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacyjną całej inwestycji.

Abstract

The construction of the Baltic Hub T3 Terminal in Gdańsk is one of the key infrastructure investment projects in the Baltic Sea region aimed at increasing cargo

handling capacity and strengthening Poland's position in international trade. This article presents a case study on the design of concrete with reduced chloride ion migration specifically tailored to meet the structural requirements of the terminal. Special attention is given to the stringent durability criteria required for demanding marine environment, particularly in the splash zone, where concrete is exposed to chloride-rich mists and aerosols along with cyclical freezing and thawing process. The study outlines some challenges that the Contractor and the supplier of ready-mixed concrete had to face in the course of execution.

The article presents the main technological assumptions, including the selection of cement type, reduction of the water-to-cement ratio, and the use of suitable chemical admixtures, all of which contributed to achieving low porosity and high cement matrix density. A significant part of the study is dedicated to laboratory and field tests, such as permeability tests using the NT Build 492 method, conducted over a one-year period of concrete deliveries. These tests confirmed the effectiveness of the designed concrete mix. The study also highlights practical challenges related to sample collection for testing.

The findings serve as a valuable reference and guidance for selecting materials and testing methodologies in future projects where chloride-induced reinforcement corrosion poses a significant risk. This case study demonstrates that a comprehensive approach to the selection of concrete components and its quality control in terms of chloride aggression ensures long-term structural durability, minimizes maintenance costs, and enhances both safety and operational efficiency of the entire investment.

1.Wprowadzenie

Eksplotacja żelbetowych konstrukcji w strefach nadmorskich wiąże się z intensywnym oddziaływaniem środowiska agresywnego, w szczególności z obecnością jonów chlorkowych pochodzących z wody morskiej, aerozoli solnych oraz stosowania soli odladzających. Jony chlorkowe penetrują beton, prowadząc do utraty pasywności stali zbrojeniowej i inicjacji korozji. Szczególnie niebezpieczne są warunki zmienne, takie jak strefa rozbryzgu czy przemienne zamrażanie i rozmrażanie.

Agresja chemiczna spowodowana działaniem wody morskiej na beton wynika z obecności wielu rozpuszczalnych soli w jej składzie. Zasolenie wód morskich oraz oceanicznych wynosi na ogół 3,5%. Odbiega od tego zasolenie Bałtyku, które wynosi zaledwie 0,7%, a Morza Martwego 31,5%. We wszystkich morzach proporcje soli są praktycznie stałe i na przykładzie Oceanu Atlantyckiego wynoszą odpowiednio: chlorki 2,00%, siarczany 0,28%, kationy sodu 1,11%, magnezu 0,14%, wapnia 0,05%, potasu 0,04%. W wodzie morskiej znajduje się również pewna ilość rozpuszczonego CO₂. Płytkie rejony blisko brzegu, szczególnie w klimacie gorącym, gdzie ma miejsce intensywne parowanie, mogą zawierać większe stężenie soli.

Przemienne zwilżanie i osuszanie powierzchni betonu tworzy znacznie ostrzejsze warunki dla betonu, niż te, gdzie jest stale zanurzony. Jest to spowodowane odkładaniem się soli na powierzchni betonu oraz w porach z racji wnikania wody morskiej i odparowywania czystej wody. Wietrzenie solankowe może obejmować strefę do głębokości kilku milimetrów i działać erozyjnie na zaczyn cementowy i

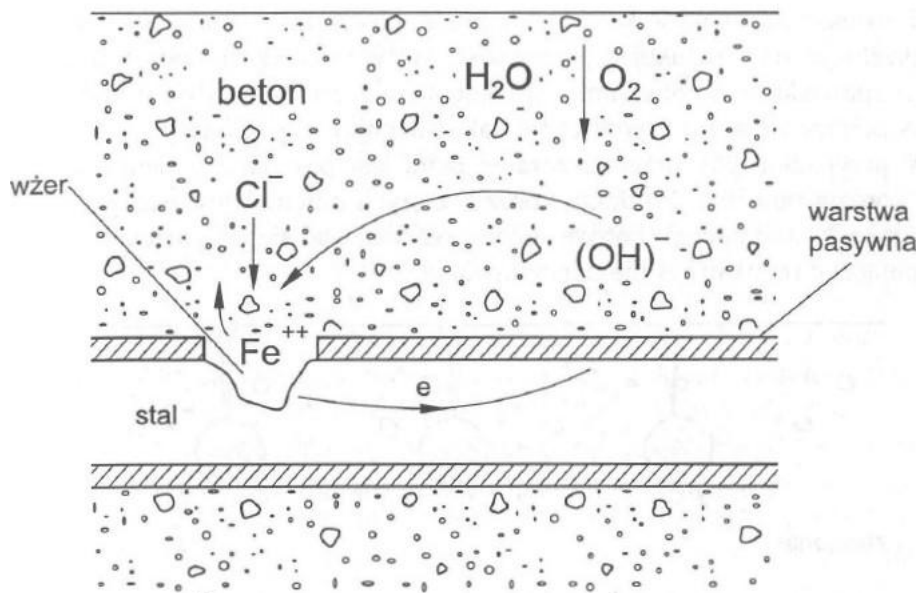
zatopione w nim kruszywo. Wybór odpowiedniego kruszywa dla trwałości takiego elementu jest kluczowe, tak samo jak betonu, który wykazuje niską przepuszczalność strefy powierzchniowej.

Zabezpieczenie konstrukcji w takich warunkach wymaga projektowania betonu o wysokiej szczelności, odpowiedniej mikrostrukturze i ograniczonej przepuszczalności dla agresywnych mediów. W tym celu stosuje się m.in. cementy wieloskładnikowe, domieszki chemiczne oraz kontrolę składu granulometrycznego kruszyw.

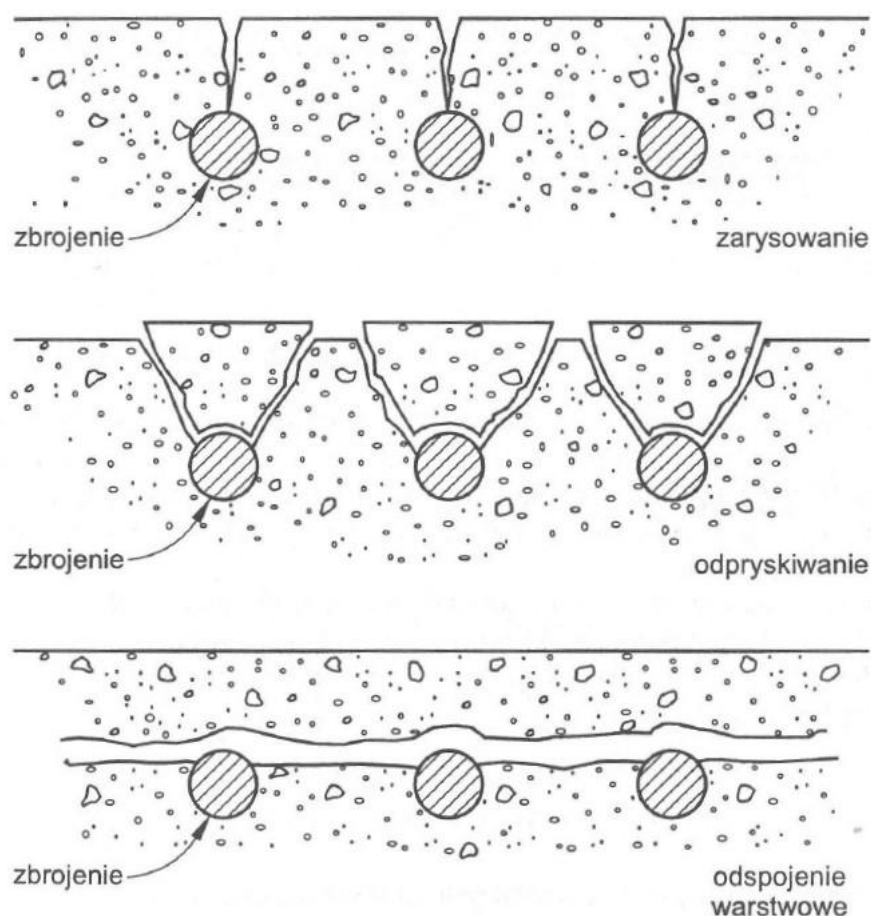
2.Korozja chlorkowa

Zdecydowanie najbardziej niszczący efekt działania wody morskiej na konstrukcje betonowe wywołany jest działaniem chlorków na stal zbrojeniową. Zniszczenie betonu otaczającego stal jest konsekwencją tej korozji. Korozja zbrojenia jest jedną z głównych przyczyn niszczenia konstrukcji żelbetowych.

Mechanizm korozji zbrojenia następuje w obecności wody i tlenu, gdy zostanie uszkodzona warstwa pasywna zabetonowanej stali przez jony chlorkowe. Warstwa ta tworzy się wkrótce po rozpoczęciu procesu hydratacji cementu i składa się z cząstek $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ściśle przyległych do powierzchni stali. Korozja w suchym betonie, w pełni zanurzonej oraz prawdopodobnie poniżej 60% wilgotności względnej nie występuje – chyba, że w wodzie zawarty jest rozpuszczony tlen. Wilgotność optymalna dla przebiegu procesu korozji wynosi 70-80%.



Rysunek 1. Przebieg korozji elektrochemicznej w obecności chlorków [7].



Rysunek 2. Powstawanie zniszczeń wywołanych korozją: zarysowania, odpryskiwanie, odspojenia warstwowe [7].

Chlorki mogą występować w betonie przez wprowadzenie ich do mieszanki z zanieczyszczonym kruszywem, wodą morską lub lekko zasoloną np. z rzeki. Wymienione składniki nie powinny być zastosowane do wytwarzania żelbetu i normy ograniczają zawartość chlorków w betonie niezależnie od jego pochodzenia. Norma PN-EN 206 dopuszcza maksymalnie 1% zawartości jonów chlorkowych w stosunku do masy cementu w betonie niezbrojonym, 0,2% w żelbecie i 0,1% w elementach sprężonych. Kluczowe są chlorki rozpuszczalne w wodzie, które stanowią tylko część całkowitej zawartości chlorków. Całkowita zawartość chlorków określana jest jako zawartość chlorków rozpuszczalnych w kwasach, którą można oznaczyć na podstawie m.in. ASTM C 1152-90 lub PN-EN 14629. Źródłem chlorków może być również cement, który zazwyczaj zawiera ich poniżej 0,10% masy. Woda pitna może zawierać 250 ppm jonów chlorkowych, co przy stosunku $w/c = 0,40$ wprowadziłaby do mieszanki betonowej mniej więcej tyle samo chlorków co cement portlandzki.

Problem korozji chlorkowej pojawia się zazwyczaj, gdy jony chlorkowe wnikają do wnętrza betonu. Ich źródłem najczęściej jest sól, stosowana do usuwania lodu czy woda morska. Chlorki mogą być również transportowane przez drobne kropelki wody morskiej unoszące się w powietrzu. Odnotowano przypadek, gdzie chlorki utrzymywały się w powietrzu na odległości 2 km. Niezależnie od źródła, chlorki przenikają do wnętrza betonu w wyniku przepływu roztworów je zawierających, dyfuzji jonów Cl^- czy

absorpcji. Przemienne zwilżanie i wysychanie betonu powoduje stopniowe wnikanie soli w kierunku stali zbrojenia. Maksymalna zawartość jonów chlorkowych w porach kapilarnych może przewyższać ich zawartość w wodzie morskiej – fakt taki odnotowano po 10 latach użytkowania betonu w sąsiedztwie wody morskiej. Beton w strefie przyptywów (krótki okres wysychania) jest mniej podatny na korozję niż w strefie spryskiwania (zwilżanie następuje tylko, gdy morze jest wzburzone lub występuje silny wiatr). Najbardziej narażony na korozję jest beton zwilżany przez wodę morską tylko okazjonalnie np.: wokół pachołów cumowniczych czy hydrantów z których pobierana jest woda morską.

Nie istnieje graniczna – uniwersalna wartość zawartości chlorków przy powierzchni stali zbrojeniowej, która powoduje jej korozję. Nadmierna ilość chlorków w wyjściowej mieszance pociąga za sobą intensyfikację procesów korozyjnych wywołanych czynnikami zewnętrznymi. Występuje wówczas większa szybkość korozji od tej niż, gdyby ta sama ilość chlorków wniknęła do betonu podczas eksploatacji. Zabezpieczenie przed korozją sprowadza się do ograniczenia wnikania chlorków poprzez kontrolę grubości otuliny zbrojenia oraz przepuszczalność otuliny betonu. Warto nadmienić, iż całkowita zawartość chlorków nie decyduje o tym, czy korozja nastąpi, czy nie. Część chlorków ulega związaniu podczas procesu hydratacji, a inna część jest związana fizycznie na powierzchni porów żelowych. Kluczowe dla agresji chlorkowej są wolne chlorki, które są zawsze obecne w cieczy porowej i występują w nadmiarze w stosunku do jonów koniecznych do zachowania równowagi.

Podstawową formą wiązania jonów chlorkowych w betonie jest ich reakcja z C_3A . Produktem tej reakcji jest sól Friedela. Wysoka zawartość cementu, bogatego w glinian trójwapniowy jest pożądana, aby zwiększyć odporność na korozję chlorkową betonu. W przypadku cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy, wiązanie chlorków może następować również przez glinian, występujące w żużlu, co jednak nie zostało w pełni potwierdzone. Obecność znacznej ilości siarczanów w wodzie morskiej powoduje reakcję pomiędzy jonami C_3A i $C-S-H$ w wyniku czego powstaje ettringit. Nie powoduje to jednak szkodliwej ekspansji, ponieważ w obecności chlorków jest rozpuszczalny i może być wypłukiwany przez wodę morską, jednak zaleca się aby ograniczać zawartość C_3A w cemencie do 8-10% w zależności od stężenia SO_3 . Należy mieć na uwadze, że jego wysoka zawartość (C_3A) nie jest zalecana, ponieważ wpływa niekorzystnie na korozję siarczanową oraz przyczynia się do szybkiego wczesnego wydzielania ciepła – co nie jest korzystne w masywnych elementach. Projektując beton należy wziąć pod uwagę wszystkie zagrożenia i szukać kompromisu, który okaże się najbardziej bezpieczny dla danej konstrukcji. Stosowanie cementów bogatych w dodatki typu II jest pożądaną, ponieważ znacznie redukuje przepuszczalność betonu, zwiększając jego opór właściwy i zmniejszając tym samym szybkość korozji.

3. Założenia i wymagania Kontraktu

3.1 Charakterystyka inwestycji

Terminal DCT T3 w Gdańsku to jedna z największych inwestycji morskich w Polsce, realizowana w bezpośrednim sąsiedztwie Zatoki Gdańskiej. Ze względu na lokalizację

i funkcję, konstrukcje żelbetowe narażone są na długotrwałe działanie czynników korozyjnych, w tym chlorków i zmiennych warunków klimatycznych. Kluczowym założeniem kontraktu było ograniczenie ryzyka korozji zbrojenia w długim okresie eksploatacji, poprzez zastosowanie betonu charakteryzującego się niską przepuszczalnością i wysoką trwałością w środowisku agresji chlorkowej. Wymagania te zostały wyrażone zarówno w dokumentacji projektowej, jak i w warunkach technicznych dostaw betonu, uwzględniających konieczność spełnienia określonych parametrów potwierdzonych odpowiednimi badaniami, m.in. według metody NT Build 492.



Zdjęcie 1. Widok nowopowstałego Terminala T3
Źródło: Budimex S.A.

3.2 Wymagania techniczne

Dokumentacja kontraktowa określała maksymalny współczynnik migracji jonów chlorkowych wg metody NT Build 492, dostosowany do klasy ekspozycji XS3/XD3. Dodatkowo wymagano stopnia mrozoodporności F200 oraz odporności na sole odladzające w kategorii FT2. Beton musiał również spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości (min. C35/45) oraz niskiej zawartości jonów chlorkowych ogółem ($Cl^- \leq 0,10\%$).

W dokumentacji kontraktowej jednoznacznie określono wymagania dotyczące trwałości betonu w kontekście migracji jonów chlorkowych. Jednym z podstawowych

kryteriów było osiągnięcie odpowiednio niskiego współczynnika migracji, potwierdzonego metodą badawczą NT Build 492 – zgodnie z którą dopuszczalna wartość współczynnika migracji wynosiła maksymalnie $X \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^*$ (w zależności od elementu i jego lokalizacji w konstrukcji). Tak zdefiniowane wymagania stanowiły istotne ograniczenie technologiczne, które determinowało dobór składników betonu, parametry mieszanki oraz procedury kontroli jakości na etapie produkcji i wbudowywania.

4. Proces projektowania receptury betonu

4.1 Cele projektowe

Głównym celem projektowania receptury betonu przeznaczonego do realizacji konstrukcji terminalu DCT T3 było zapewnienie długoterminowej trwałości materiału w warunkach silnej ekspozycji na jony chlorkowe. Założenia technologiczne obejmowały przede wszystkim uzyskanie niskiego współczynnika migracji chlorków, zgodnego z wymaganiami kontraktowymi, co miało kluczowe znaczenie w kontekście ochrony zbrojenia przed korozją. Równocześnie beton musiał spełniać wymagania w zakresie wytrzymałości na ściskanie ($\geq \text{C35/45}$) oraz zapewniać trwałość zgodnie z zakładanym okresem użytkowania konstrukcji, wynoszącym co najmniej 100 lat.

Cele projektowe były ściśle powiązane z zapisami dokumentacji technicznej inwestycji oraz wymaganiami Zamawiającego i Inwestora, które kładły nacisk na jakość, trwałość i odporność materiałów na czynniki środowiskowe. Projektowana mieszanka betonowa musiała zatem łączyć właściwości wytrzymałościowe z bardzo wysoką szczelnością strukturalną, a cały proces jej opracowania podporządkowano osiągnięciu spójnych parametrów zarówno na etapie badań laboratoryjnych, jak i w rzeczywistych warunkach budowy.

4.2 Dobór składników

4.2.1 Cement

W projektowanej mieszance zastosowano cement hutniczy - CEM III/A, którego głównym składnikiem jest żużel wielkopiecowy, istotnie wpływający na poprawę trwałości betonu w środowiskach agresywnych chemicznie, w tym chlorkowych. Dodatki typu II – zarówno o właściwościach pucolanowych, jak i hydraulicznych – odgrywają kluczową rolę w nowoczesnej technologii betonu. Pucolany reagują z wodorotlenkiem wapnia, natomiast dodatki hydrauliczne, po aktywacji, wykazują własności wiążące. Efektem obydwóch tych procesów jest wytworzenie dodatkowych produktów hydratacji, poza fazami klinkierowymi, które powstają podczas hydratacji. Produkty te doszczelniają mikrostrukturę zaczynu oraz betonu. Dodatkowa ilość fazy C-S-H o niskim stosunku C/S tworząca się po dłuższym okresie dojrzewania przerywa kapilary, co istotnie wpływa na współczynnik dyfuzji jonów stwardniałej matrycy cementowej.

Przyczynia się to do zwiększenia trwałości betonów z dodatkami w środowisku agresywnym chemicznie. Odporność korozyjna betonów ma duży związek z mikrostrukturą oraz składem fazowym. W przypadku mikrostruktury, największa

różnica wynika ze zmniejszenia porowatości kapilarnej na rzecz porowatości żelowej. Ogranicza to współczynnik dyfuzji agresywnych mediów nawet o kilka rzędów wielkości w stosunku do odpowiednich betonów opartych na cemencie portlandzkim.

4.2.2 Domieszki chemiczne

Domieszki redukujące ilość wody

Domieszki upłynniające, zastosowane w recepturze, umożliwiają obniżenie ilości wody zarobowej przy zachowaniu wymaganej urabialności mieszanki. Wpływa to korzystnie na zagęszczenie struktury betonu, zmniejszenie porowatości oraz podniesienie jego wodoszczelności. Efektem jest ograniczenie kapilarnego transportu wody i agresywnych jonów (m.in. chlorków i siarczanów), co znacząco poprawia trwałość oraz odporność betonu na korozję stali zbrojeniowej. Szczególnie istotne jest zmniejszenie powierzchniowej nasiąkliwości, co ogranicza gromadzenie się soli na powierzchni i wzmacnia mrozoodporność betonu.

Domieszki napowietrzające

W celu uzyskania odpowiedniej odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie zastosowano domieszki napowietrzające, pozwalające na tworzenie i stabilizację równomiernie rozproszonych mikroporów powietrznych. Taki układ porów skutecznie przerywa sieć porów kapilarnych, ograniczając absorpcję wody i jej penetrację w głąb betonu. Jednocześnie mikropory działają jak bufor w przypadku zamarzającej wody, zwiększając odporność na uszkodzenia mrozowe. Napowietrzenie korzystnie wpływa także na urabialność mieszanki betonowej.

4.2.3 Kruszywo

W doborze kruszywa kierowano się zarówno jego właściwościami mechanicznymi, jak i fizycznymi. Zastosowane kruszywo amfibolitowe charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie oraz niską porowatością, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszoną nasiąkliwość betonu i jego lepszą mrozoodporność. Kluczowe znaczenie miał również optymalny dobór uziarnienia, w tym proporcji kruszywa grubego i drobnego, co umożliwiło uzyskanie szczelnego i stabilnego stosu okrucowego, poprawiającego szczelność oraz jednorodność gotowej mieszanki betonowej.

5. Receptura betonu i jej uzasadnienie

5.1 Skład receptury i właściwości technologiczne mieszanki

Receptura betonu zaprojektowana na potrzeby realizacji terminalu DCT T3 została opracowana z uwzględnieniem wysokich wymagań w zakresie trwałości, szczelności i odporności na agresję środowiskową. Główne składniki oraz ich źródła przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Składniki mieszanki betonowej

Składniki	Surowce
Cement	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA - Ożarów
Kruszywo drobne	Piasek 0/2 mm
Kruszywo grube	Grys amfibolitowy 2/8 mm
Kruszywo grube	Grys amfibolitowy 8/16 mm
Plastyfikator	Baza chemiczna: lignosulfoniany
Superplastyfikator	Baza chemiczna: PCE
Napowietrzacz	Baza chemiczna: syntetyczne tensydy
Woda	Woda wodociągowa

Właściwości uzyskanej mieszanki betonowej oraz deklarowane parametry techniczne przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości betonu

Zasadnicze charakterystyki	Deklarowane właściwości
Klasa wytrzymałości na ściskanie	C35/45
Klasa konsystencji	S3
Stosunek wodno-cementowy	<0,40
Klasy ekspozycji	XC4 XS3 XD3 XF4 XA3 XM3
Klasy zawartości chlorków	Cl 0,10
D _{max} [mm]	16
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	40
Stopień mrozoodporności	F200
Kategoria odporności na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odładzających	FT2

Zgodnie z wymaganiami Dokumentacji Kontraktowej w przypadku stosowania cementu CEM III i dla globalnej klasy temperatury określonej (dla realizowanej Inwestycji jako XT1) cechującej się średniorocznym zakresem temperatur 5,0-15,0°C przyjmuje się wymagania dotyczące trwałości betonu w odniesieniu do korozji wywołanej chlorkami - zawartość w tabeli 3.

Tabela 3. Wymagania dotyczące trwałości betonu

Strefa	Rodzaj spoiwa wg 197-1	Min. Zawartość spoiwa [kg/m ³]	w/c	Klasa betonu	Średni współczynnik migracji chlorków [10 ⁻¹² m ² /s]

Atmosferyczna	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	6,0
Rozbryzgów/ pływów	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	4,0
Zanurzona/pogrążona	CEM III/A	370	≤0,40	≥32/40	4,0

Dla ujednolicenia i zastosowania jednej receptury dla wszystkich elementów wykonanych z projektowanej mieszanki przyjęto wymaganie względem średnika współczynnika migracji jonów na poziomie $4,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.2 Uzasadnienie przyjętych proporcji i technologii

Wybór receptury został podporządkowany wymogowi uzyskania betonu o jak najniższej przepuszczalności dla agresywnych mediów, przede wszystkim jonów chlorkowych, a także zapewnienia wysokiej odporności na działanie mrozu i soli odladzających. Kluczowe decyzje projektowe obejmowały:

- zastosowanie cementu CEM III z dodatkiem żużla wielkopiecowego, wpływającego korzystnie na makroteksturę matrycy cementowej i zdolność wiązania chlorków,
- ograniczenie stosunku wodno-cementowego do wartości $\leq 0,40$, co znacząco zmniejsza porowatość kapilarną betonu,
- wykorzystanie domieszek chemicznych, w tym superplastyfikatora oraz plastyfikatora, umożliwiających uzyskanie wymaganej konsystencji przy obniżonej zawartości wody zarobowej,
- napowietrzenie mieszanki do poziomu 4,5–6,0% objętościowego powietrza, co pozwala na zapewnienie odporności na zamrażanie i odmrażanie, zgodnie z wymaganiami stopnia F200 i kategorii FT2,
- odpowiedni dobór kruszywa o wysokiej trwałości, niskiej nasiąkliwości i zrównoważonym składzie granulometrycznym, zapewniającym szczelność stosu okruszowego i jednorodność mieszanki.

Należy również podkreślić znaczenie odpowiedniej technologii wbudowywania jak i pielęgnacji betonu. W warunkach narażenia na wodę morską wskazane jest, aby beton poddany był wstępnej pielęgnacji w warunkach kontrolowanych przez co najmniej 7 dni, zanim zostanie wystawiony na działanie środowiska agresywnego. Woda morska nie zapewnia odpowiedniej pielęgnacji, chyba, że beton raz zanurzony, zostanie w niej na stałe.

Nieprawidłowe wbudowywanie jak i brak prawidłowej pielęgnacji, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania, może znacząco obniżyć trwałość materiału, niezależnie od jakości składników, dlatego należy zapobiegać m.in. niedogęszczeniom, pęknięciom skurczowym i niewłaściwym naprężeniom użytkowym.

6. Opis właściwości betonu

6.1 Przepuszczalność betonu

Jednym z najważniejszych parametrów ocenianych w kontekście trwałości betonu była jego przepuszczalność dla jonów chlorkowych. W celu jej oceny zastosowano metodę badawczą NT Build 492, która pozwala na określenie współczynnika migracji chlorków w warunkach przyspieszonego pola elektrycznego. Metoda ta dobrze odwzorowuje zdolność betonu do przeciwdziałania przenikaniu chlorków w realnym środowisku eksploatacji.

Wyniki badań wykazały, że współczynnik migracji uzyskany dla zaprojektowanej mieszanki betonowej mieścił się poniżej wartości granicznej określonej w kontrakcie, co jednoznacznie potwierdziło skuteczność zastosowanej technologii betonu w zakresie ochrony zbrojenia przed korozją chlorkową. Dodatkowo, niska przepuszczalność ograniczała także penetrację wody, siarczanów oraz innych agresywnych substancji, wzmacniając ogólną odporność chemiczną betonu.

6.2 Wytrzymałość na ściskanie

Projektowana wytrzymałość betonu na ściskanie wynosząca minimum C35/45 była nie tylko wymogiem konstrukcyjnym, ale również istotnym czynnikiem wpływającym na mikrostrukturę materiału. Wyższa wytrzymałość wiąże się ze zmniejszoną porowatością, gęstszą strukturą matrycy cementowej oraz lepszą szczelnością — co w sposób pośredni ogranicza szybkość przenikania jonów chlorkowych i wody do wnętrza betonu. Parametr ten pełnił, więc podwójną rolę: nośną i trwałościową.

6.3 Odporność na mróz i sole odladzające

Ze względu na lokalizację inwestycji w strefie rozbryzgu oraz ekspozycję na działanie soli odladzających, konieczne było spełnienie wysokich wymagań dotyczących odporności betonu na działanie mrozu. Mieszanka została zaprojektowana tak, aby osiągała mrozoodporność stopnia F200 oraz kategorii FT2 (działanie mrozu w obecności soli).

Osiągnięto to poprzez wprowadzenie domieszki napowietrzającej, dzięki której uzyskano stabilny układ mikroporów powietrznych w przedziale 4,5–6,0%. Taka struktura umożliwia kompensację ciśnienia powstającego przy zamarzaniu wody w porach kapilarnych, a także ogranicza wnikanie roztworów chlorkowych w zmiennych warunkach wilgotności i temperatury.

6.4 Trwałość ogólna betonu w środowisku morskim

Zintegrowane podejście do projektowania receptury — obejmujące odpowiedni cement, niskie W/C, domieszki chemiczne i napowietrzające, optymalny dobór kruszywa oraz kontrolowaną pielęgnację — pozwoliło uzyskać beton o wysokim stopniu trwałości. Materiał ten może być skutecznie stosowany w konstrukcjach eksploatowanych w klasach ekspozycji XS3 i XD3, gdzie dominującym zagrożeniem jest agresja chlorkowa i cykliczne zamrażanie/rozmarzanie.

7. Badania i ocena skuteczności receptury

7.1 Metody badawcze

W celu weryfikacji założeń technologicznych oraz trwałości zaprojektowanego betonu, przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych i terenowych zarówno na mieszance betonowej, jak i na próbkach betonu stwardniałego. Badania te miały na celu ocenę właściwości fizycznych, mechanicznych i trwałościowych, w tym odporności na agresję chlorkową i działanie mrozu.

Zakres badań obejmował*:

- Właściwości mieszanki betonowej:
 - konsystencja (metoda opadu stożka) badana wg PN-EN 12350-2,
 - zawartość powietrza (metoda ciśnieniowa) badana wg PN-EN 12350-7,
 - temperatura mieszanki i czas zachowania urabialności.
- Badania wytrzymałościowe i trwałościowe betonu stwardniałego:
 - Wytrzymałość na ściskanie – oznaczana zgodnie z PN-EN 12390-3,
 - Mrozoodporność – stopień F200, badana wg PN-B-06265,
 - Odporność na sole odladzające – kategoria FT2, badana wg PN-B-06265,
 - Migracja jonów chlorkowych – badana zgodnie z metodą NT Build 492,
 - Penetracja wody pod ciśnieniem – oznaczana zgodnie z PN-EN 12390-8,
 - Zawartość chlorków rozpuszczalnych w kwasach – określona według PN-EN 14629.

**wydania norm aktualne w dniu badania*

Regularność i zakres badań dostosowano do wymagań kontraktu oraz zmiennych warunków produkcji i transportu, co umożliwiło bieżącą kontrolę jakości oraz ocenę stabilności właściwości mieszanki w dłuższym horyzoncie czasowym.

7.2 Wyniki badań i ich interpretacja

Analizie poddano wyniki badań wykonanych na próbkach pobieranych z partii betonu wbudowywanego w okresie od jesieni 2023 roku do końca 2024 roku. W tym czasie na potrzeby realizacji terminalu DCT T3 w Gdańsku łącznie wbudowano około 19000 m³ mieszanki betonowej o recepturze omówionej w niniejszym artykule.



Zdjęcie 2. Widok elementów, które zostały m.in. wykonane z analizowanej receptury
Źródło: Budimex S.A.

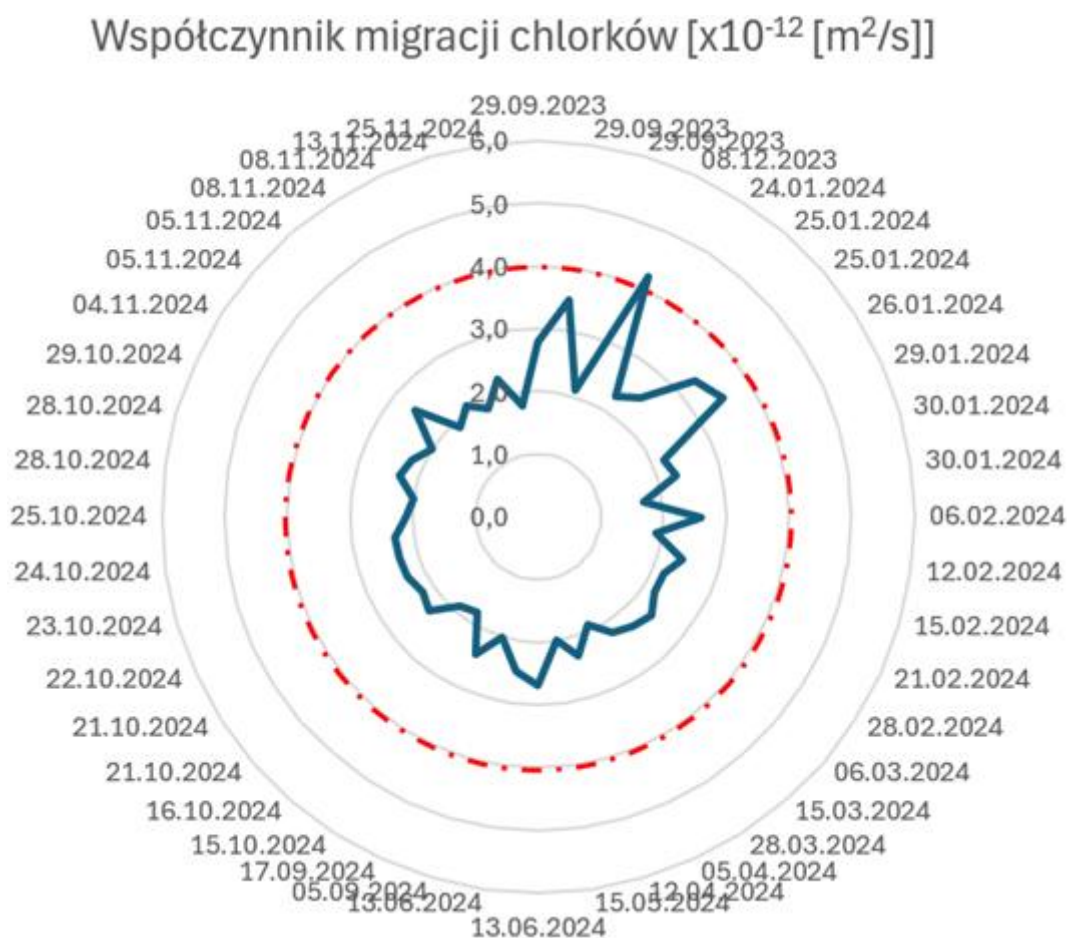
W celu oceny wpływu postępującej hydratacji cementu na szczelność betonu oraz wynikowy współczynnik migracji jonów chlorkowych, przeprowadzono analizę porównawczą trzech par próbek badanych po 28 oraz 90 dniach dojrzewania.

Choć metoda NT Build 492 nie uwzględnia czasu równoważnego (tj. czasu dojrzewania próbki jako zmiennej), uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na korzystny wpływ wydłużonego czasu hydratacji na ograniczenie przepuszczalności betonu. Zaobserwowano wyraźne uszczelnienie struktury matrycy cementowej w próbkach 90-dniowych, co przekłada się na niższy współczynnik migracji chlorków.

Zjawisko to związane jest z kontynuacją procesów hydratacyjnych i dojrzewaniem wtórnych produktów wiążących (głównie C-S-H), które wypełniają przestrzenie porowe i skutecznie ograniczają kapilarny transport agresywnych jonów. Potwierdza to znaczenie odpowiedniej pielęgnacji betonu oraz fakt, że jego właściwości trwałościowe rozwijają się w czasie, zwłaszcza w mieszankach z cementami z większą zawartością dodatków typu II, takimi jak CEM III/A.

Tabela 4. Porównanie współczynnika migracji jonów chlorkowych w zależności od czasu dojrzewania betonu

Para próbek	Czas dojrzewania próbki	Różnica względem próby 28-dniowej [%]	Uwagi / Obserwacje
1	90 dni	17 %	Wyraźna poprawa szczelności
2	90 dni	13 %	Wyraźna poprawa szczelności
3	90 dni	11 %	Wyraźna poprawa szczelności



Wykres 1. Zestawienie wyników badań współczynnika migracji chlorków.

Przeprowadzone badania laboratoryjne i terenowe pozwoliły na ocenę stabilności parametrów technologicznych oraz trwałościowych betonu. Poniżej przedstawiono zbiorcze wyniki wybranych badań:

Tabela 5. Zestawienie średnich wartości przeprowadzonych badań

Parametr badawczy	Jednostka	Wymaganie kontraktowe	Wynik średni [ilość wyników do analizy]	Uwagi
Wytrzymałość na ściskanie ($f_{cm,28}$)	MPa	$\geq 45,0$	54,4 [200]	PN-EN 12390-3
Współczynnik migracji chlorków	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$\leq 4,0$	2,3 [44]	Badanie przyspieszone wg NT Build 492
Penetracja wody pod ciśnieniem	mm	≤ 40	26 [6]	PN-EN 12390-8
Konsystencja mieszanki betonowej	klasa	S3	150 mm [200]	PN-EN 12350-2
Zawartość powietrza w mieszance betonowej	% obj.	4,5–6,0	5,2 [200]	PN-EN 12350-7
Odporność betonu na działanie mrozu	Stopień	F200	Ubytek masy = 0,16% Obniżenie wytrzymałości = 3,90% Próbki nie wykazywały spękań [5]	PN-B-06265
Odporność na działanie mrozu w obecności soli odladzających	Kategoria	FT2	Ubytek masy po 28 dniach = 0,14 Ubytek masy po 56 dniach = 0,26 [8]	PN-B-06265
Zwartość chlorków ogółem (rozpuszczalne w kwasach)	% m.c.	$\leq 0,10$	0,03 [31]	PN-EN 14629

Wyniki jednoznacznie potwierdzają wysoką jakość i powtarzalność wytwarzanej mieszanki betonowej, a także skuteczność przyjętej receptury w zakresie ograniczania migracji chlorków, zapewnienia trwałości w środowisku morskim oraz odporności na cykliczne zamrażanie/rozmarzanie. Szczególnie niska przepuszczalność i stabilność zawartości powietrza świadczą o poprawnym doborze składników, skutecznym napowietrzeniu oraz właściwym nadzorze nad produkcją i wbudowywaniem betonu.

8. Wnioski

8.1 Podsumowanie efektów projektowania receptury

Realizacja betonu konstrukcyjnego o ograniczonej migracji jonów chlorkowych na potrzeby inwestycji DCT T3 w Gdańsku wykazała, że odpowiednio zaprojektowana mieszanka może skutecznie zabezpieczyć elementy żelbetowe przed degradacją w warunkach morskich i zimowych. Kluczowe znaczenie miały następujące czynniki:

- Zastosowanie cementu CEM III/A z wysoką zawartością żużla wielkopiecowego, który przyczynił się do zmniejszenia porowatości matrycy cementowej i zdolności przenikania chlorków,
- Obniżony stosunek wodno-cementowy ($\leq 0,40$), wsparty odpowiednimi domieszkami upłynniającymi i redukującymi wodę zarobową,
- Zastosowanie domieszek napowietrzających, umożliwiających uzyskanie odporności mrozowej stopnia F200 oraz kategorii FT2,
- Optymalizacja składu kruszywa, prowadząca do uzyskania szczelnego stosu okruszowego oraz ograniczenia jamistości,
- Kontrola jakości wykonania i pielęgnacji, szczególnie na etapie dojrzewania betonu przed jego narażeniem na środowisko agresywne.

Efektem było uzyskanie materiału o podwyższonej trwałości, niskiej przepuszczalności i odporności na czynniki destrukcyjne typowe dla konstrukcji nabrzeżnych i portowych.

8.2 Rekomendacje dla przyszłych projektów

W oparciu o doświadczenia wyniesione z realizacji oraz przeprowadzone badania, sformułowano następujące zalecenia:

- Dobór cementu powinien uwzględniać nie tylko parametry wytrzymałościowe, ale również odporność na agresję chemiczną i zdolność do wiązania jonów chlorkowych.
- Pielęgnacja betonu powinna być prowadzona w sposób ciągły i kontrolowany, szczególnie w pierwszych 7 dniach, w celu zapewnienia właściwego przebiegu hydratacji i ograniczenia skurczu plastycznego.
- Jakość wykonawstwa (szalunki, zagęszczanie, warunki pogodowe) musi być ściśle monitorowana — zaleca się stosowanie systemów oceny szczelności powierzchni oraz właściwe oczyszczanie styków roboczych.
- Projektowanie mieszanki powinno uwzględniać specyfikę strefy ekspozycji (np. strefa rozbryzgu, zanurzenia, aerozole), co pozwala dobrać klasę ekspozycji i stopień zabezpieczenia.
- Pobór próbek do badań powinien być zaplanowany zgodnie z wcześniej ustalonym harmonogramem i częstotliwością badań oraz w przypadkach szczególnych.

Czy można zaradzić korozji, gdyby jednak wystąpiła?

Postęp korozji chlorkowej uległby ograniczeniu, gdyby:

- osuszono beton,
- ograniczono dostęp tlenu przez zastosowanie określonych barier.

Stwierdzono, że azotyny sodu i wapnia są efektywne jako inhibitory korozji w warunkach prób laboratoryjnych. Nie ma pewności czy inhibitory są efektywne na zawsze, czy tylko opóźniają potencjalną korozję. Wprowadzone inhibitory zabezpieczają całą zabetonowaną stal ale nie są substytutem betonu o niskiej przepuszczalności. Można rozważyć również zabezpieczanie stali przez pokrycia epoksydowe czy ochrony katodowej. W specjalnych przypadkach można stosować zbrojenie ze stali nierdzewnej lub pokryte taką stalą, jednak jest to rozwiązanie bardzo kosztowne. Opracowana została technika odsalania betonu, w której chlorki usuwane są przez przepuszczenie dużego prądu stałego między korodującą stalą zbrojenia (katodą) i zewnętrzną anodą, która pozostaje w kontakcie elektrolitycznym z betonem. Jony chlorkowe migrują wówczas w kierunku anody zewnętrznej, oddalając się od powierzchni zbrojenia. Metoda ta posiada też negatywne konsekwencje i może przyczynić się do reakcji alkalia-kruszywo, która normalnie by nie wystąpiła. Całkowite usunięcie chlorków raczej nie jest możliwe, a z czasem korozja może postępować od nowa.

Zastosowanie powyższych rozwiązań w sposób kompleksowy pozwala istotnie wydłużyć okres użytkowania konstrukcji i ograniczyć koszty związane z jej eksploatacją oraz utrzymaniem.

Literatura

- [1] PN-EN 206+A2:2021-08 – Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] PN-EN 12390-3:2019-07 – Badanie betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek.
- [3] PN-EN 12390-8:2019-08 – Badanie betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [4] PN-B-06265:2022-08 – Beton – Wymagania dotyczące mrozoodporności.
- [5] NT Build 492:1999 – Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.
- [6] PN-EN 14629:2008 – Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie przenikania wody przy ciśnieniu.
- [7] Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

-
- [8] Gołaszewski, J. (2013). *Domieszki do betonu – mechanizmy działania, wpływ na właściwości betonu, zalecenia technologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [9] Deja, J. (red.). (2012). *Beton – technologie i metody badań*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.