

Michael van de Koppel,
DMC, The Netherlands

Andrzej Makowski,
NDI S.A., Polska

Andrzej Wilczyński,
Sika Poland Sp. z o.o., Polska

Pierwsze międzynarodowe zastosowanie XblocPlus na Przekopie Mierzei Wiślanej w Polsce.

First international application of XblocPlus at Vistula Spit, Poland.

Streszczenie

Projekt Przekopu Mierzei Wiślanej w Polsce stanowi pierwsze międzynarodowe zastosowanie nowej jednostki betonowej XblocPlus. Opracowany przez DMC w latach 2015-2018, XblocPlus bazuje na oryginalnym Xbloc, wprowadzając wzór umieszczania, który zwiększa stabilność hydrauliczną, upraszcza instalację i oferuje korzyści estetyczne. Projekt Mierzei Wiślanej, realizowany przez wspólne przedsięwzięcie firm Besix i NDI, wykorzystał prawie 10 000 jednostek XblocPlus do wzmocnienia falochronów, co stanowi znaczący kamień milowy w zastosowaniu tej technologii poza granicami Holandii.

Treść szczegółowo opisuje procesy projektowania, produkcji i wdrażania XblocPlus, podkreślając jego zalety w porównaniu z tradycyjnymi jednostkami umieszczanymi losowo. Kluczowe korzyści obejmują zwiększenie szybkości budowy, zmniejszenie złożoności oraz zwiększenie bezpieczeństwa dzięki jednolitemu wzorowi umieszczania. Uwzględniono również aspekty środowiskowe, a projekt systemu przyczynia się do celów zrównoważonego rozwoju poprzez zmniejszenie zapotrzebowania na materiały i niższą emisję CO₂.

Udane zastosowanie XblocPlus w projekcie Mierzei Wiślanej pokazuje jego potencjał jako wartościowego elementu przyszłych projektów ochrony morskiej i przeciwpowodziowej, oferując solidne, efektywne i przyjazne dla środowiska rozwiązanie.

Abstract

The Vistula Spit project in Poland represents the first international application of the new XblocPlus concrete armour unit. Developed by DMC between 2015 and 2018, XblocPlus builds upon the original Xbloc by introducing a pattern-placed design that enhances hydraulic stability, simplifies installation, and offers aesthetic benefits. The Vistula Spit project, executed by a joint venture of Besix and NDI, utilized nearly

10,000 XblocPlus units to reinforce breakwaters, marking a significant milestone in the technology's deployment outside the Netherlands.

This paper describes the design, manufacturing, and implementation processes of XblocPlus, emphasizing its advantages over traditional randomly placed units. Key benefits include increased construction speed, reduced complexity, and enhanced safety due to the uniform placement pattern. Environmental considerations are also addressed, with the system's design contributing to sustainability goals through reduced material requirements and lower CO₂ emissions.

The successful application of XblocPlus at the Vistula Spit project demonstrates its potential as a valuable component for future marine and flood protection projects, offering a robust, efficient, and environmentally friendly solution

1. WSTĘP

Projekt Przekopu Mierzei Wiślanej, wspólny wysiłek BESIX i Grupy NDI, jest znaczącą inicjatywą w zakresie infrastruktury morskiej w Polsce. Projekt zakładał budowę nowego kanału żeglugowego łączącego Zalew Wiślany z Zatoką Gdańską. Głównym celem jest zwiększenie ruchu morskiego i pobudzenie działalności gospodarczej portu w Elblągu.

Kluczowe cechy projektu to stworzenie falochronów, nabrzeży, kanału, infrastruktury śluzowej z obrotowymi mostami i bramami śluzowymi, a także rozwój sztucznej wyspy. Kanał rozciąga się na prawie 23 kilometry, o głębokości 5 metrów, ułatwiając przejście większych statków.

Falochrony, niezbędne do ochrony nowego kanału przed trudnymi warunkami morskimi, są zbudowane przy użyciu prefabrykatów XblocPlus. Te innowacyjne, rozmieszczone według określonego wzoru betonowe jednostki zapewniają solidną ochronę przed działaniem fal, minimalizując zużycie materiału i wpływ na środowisko. Zastosowanie XblocPlus nie tylko zwiększa trwałość i stabilność falochronów, ale także przyczynia się do bardziej zrównoważonego procesu budowlanego.

Budowa oficjalnie rozpoczęła się w 2019 roku, a pierwsze jednostki XblocPlus zostały umieszczone w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej w 2020 roku. Cały projekt został ukończony w 2022 roku.



Zdjęcie 1: Lokalizacja projektu Przekopu Mierzei Wiślanej na Zatoce Gdańskiej

Betonowe jednostki ochronne mogą być produkowane lokalnie i są bardziej stabilne podczas sztormów w porównaniu do bloków litej skały o równej wadze. Xbloc to zaawansowana prefabrykowana jednostka stosowana w projektach budowlanych przybrzeżnych i morskich w celu ochrony konstrukcji takich jak falochrony przed działaniem fal. Wprowadzony na rynek w 2003 roku został szeroko przyjęty w wielu projektach na całym świecie. Do chwili obecnej użyto ponad 600.000 szt. Opierając się na tym doświadczeniu, DMC opracowało nowy prefabrykat: XblocPlus.

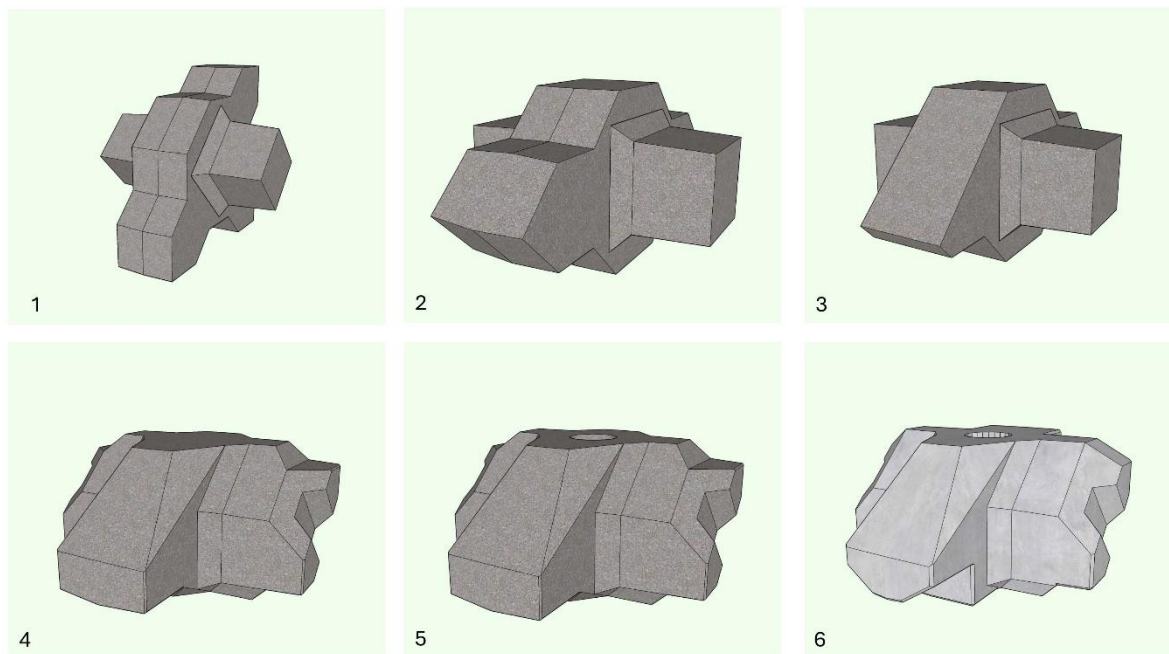
Ta ulepszona wersja globalnie używanego Xbloc debiutowała w Polsce na arenie międzynarodowej. Do produkcji 10.000 szt. XblocPlus zastosowało ok. 22.000 m³ betonu. Bloki wzmacniają strukturę dwóch falochronów. Falochron wschodni ma długość ok. 900m, wschodni ok. 300m.

Bloki ważą od 2.34 do 9.6 ton każdy i mają trzy różne objętości, 1m³, 3m³ i 4m³.

2. Rozwój XblocPlus

Rozwój XblocPlus rozpoczął się w 2015 roku. W poprzednich projektach z użyciem prefabrykatów Xbloc zauważono, że operatorzy żurawi wolą regularne umieszczanie elementów, ponieważ jest to łatwiejsze i szybsze. Dlatego regularne rozmieszczenie elementów Xbloc było testowane w modelu w skali fizycznej. Jeśli jednostki Xbloc są rozmieszczone w regularnym wzorze, mogą być ułożone bliżej

siebie. Zwiększa to ilość potrzebnego betonu i śladu CO₂. W związku z tym zbadano opcje optymalizacji gęstości ich ułożenia. Głównymi zaletami nowej jednostki XblocPlus są: lepsza stabilność hydrauliczna, , łatwość produkcji i układania oraz mniejsze zużycie mieszanki betonowej.



Rysunek 2: Etapy rozwoju od Xbloc do XblocPlus

Kształt XblocPlus można opisać jako ptaka, z dziobem, ogonem i dwoma skrzydłami. Ważnym etapem rozwoju kształtu była modyfikacja dzioba, w celu zminimalizowania ciśnienia podnoszenia, modyfikacja skrzydeł w celu zwiększenia odległości bloków od siebie, stworzenie szczeliny w skrzydłach w celu rozpraszania energii fal, dodanie otworu w środku bloku w celu uwolnienia ciśnień podnoszenia fali (rysunek 2, blok 5).

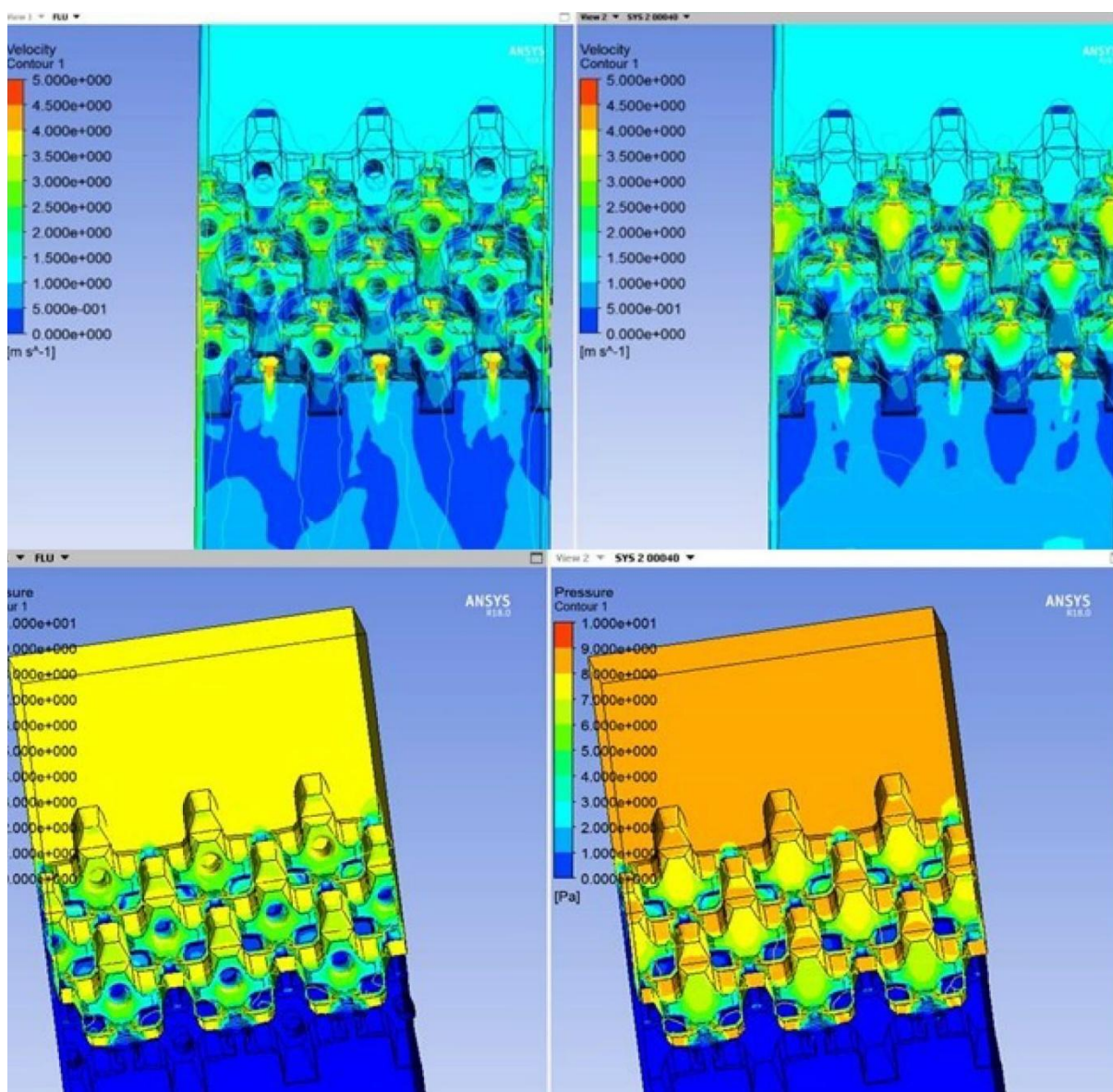
Każda modyfikacja kształtu została po raz pierwszy przetestowana w laboratorium falowym o długości 25 m w zakładowym laboratorium wodnym DMC. Zdjęcie 3 przedstawia typową konfigurację testu podczas falowania.



Zdjęcie 3: Fizyczne testowanie modelu w laboratorium wewnętrznym

Wprowadzenie otworu w środku bloku nastąpiło po zaobserwowaniu niestabilności z powodu ciśnienia podnoszenia fali podczas testów modelu. Otwory zostały wywiercone w blokach modelu i wykonano ponowny test. Wprowadzenie otworu znacznie zwiększyło stabilność hydrauliczną [2] i zmniejszyło zużycie mieszanki betonowej.

Modelowanie numeryczne zostało wykonane przy użyciu programu ANSYS CFD, w celu zbadania prędkości i ciśnień falowych. Również w modelu numerycznym siły destabilizujące zostały znacznie zmniejszone poprzez wprowadzenie centralnego otworu. Przykład wyników obliczeń przedstawiono na rysunku 4 [3].



Rysunek 4: Porównanie ciśnień falowych z i bez otworu centralnego przy użyciu programu ANSYS CFD

2.1 Właściwości betonu

Elementy Xbloc i XblocPlus wykonane były z betonu niezbrojonego, w klasie C35/45, w klasach ekspozycji XA1, XC4, XS3, XF4. Betonowe prefabrykaty są zwykle zaprojektowane tak, aby wytrzymać 100-letnią burzę (SLS), ale często są również testowane z 20% wyższym obciążeniem falą (ULS).

W przypadku nieregularnie rozmieszczonych elementów zawsze jest kilka sztuk, które mogą poruszać się lekko podczas burzy projektowej. To nazywa się kołysaniem. Kiedy kołysanie odbywa się regularnie, może spowodować zderzenia elementów, co prowadzi do uszkodzenia prefabrykatów [5]. Ze względu na regularne umieszczanie XblocPlus ryzyko kołysania jest mniejsze niż w przypadku Xbloc, a tym samym zmniejsza się ryzyko uszkodzenia całego systemu ochronnego falochronów.

2.2 Stabilność hydrauliczna

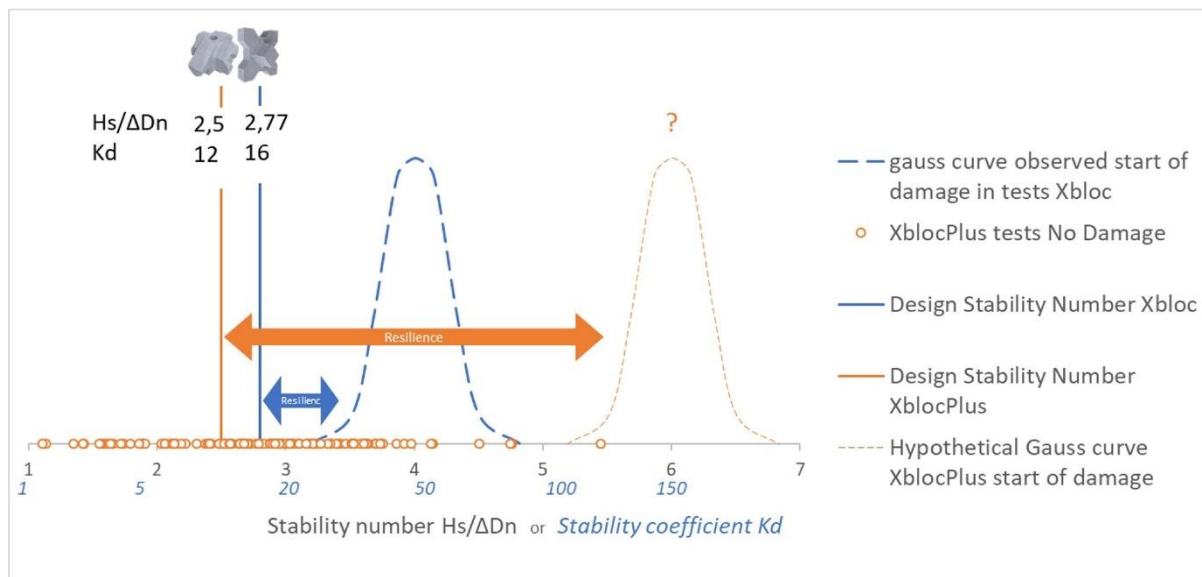
Chociaż przy ostatecznym kształcie XblocPlus nie obserwuje się kołysania podczas fizycznego testowania modelu, testy przeprowadzono z kilkoma elementami ręcznie usuniętymi, aby upewnić się, że nie wystąpią żadne postępujące uszkodzenia, jak pokazano na zdjęciu 5 [5]. Testy wykazały, że celowo usunięte prefabrykaty nie spowodowały awarii.



Zdjęcie 5: Test modelu z dwoma usuniętymi elementami

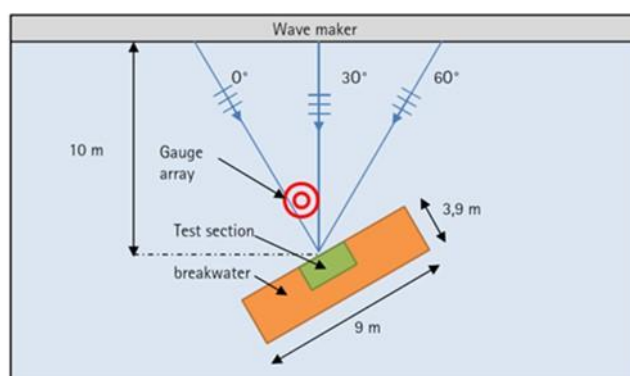
Stabilność betonowych jednostek ochronnych jest określona przez parametr stabilności $H_s/\Delta D_n$. Liczba ta, to wysokość fali (H_s) podzielona przez gęstość względną (Δ) razy średnicę nominalną elementu (D_n). Na podstawie testów fizycznych modelu Xbloc stwierdzono, że Xbloc może być stosowany ze współczynnikiem stabilności wynoszącym 2.77. Ubytki jednostek z warstwy ochronnej przez obciążenie falowe może wystąpić przy wartościach $H_s/\Delta D_n$ powyżej 3.5, co daje 25% marginesu bezpieczeństwa. Jest to pokazane na rysunku 6 [4].

Przy ostatecznym kształcie XblocPlus nie wystąpiły uszkodzenia podczas fizycznego testowania modelu, nawet w przypadku 200% przeciążenia. Pomimo wyższej stabilności XblocPlus niż Xbloc, zdecydowano się na zastosowanie niższego współczynnika stabilności $H_s/\Delta D_n = 2.5$. Ten niższy współczynnik stabilności prowadzi do większej odporności i bezpieczeństwa w projektowaniu [6]. Gdy wysokość fali wzrasta z powodu zmian klimatycznych, ochrona nadal jest wystarczająca.

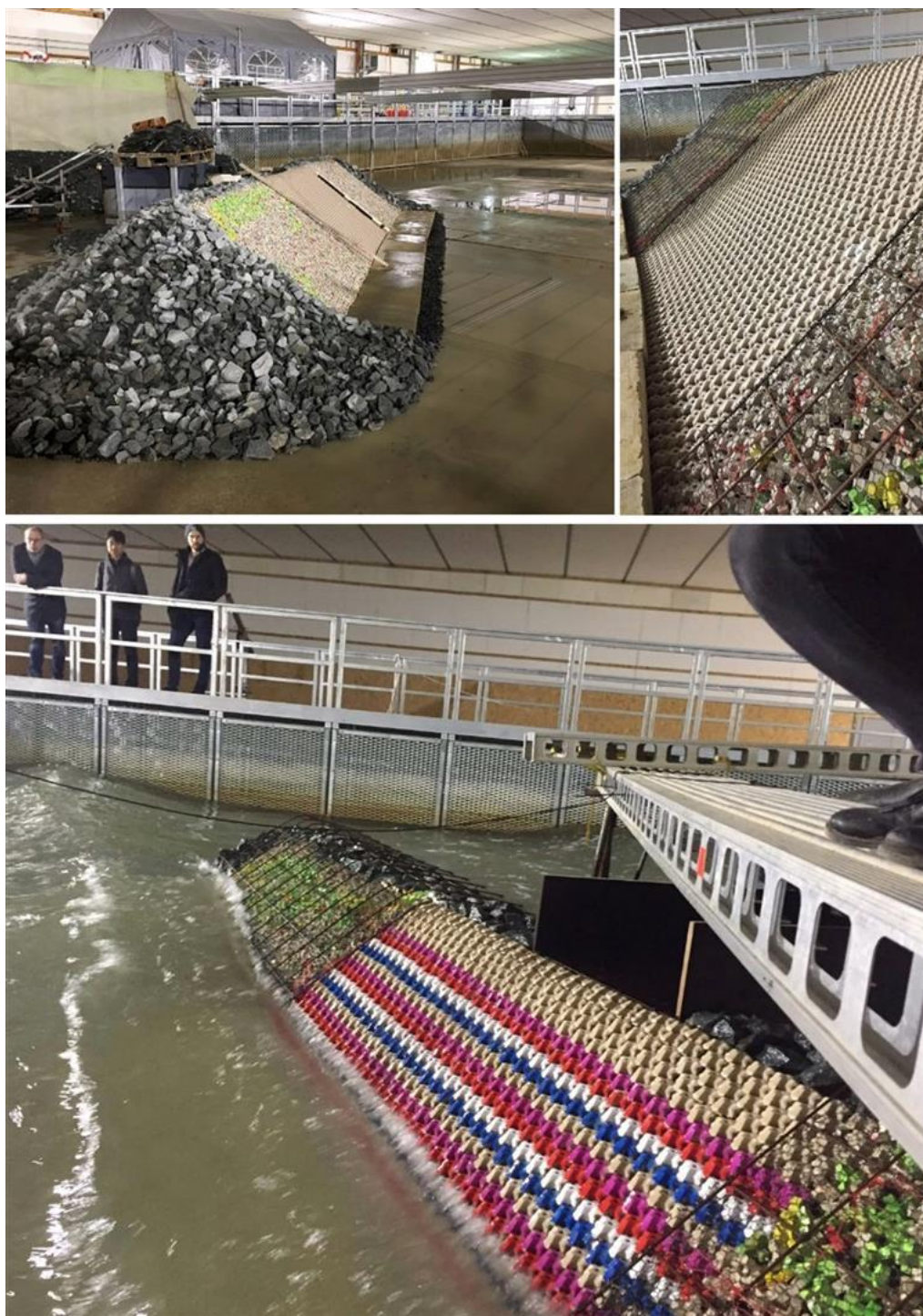


Rysunek 6: Wyniki fizycznych testów modelu i współczynnika stabilności

Oprócz testowania modelu fizycznego 2D w laboratorium falowym przeprowadzono również testy 3D w Instytucie Franzius w Hanowerze, aby sprawdzić stabilność w uderzeniu skośnej fali. Testy te nie doprowadziły do wyrwania elementów ochronnych i potwierdziły wysoką stabilność hydrauliczną. Jedną z konfiguracji testowych w Hanowerze jest pokazana na rysunku 7 i zdjęciu 8 [2].



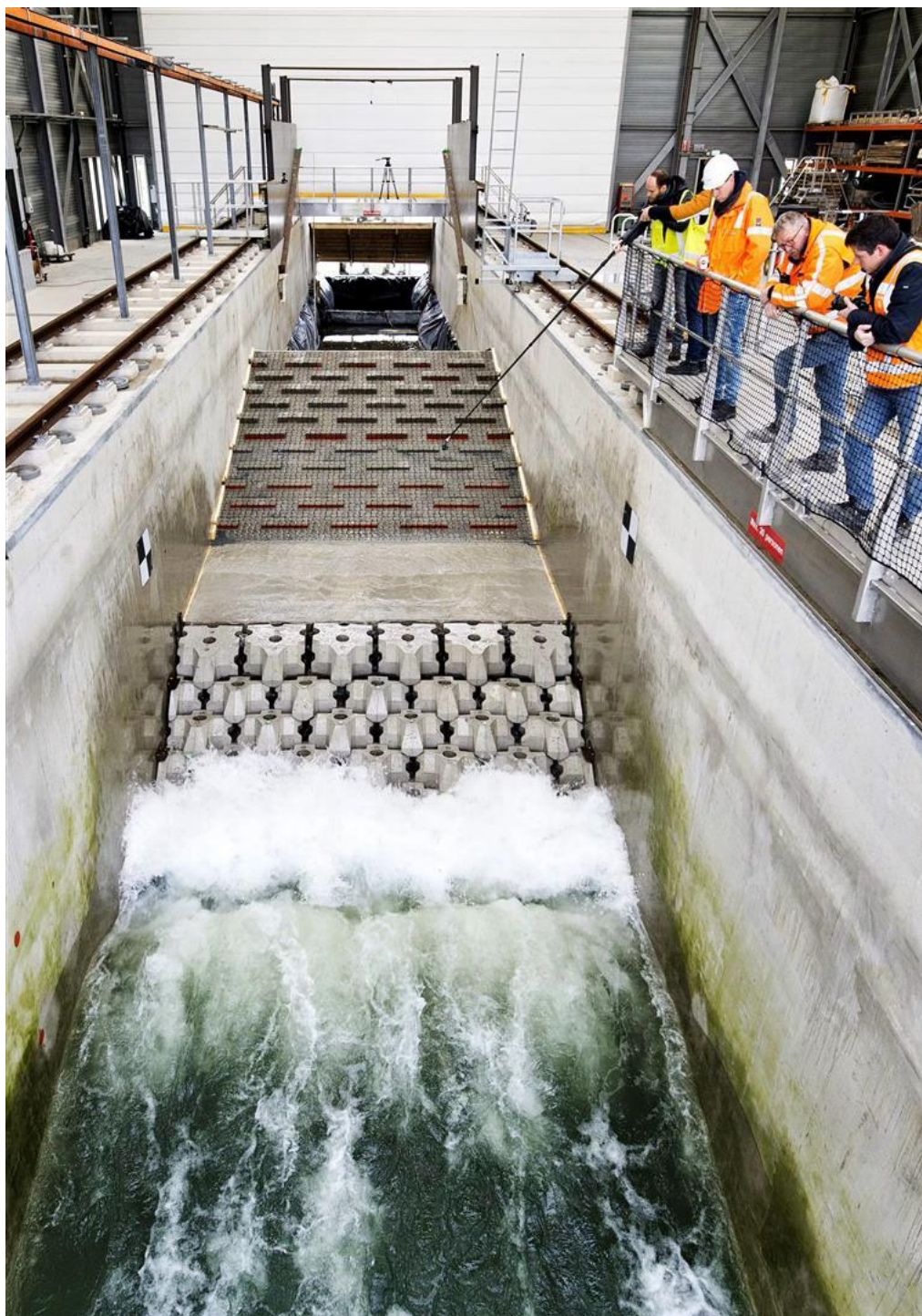
Rysunek 7: Układ badania fal skośnych



Zdjęcie 8: Testy 3D w Hanowerze

Testy modeli w skali 1:3 zostały przeprowadzone w Delta Flume w Deltares w Holandii w ramach weryfikacji projektu Afsluitdijk. Delta Flume jest jednym z największych laboratoriów falowych na świecie. W tym laboratorium wygenerowano znaczne wysokości fal do 1.5 m. Testowano przypadek przeciążenia z 10% wyższą wysokością fali. Testowano również o 10% słabszą strukturę elementów. Zostało to zrealizowane dzięki zastosowaniu zmniejszonej gęstości betonu dla bloków

modelowych. Monitorowano stabilność hydrauliczną całego układu. Zdjęcie 9 pokazuje wygaszanie fal.



Zdjęcie 9: Testy hydrauliczne na dużą skalę w laboratorium Delta Flume.

3. Zastosowanie w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej

Oba falochrony zaprojektowano tak, aby chronić kanał wejściowy do portu wewnętrznego od strony Zatoki Gdańskiej. Falochron wschodni ma długość 900 m i podąża łagodną krzywą. Wschodni falochron rozciąga się po linii prostej od plaży do morza, na długości ok. 300m. Ze względu na głębokość wody i dominujący wschodni kierunek fal falochron wschodni narażony jest na ataki najwyższych fal. W związku z tym użyto przy jego wznoszeniu największe bloki XblocPlus, o wymiarach 4 m³ i wadze 9.6 ton.

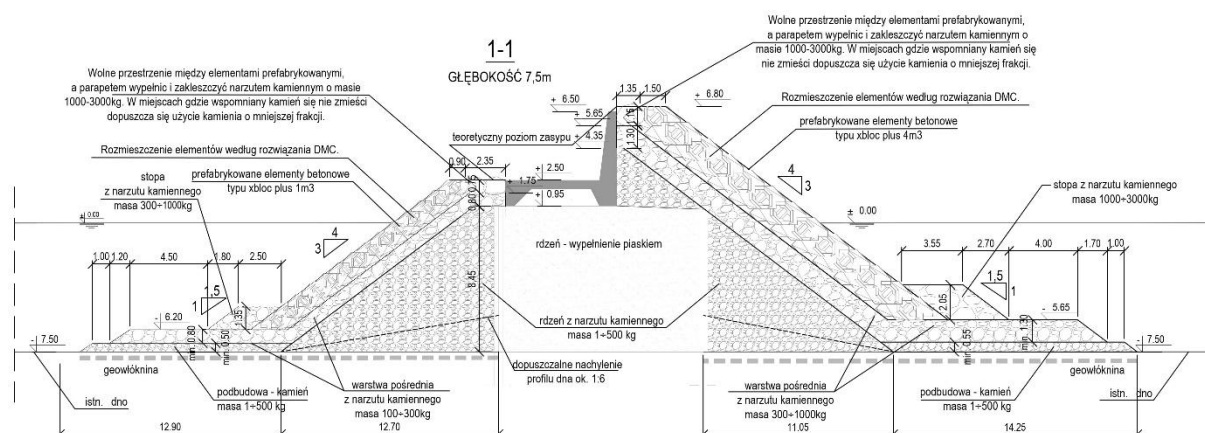


Zdjęcie 10: Budowa falochronu wschodniego



Zdjęcie 11: Budowa falochronu wschodniego

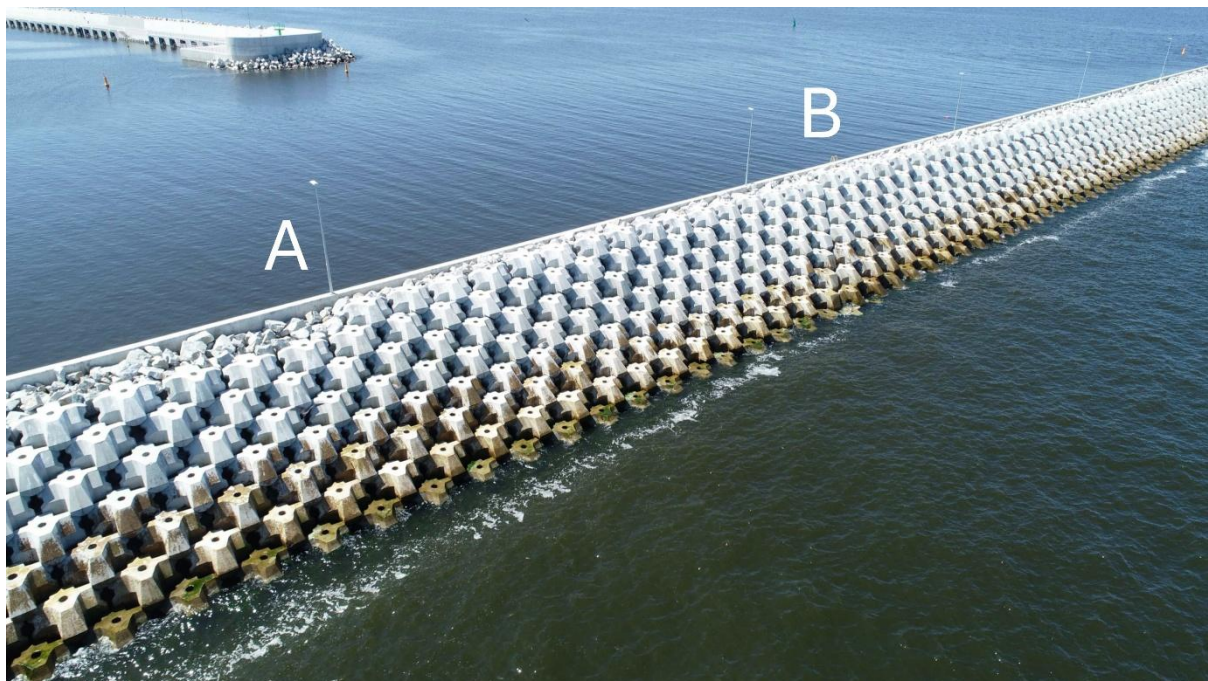
Na wewnętrznej stronie falochronu wschodniego występuje mniejsze falowanie, co pozwoliło na użycie mniejszych bloków XblocPlus o objętości 1 m^3 . Krótszy falochron zachodni znajduje się również częściowo w strefie ochronnej falochronu wschodniego, co pozwoliło na zastosowanie bloków objętości 3 m^3 .



Rysunek 12: Typowy przekrój falochronu wschodniego

Podstawy falochronów podążają za poziomem dna morskiego, powodując, że poziom pierwszej warstwy elementów XblocPlus zmniejsza się wzdłuż długości

falochronu. Aby pokryć nachylenie falochronu, liczba rzędów XblocPlus zwiększa się wzdłuż jego długości. Początek dodatkowej warstwy XblocPlus jest oznaczony punktem A na zdjęciu 13.



Zdjęcie 13: Dodatkowy rząd (punkt A) i przejście z bloków o objętości 3m^3 do 4m^3 (punkt B)

Jednostki XblocPlus, są umieszczane na wstępnie określonej siatce, aby zapewnić spójne odstępy i punkty styku pomiędzy blokami. Te aspekty są kluczowe dla tworzenia blokującej się warstwy pancerza ochronnego. Wynikające z tego wzajemne blokowanie elementów znacznie zwiększa stabilność całego układu.

XblocPlus może być umieszczony na delikatnych krzywych (promień w zależności od wielkości bloku i liczby rzędów). W przypadku ostrzejszych krzywych można użyć zmodyfikowanego kształtu XblocPlus lub oryginalnego Xbloc. Do projektu Przekopu Mierzei Wiślanej zastosowano regularne elementy Xbloc (o objętościach 3m^3 i 5m^3) na głowicach falochronów ze względu na ich niewielki promień.

Maksymalna wysokość fali przy falochronie wzrasta wraz ze wzrostem głębokości wody. Dlatego w głębszych częściach falochronu wschodniego potrzebne były większe jednostki XblocPlus, aby zapewnić stabilne rozwiązanie w porównaniu z płytszymi częściami w pobliżu brzegu. Projekt przewidział użycie dwóch rozmiarów XblocPlus: objętości 4m^3 w najgłębszych częściach zewnętrznej krzywej falochronu wschodniego i objętości 3m^3 XblocPlus dla płytszych części w pobliżu brzegu. Ponieważ bloki różnią się wielkością, nie pasują do siebie płynnie. Pomiędzy dwiema częściami utworzono przejście z nowo opracowanym blokiem przejściowym. Przejście jest pokazane z góry na zdjęciu 14 i jest widoczne od strony morza na zdjęciu 13 (punkt B). Blok przejściowy został zastosowany po raz pierwszy w

projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej po wykazaniu stabilności przejścia podczas testów modelu fizycznego.



Zdjęcie 14: Przejście z elementów o objętości 3 m^3 na 4 m^3

Głowica falochronu jest skonstruowana z regularnych Xbloc.



Zdjęcie 15: Przejście z XblocPlus na Xbloc

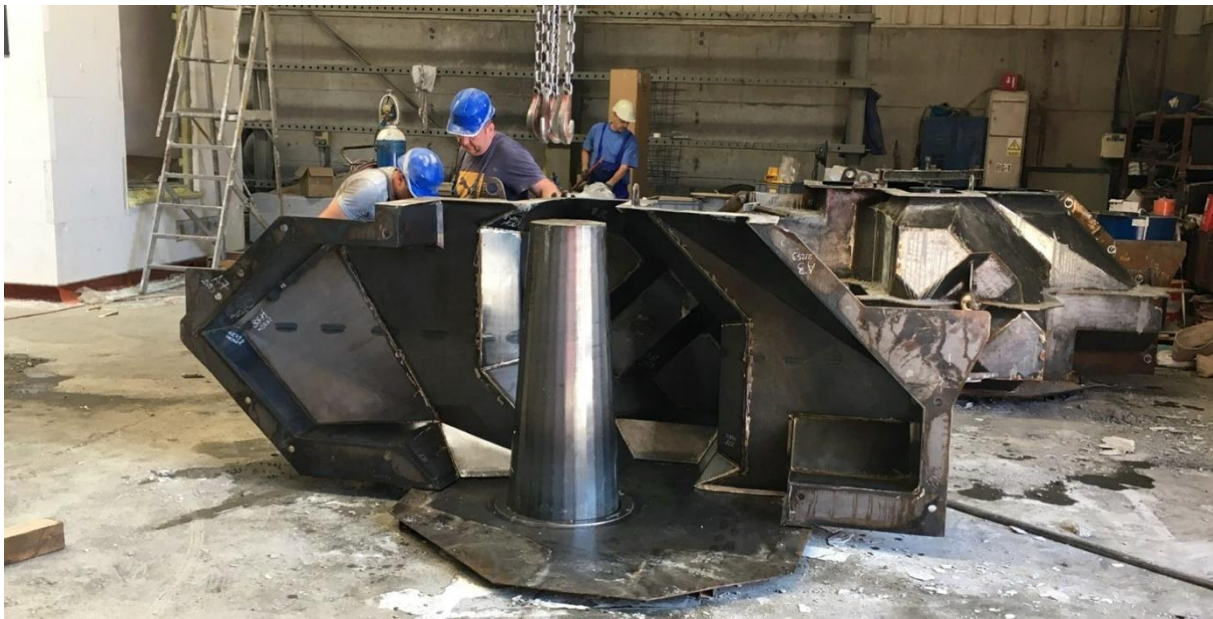


Zdjęcie 16: Głowica falochronu zachodniego

3.1 Produkcja

Produkcję prefabrykatów wykonano w zakładzie Zbych-Pol & Mobet w Mogilnie.

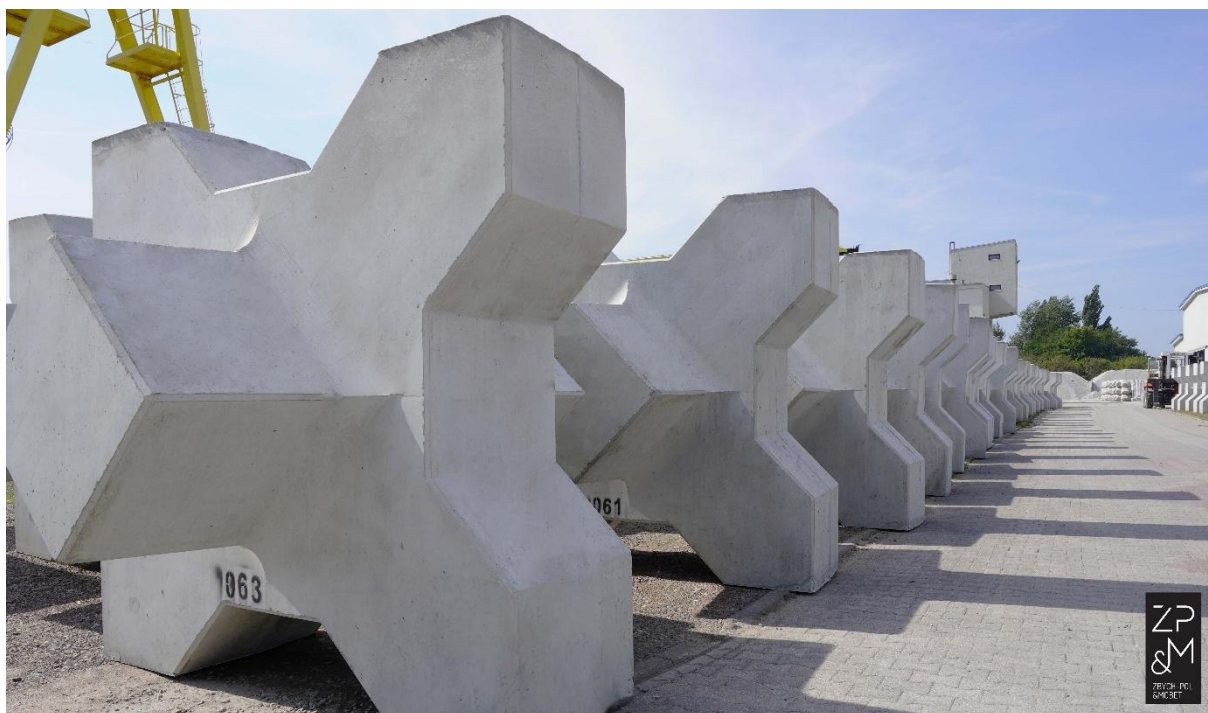
Prefabrykaty były produkowane w formach składających się z trzech części. Każda forma składa się z dwóch części pionowych, oraz stożka dla ukształtowania otworu. W przypadku elementów XblocPlus monitorowany jest rozwój temperatury bloku oraz różnice między temperaturami wewnętrznymi i powierzchniowymi.



Zdjęcie 17: Formy produkcyjne

Do produkcji elementów użyto betonu C35/45, w klasach ekspozycji XA1, XC4, XS3, XF4 oraz mrozoodporności F150 i wodoszczelności W8.

Mieszanka była zaprojektowana w oparciu o cement CEM II/A-V 42,5R, kruszywa łamane ze skały litej, oraz domieszki Sika Viscocrete 3225 i Sika LPSA-94.



Zdjęcie 18: Wyprodukowane prefabrykaty Xbloc – plac składowy producenta

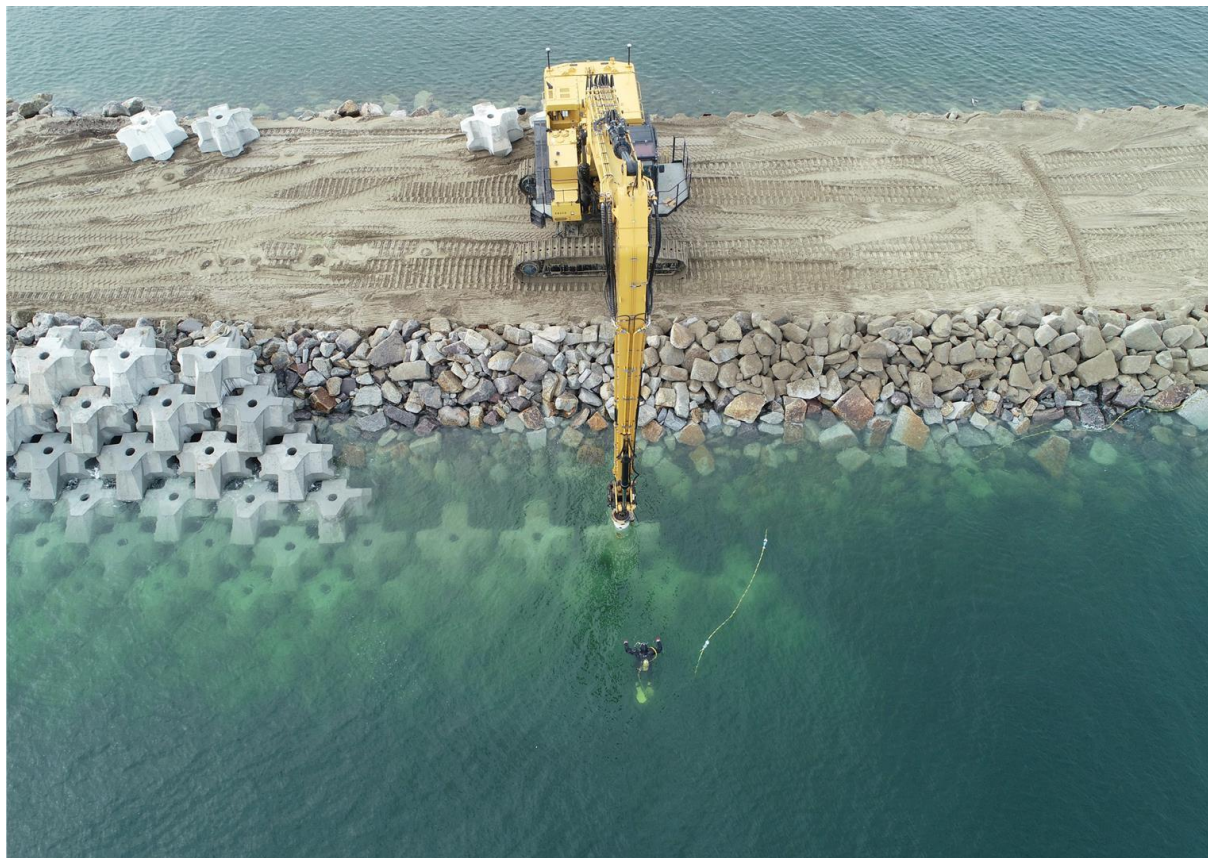


Zdjęcie 19: Wyprodukowane prefabrykaty XblocPlus – plac składowy producenta

3.2 Wbudowanie

Obsługa bloków odbywa się za pomocą chwytaka mocowanego do koparki (zdjęcie nr 20). Podnosi on bloki, wykorzystując okrągły otwór w środku XblocPlus. Chwytak hydrauliczny z rotatorem zapewnia pełną kontrolę nad położeniem układanych elementów. Taki system układania umożliwia umieszczanie prefabrykatów z dużą wydajnością do 100 bloków dziennie. Dodatkowo praca staje się bezpieczniejsza ze względu na brak konieczności podwieszania elementów.

Koparka jest zawsze wyposażona w system GPS, który umożliwia operatorowi maszyny umieszczenie bloków na zaprojektowanych współrzędnych. Na budowie Przekopu Mierzei Wiślanej umieszczanie elementów realizowane było z pomocą nurków dla podwodnej części elementów, którzy weryfikowali układanie bloków.



Zdjęcie 20: Koparka z chwytakiem umieszczająca prefabrykaty z pomocą nurka

3.3 Ekologia

Warstwa pancerza z blokami XblocPlus ma wysoką jamistość ok 60% i znajduje się w strefie zmiennego poziomu wody. Dlatego stanowi siedlisko dla życia morskiego, takiego jak rośliny, ryby i skorupiaki.



Zdjęcie 21: Siedlisko życia na prefabrykacie XblocPlus

4. Podsumowanie

Nowy typ betonowej jednostki ochronnej falochronów został z powodzeniem zastosowany w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej, co oznacza międzynarodowy debiut systemu XblocPlus. Te elementy charakteryzują się regularnym wzorem rozmieszczenia. Zapewniają wysoką rezerwę stabilności hydraulicznej i dlatego będą odporne na zmiany warunków brzegowych układu hydraulicznego z powodu zmian klimatu. Mają niski ślad CO₂ w porównaniu do tradycyjnych betonowych prefabrykatów typu gwiazdobloki (wymagają mniejszej ilości mieszanki betonowej). Przenoszenie i umieszczanie jest bezpieczniejsze i łatwiejsze dzięki środkowemu otworowi w połączeniu z chwytem hydraulicznym układarki. Zastosowanie systemu XblocPlus w projekcie Przekopu Mierzei Wiślanej pokazuje, że jest on cennym elementem budowlanym dla przyszłych projektów ochrony środowiska morskiego i przeciwpowodziowego.

5. Literatura

- [1] Donnelly, J., Bakker P., Reedijk B., Yang Z. XblocPlus the interlocking pattern placed and efficient armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* (36v) Structures 18, 2020
- [2] Reedijk B, Eggeling, T. Bakker, P, Jacobs R., Muttray M. Hydraulic stability and overtopping performance of a new type of regular placed armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* 1(36);54, 2018.
- [3] Jacobs R., Bakker, P., Vos-Rover I., and Reedijk B. XblocPlus development of a regular placed interlocking armour unit. *Coastal Engineering Proceedings* 1(36);45, 2018.
- [4] Muttray M., Reedijk B., Design of concrete armour layers. Hansa, International Maritime Journal, Vol. 146, No. 6 pp. 111-118, 2009
- [5] Bakker, P., de Hoop T., Muttray, M., Stability of XblocPlus armour layers after initial damage. *Coastal Engineering Proceedings* (36v) Structures 16, 2020

-
- [6] Reedijk J.S., Muttray M., Bergmann H. Risk awareness, key to a Sustainable Design Approach for Breakwater Armouring. Proceedings Coasts, Marine Structures and Breakwaters, Edinburgh, 2009
- [7] Van den Berg I., Hofland, B., Reedijk, B. Influence of irregularities in the underlayer on the stability of XblocPlus. Coastal Engineering 157:103637, 2020