



INSTYTUT MORSKI UNIWERSYTETU MORSKIEGO W GDYNI

Ekspertyza w sprawie możliwości rozbudowy Portu w Kołobrzegu, w tym przeprowadzenie analizy nawigacyjnej, analizy hydrotechnicznej i analizy falowania

Analiza falowania



	Imię nazwisko	Podpis
Kierownik opracowania dotyczącego analizy falowania	dr inż. Tomasz Marcinkowski	
Wykonawcy części obliczeniowej	dr inż. Tomasz Marcinkowski mgr Tomasz Olszewski	

Zleceniodawca:

Zarząd Portu Morskiego Kołobrzeg sp. z o.o. ul. Portowa 41, 78-100 Kołobrzeg

Gdańsk 2021

Spis treści

1. WSTĘP	3
2. OPIS PORTU.....	5
3. ODDZIAŁYWANIE ŚRODOWISKA MORSKIEGO.....	7
3.1 Charakterystyczne poziomy morza	7
3.2 Wyznaczanie falowania na przedpolu portu	8
4. OBLICZENIE FALOWANIA W AKWENIE PORTOWYM	13
4.1 Opis modelu numerycznego	13
4.2 Założenia i scenariusze obliczeniowe	14
4.3 Metodyka opracowania wyników obliczeń.....	18
4.4 Wyniki obliczeń	20
4.4.1 Wprowadzenie.....	20
4.4.2 Wpływ spiętrzenia sztormowego	21
4.4.3 Stan aktualny	22
4.4.4 Wariant A przebudowy wejścia	23
4.4.5 Wariant B przebudowy wejścia.....	24
4.4.6 Porównanie wyników obliczeń	25
5. PODSUMOWANIE.....	27
SPIS RYSUNKÓW.....	29
SPIS TABEL	30
SPIS LITERATURY	31

1. Wstęp

Prezentowany raport przedstawia wyniki badań falowania w obszarze Portu Kołobrzeg dla analizowanych wariantów jego przebudowy umożliwiającej wejście większych jednostek do portu. Został on wykonany na zlecenie 3G Tech sp. z o.o. z siedzibą w Szczecinie w ramach pracy realizowanej dla Zamawiającego, tj. Zarządu Portu Morskiego w Kołobrzegu.

Celem pracy było przeanalizowanie na modelu numerycznym wpływu poszerzenia drogi wodnej prowadzącej do portu wewnętrznego na zmianę warunków falowych z jednoczesnym zapewnieniem bezpiecznej nawigacji dla jednostek:

- drobnicowiec $L = 130$ m, $B = 20$ m, $T = 7,5$ m o dobrej manewrowości,
- Ro-Ro $L = 130$ m, $B = 20$ m, $T = 6$ m o doskonałej manewrowości.

Rozpatrzono dwa warianty poszerzenia drogi wodnej, które uzgodniono zarówno z Zespołem wykonującym analizę nawigacyjną jak i z Zamawiającym. Zgodnie z tymi ustaleniami do obliczeń numerycznych zbudowano 3 modele, które uwzględniały następujące układy zabudowy hydrotechnicznej portu Kołobrzeg:

- stan istniejący,
- wariant przebudowy A – poszerzenie drogi wodnej do szerokości $B = 60$ m (przebudowa obejmuje skrócenie pięciu szykan na Falochronie Zachodnim, znaczne ingerencje w Nabrzeże Wydmowe-Zabezpieczające, Nabrzeże Marynarskie, Nabrzeże Flagowe, Nabrzeże Zachodnie Żelbetowe i nieznaczne w Nabrzeże Bunkrowe (Rys. 1A),
- wariant przebudowy B – poszerzenie drogi wodnej do szerokości $B = 60$ m od piątej szykany Falochronu Zachodniego do północnego zakończenia Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego (przebudowa obejmuje skrócenie pięciu szykan na Falochronie Zachodnim oraz znaczną ingerencję w Nabrzeże Wydmowe-Zabezpieczające przy pozostawieniu szerokości drogi wodnej $B = 50$ m na wysokości Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego i Nabrzeża Bunkrowego (Rys. 1B).

Modelowaniem numerycznym objęto obszar uwzględniający przedpole portu, drogę wodną do portu pomiędzy falochronami, do wysokości odpowiadającej południowemu zakończeniu Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego oraz Basen Sportowy.

Zakres wykonanych prac obejmował:

- wyznaczenie parametrów falowania na przedpolu portu dla potrzeb modelowania falowania w porcie,
- analizę częstości i kierunków podchodzenia falowania wiatrowego na przedpolu portu w okresie dziesięcioletnim,
- obliczenie falowania w porcie dla:
 - obecnego układu falochronów,
 - wariantu A,
 - wariantu B,

- analizę porównawczą wpływu przebudowy na warunki falowe w rozpatrywanym akwenu.

Wariant A



Wariant B



Rys. 1. Zakres projektowanej przebudowy drogi wodnej w Porcie Kołobrzeg wg wariantów A i B (linie żółte)

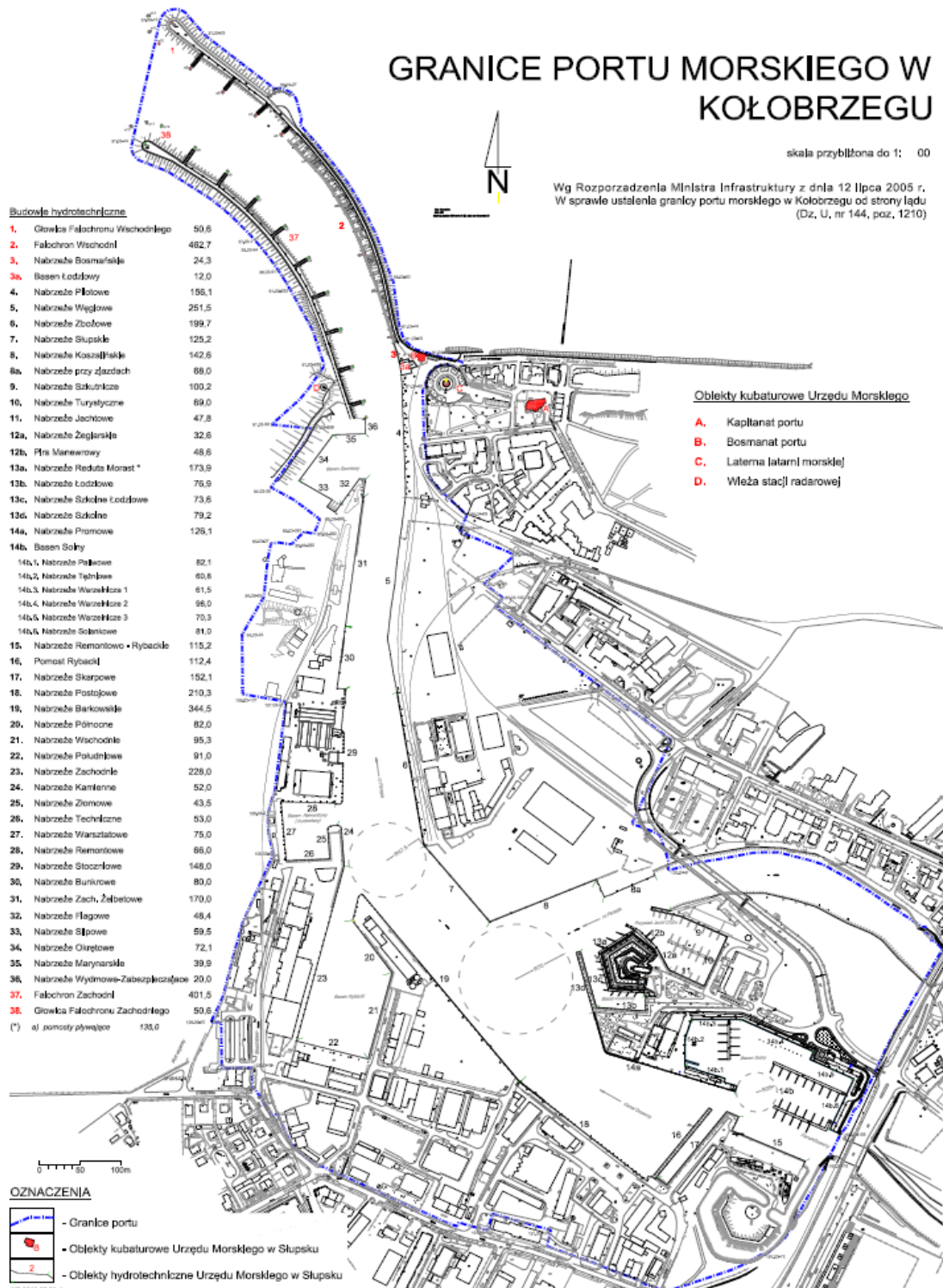
W wstępnej fazie przyjęto założenie, że do analizy wybrany będzie sztorm o okresie powtarzalności raz na 5 lat podchodzący z kierunku, dla którego falowanie w znacznym stopniu przenika do obszaru chronionego falochronami. Analizowany był sztorm z kierunku NW, kierunek ten reprezentuje najczęściej występujące falowanie na przedpolu portu.

W rezultacie modelowanie falowania wewnątrz portu przeprowadzono zarówno dla istniejącego układu falochronów, jak i dwóch wariantów przebudowy falochronu/nabrzeży dla sztormu o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na 5 lat z kierunku $A_z = 315^\circ$, dla którego falowanie na odmorskiej granicy modelu zostało opisane widmem JONSWAP o parametrach $H_s = 3,81$ m, $T_p = 9,23$ s.

Dla potrzeb realizacji wymaganych obliczeń Zarząd Portu Morskiego Kołobrzeg sp. z o.o. dostarczył opis istniejących konstrukcji hydrotechnicznych w porcie wraz z planem portu i dokumentacją pomiarów batymetrycznych na torze wodnym.

2. Opis portu

Według Locji Bałtyku Wybrzeże Polskie 502 (2016) na torze podejściowym występują naturalne głębokości 8,0 m, a na ostatnim odcinku toru w pobliżu głowicy utrzymywana jest pogłębiona do 8,0 m rynnica. Na wejściu do portu szerokość drogi wodnej pomiędzy dalbami kierującymi dochodzi do 80 m, natomiast odległość między falochronami na poziomie zwierciadła wody przekracza 105 m, pozwalając na znaczną penetrację falowania w rejon kanału portowego. Długotrwała przebudowa wejścia do kołobrzeskiego portu, potwierdzona uzyskaniem pozwolenia na użytkowanie zakończyła się w 2010 r. W ramach tej przebudowy wybudowany został nowy Falochron Zachodni o długości 452 m o konstrukcji narzutowej, zabezpieczony gwiazdoblokami o ciężarze 5 T z nadbudową żelbetową oraz wydłużony Falochron Wschodni o 150 m (konstrukcja analogiczna) do długości 513 m. Układ falochronów wyznacza drogę wodną prowadzącą do portu od początkowej szerokości 80 m do szerokości 46 m u nasady falochronu w rejonie Nabrzeża Wydmowego-Zabezpieczającego. W szczególności szerokości te wyznaczają szykany wraz ze stalowymi dalbami kierunkowymi oraz kierownica na Falochronie Wschodnim. Rola szykan polega na rozpraszaniu energii falowania przenikającej do wnętrza portu. Długa droga wodna, o głębokości nieznacznie przekraczającej 6 m, o układzie łukowym efektywnie zapewnia redukcję falowania przenikającego w obszar osłonięty falochronami. Układ nabrzeży, basenów i pirsów wewnątrz portu przedstawiono na rys. 2 uzyskanym od Zarządu Morskiego Portu Kołobrzeg.



Rys. 2. Istniejący układ Portu Kołobrzeg

3. Oddziaływanie środowiska morskiego

3.1 Charakterystyczne poziomy morza

Poziomy wody w Kołobrzegu są obserwowane od 1867 roku. Wodowskaz w porcie jest usytuowany przy Nabrzeżu Bosmańskim w Basenie Łodziowym. Charakterystyczne poziomy morza, według danych IMGW, zamieszczono w tab. 1. Jako stan alarmowy dla tego rejonu Bałtyku przyjmowany jest poziom wody równy 610 cm.

Tab.1. Charakterystyczne poziomy wody w Kołobrzegu (IMGW)

Poziomy morza	Stan [cm]	Data pomiaru	Okres obserwacji
MAKSYMALNY	722	13.11.1872	od 1867
WWW	647	-	1948–2006
SWW	546	-	1948–2006
SW	500	-	1948–2006
SNW	463	-	1948–2006
NNW	370	-	1948–2006
NAJNIŻSZY	370	04.11.1979	Od 1873

Obecnie najnowszym zwartym opracowaniem, pozwalającym na wyznaczenie maksymalnych poziomów morza o zadanym okresie powtarzalności jest praca Wiśniewskiego i Wolskiego, 2009. W pracy tej przedstawiono tabelarycznie, teoretyczne maksymalne poziomy morza wraz z ich prawdopodobieństwem wystąpienia dla portu w Kołobrzegu za okres 1948-2006, wyznaczone rozkładem Pearsona, metodą największej wiarygodności. Wyniki te zamieszczono w tab. 2.

Tab.2. Maksymalne poziomy wody dla zadanych okresów powtarzalności wyznaczone na podstawie pomiarów z lat 1948÷2006, Stacja Kołobrzeg (Wiśniewski i Wolski 2009)

Okres powtarzalności T_R [lata]	Poziom morza [cm]
1	537,6
2	593,1
5	621,6
10	639,6
20	656,3
50	677,0
100	692,0
200	708,1

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w Zaleceniach do Projektowania i Wykonywania Morskich Budowli Hydrotechnicznych (Mazurkiewicz 2006), dla falochronów osłaniających wejścia portowe należy przyjmować projektowy poziom wody o prawdopodobieństwie przewyższenia równym 1%. Z kolei IPCC zaleca dodatkowo uwzględniać prognozowany wzrost poziomu morza związany z efektem cieplarnianym.

Maksymalne i minimalne poziomy wody wyznaczone na podstawie pomiarów z lat 1867–2006, Wiśniewski i Wolski (2009), o okresach powtarzalności $T_R = 50$ lat oraz $T_R = 100$ lat wynoszą:

- maksymalny poziom wody ($T_R = 50$ lat) $\rightarrow 677$ cm,
- minimalny poziom wody ($T_R = 50$ lat) $\rightarrow 383$ cm.
- maksymalny poziom wody ($T_R = 100$ lat) $\rightarrow 692$ cm,
- minimalny poziom wody ($T_R = 100$ lat) $\rightarrow 377$ cm.

Projektowy poziom wody maksymalnej

Przy wyznaczaniu poziomu maksymalnego uwzględniono najnowsze dane dotyczące prognozowanego wzrostu poziomu wody związanego z efektem cieplarnianym. Przyjmując za Stramską i Chudziakiem (2013) roczny wzrost poziomu wody równy 0,33 cm otrzymuje się:

- prognozowany wzrost poziomu morza w perspektywie 50 lat (+17 cm),
- prognozowany wzrost poziomu morza w perspektywie 100 lat (+33 cm),

skąd:

$$Z_{proj-50} = 677 + 17 = 694 \text{ cm (+1,94 m powyżej średniego poziomu morza),}$$

$$Z_{proj-100} = 692 + 33 = 725 \text{ cm (+2,25 m powyżej średniego poziomu morza).}$$

Projektowy poziom wody minimalnej

Jako projektowy minimalny poziom wody przyjęto poziom wody o prawdopodobieństwie przewyższenia równym 1%. Przy wyznaczaniu tego poziomu nie uwzględniono prognozowanego wzrostu poziomu wody związanego z efektem cieplarnianym. W rezultacie otrzymano:

$$Z_{proj-min} = 377 \text{ cm (-1,23 m poniżej średniego poziomu morza).}$$

3.2 Wyznaczanie falowania na przedpolu portu

Pomiary falowania na polskich wodach południowego Bałtyku są wykonywane nieregularnie i w niewielu miejscach, tak że na ich podstawie niemożliwym jest wykonanie długoterminowych analiz określających prawdopodobieństwo występowania fal o różnych parametrach (wysokości, okresu i kąta podchodzenia). Dlatego też do odtworzenia falowania wykorzystywane są modele falowania. Danymi wejściowymi do modeli falowania są pola wiatrów. W starszych pracach opierano się na wynikach obliczeń falowania wykonywanych modelami parametrycznymi dla wiatrów stacjonarnych i jednorodnych. Podstawowym uproszczeniem tych modeli było założenie, że wiatry pomierzone na stacjach brzegowych (lądowych) są reprezentatywne dla całego Bałtyku i mogą być przyjmowane jako czynnik sprawczy generacji fal wiatrowych na tym akwenie.

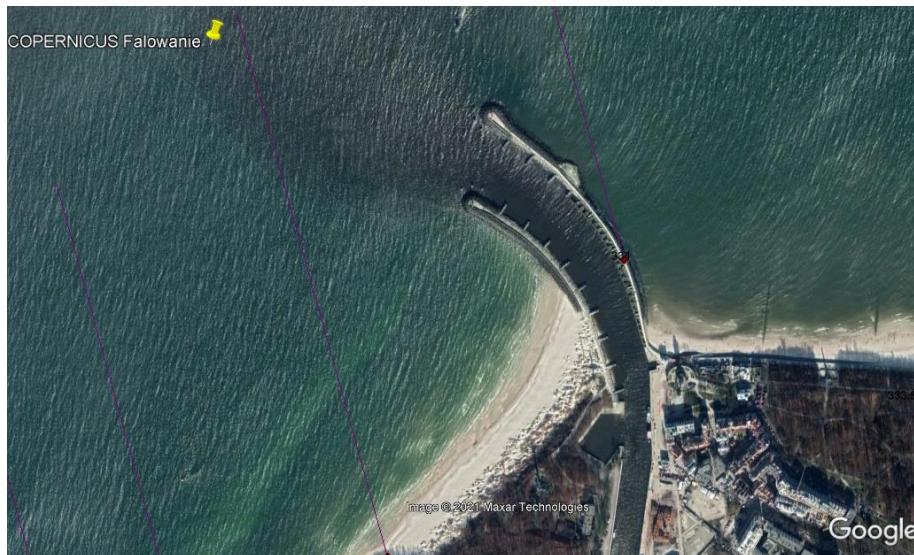
W latach dziewięćdziesiątych XX wieku systematycznie uruchamiano modele operacyjne, za pomocą których prognozowano falowanie przy wykorzystaniu mezoskalowych modeli atmosfery obejmujących cały Bałtyk. W Polsce modelowanie takie realizowane jest w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM). Również w europejskim programie Copernicus stworzono bazy danych

zawierające parametry falowania morskiego dla różnych akwenów. W prognozowaniu najczęściej jest wykorzystywany model WAM (WaveModelling, 1988), który przy wykorzystaniu historycznych układów pola wiatrowego i zastosowaniu analizy wstecznej pozwolił na rekonstrukcję pola falowego dla dłuższych okresów czasu. Znane są prace prezentujące wyniki rekonstrukcji falowania dla okresu 44 lat (1958-2001) wraz z porównaniem wyników modelowania do pomiarów in situ, czy też pomiarów satelitarnych (Cieślikiewicz i in., 2005). Wyniki tych analiz porównawczych jednoznacznie potwierdzają dużą zgodność parametrów falowych uzyskiwanych z modelu numerycznego z parametrami pomiarowymi. W wyniku tego typu obliczeń dla każdej kolejnej godziny otrzymywane są reprezentatywne parametry fali, tj. wysokości fali znacznej H_S , okresy T_P i azymuty kątów podchodzenia fali do brzegu A_Z w poszczególnych węzłach siatki numerycznej.

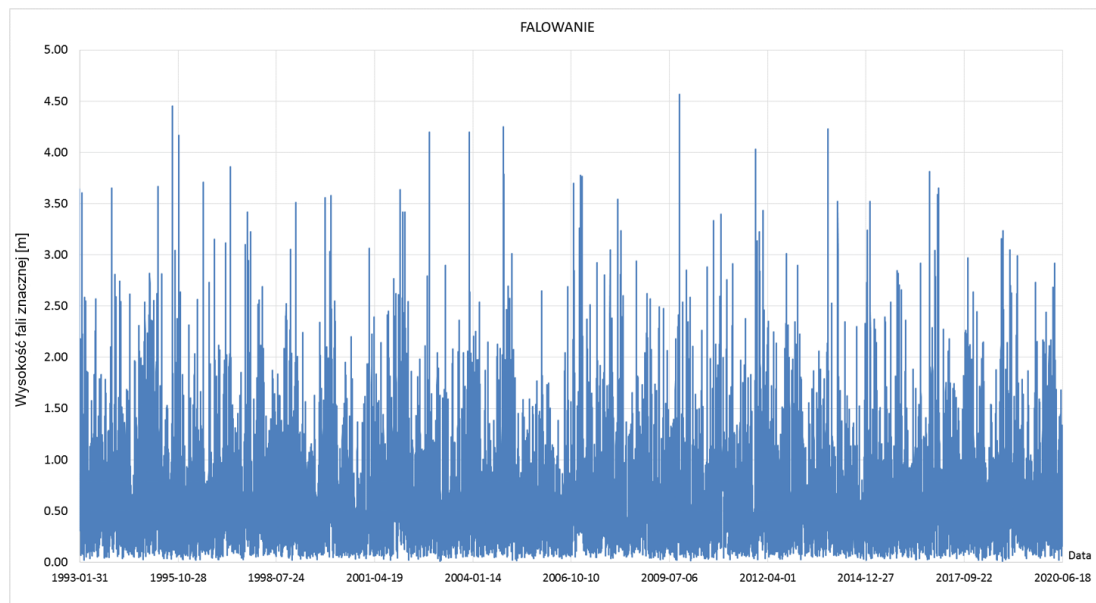
Do analizy klimatu falowego w rejonie Kołobrzegu wykorzystano dane pochodzące z bazy danych programu zarządzanego przez Komisję Europejską – Copernicus. Wśród dostępnych danych znajdują się wyniki rekonstrukcji oraz prognozy falowania na Morzu Bałtyckim. Obejmują one okres od 01.01.1993 do chwili obecnej. Są to dane obliczeniowe uzyskane przy pomocy numerycznego modelu falowania WAM (cykl 4.6.2). Model zaimplementowano na siatce numerycznej o rozdzielczości ok. 1 mili morskiej (ok. 1,85 km). Wyniki obejmują m.in. takie parametry falowe jak: wysokość fali znacznej, okres piku energii falowania oraz azymut promienia falowego wygenerowano z krokiem 1-godzinnym.

Dla potrzeb niniejszej pracy w celu wyznaczenia parametrów falowania na przedpolu portu w Kołobrzegu wybrano punkt o współrzędnych 15.5415°E 54.1916°N położonego na głębokości $h = 12$ m, którego lokalizację pokazano na rys. 3.

Walidacji modelu dokonano na podstawie danych z 9 boi falowych obejmujących okres 1996–2018 w przypadku rekonstrukcji falowania (Lindgren i in., 2020) oraz 2016–2017 w przypadku prognozy falowania (Vähä-Piikkiö i in., 2019). Bardzo dobrą jakość danych falowych wytworzonych w ramach usługi CMEMS, potwierdziło porównanie tych danych z danymi IBW PAN pochodzącymi z pomiarów boją falową zakotwiczoną w rejonie Lubiatowa, realizowanych w sposób ekspedycyjny.



Rys. 3. Lokalizacja punktu o współrzędnych $15.5415^{\circ}E$ $54.1916^{\circ}N$, dla analizy falowania na przedpolu Portu Kołobrzeg



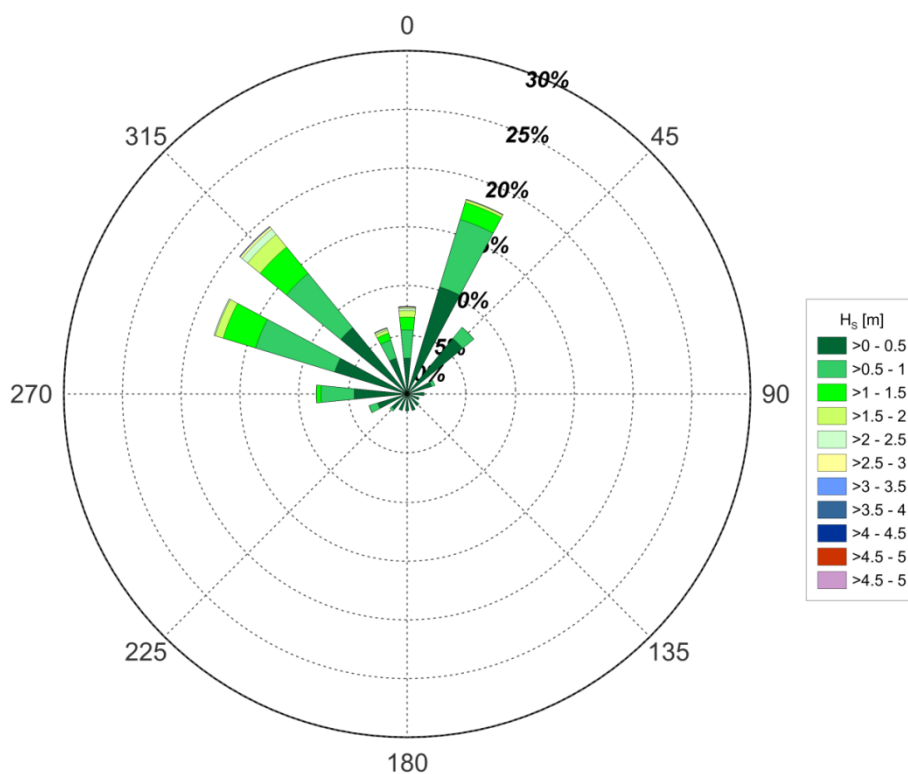
Rys. 4. Przebieg czasowy zmienności wysokości fali H_s na przedpolu Portu Kołobrzeg w punkcie $15.5415^{\circ}E$ $54.1916^{\circ}N$ w okresie od 01.01.1993 do 18.06.2021

Przebieg czasowy zmienności wysokości fali znacznej H_s dla całego badanego okresu przedstawiono na rys. 4. Warto zwrócić uwagę, że w notowaniach wystąpiło 1 zdarzenie z wysokością fali przekraczającą 4,5 m. Zbiór ten przedstawia H_s z rozdzielczością godzinową.

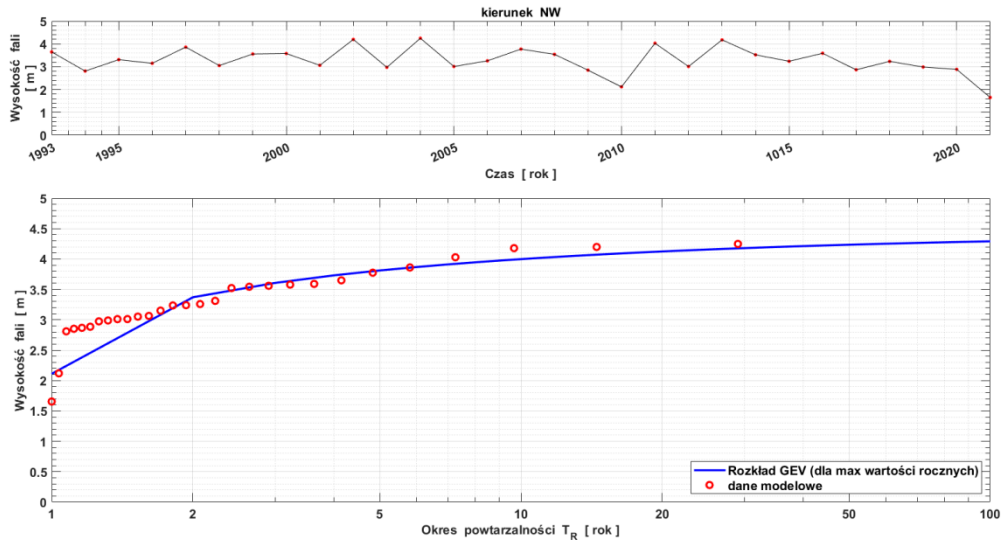
Wybór kierunku podchodzenia fal, najbardziej właściwego do przeprowadzenia analizy porównawczej, uzależniony był z jednej strony układem i orientacją falochronów zewnętrznych (kierunek, dla którego największa ilość energii falowej przenika w obszar chroniony), z drugiej zaś częstością zdarzeń w roku średnim. Róża falowania dla całego okresu badanego przedstawiona została na rys. 5. Widać z niej wyraźnie, że falowanie z kierunków NW i NNE występują najczęściej. Dla portu Kołobrzeg kierunki odmorskie zawierają się w sektorze WSW÷ENE. Długoterminową analizę falowania przeprowadzono po wstępnym podziale wszystkich danych na

16 kierunków podchodzenia fal. Dla każdego z tych kierunków wyznaczono parametry falowania o określonym prawdopodobieństwa powtarzalności. W tym celu z 28-letniego zbioru danych falowych w punkcie prognostycznym wybrano z każdego roku maksymalne wysokości fali. Dla tak otrzymanych zbiorów, przy wykorzystaniu statystycznego rozkładu GEV (General Extreme Value, Kamphuis 2010), wyznaczono maksymalne wysokości fal o zadanym okresie powtarzalności dla wszystkich kierunków. Na rys. 6 zamieszczono otrzymany z obliczeń rozkład prawdopodobieństwa wysokości fal znacznych dla kierunku NW, który został wybrany do przeprowadzenia analizy porównawczej warunków falowych w akwatorium portowym, pomiędzy sytuacją aktualną oraz rozpatrywanymi wariantami przebudowy portu.

Z kolei rys. 7 przedstawia wyznaczone z długoterminowej analizy statystycznej wysokości fal znacznych o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat dla szesnastu kierunków na przedpolu portu Kołobrzeg w punkcie odległym o ok. 0,5 km od głowic falochronów. Rysunek ten dodatkowo ilustruje rozpatrywane kierunki podchodzenia falowania wiatrowego w odniesieniu do układu falochronów portu Kołobrzeg.

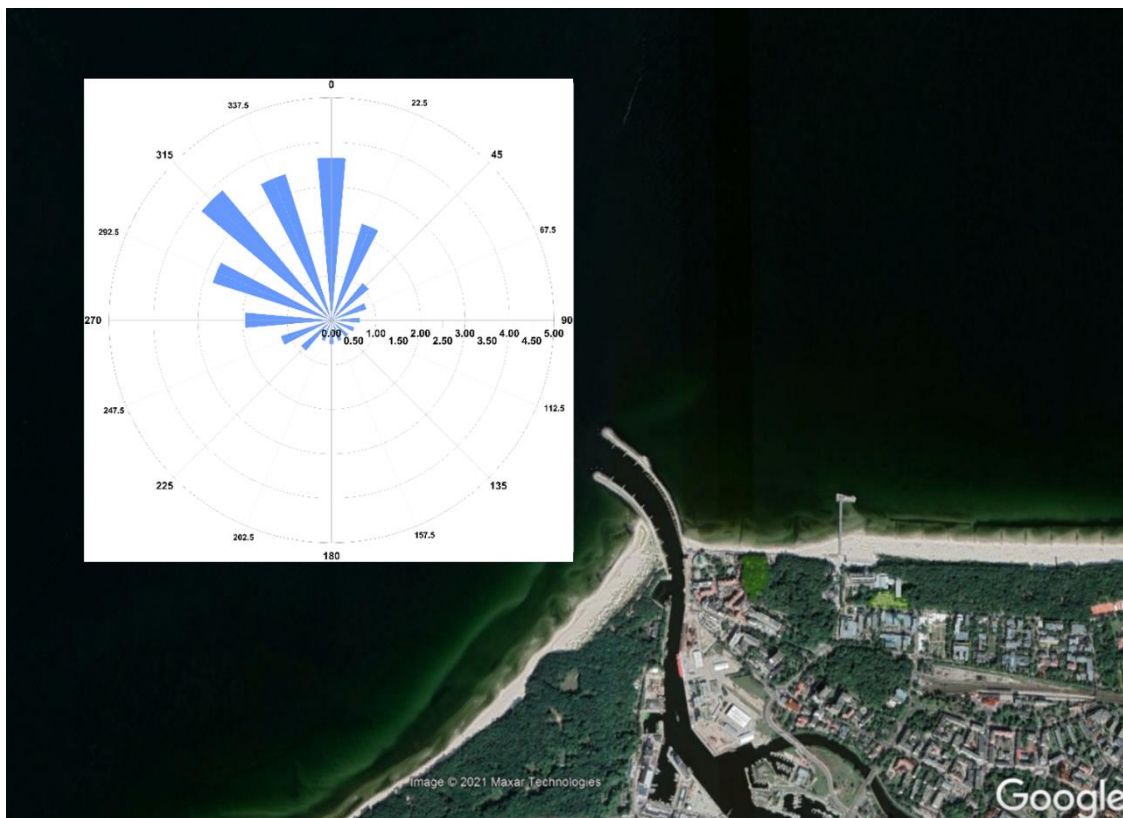


Rys. 5. Róża falowania w punkcie prognostycznym na przedpolu Portu Kołobrzeg



Rys. 6. Obliczony rozkład wysokości fal znacznych dla falowania podchodzącego z kierunku NW w punkcie prognostycznym

Parametry fali znacznej charakteryzującej sztorm występujący z prawdopodobieństwem pojawienia się raz na 5 lat z kierunku północno-wschodniego przedstawiono w tab. 3.



Rys. 7. Wyznaczone z analizy statystycznej wysokości fal znacznych dla wszystkich kierunków o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat

Tab.3. Parametry fal o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat przyjęte w punkcie prognostycznym do obliczania falowania w porcie

Kierunek propagacji fali	Okres powtarzalności $T_R = 5$ lat	
	Wysokość fali znacznej H_S [m]	Okres fali znacznej T_P [s]
NW	3,81	9,2

4. Obliczenie falowania w akwenu portowym

4.1 Opis modelu numerycznego

Obliczenia falowania wewnątrz portu wykonano przy wykorzystaniu licencyjnego, duńskiego pakietu programów z rodziny MIKE 21 BW (MIKE, 2020). Pakiet ten jest oparty na numerycznym rozwiązaniu w dziedzinie czasu, równań typu Boussinesq'a. Równania te uwzględniają nieliniowość oraz dyspersję fal. Rozszerzone równania Boussinesq'a wprowadzone przez Madsena i innych (1991) pozwalają na symulację przemieszczania się ciągu fal na obszarach o ograniczonych głębokościach. W przeprowadzonych obliczeniach uwzględniono:

- efekt splotania,
- refrakcję falowania,
- dyfrakcję fal wokół konstrukcji hydrotechnicznych,
- załamywanie się fal,
- dyssypację energii fal wywołaną tarciem o dno,
- nieliniowe współdziałanie pomiędzy poszczególnymi składowymi widma falowego,
- rzeczywiste odbicia fal od falochronów i budowli usytuowanych wewnątrz portu,
- interpretację falowania w ujęciu widmowym (częstotliwościowo-kierunkowym).

Przy uwzględnieniu powyższych zjawisk, efekty związane z grupowaniem się fal z wolnozmiennymi oscylacjami basenów wynikającymi z odbić, także są uwzględnione w obliczeniach.

W modelowaniu falowania wewnątrz Portu Kołobrzeg wykorzystano moduł dwuwymiarowy (dwie współrzędne przestrzenne, z uśrednieniem wielkości względem głębokości) rozwiązujący rozszerzone równania Bussinesq'a metodą różnic skończonych.

Modelowany obszar objął swoim zasięgiem wszystkie akweny: przedpole falochronów, między falochronami, basen sportowy oraz drogę wodną do portu wewnętrznego na wysokości nabrzeży Zachodniego Żelbetowego oraz Bunkrowego.

Na krawędziach bocznych obszaru modelowego (poza obszarem obliczeniowym), przyjęto tzw. warunek pochłaniania energii falowania. Natomiast granica lądowa rozpatrywanego akwenu została odwzorowana geometrycznym układem budowli morskich w porcie oraz przebiegiem naturalnej linii brzegowej na zewnątrz portu.

Przy obliczaniu parametrów falowania wewnątrz portu przyjęto kwadratową siatkę numeryczną o odległości między węzłami równej 1,0 m. Dla tak przyjętej geometrii rozpatrywanego obszaru, w celu spełnienia warunku zbieżności obliczeń założono, że liczba Couranta nie przekroczy wartości 0,25. W konsekwencji tego założenia krok czasowy wynosił $\Delta t = 0,02$ s.

4.2 Założenia i scenariusze obliczeniowe

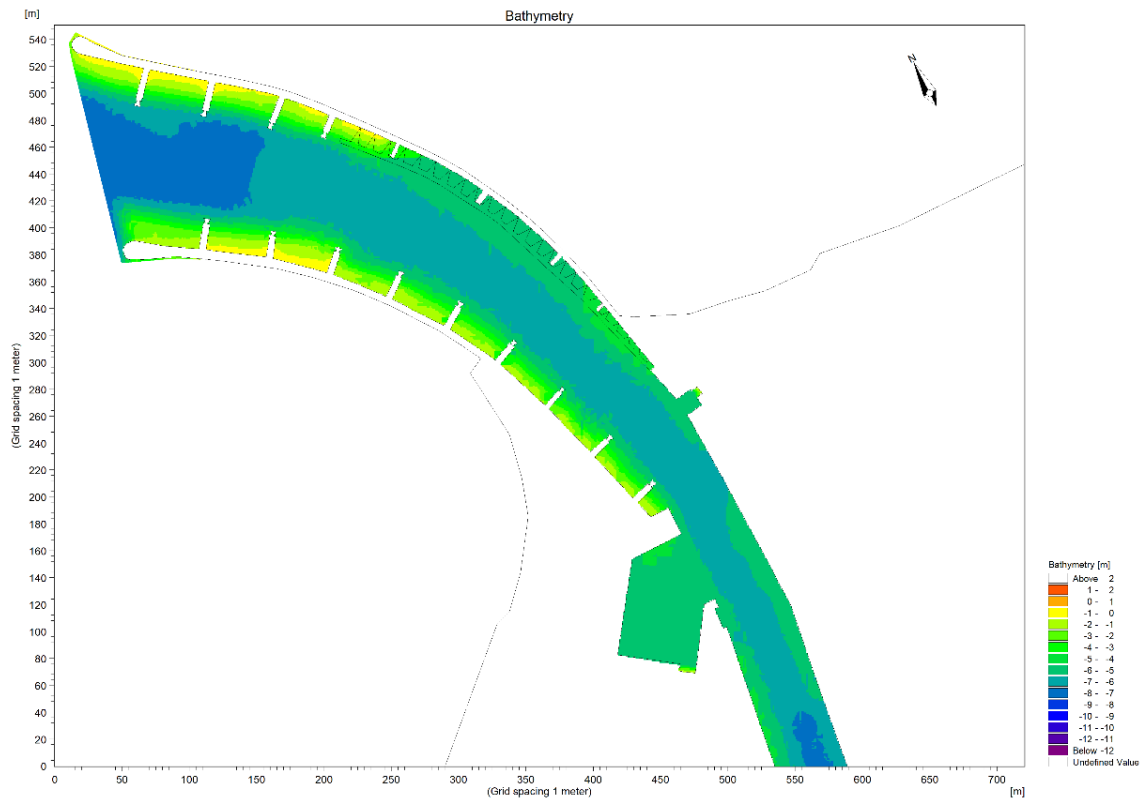
Założenia

W budowie modelu numerycznego portu Kołobrzeg zastosowano technikę obrotu układu odniesienia o kąt 30° , w celu wykorzystywania do symulacji obliczeniowych generatora prostego (składającego się z jednej linii) dla falowania podchodzącego z kierunku NW. Rzeczywisty układ portu zorientowany do kierunku północ (N) pokazano na rys. 8a, natomiast obrócenie układu odniesienia pokazano na rys. 8b.



Rys. 8. Obrót układu odniesienia w modelu numerycznym.
 a) rzeczywisty układ portu zorientowany do kierunku N b) obrót układu odniesienia w modelu

Warunki batymetryczne przyjęte w modelu numerycznym pochodziły z pomiarów sondażowych realizowanych na potrzeby eksploatacji portu i udostępnione zostały przez Zarządu Portu Morskiego w Kołobrzegu. Kilka sondaży, z których ostatni wykonany został w 2019 r. pokazują, że droga wodna do portu utrzymuje głębokość $h \approx 6,5$ m. Batymetrię obszaru objętego modelowaniem numerycznym w modelu MIKE 21 BW przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Batymetria przyjęta w modelu numerycznym

Granica lądowa rozpatrywanego akwenu portowego została odwzorowana geometrycznym układem budowli hydrotechnicznych (falochrony, nabrzeża, szykany).

Przy obliczaniu falowania w porcie przyjęto następujące wartości współczynników odbicia K_R od konstrukcji hydrotechnicznych, od strony portu (Zanuttigh, van der Meer 2006):

- falochrony narzutowe $\rightarrow K_R = 0,60$,
- szykany posadzone na rurach stalowych z wypełnieniem oraz obrzutem kamiennym $\rightarrow K_R = 0,75$,
- nabrzeża pionowościenne $\rightarrow K_R = 0,95$,
- slipy $\rightarrow K_R = 0,40$.

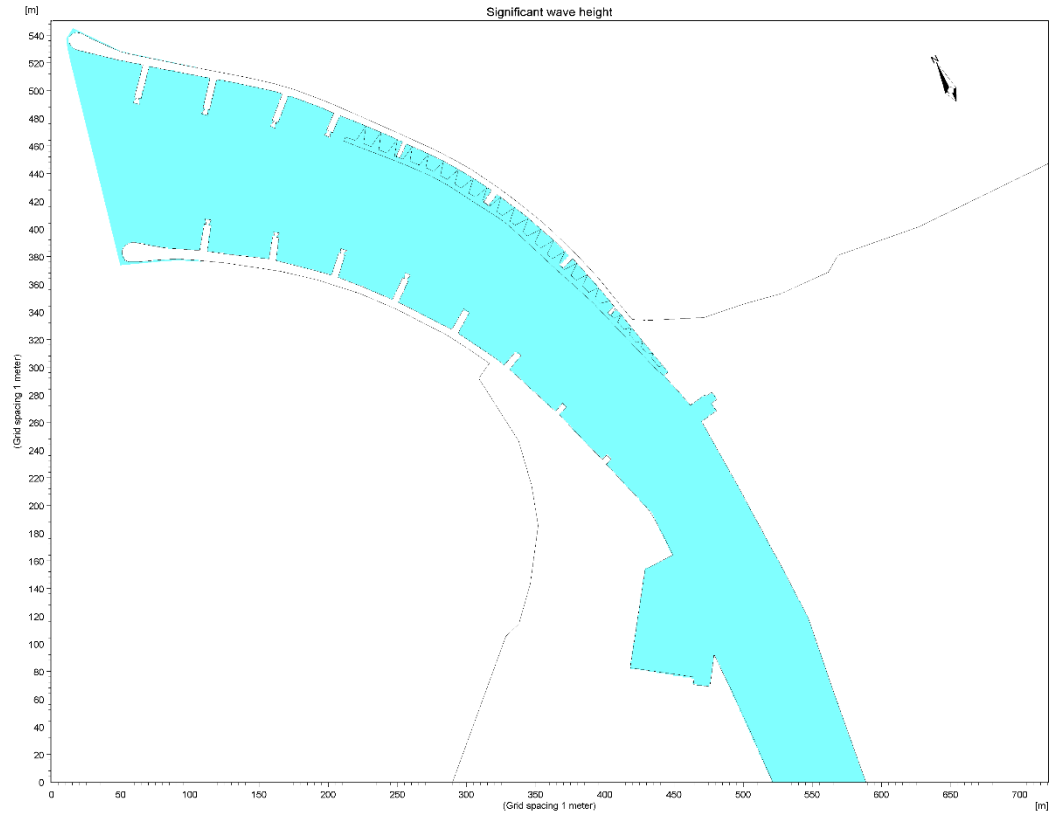
Zgodnie z ustaleniami z Zamawiającym analiza porównawcza została przeprowadzona dla wymuszeń sztormowych pojawiających się z prawdopodobieństwem wystąpienia raz na 5 lat. Z analizy klimatu falowego na przedpolu portu Kołobrzeg (rozdz. 3.2) wynika, że najwyższe fale, które przenikają do wnętrza portu podchodzą z kierunku NW. Parametry fali znacznej, charakteryzującej sztorm o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat, przedstawiono w tab. 3. Zostały one przyjęte jako warunek brzegowy do obliczenia falowania w porcie, zarówno dla stanu aktualnego jak i obu wariantów jego przebudowy. W modelu MIKE 21 rzeczywistą, losową zmienność parametrów falowania opisano funkcją gęstości widmowej typu JONSWAP.

Scenariusze obliczeniowe

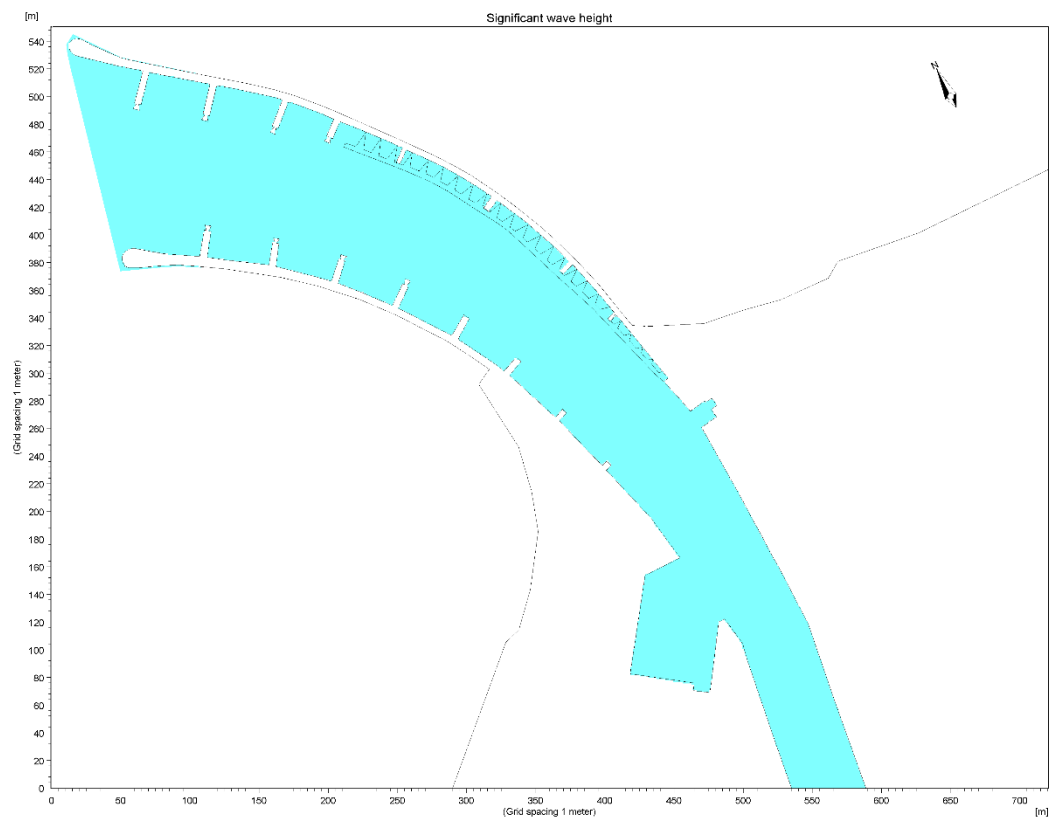
Celem przeprowadzonych obliczeń falowania w Porcie Kołobrzeg było wsparcie procesu projektowego planowanej przebudowy wejścia do portu. W szczególności chodziło o znalezienie odpowiedzi, z wykorzystaniem modelowania numerycznego, czy i w jakim stopniu poszerzenia drogi wodnej prowadzącej do portu wewnętrznego będzie wpływać na zmianę warunków falowych.

Obliczenia przeprowadzono dla podchodzenia falowania z kierunku NW, tj. takiego, z którego bezpośrednio największa porcja energii przenika w obszar pomiędzy głowice falochronów. Wymuszenie sztormowe wybrane do analizy porównawczej zostało określone na poziomie sztormu 5-cio letniego (o prawdopodobieństwie pojawienia się raz na 5 lat). Zbudowano trzy modele uwzględniające następujące warianty układu zabudowy hydrotechnicznej portu:

- stan istniejący,
- wariant przebudowy A – poszerzenie drogi wodnej do szerokości $B = 60$ m (przebudowa obejmuje skrócenie pięciu szykan na Falochronie Zachodnim, znaczne ingerencje w Nabrzeże Wydmowe-Zabezpieczające, Nabrzeże Marynarskie, Nabrzeże Flagowe, Nabrzeże Zachodnie Żelbetowe i nieznaczne w Nabrzeże Bunkrowe (rys. 10),
- wariant przebudowy B – poszerzenie drogi wodnej do szerokości $B = 60$ m na odcinku od piątej szykany Falochronu Zachodniego do północnego zakończenia Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego (przebudowa obejmuje skrócenie pięciu szykan na Falochronie Zachodnim oraz znaczną ingerencję w Nabrzeże Wydmowe-Zabezpieczające przy pozostawieniu szerokości drogi wodnej $B = 50$ m na wysokości Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego i Nabrzeża Bunkrowego (rys. 11).

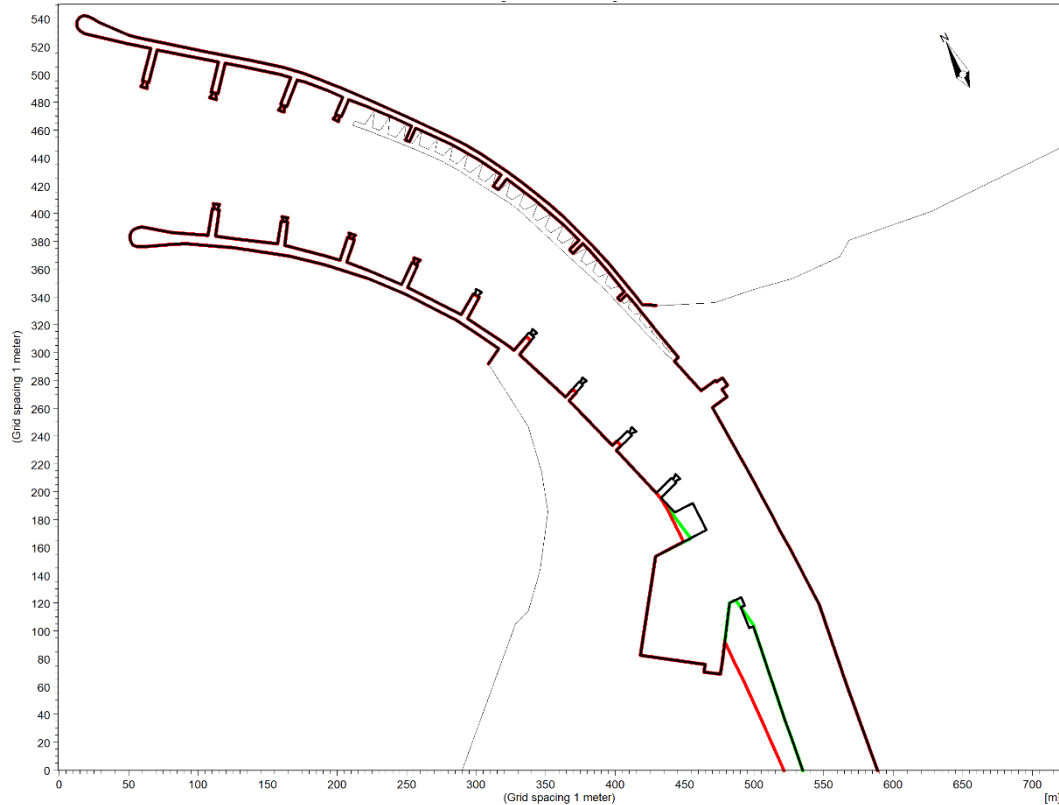


Rys. 10. Wariant A przebudowy wejścia do Portu Kołobrzeg – układ w modelu numerycznym



Rys. 11. Wariant B przebudowy wejścia do Portu Kołobrzeg – układ w modelu numerycznym

Przebudowa dotyczy zachodniego brzegu drogi wodnej prowadzącej do portu wewnętrznego. Warianty A i B różnią się przede wszystkim skalą ingerencji w Nabrzeża Zachodnie Żelbetowe. Na rys. 12 pokazano zakresy przebudowy w Wariancie A (linia czerwona), w Wariancie B (linia zielona) w odniesieniu do stanu aktualnego (linia czarna).



Rys. 12. Zestawienie wariantów oraz stanu aktualnego zabudowy hydrotechnicznej portu (kolor czarny – Stan aktualny, kolor czerwony – Wariant A, kolor zielony – Wariant B)

Dodatkowo za pomocą modelu numerycznego wykonano obliczenia, które miały na celu określenie wpływu wzrostu poziomu zwierciadła wody wywołanego spiętrzeniem sztormowym na falowanie rozprzestrzeniające się wewnątrz portu.

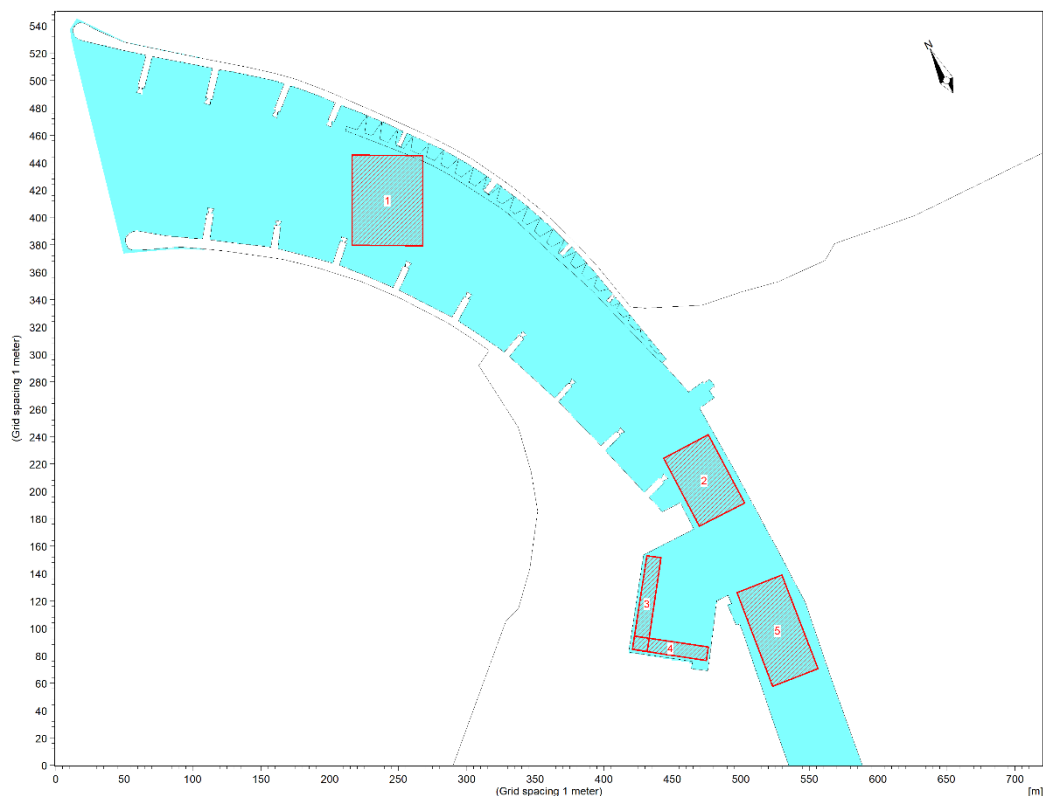
4.3 Metodyka opracowania wyników obliczeń

W celu oceny wpływu poszerzenia drogi wodnej prowadzącej do portu wewnętrznego na zmianę warunków falowych w akwenu pomiędzy falochronami, w Basenie Sportowym oraz w kanale portowym wydzielono pięć obszarów obliczeniowych (kontrolnych) (rys. 13) do analizy porównawczej falowania, według następujących kryteriów:

- **obszar 1** – na wysokości szykan 3 i 4, jest obszarem kontrolnym modelu numerycznego. W każdym rozpatrywanym modelu do tego miejsca przenikające do portu falowanie nie jest modyfikowane bezpośrednio przebudową. W rezultacie warunki falowe powinny pozostawać jednakowe dla wszystkich rozpatrywanych przypadków (stan aktualny, Wariant A i Wariant B);
- **obszar 2** – na wysokości nasady falochronów i Nabrzeża Wydumowego-Zabezpieczającego. Obszar, w którym oczekiwane są zmiany w polu falowym wywołane

poszerzeniem drogi wodnej poprzez skrócenie szykan i ścięcie nabrzeża w obu rozważanych wariantach przebudowy;

- **obszar 3** – obejmuje przedpole Nabrzeża Okrętowego w Basenie Sportowym. Ze względu na większe odsłonięcie tego basenu w proponowanych wariantach przebudowy, uznano za konieczne ocenę zmiany warunków falowych w tym obszarze;
- **obszar 4** – obejmuje przedpole Nabrzeża Slipowego w Basenie Sportowym. Ze względu na większe odsłonięcie tego basenu w proponowanych wariantach przebudowy uznano za konieczne (podobnie jak dla obszaru 3) ocenę zmiany warunków falowych w tym obszarze;
- **obszar 5** – na wysokości początkowego odcinka Nabrzeża Zachodniego Żelbetowego. Ten obszar obliczeniowy pozwoli na oszacowanie zmian w polu falowym wywołanych planowanymi przebudowami w wariantach A i B.



Rys. 13. Lokalizacja wybranych sektorów do analizy falowania w Porcie Kołobrzeg

Dla każdego z tych obszarów obliczono średnie wysokości fal znacznych ze wszystkich węzłów siatki numerycznej znajdujących się wewnątrz tych obszarów. Średnia wysokość fali znacznej dla każdego obszaru w analizowanych wariantach przebudowy portu została odniesiona do średniej wysokości fali znacznej obliczonej dla stanu aktualnego zabudowy portu. Analogiczne działanie przeprowadzono dla maksymalnych wysokości fal znacznych w wyodrębnionych obszarach obliczeniowych. Obliczenia te przeprowadzono w obszarach kontrolnych, które pomijają wąskie pasy fal odbitych w bezpośrednim sąsiedztwie budowli hydrotechnicznych. Należy podkreślić, że wysokość fali znacznej jest definicją statystyczną i odnosi się do średniej z 1/3

fal najwyższych w ciągu falowym. Oznacza to, że w każdym obliczeniowym obszarze mogą pojawić się podczas sztormu losowo, pojedyncze fale wyższe, których maksymalne wysokości mogą przekroczyć o ok. 60–80% wartości fal znacznych. Przyjęcie tych samych warunków wejściowych w modelu numerycznym, we wszystkich analizowanych wariantach zabudowy portu oraz tego samego sposobu opracowania wyników obliczeniowych, pozwala na przeprowadzenie analizy porównawczej pomiędzy rozpatrywanymi układami portu.

Wyniki obliczeń symulacji numerycznych przedstawiono zarówno w postaci map rozkładu fali znacznych w analizowanym obszarze, jak i zestawień tabelarycznych obliczonych wysokości fal znacznych dla analizowanych układów hydrotechnicznej zabudowy portu.

4.4 Wyniki obliczeń

4.4.1 Wprowadzenie

W przypadku przeprowadzania obliczeń z wykorzystaniem modeli numerycznych zalecane jest (jeżeli jest to możliwe) przeprowadzenie procesu weryfikacji modelu. Proces taki polega na porównaniu wyników pomiarów *in-situ* z wynikami otrzymywanymi z modelu. Jednakże wykonanie takich badań pociąga za sobą znaczne koszty pozyskania i instalacji aparatury pomiarowej, realizacji kampanii pomiarowej oraz przetworzenia wyników pomiarowych. W prezentowanej pracy badania tego typu nie były realizowane. Autorzy niniejszego opracowania wykonywali weryfikację modelu MIKE 21 BW w rejonie Portu Północnego w Gdańsku wykazując bardzo dużą zgodność wyników pomiarowych z rezultatami symulacji numerycznych (Marcinkowski i in. 2015).

Warto jednak zwrócić uwagę na obserwacje przenikania falowania do portu, które często pozwalają na jakościową ocenę zjawisk na akwenach badanych. Na rys. 14 zamieszczono dwa zdjęcia satelitarne uzyskane z Google Earth pokazujące przenikanie umiarkowanego falowania podchodzącego z sektora W–N do portu. Zdjęcia te dowodzą dużej efektywności szykan na falochronach Portu Kołobrzeg, będących przyczyną znacznego zanikania falowania wiatrowego na odcinku od głowic falochronów do ich nasad. Ponadto obrazy te wskazują również na istotne zmniejszenie wysokości fali wchodzącej do portu w miarę pokonywania przez nią coraz większej krzywizny osi falochronów.



Rys. 14. Przenikanie umiarkowanego falowania z sektora W-N do Portu Kołobrzeg (fot. Google Earth)

Z kolei na rys. 15 pokazano stan zafalowania w Basenie Sportowym. Obraz ten, pochodzący z zasobów własnych, przedstawia sytuację, w której falowania o parametrach $H_S = 1,1$ m, $T_P = 4,8$ s, $A_Z = 302^\circ$ na przedpolu portu, praktycznie zostało całkowicie wytłumione po osiągnięciu Basenu Sportowego.



Rys. 15. Warunki falowe w Basenie Sportowym podczas falowania $H_S = 1,1$ m, $T_P = 4,8$ s, $A_Z = 302^\circ$ na przedpolu portu (fot. zasoby własne)

4.4.2 Wpływ spiętrzenia sztormowego

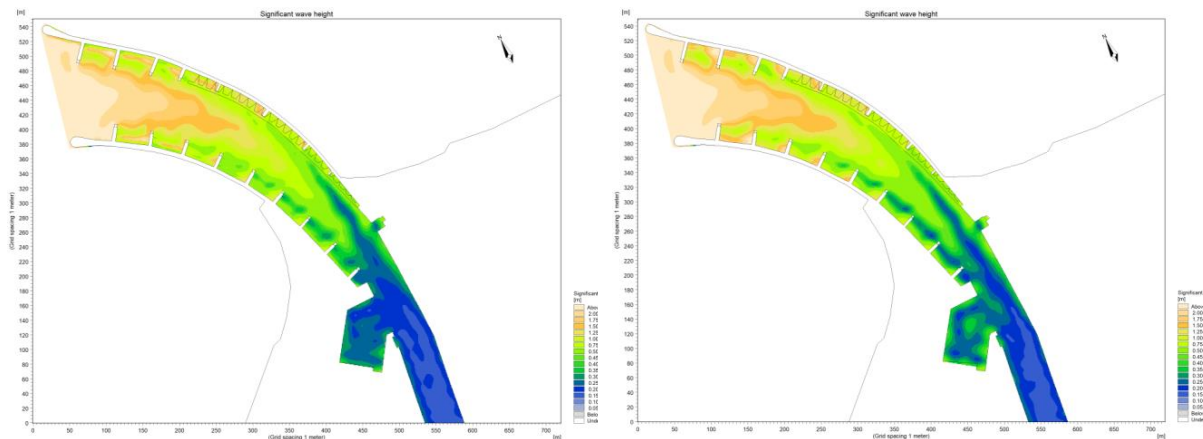
Ocenę wpływu spiętrzenia sztormowego na przenikanie falowania do wnętrza portu wykonano dla stanu aktualnego portu. Naturalne głębokości na przedpolu portu w Kołobrzegu osiągają i nieznacznie przekraczają wartość 8 m, natomiast na torze wodnym w porcie utrzymywana jest głębokość 6,5 m. Obliczenia transformacji falowania w akwenie portowym wykonano dla założonego sztormu o okresie powtarzalności raz na 5 lat. Obliczenia te wykonano dwukrotnie: dla średniego poziomu morza 500 cm oraz dla poziomu 694 cm, tj. odpowiadającemu sytuacji, w której uwzględniono spiętrzenie sztormowe występujące z prawdopodo-

bieństwem pojawienia się raz na 50 lat (rozd. 3.1). Oznacza to, w każdym węźle siatki numerycznej głębokości zwiększyły się o 1.94 m.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń pokazano na rys. 16, przedstawiając rozkład falowania dla średniego poziomu morza (500 cm) po stronie lewej oraz z uwzględnieniem spiętrzenia sztormowego (694 cm) po stronie prawej. Z obliczeń tych wynika, że wysokości fal znacznych w przypadku uwzględnienia spiętrzenia sztormowego wzrastają o 6% dla średnich wysokości fal znacznych i o 14% dla wartości maksymalnych w 2 obszarze obliczeniowym, pozostając praktycznie niezmienione w rejonie wejścia do portu (obszar 1). Dla pozostałych akwenów (obszar 3, 4 i 5) średni wzrost wysokości fal nie przekracza wartości 5%.

Z praktycznego punktu widzenia w analizie porównawczej uwzględnianie spiętrzenia sztormowego nie będzie miało żadnego wpływu na wyniki przeprowadzonych obliczeń (metodyka przedstawiona w rozdz. 4.3).

Przedstawione w następnych podrozdziałach obliczenia zostały wykonane dla średniego poziomu morza 500 cm.



Rys. 16. Warunki Porównanie obliczeniowych rozkładów wysokości fal znacznych w sztormie $H_S = 3,8$ m, $T_P = 9,2$ s, $AZ = 315^\circ$ dla poziomu morza 500 cm (lewy) i 694 cm (prawy)

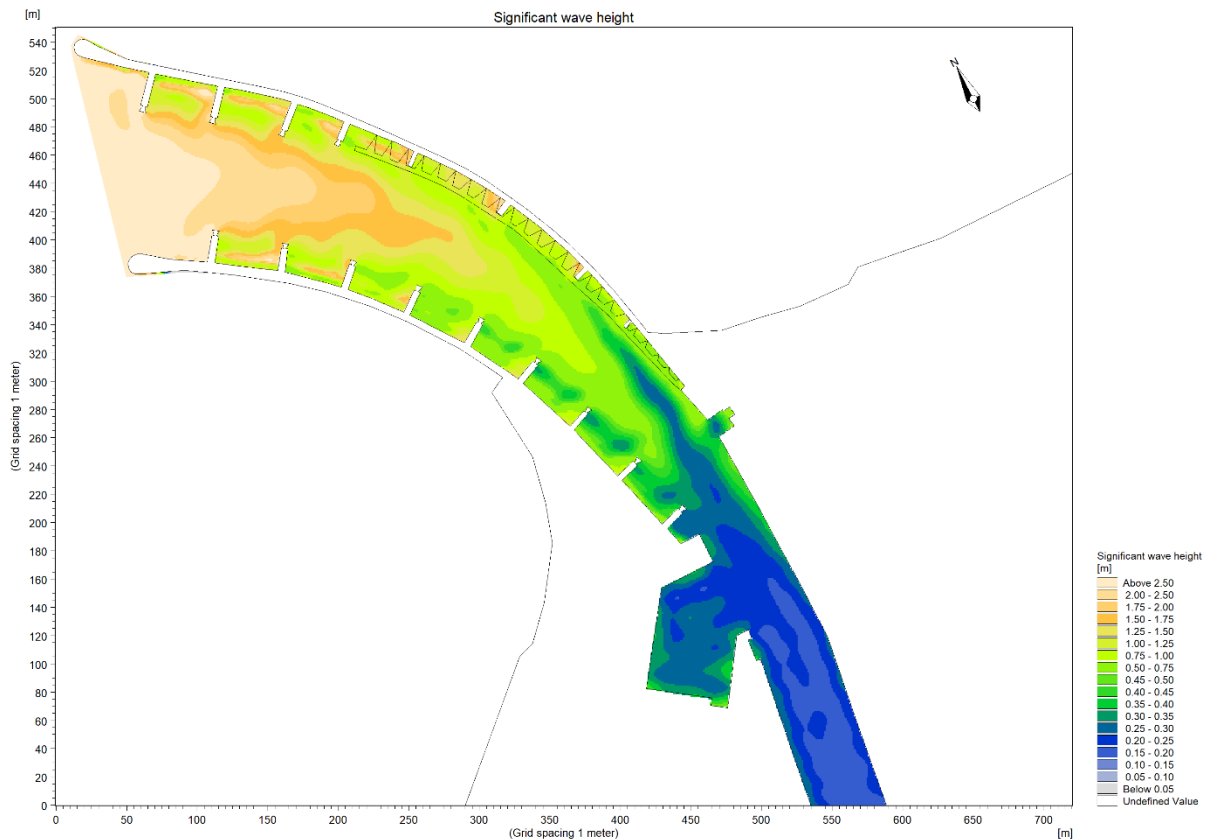
4.4.3 Stan aktualny

Warunki sztormowe o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat

- kierunek podchodzenia falowania NW, ($H_S = 3,81$ m, $T_P = 9,23$ s), rys. 17
- średni poziom morza 500 cm

Falowanie przenika do portu całą szerokością wejścia, widoczny jest wyraźny efekt tłumienia falowania w obszarze pomiędzy falochronami. Wysokości fal znacznych przy głowicach falochronów przekraczają 3,0 m, ale już na odcinku pomiędzy trzecią i czwartą szczyką falochronu zachodniego ich wysokości są mniejsze $H_S \leq 1.8$ m. Widoczne są również rezultaty odbicia fal we wszystkich obszarach między szczykami, także wpływające na redukcję falowania. Na wysokości Nabrzeża Wydmowego-Zabezpieczającego wysokości fal znacznych na torze wodnym nie przekraczają wartości 0,45 m. W Basenie Sportowym na przedpolu Nabrzeży Okrętowego i Slipowego wysokości fal znacznych mieszczą się w granicach od 0,25 do 0,40 m. Wysokość

fali propagującej torem wodnym w kierunku portu wewnętrznego, po przejściu Basenu Sportowego nie przekracza wartości 0,25 m.



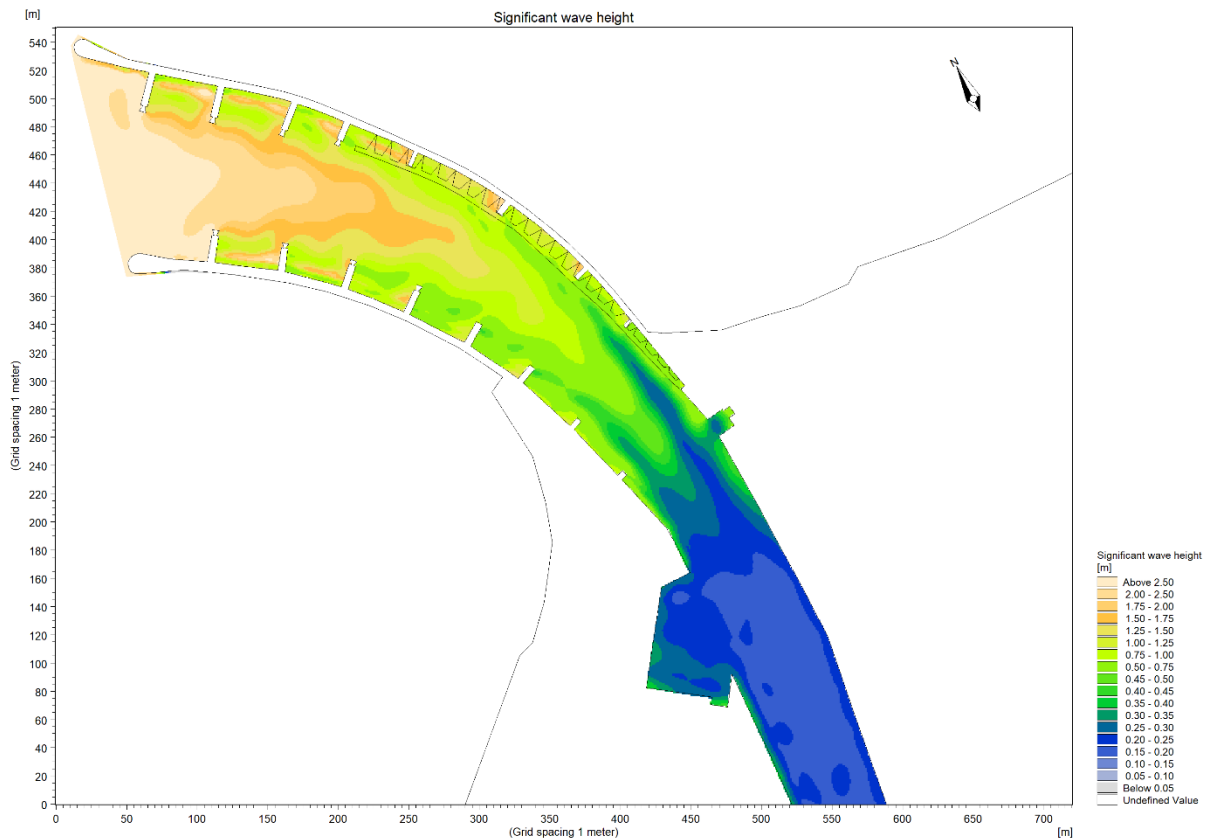
Rys. 17. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla istniejącego układu zabudowy hydrotechnicznej portu, dla sztormu z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.
Parametry fali: $H_s = 3,8$ m, $T_p = 9,2$ s, $A_z = 315^\circ$

4.4.4 Wariant A przebudowy wejścia

Warunki sztormowe o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat

- kierunek podchodzenia falowania NW, ($H_s = 3,81$ m, $T_p = 9,23$ s), rys. 18
- średni poziom morza 500 cm

Obraz falowania przenikającego do portu na odcinku od głowic falochronów do piątej szyki falochronu zachodniego jest identyczny z rezultatem obliczeń dla stanu aktualnego. Wynik taki *a priori* był oczekiwany. Wysokości fal znacznych na odcinku pomiędzy trzecią i czwartą szyką zachodnią dochodzą do 1,8 m, a na wysokości piątej szyki (początek planowanej przebudowy) największe wysokości fal znacznych na torze wodnym nie przekraczają 1,5 m. W sąsiedztwie Nabrzeża Wydmowego-Zabezpieczającego wysokości fal znacznych na torze wodnym nie przekraczają wartości 0,45 m. W Basenie Sportowym na przedpolu Nabrzeży Okrętowego i Slipowego wysokości fal znacznych mieszczą się w granicach od 0,20 do 0,37 m. Wysokość fali znacznej na torze wodnym w kierunku portu wewnętrznego, po przejściu Basenu Sportowego nie przekraczają wartości 0,20 m.



Rys. 18. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla Wariantu A zabudowy hydrotechnicznej portu, dla sztormu z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

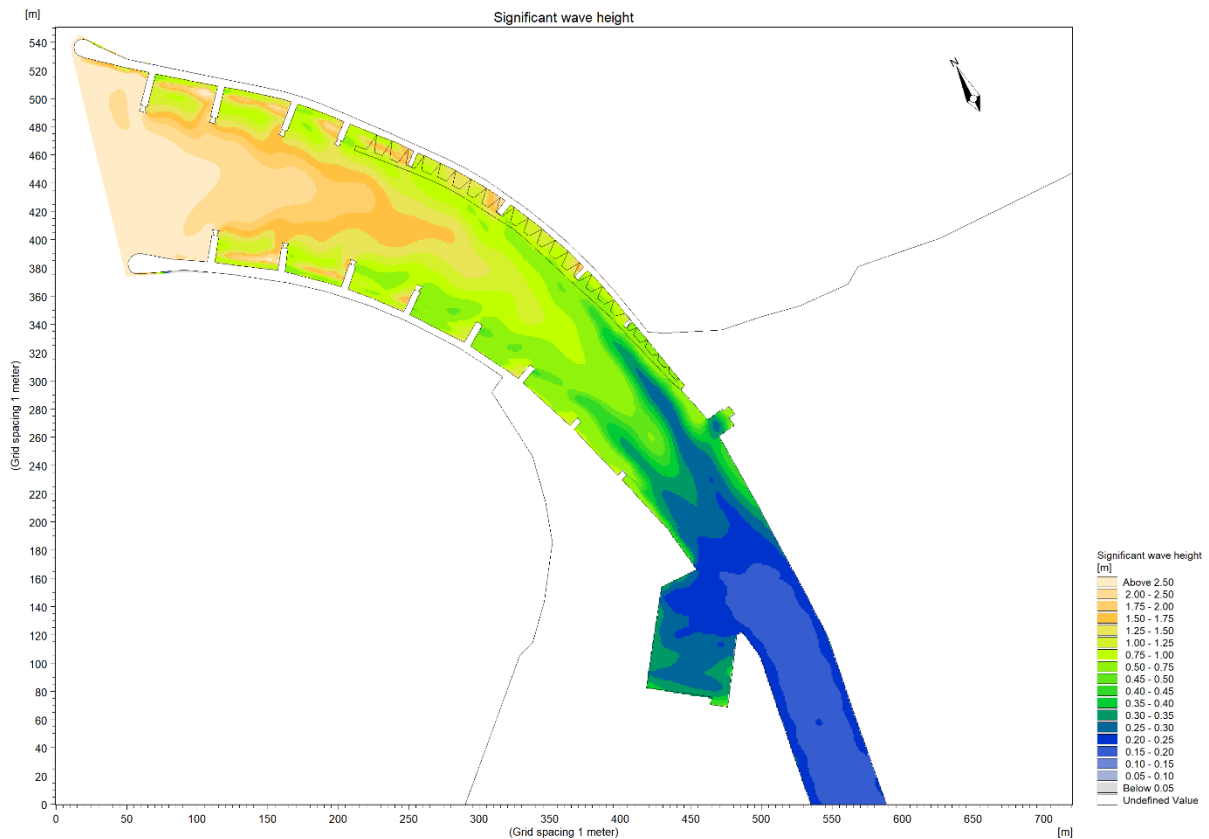
Parametry fali: $H_s = 3,8$ m, $T_p = 9,2$ s, $A_z = 315^0$

4.4.5 Wariant B przebudowy wejścia

Warunki sztormowe o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat

- kierunek podchodzenia falowania NW, ($H_s = 3,81$ m, $T_p = 9,23$ s), rys. 19
- średni poziom morza 500 cm

Analogicznie jak w przypadku przebudowy w Wariancie A, obliczony rozkład wysokości fal znacznych dla Wariantu B nie wykazuje żadnych różnic w stosunku do wyników obliczeń dla stanu istniejącego, na odcinku głowice falochronów – piąta szykana falochronu zachodniego. W dalszej części rozpatrywanego akwenu rozkład wysokości fal znacznych w Wariancie B różni się tylko drobnymi niuansami, bez znaczenia inżynierskiego, od rozkładu w Wariancie A. W sąsiedztwie Nabrzeża Wydumowego-Zabezpieczającego wysokości fal znacznych na torze wodnym nie przekraczają 0,45 m. W Basenie Sportowym na przedpolu Nabrzeży Okrętowego i Słupowego wysokości fal znacznych mieszczą się w granicach od 0,20 do 0,36 m. Wysokość fali znacznej na torze wodnym prowadzącym w kierunku portu wewnętrznego po przejściu Basenu Sportowego nie przekraczają wartości 0,21 m.



Rys. 19. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla Wariantu B zabudowy hydrotechnicznej portu, dla sztormu z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

Parametry fali: $H_s = 3,8$ m, $T_p = 9,2$ s, $A_z = 315^0$

4.4.6 Porównanie wyników obliczeń

Zgodnie z przyjętą metodyką porównano zarówno uśrednione dla całych obszarów obliczeniowych (rozdz. 4.3) wysokości fal znacznych, jak i najwyższe wysokości tych fal występujących w przyjętych obszarach. Wynik porównania w przyjętych sektorach obliczeniowych wraz ze względnymi zmianami (wyrażonymi w procentach) odniesionymi do stanu wyjściowego, tj. do falowania występującego przy aktualnej konfiguracji portu, przedstawiono w tab. 4 – tab. 7 w następujący sposób:

- średnie wysokości fal znacznych oraz ich zmianę (%) dla proponowanego zakresu przebudowy w Wariancie A (tab. 4),
- średnie wysokości fal znacznych oraz ich zmianę (%) dla proponowanego zakresu przebudowy w Wariancie B (tab. 5),
- maksymalne wysokości fal znacznych oraz ich zmianę (%) dla proponowanego zakresu przebudowy w Wariancie A (tab. 6),
- maksymalne wysokości fal znacznych oraz ich zmianę (%) dla proponowanego zakresu przebudowy w Wariancie B (tab. 7).

Tab.4. Obliczone średnie wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie A wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

Akweny portowe	Istniejący układ zabudowy	Projektowany układ zabudowy Wariant A	
	Średnia wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Średnia wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Zmiana wysokości [%]
Akwen nr 1	1,38	1,38	0%
Akwen nr 2	0,28	0,26	- 7%
Akwen nr 3	0,28	0,26	- 7%
Akwen nr 4	0,29	0,26	- 10%
Akwen nr 5	0,20	0,18	- 10%

+ wzrost wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów,
 - zmniejszenie wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów

Tab.5. Obliczone średnie wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie B wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

Akweny portowe	Istniejący układ zabudowy	Projektowany układ zabudowy Wariant B	
	Średnia wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Średnia wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Zmiana wysokości [%]
Akwen nr 1	1,38	1,38	0%
Akwen nr 2	0,28	0,27	- 4%
Akwen nr 3	0,28	0,29	+ 4%
Akwen nr 4	0,29	0,30	+ 3%
Akwen nr 5	0,20	0,18	- 10%

+ wzrost wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów,
 - zmniejszenie wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów

Tab.6. Obliczone maksymalne wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie A wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

Akweny portowe	Istniejący układ zabudowy	Projektowany układ zabudowy Wariant A	
	Maks. wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Maks. wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Zmiana wysokości [%]
Akwen nr 1	1,87	1,87	0%
Akwen nr 2	0,44	0,40	- 9%
Akwen nr 3	0,39	0,37	- 5%
Akwen nr 4	0,40	0,37	- 8%
Akwen nr 5	0,24	0,20	- 17%

+ wzrost wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów,
 - zmniejszenie wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów

Tab.7. Obliczone maksymalne wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie B wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.

Akweny portowe	Istniejący układ zabudowy	Projektowany układ zabudowy Wariant B	
	Maks. wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Maks. wys. fal znacznych \bar{H}_s [m]	Zmiana wysokości [%]
Akwen nr 1	1,87	1,87	0%
Akwen nr 2	0,44	0,42	- 5%
Akwen nr 3	0,39	0,36	- 8%
Akwen nr 4	0,40	0,36	- 10%
Akwen nr 5	0,24	0,21	- 13%

+ wzrost wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów,
 - zmniejszenie wysokości falowania w stosunku do istniejącego układu falochronów

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wyraźnie wskazują, że:

- proponowany zakres przebudowy w Wariancie A spowoduje:
 - dla sztormu podchodzącego z kierunku NW ($Az = 315^\circ$) nieznaczne zmniejszenie wysokości fal w kanale portowym oraz w Basenie Sportowym w granicach od 7 do 10% w odniesieniu do wartości uśrednionych wysokości fal znacznych oraz zmniejszenie w granicach od 5 do 17% w odniesieniu do lokalnie występujących maksymalnych wartości wysokości fal znacznych,
- proponowany zakres przebudowy w Wariancie B spowoduje:
 - dla sztormu podchodzącego z kierunku NW ($Az = 315^\circ$) nieznaczne zmniejszenie wysokości falowania w kanale portowym w granicach 4÷10% i minimalny wzrost o ok. 4% w Basenie Sportowym w odniesieniu do wartości uśrednionych wysokości fal znacznych oraz zmniejszenie w granicach od 5 do 13% w odniesieniu do lokalnie występujących maksimum wartości wysokości fal znacznych.

W literaturze znane są przypadki, w których stałe zwięźanie się drogi wodnej na drodze wodnej może prowadzić do pogorszenia się warunków falowych w przewężeniu (Miles i Munk 1961), a taki jest układ falochronów w Kołobrzegu. Stąd nieznaczne poszerzenie drogi wodnej w obszarze, w którym była ona najwęższa skutkuje nieznaczną redukcją wysokości fal w tym rejonie.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone numeryczne obliczenia falowania w Porcie Kołobrzeg dla obecnego układu zabudowy portu oraz dla dwóch wariantów poszerzenia istniejącego toru wodnego, miało odpowiedzieć na pytanie na ile planowana przebudowa wpłynie na zmianę warunków falowych w porcie.

Po przeprowadzonej analizie statystycznej falowania na przedpolu portu do celów porównawczych, jako reprezentatywny, przyjęto sztorm o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat, który charakteryzują następujące parametry fali $H_S = 3,81$ m, $T_p = 9,23$ s, $A_Z = 315^\circ$. Wybór kierunku podchodzenia fal uwzględnił z jednej strony układ i zorientowanie falochronów zewnętrznych (kierunek, dla którego największa ilość energii falowej przenika w obszar chroniony), z drugiej zaś dominującą częstością występowania falowania z tego kierunku w roku średnim.

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych symulacji numerycznych prowadzą do następujących wniosków:

- układ geometryczny falochronów zewnętrznych, zwłaszcza ich długość i łukowe ukształtowanie poprawnie osłania port, powodując znaczne tłumienie falowania na drodze propagacji fal od głowic aż po nasady falochronów,
- istnienie szykan na obu falochronach w sposób efektywny oddziałuje na pole falowe skutecznie redukując wysokości fal propagujących do wnętrza portu, przy czym wpływ szykan wbudowanych w Falochron Wschodni na rozpraszanie energii falowania jest prawdopodobnie większy,
- projektowane przebudowy wejścia do portu uwzględniające poszerzenie drogi wodnej prowadzącej do portu wewnętrznego w celu zapewnienia wymaganych parametrów nawigacyjnych dla jednostek większych polegające na stopniowym zmniejszaniu długości pięciu wewnętrznych szykan Falochronu Zachodniego oraz ścięciu Nabrzeża Wydmowego-Zabezpieczającego nie zmieni w sposób istotny warunków falowych w porcie,
- poszerzenie drogi wodnej w rejonie nasady Falochronu Zachodniego, umożliwiające pełniejszą ekspansję boczną falowania w tym obszarze spowoduje niewielką, dochodzącą maksymalnie do ok. 10% redukcję wysokości fal,
- większa ekspozycja Basenu Sportowego nie spowoduje pogorszenia się warunków falowych,
- z inżynierskiego punktu widzenia zmiany w polu falowym wywołane projektowaną przebudową wejścia, zarówno w Wariancie A, jak i w Wariancie B są nieistotne,
- różnice w polu falowym przy zastosowaniu Wariantu A lub Wariantu B są minimalne.

Spis rysunków

Rys. 1. Zakres projektowanej przebudowy drogi wodnej w Porcie Kołobrzeg wg wariantów A i B (linie żółte) ..	4
Rys. 2. Istniejący układ Portu Kołobrzeg.....	6
Rys. 3. Lokalizacja punktu o współrzędnych 15.5415°E 54.1916°N, dla analizy falowania na przedpolu	10
Rys. 4. Przebieg czasowy zmienności wysokości fali H_s na przedpolu Portu Kołobrzeg w punkcie 15.5415°E 54.1916°N w okresie od 01.01.1993 do 18.06.2021	10
Rys. 5. Róża falowania w punkcie prognostycznym na przedpolu Portu Kołobrzeg.....	11
Rys. 6. Obliczony rozkład wysokości fal znacznych dla falowania podchodzącego z kierunku NW w punkcie prognostycznym.....	12
Rys. 7. Wyznaczone z analizy statystycznej wysokości fal znacznych dla wszystkich kierunków o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.....	12
Rys. 8. Obrót układu odniesienia w modelu numerycznym.....	14
Rys. 9. Batymetria przyjęta w modelu numerycznym	15
Rys. 10. Wariant A przebudowy wejścia do Portu Kołobrzeg – układ w modelu numerycznym	17
Rys. 11. Wariant B przebudowy wejścia do Portu Kołobrzeg – układ w modelu numerycznym.....	17
Rys. 12. Zestawienie wariantów oraz stanu aktualnego zabudowy hydrotechnicznej portu (kolor czarny – Stan aktualny, kolor czerwony – Wariant A , kolor zielony – Wariant B).....	18
Rys. 13. Lokalizacja wybranych sektorów do analizy falowania w Porcie Kołobrzeg.....	19
Rys. 14. Przenikanie umiarkowanego falowania z sektora W-N do Portu Kołobrzeg (fot. Google Earth).....	21
Rys. 15. Warunki falowe w Basenie Sportowym podczas falowania $H_s = 1,1$ m, $T_p = 4,8$ s, $A_z = 302^\circ$ na przedpolu portu (fot. zasoby własne)	21
Rys. 16. Warunki Porównanie obliczeniowych rozkładów wysokości fal znacznych w sztormie $H_S = 3,8$ m, $T_P = 9,2$ s, $A_Z = 315^\circ$ dla poziomu morza 500 cm (lewy) i 694 cm (prawy)	22
Rys. 17. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla istniejącego układu zabudowy hydrotechnicznej portu, dla sztormu z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.....	23
Rys. 18. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla Wariantu A zabudowy hydrotechnicznej portu,	24
Rys. 19. Obliczone wysokości fal znacznych w porcie dla Wariantu B zabudowy hydrotechnicznej portu,	25

Spis tabel

Tab.1. Charakterystyczne poziomy wody w Kołobrzegu (IMGW)	7
Tab.2. Maksymalne poziomy wody dla zadanych okresów powtarzalności wyznaczone na podstawie pomiarów z lat 1948÷2006, Stacja Kołobrzeg (Wiśniewski i Wolski 2009)	7
Tab.3. Parametry fal o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat przyjęte w punkcie prognostycznym do obliczania falowania w porcie	13
Tab.4. Obliczone średnie wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie A wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.	26
Tab.5. Obliczone średnie wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie B wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat.	26
Tab.6. Obliczone maksymalne wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie A wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat. .	26
Tab.7. Obliczone maksymalne wysokości fal znacznych w wybranych sektorach akwenów portowych dla obecnego oraz projektowanego układu zabudowy hydrotechnicznej w Wariancie B wraz z ich procentową zmianą dla sztormu podchodzącego z kierunku NW o okresie powtarzalności $T_R = 5$ lat. .	27

Spis literatury

1. Cieślakiewicz W., Paplińska-Swerpel B., (2005). Długoterminowe modelowanie falowania wiatrowego Bałtyku w okresie 1958–2001, *Inżynieria Morska i Geotechnika* Nr 4, s. 313-321.
2. Locja Bałtyku. (2016). Wybrzeże Polskie nr 502, wyd. X. *Biuro Hydrograficzne Marynarki Wojennej*. Gdynia.
3. Lindgren E., Tuomi L., Huess V., (2020). Baltic Sea Production Centre BAL-TICSEA_REANALYSIS_WAV_003_015. Quality information document. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*.
4. Miles, J. Munk, W., (1961). Harbor paradox. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, 87, 3, 111-130.
5. Kamphuis J.W. (2010). Introduction to Coastal Engineering and Management. *Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 30* Word Scientific, p.526.
6. Madsen P. A., Murray R., Sorensen O. R., (1991). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. *Coastal Engineering* 15, No4.
7. Marcinkowski T., Lisimenka A., Olszewski T., (2015). Falowanie wewnątrz akwatorium portowego w ujęciu modelowym. *Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego w Gdańsku. Nr 7001*.
8. MIKE 21 Boussinesq Wave Model, User Guides, (2020). *Vol. 1, DHI Software*.
9. Morskie Budowle Hydrotechniczne; Zalecenia do projektowania i wykonywania, Wydanie IV (2006). Zespół Roboczy Zasad Projektowania Budowli Morskich pod redakcją B. Mazurkiewicza, *Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk*.
10. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dn. 1 czerwca 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, *Dz. U. Nr 101, Warszawa*.
11. Vähä-Piikkiö O., Tuomi L., Huess V., (2019). Baltic Sea Wave Analysis and Forecasting Product BAL-TICSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_003_010. Quality information document. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*.
12. WAMDI Group. (1988). The WAM model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, pp. 1775–1810.
13. Zanuttigh B., van der Meer J. W. (2006). Wave reflection from coastal structures. 30th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, San Diego USA.

Ilustracja na okładce utworzona z wykorzystaniem zasobów własnych.