



Zastosowanie modelu trójwarstwowego do opisu transportu rumowiska w sąsiedztwie progów podwodnych na przykładzie Kołobrzegu

Martyna Chuda, Leszek M. Kaczmarek
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Zwiększone tempo rozmywania i zanikania plaż, obserwowane w ostatnich latach, wymaga podjęcia stosownych działań ochronnych brzegu przed abrazją. W tym celu coraz częściej są używane narzutowe bądź ażurowe konstrukcje modułów siedliskowych, które stanowią obecnie innowacyjne rozwiązania techniczne, zyskując tym samym większą popularność od klasycznych metod ochrony brzegu morskiego (Zawadzka-Kahlau 1999).

Zmiany erozyjne brzegu w obrębie Kołobrzegu, obserwowane w latach 2007-2011, były bezpośrednią przyczyną powzięcia decyzji o rozpoczęciu w 2012 roku budowy umocnień ochronnych w postaci progów podwodnych, ostróg brzegowych oraz wykonania sztucznego zasilania plaży (Łabuz 2012). Obliczenia wykonane na podstawie danych UM w Słupsku z 2013 roku (Chuda 2015, Chuda i in. 2017) wykazują jednak brak skuteczności tych umocnień, gdyż we wszystkich profilach brzegowych zanotowano zmniejszenie tzw. powierzchni aktywnej, obliczonej według metody holenderskiej (Cieślak 2001). Zmniejszanie powierzchni aktywnej profilu niwelacyjno-batymetrycznego oznacza, że brzeg jest erodowany. Jedynie w profilu 331,5 KM zanotowano nieznaczny wzrost powierzchni czynnej. Ukazuje to tendencję do akumulacji rumowiska w profilu. Profil ten został wzięty pod uwagę w przeprowadzonej poniżej analizie hydrodynamicznej.

W rejonie klasycznych budowli narzutowych zachodzą skomplikowane procesy hydrodynamiczne, które odgrywają istotną rolę w przybrzeżnej cyrkulacji osadu (Sánchez-Arcilla 2003, Cálabrese i inni 2003, Burcharth i inni 2007). Kwestią otwartą jest natomiast rozpoznanie ich oddziaływania na morfodynamikę strefy brzegowej morza.

Proces transformacji falowania dla klasycznych progów podwodnych został wielokrotnie zbadany i sparametryzowany (Lasser i inni 2003, Johnson i in. 2005, Van der Meer i in. 2005). Jak wynika z obliczeń wykonanych w niniejszej pracy, wciąż istnieje konieczność modyfikacji znanych do tej pory sposobów obliczeń progów podwodnych (Zyserman i in. 2005). Obecny stan wiedzy dotyczący litodynamiki osadów dennych w rejonie narzutowych konstrukcji progów podwodnych ogranicza się tylko do obserwacji i pomiarów w terenie (Kubowicz-Grajewska 2015). O ile zjawisko podmywania i stabilności konstrukcji w rejonie progów podwodnych jest stosunkowo dobrze rozpoznane (Fredsoe i Sumer 2000), o tyle sprawą całkowicie otwartą jest rozpoznanie procesów lokalnej abrazji oraz określenie stabilności konstrukcji zbudowanych z narzutów kamiennych lub modułów ażurowych, zwłaszcza w warunkach sztormowych.

Procesy zachodzące w strefie brzegowej, wywołujące erozję brzegu, powodują konieczność wykonania analizy hydrodynamicznej w celu oceny skuteczności zaprojektowanych umocnień technicznych. Celem niniejszej pracy jest analiza hydrodynamiczna przeprowadzona w obszarze występowania progów podwodnych, w zależności od odległości ich usytuowania od linii brzegowej oraz dla różnych wysokości budowli, w zależności od zanurzenia korony budowli pod powierzchnią wody. Analizę hydrodynamiczną wykonano w oparciu o obliczenia natężenia transportu niejednorodnego rumowiska w kierunku od- i dobrzegowym oraz wzdłużbrzegowym.

Obliczenia natężenia transportu rumowiska zostały przeprowadzone w oparciu o trójwarstwowy model osadów niejednorodnych granulometrycznie według Kaczmarka i innych (2004). Model ten wyszczególnia trzy warstwy: warstwę wleczenia, warstwę kontaktową oraz warstwę zewnętrzną. Warstwy te określone są odmiennymi równaniami z uwagi na różny charakter współoddziaływania pomiędzy wodą a osadami w poszczególnych warstwach. Kompletnie rozwiązanie opisujące transport osadów o niejednorodnym uziarnieniu zostało zaproponowane

z uwzględnieniem zachowania ciągłości zarówno prędkości, jak i koncentracji na granicach tych warstw (Kaczmarek 1999).

Porównanie wyników obliczeń transportu rumowiska przeprowadzonych dla profilu brzegowego z wybudowanymi progami do sytuacji bez progów pozwoliło na sformułowanie kryterium oceny efektywności działania tych budowli. Zgodnie z nim, prawidłowo zaprojektowane progi podwodne to takie budowle, które swoją obecnością nie powodują wzrostu transportu rumowiska w profilu w stosunku do sytuacji bez progów. Wzrost transportu rumowiska w profilu oznacza bowiem erozję dna. Zastosowanie powyższego kryterium umożliwiło przeprowadzenie oceny działania progów w profilach, w których erozję udokumentowano poprzez zmniejszanie się obliczonych powierzchni efektywnych (Chuda 2015).

2. Analiza hydrodynamiczna

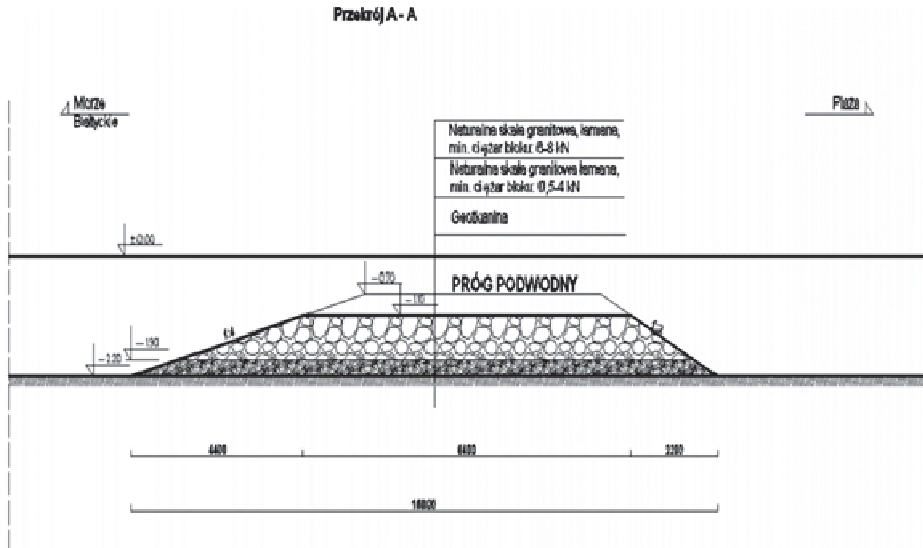
2.1. Wprowadzenie

Kołobrzeskie progi podwodne są podstawowymi zabezpieczeniami hydrotechnicznymi brzegu morskiego na odcinku 330,4-333,4 KM. Zlokalizowane są w odległości średnio około 100 m od umownej linii brzegowej, co przedstawiono na rysunku 1. Parametry konstrukcji przedstawiono na rysunku 2, na przekroju poprzecznym progów podwodnych.

Zadaniem progów podwodnych jest zmniejszenie wysokości falowania oraz wymuszenie odkładania osadu przede wszystkim po ich odlądowej stronie (Hueckel 1972, Basiński i inni 1993). Wybór takich parametrów jak długość, odległość od brzegu oraz głębokość posadowienia wpływa na natężenie transportu rumowiska w profilu brzegowym, w szczególności zaś transportu wzdłużbrzegowego, który jest dominującym i najbardziej niebezpiecznym dla brzegu w południowej strefie Bałtyku. Właśnie dlatego podstawową zasadą przy projektowaniu progów jest odpowiednie rozpoznanie warunków hydrodynamicznych. Nieodpowiednie wykonanie może bowiem doprowadzić do ujemnego bilansu rumowiska, a co za tym idzie do wzmożonej erozji profilu brzegowego.

2.2. Trójwarstwowy model transportu rumowiska

Matematyczny model transportu osadów niejednorodnych granulometrycznie jest kompleksowym i kompletnym narzędziem do rozwiązywania problemów inżynierskich związanych m.in. z projektowaniem



Rys. 2. Przekrój poprzeczny progu podwodnego (UM w Słupsku)
Fig. 2. Cross section of the underwater threshold (UM in Słupsk)

Przyjęte w pierwszej warstwie tj. w warstwie wleczenia założenie o poruszaniu się wszystkich frakcji rumowiska z tą samą prędkością $U_b(z', t)$, wyeliminowało możliwość wystąpienia sortowania osadów w tej warstwie. Oznacza to jednakową prędkość i koncentrację $c_b(z', t)$ wszystkich frakcji rumowiska o średnicach d_i , na dowolnym poziomie w odległości z' (oś z' skierowana jest w dół) od poziomu teoretycznego dna. Posługując się zależnościami Sayed'a i Savage'a (1983) dla naprężeń stycznych o charakterze lepkościowym, a także dla naprężeń wywołanych tarciem Coulomba między ziarnami, Kaczmarek (1999) zaproponował następujący układ równań:

$$\alpha^0 \left(\frac{C_b - C_0}{C_m - C_b} \right) \sin \varphi \sin 2\psi + \mu_1 \left(\frac{\partial u_b}{\partial z'} \right)^2 = \rho u_f^2, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha^0 \left(\frac{C_b - C_0}{C_m - C_b} \right) (1 - \sin \varphi \cos 2\psi) + (\mu_0 + \mu_2) \left(\frac{\partial u_b}{\partial z'} \right)^2 = \\ = \left(\frac{\mu_0 + \mu_2}{\mu_1} \right) \Big|_{c=c_0} \rho u_f^2 + (\rho_s - \rho) g \int_0^{z'} c_b dz', \end{aligned} \quad (2)$$

w których współczynniki μ_0, μ_1, μ_2 są funkcjami koncentracji osadu c_b , opisane poniższymi wzorami:

$$\frac{\mu_1}{\rho_s d^2} = \frac{0,03}{(C_m - C_b)^{1,5}} \quad (3) \quad \frac{\mu_0 + \mu_2}{\rho_s d^2} = \frac{0,02}{(C_m - C_b)^{1,75}} \quad (4)$$

gdzie:

$c_0 = 0,32$ – koncentracja osadów na poziomie dna teoretycznego,

$c_m = 0,53$ – maksymalna koncentracja osadów ze ściśle przylegającymi do siebie ziarnami,

c_b – chwilowa w okresie fali koncentracja osadów w warstwie wleczonej,

u_b – chwilowa w okresie fali prędkość osadów w warstwie wleczonej,

φ – kąt tarcia wewnętrznego (quasi-statyczny), przy czym $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$,

zaś $\frac{\alpha_0}{\rho_s g d} = 1$.

W modelu przyjmuje się, że liczba oraz udział poszczególnych frakcji rumowiska są zgodne z wielkościami uzyskanymi w analizie sitowej. Jedynie w warstwie wleczonej niejednorodność frakcji przedstawia się za pomocą średnicy reprezentatywnej $d_r = d_{50}$. Oznacza to, że można wyznaczyć szorstkość efektywną $k_e = k_r$ na podstawie wzoru zaproponowanego przez Kaczmarka (1999) w postaci:

$$k_{er} = 47,03 d_r \theta_{2,5}^{-0,658} \quad (5)$$

w którym bezwymiarową wielkość tarcia $\theta_{2,5}$ określił Nielsen (1992). Postępując dalej zgodnie z modelem całkowym Fredsøe (1984), uzyskuje się chwilowe prędkości tarcia $u_f(t)$ na powierzchni dna akwenu.

W drugiej warstwie tj. kontaktowej przyjęto założenie, że transport poszczególnych frakcji rumowiska różni się ze względu na pulsacje turbulentne i chaotyczne zderzenia ziaren. Wynikiem tego są zróżnicowane prędkości $u_{ci}(z'', t)$ oraz koncentracje $c_{ci}(z'', t)$ każdej i-tej frakcji rumowiska. Zbliżając się stopniowo w stronę warstwy zewnętrznej, procesy segregacyjne ulegają spowolnieniu. Uwzględniając zmienną w okresie fali prędkość tarcia naskórkowego $u'_f(t)$ (Kaczmarek 1999), możemy określić chwilową w okresie fali koncentrację osadów c_{ci} oraz chwilową prędkość u_{ci} , zgodnie z równaniem:

$$\left[\frac{3}{2} \left(\alpha_{si} \frac{d_i}{w_{si}} \frac{\partial u_{ci}}{\partial z''} \frac{2s+c_M}{3c_D} + \beta_{si} \right)^2 d_i^2 c_{ci}^2 (s+c_M) + l^2 \right] \left(\frac{\partial u_{ci}}{\partial z''} \right)^2 = u_f'^2(t) \quad (6)$$

$$\left[3 \left(\alpha_{si} \frac{d_i}{w_{si}} \frac{\partial u_{ci}}{\partial z''} \frac{2s+c_M}{3c_D} + \beta_{si} \right)^2 d_i^2 \frac{\partial u_{ci}}{\partial z''} c_{ci} + l^2 \frac{\partial u_c}{\partial z''} \right] \left(\frac{\partial c_{ci}}{\partial z''} \right)^2 = -w_{si} c_{ci} \quad (7)$$

gdzie:

c_{ci} – chwilowa w okresie fali koncentracja i-tej frakcji rumowiska osadów w warstwie kontaktowej,

$c_D = 1,0$ – współczynnik oporu,

c_M – współczynnik masy dołączonej,

u_{ci} – zmienna w okresie fali prędkość i-tej frakcji osadów w warstwie kontaktowej,

$s + c_M = 3,0$ – założenie Deigaarda (za Kaczmarek 1999),

α_{si}, β_{si} – współczynniki proporcjonalności i-tej frakcji rumowiska wyznaczane metodą iteracyjną,

$l = 0,4 \text{ kz}''$ – długość turbulentnego mieszania, gdzie $z'' = z + k'$,

przy czym $z = 0$ oznacza poziom teoretycznego dna zaś oś z skierowana jest w górę,

w_{si} – prędkość opadania i-tej frakcji rumowiska.

Zmienność prędkości tarcia naskórkowego $u_f'(t)$ w okresie fali, można wyznaczyć z modelu Fredsøe (1984), przy założeniu, że wysokość szorstkości naskórkowej równa jest $k' = \frac{2,5d_i}{30}$. Warunki brzegowe dla wszystkich frakcji wynoszą:

$$u_{ci} \left(z'' = \frac{2,5d_i}{30}, t \right) = u_b(z' = 0, t) \quad (8)$$

$$c_{ci} \left(z'' = \frac{2,5d_i}{30}, t \right) = c_b(z' = 0) = 0,32 \quad (9)$$

W obszarze zewnętrznym zakłada się, że rozkład uziarnienia osadów zawieszonych nie zmienia się wraz z głębokością i jest taki sam jak na górnej granicy warstwy kontaktowej. Uśredniona w okresie fali koncentracja osadów w warstwie zewnętrznej opisana jest wzorem:

$$c(z) = c_z(z = \delta_{cr}) \left(\frac{z}{\delta_{cr}} \right)^{-\alpha_1} \quad (10)$$

w którym:

$c_z(z = \delta_{cr})$ – uśredniona w okresie fali koncentracja na górnej granicy warstwy kontaktowej,

$\alpha_1 = 0,6$ → założony wykładnik potęgi

Program obliczeniowy opracowany w IBW PAN w Gdańsku przez zespół pod kierunkiem Leszka M. Kaczmarka otrzymał nazwę Klepsydra. Pozwala on, przy wykorzystaniu wyników prądów od- i do-brzegowych oraz wzdłużbrzegowych, obliczyć (na podstawie równań (1) i (2) oraz (6) i (7) oraz (10)) natężenia transportu rumowiska odpowiednio w warstwie wleczenia, kontaktowej i zewnętrznej. Zakłada się przy tym, że falowanie jest opisane tzw. II przybliżeniem Stokesa, jako że wypadkowy w okresie fali transport osadów w warstwie wleczenia i kontaktowej dla I przybliżenia jest równy zero. Algorytm programu pozwala zatem na obliczenie następujących składników:

1. Transport wzdłużbrzegowy pochodzenia falowego:

$$q_{fl} = \left(q_{B_{net}} + \sum_{i=1}^N n_i \cdot q_{C_{net,i}} \right) \cdot \cos \alpha \frac{\pi}{180} \quad (11)$$

gdzie:

n_i – zawartość ułamkowa danych frakcji,

$q_{B_{net}}$ – wypadkowy w okresie fali transport osadów w warstwie wleczenia,

$q_{C_{net,i}}$ – wypadkowy w okresie fali transport i-tej frakcji osadów w warstwie kontaktowej,

α – kąt podchodzenia fali do brzegu, definiowany jako kąt pomiędzy linią normalną do brzegu a kierunkiem propagacji fali.

2. Transport wzdłużbrzegowy pochodzenia prądowego:

$$q_{pl} = U_L \cdot C_P \cdot h \quad (12)$$

gdzie:

U_L – uśredniona po głębokości i w okresie fali prędkość prądu wzdłużbrzegowego,

C_P – uśredniona po głębokości i w okresie fali koncentracja osadów w warstwie zewnętrznej,

h – głębokość wody.

3. Transport dobrzegowy pochodzenia falowego:

$$q_{fn} = \left(q_{B_{net}} + \sum_{i=1}^N n_i \cdot q_{C_{net,i}} \right) \cdot \sin \alpha \frac{\pi}{180} \quad (13)$$

4. Transport powrotny pochodzenia prądowego:

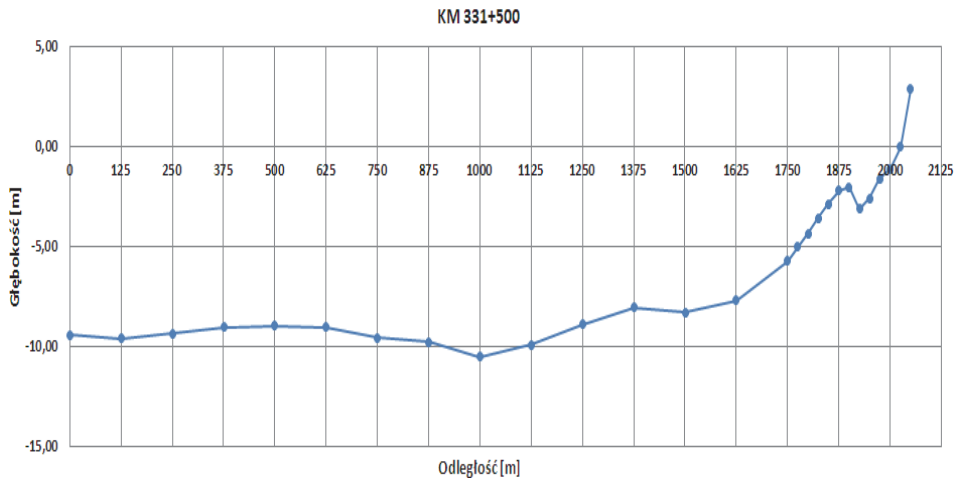
$$q_{pn} = U_p \cdot C_P \cdot h \quad (14)$$

gdzie:

U_p – uśredniona po głębokości prędkość prądu powrotnego.

2.3. Procedura obliczeń

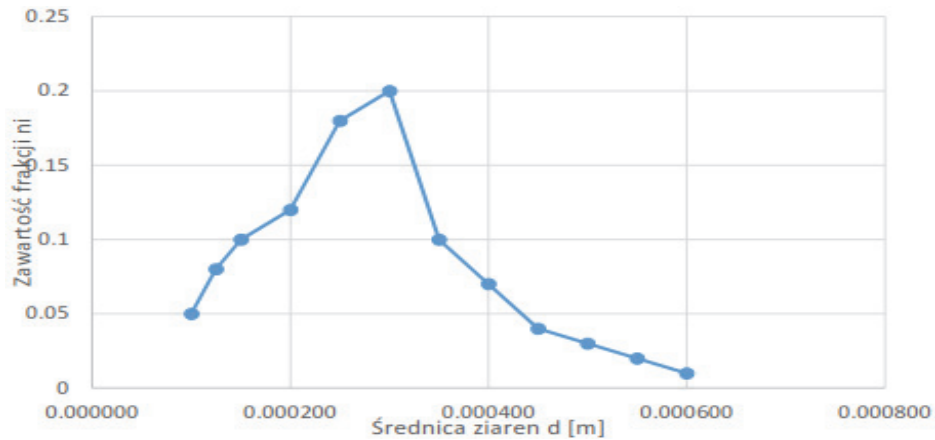
Analiza zjawisk zachodzących w strefie brzegowej morza w sąsiedztwie progów podwodnych została wykonana dla profilu 331,5 KM (rys. 3). Krążenie wód w strefie brzegowej tj. transformacja fali i prądy morskie zostały obliczone programem Crosmor (wersja 3.0.5.1), opracowanym w Laboratorium Delft Hydraulics w oparciu o koncepcję (Battjes, Janssen 1978) dla transformacji fali. Do programu wprowadzone zostały wielkości umocnienia hydrotechnicznego (wysokość progu, nachylenie skarp) odwzorowanego w postaci sztucznej rewy i posadowionego w określonej odległości od linii brzegowej. Dane przyjęte do obliczeń dla profilu 331,5 KM: średnia wysokość fali $H = 1$ m, okres $T = 6,5$ s, kąt podejścia fal: 0° i 30° . Powyższe parametry fali przyjęto arbitralnie jako parametry charakteryzujące strefę brzegową. Po otrzymaniu wyników prądów od- i dobrzegowych oraz wzdłużbrzegowych, można przystąpić do obliczania natężenia transportu rumowiska – w tym celu został użyty program Klepsydra. Poszczególne zawartości frakcji zostały przyjęte na podstawie rozkładu uziarnienia (rys. 4) proponowanego przez UM w Słupsku.



Rys. 3. Profil niwelacyjno-batymetryczny odcinka 331,5 KM odtworzony w programie Excel na podstawie danych z UM w Słupsku

Fig. 3. Leveling-bathymetric profile of the 331.5 KM section reproduced in Excel based on data from UM in Słupsk

Dla zadanego profilu niwelacyjno-batymetrycznego oraz przyjętego rozkładu uziarnienia rumowiska, obliczenia natężenia transportu przeprowadzono dla dwóch kątów podchodzenia fali do brzegu tj. dla 0° i 30° oraz dla dwóch odległości posadowienia progów podwodnych od linii brzegowej tj. 100 m i 175 m. Przy odległości ok. 100 m posadowienia progów od brzegu, przeprowadzono obliczenia dla czterech poziomów zanurzenia korony progów pod wodą tj. dla poziomów -0,7 m, -1,0 m, 1,5 m, -2,0 m, zaś w przypadku posadowienia ok. 175 m od linii brzegowej dla poziomów -1,5 m, -1,75 m, oraz -2,0 m. Wyniki obliczeń porównano z sytuacją sprzed budowy progów i zaproponowano najbardziej efektywne usytuowanie progów podwodnych.



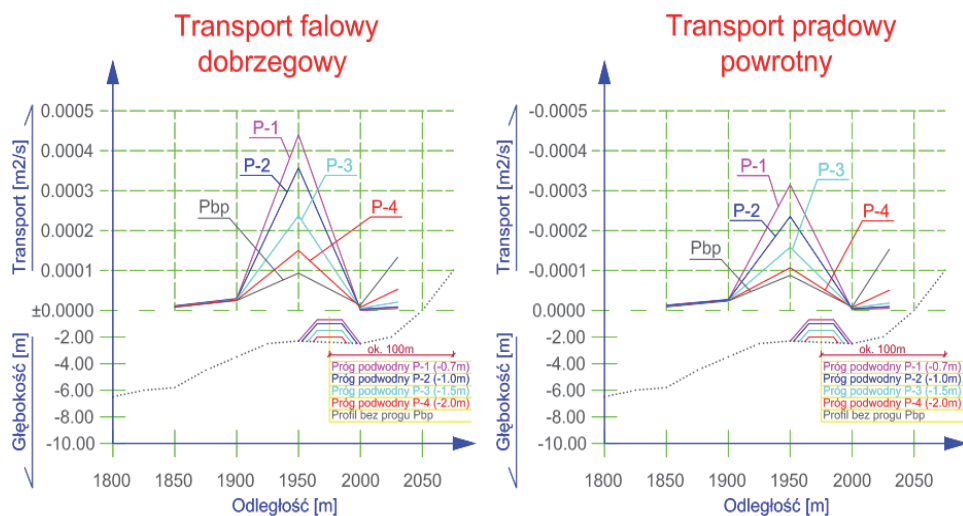
Rys. 4. Odzwierciedlenie umownego rozkładu granulometrycznego dla Kołobrzegu (dane z UM w Słupsku)

Fig. 4. Reflecting the conventional granulometric distribution for Kołobrzeg (data from UM in Słupsk)

2.4. Transport od- i dobrzegowy – wyniki obliczeń

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska od- i dobrzegowego. Przyjęto, że kąt podchodzenia fali w stronę brzegu jest równy 0° (wiatr wieje prostopadle do linii brzegowej), co oznacza, że transport wzdłużbrzegowy w tych sytuacjach nie występuje oraz 30° , co oznacza obecność transportu wzdłużbrzegowego. Obliczenia transportu rumowiska zostały przeprowadzone dla profilu 331,5 KM, gdy progi posadowione były na głębokości 2,2 m, w odległości ok. 100 m od brzegu i przy zmienne zanurzonej koronie progu poniżej poziomu wody. Rysunki zawierają także wyniki obliczeń transportu rumowiska w sytuacji bez progów podwodnych, w naturalnym systemie rew.

Analizując rysunki 5 i 6 można zauważyć, że wartości transportu rumowiska są większe przy kącie podchodzenia fali do brzegu 0° niż przy kącie 30° . Jest to związane z prostopadłym kierunkiem wiatru. Mniejsze wartości transportu przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30° wynikają z faktu, iż jego wypadkowa dzieli się w tym przypadku na składową pionową (prostopadłą) i poziomą (równoległą) do linii brzegowej.

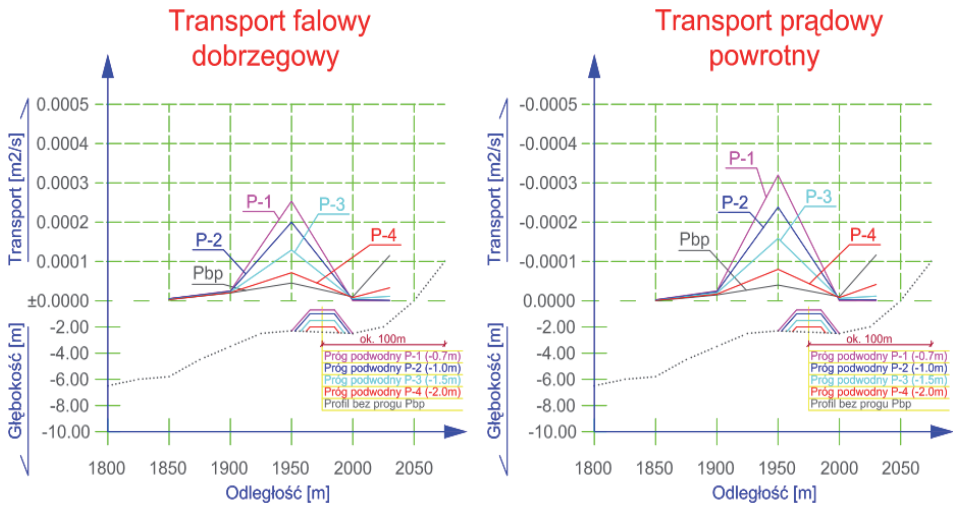


Rys. 5. Wykres obliczeń natężenia transportu od- i dobrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progów podwodnych 100 m od linii brzegowej I przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 0°

Fig. 5. Graph of calculation of the intensity of transport from and to the waterline made for the profile at the location of the underwater threshold 100 m from the shoreline and with a variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge 0°

Rozpatrując obecną sytuację posadowienia progów podwodnych w odległości 100 m od linii brzegowej i przy zmiennie zanurzonej koronie progów poniżej poziomu wody widać, że w każdym przypadku obliczony transport od- i dobrzegowy jest większy niż byłby w sytuacji bez progów. Progi zatem powodują radykalny wzrost natężenia transportu rumowiska w miejscu załamania fali przed progiem od strony odmorskiej i jego radykalny spadek za progiem w kierunku brzegu. Jego wartości po stronie odmorskiej progów mają tendencję rosnącą wraz ze zwiększaniem wysokości progów. Łatwo więc zauważyć, że im wyższy próg, tym większy wzrost natężenia transportu przed progiem i tym większe „wyciszenie” — z punktu widzenia transportu osadów — obszaru pomiędzy progiem a brzegiem. Niepokojącym sygnałem jest jednak przewaga obliczonych wartości transportu rumowiska odbrzegowego nad dobrzegowym przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30° (rys. 6). Może to skutkować erozją po stronie odmorskiej progów, gdyż w tej sytuacji większa ilość rumowi-

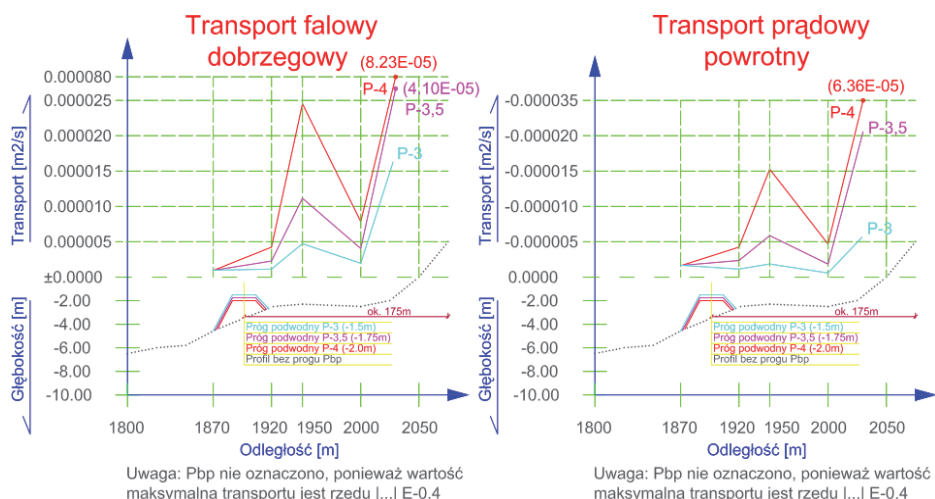
ska będzie „wynoszona” ku morzu niż transportowana do brzegu. Warto zwrócić uwagę, iż taka sytuacja nie występowała przed wybudowaniem progów, co pokazuje symulacja bez progów (rys. 6).



Rys. 6. Wykres obliczeń natężenia transportu od- i dobrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progów podwodnych 100 m od linii brzegowej i przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30°

Fig. 6. Graph of calculation of the intensity of transport from and to the waterline made for the profile at the location of the underwater threshold 100 m from the shoreline and with a variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge 30°

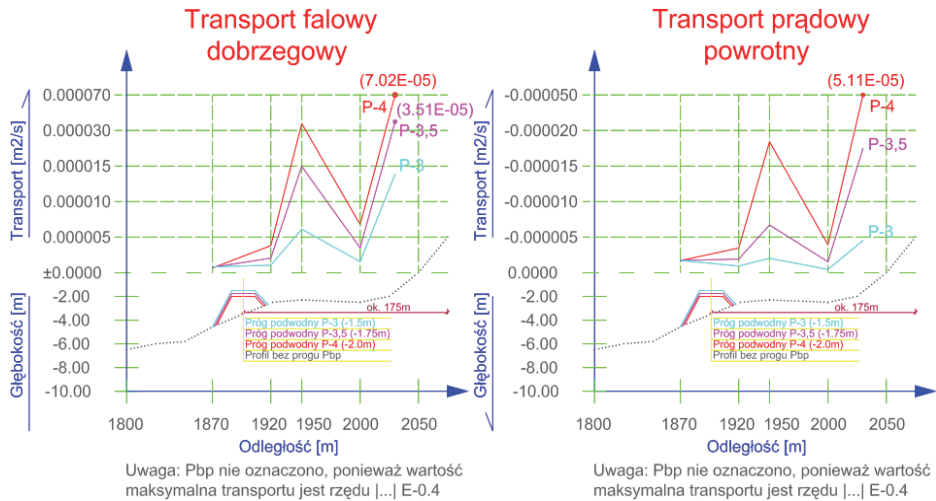
Następnie przeprowadzono obliczenia dla progów usytuowanych w odległości ok. 175 m od linii brzegowej i przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody (rys. 7 i 8). Obliczone wartości natężenia transportu rumowiska są mniejsze niż w sytuacji bez progów. Występuje również przewaga wartości transportu rumowiska dobrzegowego nad odbrzegowym przy kącie podchodzenia fali do brzegu zarówno 0° jak i 30° .



Rys. 7. Wykres obliczeń natężenia transportu od- i dobrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progu podwodnego 175 m od linii brzegowej I przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 0°

Fig. 7. Graph of the calculation of the intensity of transport, both distance and distance, made for the profile at the location of an underwater threshold of 175 m from the shoreline and with a variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge 0°

Warto zwrócić uwagę, że we wszystkich przypadkach, od P-3 do P-4 włącznie, obszar pomiędzy brzegiem a progiem byłby bardzo dobrze „wyciszony” z punktu widzenia transportu osadów. W tym przypadku progi byłyby posadowione na głębokości ok. 3,5 m. Wydaje się, że na tej głębokości nie ma zagrożeń stateczności dla budowli o wysokości 2 m (P-3), a ewentualne osiadanie (do 0,5 m) tej budowli nie spowodowałyby (zob. P-4) znaczącego pogorszenia „wyciszenia” obszaru pomiędzy brzegiem a progiem. Ponadto przesunięcie budowli na odległość ok. 175 m od brzegu spowodowałyby znaczące poszerzenie obszaru kąpieliskowego dla turystów.



Rys. 8. Wykres obliczeń natężenia transportu od- i dobrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progu podwodnego 175 m od linii brzegowej i przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30°

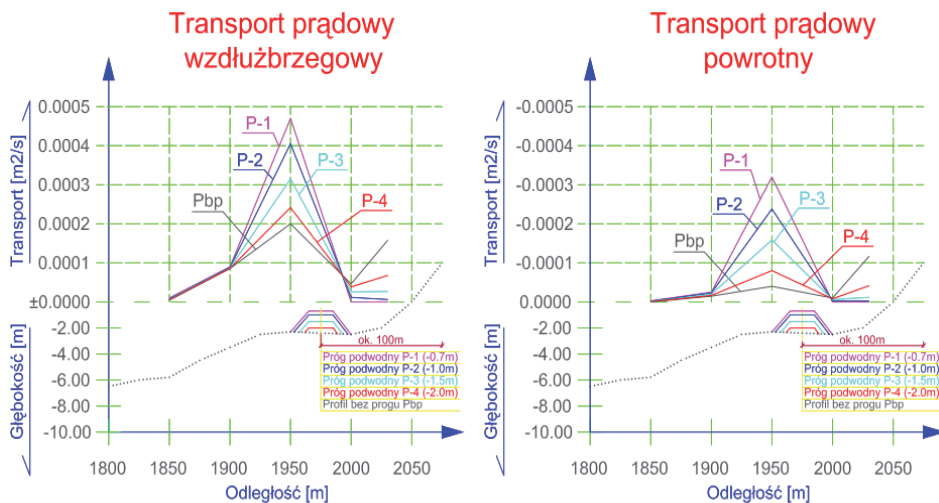
Fig. 8. Graph of the calculation of the intensity of transport, both distance and distance, made for the profile at the location of an underwater threshold of 175 m from the shoreline and with a variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge 30°

2.5. Transport wzdłuż brzegowy – wyniki obliczeń

W tym podrozdziale przedstawione zostały wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska skierowanego wzdłuż brzegu (rys. 9 i 10), w sytuacjach, gdy kąt podchodzenia fali w stronę brzegu jest równy 30° . Zgodnie z różą wiatrów jest to bardzo częsty przypadek, jaki występuje na Bałtyku w strefie brzegowej. Dodatkowo na rysunku 9 i 10 pokazane zostały wyniki obliczeń transportu prądowego powrotnego w celu porównania ich z rezultatami obliczeń transportu wzdłużbrzegowego. Obliczenia transportu rumowiska przeprowadzono dla tego samego profilu i prowadzone były pod kątem takich samych scenariuszy, jak w przypadku transportu od- i dobrzegowego.

Analizując rysunki 9 i 10 możemy zauważyć, że obliczone wartości transportu wzdłużbrzegowego rumowiska (dla kąta 30°) są większe od obliczonego natężenia transportu dobrzegowego (rys. 5-8) – zarówno przy kącie podchodzenia fali do brzegu 0° , jak i 30° , a co za tym idzie

transport ten odgrywa kluczową rolę w przebudowie dna w profilu poprzecznym brzegu. Zaczynając od rozpatrywania obecnej sytuacji (rys. 9), tj. progów podwodnych posadowionych w odległości 100 m od linii brzegowej widać, że w każdym przypadku, niezależnie od wielkości zanurzenia korony progów poniżej poziomu wody, obliczony transport wzdłużbrzegowy po stronie odmorskiej progów jest większy niż byłby w naturalnym systemie rew bez progów.



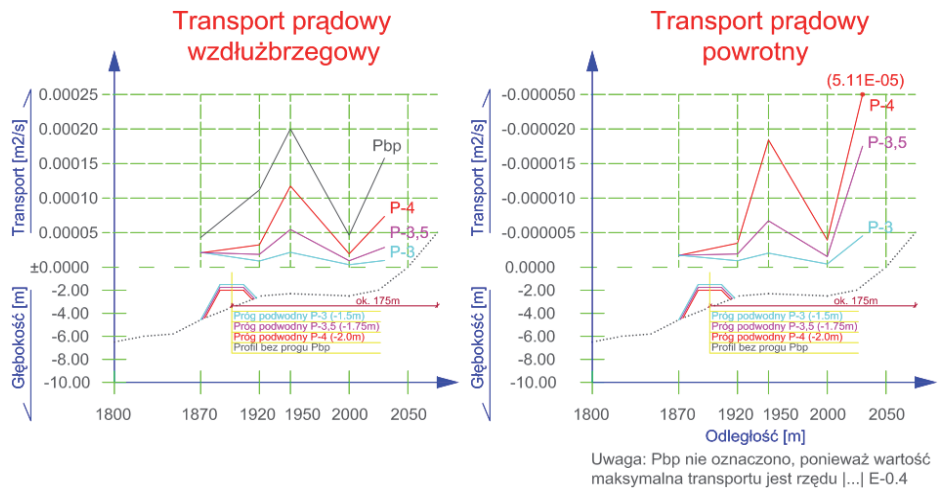
Rys. 9. Wykres obliczeń natężenia wzdłużbrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progów podwodnych 100 m od linii brzegowej i przy zmiennej zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30°

Fig. 9. Graph of the calculation of the longitudinal intensity made for the profile at the location of the underwater threshold 100 m from the shoreline and with the variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge 30°

Progi zatem powodują radykalny wzrost natężenia transportu wzdłużbrzegowego rumowiska w miejscu załamania fali po stronie odmorskiej progów, przy czym jego wartości mają tendencję rosnącą wraz ze wzrostem wysokości progów. Jednocześnie obserwuje się spadek wartości tego transportu w kierunku brzegu. Porównując rozwiązania P-1, P-2, P-3 i P-4 widać, że z punktu widzenia obszaru pomiędzy progami a brzegiem rozwiązania P-1 i P-2 są korzystniejszym rozwiązaniem niż P-3 i P-4, gdyż

w tych przypadkach obszar pomiędzy brzegiem a progiem byłby bardziej „wyciszony” z punktu widzenia transportu osadów. Ponadto we wszystkich przypadkach uwidoczniła się przewaga obliczonych wartości transportu rumowiska wzdłużbrzegowego nad transportem prądowym powrotnym.

Następnie przyjęto usytuowanie progu w odległości 175 m od linii brzegowej i przeprowadzono obliczenia przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody (rys. 10). Uzyskane wartości natężenia transportu rumowiska są na całej długości profilu mniejsze niż w sytuacji bez progu.



Rys. 10. Wykres obliczeń natężenia wzdłużbrzegowego wykonanych dla profilu przy usytuowaniu progu podwodnego 175 m od linii brzegowej i przy zmiennie zanurzonej koronie poniżej poziomu wody oraz przy kącie podchodzenia fali do brzegu 30°

Fig. 10. Graph of the calculation of the longitudinal intensity made for the profile at the location of an underwater threshold of 175 m from the shoreline and with a variably submerged crown below the water level and at the angle of approaching the wave to the edge of 30°

Występuje przy tym przewaga obliczonych wartości transportu rumowiska wzdłużbrzegowego nad transportem prądowym powrotnym. Ponadto we wszystkich przypadkach od P-3 do P-4, obszar pomiędzy progiem a brzegiem byłby „wyciszony” z punktu widzenia transportu osadów. Patrząc z jeszcze innego punktu widzenia, tj. z uwagi na wyko-

nawstwo, progi o wysokości 2,0 m (P-3) i 1,5 m (P-4) byłyby posadowione na głębokości ok. 3,5 m, a więc wydaje się, że nie byłyby narażone na problemy związane z osiadaniem i utratą stateczności.

3. Zakończenie

Analiza powierzchni aktywnych A profili niwelacyjno-batymetrycznych w Kołobrzegu wykazała, że w profilach poprzecznych brzegu występuje zjawisko erozji dna. Obliczenia pokazały, że w omawianym profilu 331,5 KM przeważają tendencje erozyjne, choć w latach 2007-2011 zauważalny był lekki trend akumulacyjny. Postępujące zmiany erozyjne były powodem podjęcia decyzji o budowie w 2012 roku umocnień ochronnych, takich jak progi podwodne. Obliczenia powierzchni kontrolnych profili poprzecznych brzegu, zmierzonych przez UM w Słupsku w 2013 roku, wykazały jednak brak skuteczności wykonanych umocnień. Ponownie jedynie w profilu 331,5 KM zauważono lekką tendencję do akumulacji rumowiska.

Profil ten został więc wzięty pod uwagę w analizie omawianego odcinka brzegu. Ocenie podlegały zarówno zaprojektowana odległość posadowienia progów od linii brzegowej, jak i wysokość korony progów poniżej poziomu wody. Analiza została wykonana w oparciu o obliczenia natężenia transportu rumowiska od- i dobrzegowego oraz wzdłużbrzegowego.

Analiza wariantu z progiem ok. 100 m od brzegu pokazała, że transport rumowiska wzdłuż brzegu dominuje nad transportem od i do-brzegowym. Obliczona maksymalna wartość tego transportu przed progiem od strony morza jest dwa razy większa od wartości tego transportu w sytuacji bez progów. Należy spodziewać się zatem wzmożonej erozji dna przed progiem od strony morza, wywołanej wzrostem transportu wzdłuż brzegu, spowodowanym wybudowaniem progów. Ponadto okazało się, że w sytuacji ukośnego podchodzenia fali do brzegu pod kątem 30° , dodatkowo przed progiem od strony morza występuje przewaga obliczonych wartości transportu od-brzegowego nad do-brzegowym, co również może oznaczać potencjalną erozję dna przed progiem. Z drugiej jednak strony obliczenia natężenia transportu rumowiska na odcinku pomiędzy progiem a linią brzegu pokazały, że jest ono praktycznie zerowe, co oznacza stabilizację profilu pomiędzy progiem a brzegiem.

W pracy przeprowadzono także analizę różnych scenariuszy, dzięki którym można było ocenić skuteczność działania progów w zależności od odległości ich posadowienia od linii brzegowej oraz od położenia korony budowli pod poziomem wody. Obliczenia pokazały, że najkorzystniejszą lokalizacją budowli byłoby położenie progów na głębokości 3,5 m, w odległości ok. 175 m od brzegu. Optymalną wysokością budowli byłaby wysokość rzędu 2,0 m. W takim przypadku obliczone wartości transportu wzdłuż brzegu oraz transportu od- i do-brzegowego w całym profilu poprzecznym są znacząco mniejsze od wartości uzyskanych dla wariantu bez progów, zaś strefa stabilizacji profilu pomiędzy progiem a linią brzegu jest znacząco szeroka.

Reasumując, obecne usytuowanie progów może być przyczyną zmian erozyjnych w profilach poprzecznych tego odcinka brzegu. Zaleca się zatem monitorowanie działania tych konstrukcji poprzez systematyczne i okresowe zbieranie danych tachimetrycznych plaży i batymetrycznych przekrojów podwodnych w sąsiedztwie progów.

Literatura

- Basiński, T., Pruszek, Z., Tarnowska, M., Zeidler, R. (1993). *Ochrona brzegów morskich*. Gdańsk. Wydawnictwo PAN.
- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. ASCE, Reston, Virginia, USA. *Proceedings Coastal Engineering*. 569-587.
- Burcharth, H.F., Hawkins, S.J., Zanuttigh, B., Lamberti, A. (2007). *Environmental Design Guidelines for Low Crested Coastal Structures*. Amsterdam. Elsevier.
- Cálabrese, M., Vicinanza, D., Buccino, M. (2003). *2D wave set up behind low crested and submerged breakwaters*. Proc. 13th International Conference ISOPE. Hawaii. Honolulu.
- Chuda, M. (2015). *Analiza hydrodynamiczna progów podwodnych i ich skuteczności w ochronie brzegu w rejonie Koszalina i Słupska*. Koszalin. Praca Magisterska.
- Chuda, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L.M. (2017). Nowatorska metoda analizy hydrodynamicznej progów podwodnych i ich skuteczności w ochronie brzegu, *Gospodarka Wodna*, 12.
- Cieślak A. (2001). Zarys strategii ochrony brzegów morskich. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2.

- Fredsøe J. (1984). Turbulent boundary layer in combined wave-current motion. *J. Hydraulic Eng., ASCE, 110(HY8)*, 1103-1120.
- Hueckel S. (1972). *Budowle morskie T. I-IV*. Gdańsk. Wydawnictwo Morskie.
- Kaczmarek L., Biegowski J., Ostrowski R., (2004). Modelling cross-shore intensive sand transport and changes of bed grain size distribution versus field data. *Coastal Engineering, 51*, 501-529.
- Kaczmarek L.M., Sawczyński Sz., Biegowski J. (2015). Hydrodynamic Equilibrium for Sediment Transport and Bed Response to Wave Motion. *Acta Geophys. 63*, 486-513.
- Kaczmarek L.M., Sawczyński Sz., Biegowski J. (2017). An equilibrium transport formula for modelling sedimentation of dredged channel. *Coastal Engineering Journal, 5*.
- Kaczmarek L.M. (1999). *Moveable sea bed boundary layer and mechanics of sediment transport*. Gdańsk. Wydawnictwo PAN.
- Kubowicz-Grajewska A. Kosmacz M. (2016). *Ochrona brzegu w Kołobrzegu*. Procesy geologiczne w strefie brzegowej morza GEOST II, Materiały Konferencyjne, Jastrzębia Góra.
- Lesser G.R., J.H. de Vroeg, Roelvink J.A., M. de Gerloni, Ardone V. (2003). *Modelling the morphological impact of the submerged offshore Breakwaters*. Florida, USA. World Scientific Publishing Co.
- Łabuz T. (2013). *Sposoby ochrony brzegów morskich i ich wpływ na środowisko przyrodnicze polskiego wybrzeża Bałtyku – Raport WWF*.
- Sánchez-Arcilla A. (2003). *The role of low crested detached breakwaters in coastal engineering* [w:] Pruszek Z. (red.), Proc. International Summer School – Workshop, Coastal Zone, Centre of Environmental Engineering and Mechanics (CEM), Lubiatowo. Wydawnictwo PAN.
- Sumer B.M., Fredsøe J. (2000). *Experimental study of 2D scour and its protection at rubble-mound breakwater*. Coastal Engineering Vol.40.
- Sayed M., Savage S.B. (1983). Rapid gravity flow of cohesionless granular materials down inclined chutes. *J. Applied Mathematics and Physics (ZAMP). 34*, 84-100.
- Van der Meer J.W., Briganti R., Zanuttigh B., Wang B. (2005). Wave transmission and reflection at low crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering, 52*.
- Warunki zamówienia dot. pełnienia usług nadzoru inwestorskiego przy projekcie Odbudowa i rozbudowa umocnień brzegu morskiego w Kołobrzegu, km 330,4-333,4, (2009). Urząd Morski w Słupsku, Słupsk, załącznik nr 12, 32.
- Zawadzka-Kahlau E. (1999). *Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku Południowego*. Gdańskie Towarzystwo Naukowe.

The Use of a Three-layer Model for Description of the Sediment Transport in the Vicinity of Underwater Threshold on the Example of Kolobrzeg

Abstract

The main aim of this thesis was to determine and parameterize hydrodynamic phenomena occurring in the coastal zone of the sea within the submerged structures. The hydrodynamic processes occurring in the region of submerged breakwaters play a significant role in transport of both cross-shore sediment transport and primarily for long-shore sediment transport. In this article 331,5 KM of the Baltic Sea was analyzed and simulated for different locations and different levels of submerged breakwaters. Coastal erosional changes within Kolobrzeg, observed in 2007-2011, were the direct cause of the decision to launch in 2012 the construction of protective fortifications in the form of underwater thresholds, shore spurs and artificial beach power supply. The calculations based on the data from the Maritime Office in Slupsk from 2013 showed the lack of effectiveness of these reinforcements, as in all edge profiles there was a decrease in the so-called active surface. The analysis of the variant with a threshold of about 100 m from the shore showed that the transport of sediment along the shore dominates over the transport and the coastage. The calculated maximum value of this transport before the seaside threshold is twice as large as the value of this transport in a non-threshold situation. Therefore, an increased erosion of the bottom before the seaside threshold, caused by the increase of transport along the shore and the construction of the threshold should be expected. It turned out that in case of an inclined wave approach to the shore at an angle of 30° , in addition to the sea-front threshold, there is a predominance of calculated values of the transport over the shore which may also mean potential bottom erosion. On the other hand calculations of the sediment transport intensity in the section between the threshold and the shoreline showed that it is virtually zero which means stabilization of the profile between the threshold and the edge. The study also involved analysis of various scenarios in which it was possible to assess the effectiveness of thresholds depending on the distance of their foundation from the shoreline and the location of the building crown below the water level. The researches showed that the most favorable location of the building would be the location of the thresholds at a depth of 3.5 m at a distance of about 175 m from the shore. The optimal height of the building would be the height of 2.0 m. In this case the calculated values of transport along the shore and the distance of transport in the whole cross section are significantly smaller than the values obtained for the variant without a threshold and the profile stabi-

lization zone between the threshold and the shoreline is significantly wide. Studies have shown that the current location of this construction may cause erosive lesions in the researched place. It is recommended to monitor the area of these structures by systematic and periodic collection of tacheometric beach data and bathymetric underwater sections in the vicinity of the thresholds.

Streszczenie

Głównym celem pracy było określenie i sparametryzowanie zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w strefie brzegowej morza w obrębie progów podwodnych. W rejonie budowli typu próg podwodny zachodzą skomplikowane procesy hydrodynamiczne, które odgrywają znaczącą rolę w transporcie osadów zarówno od- i dobrzegowych, jak i wzdłużbrzegowych. W niniejszym artykule przeprowadzono analizę dla profilu 331,5 KM w rejonie Kołobrzegu i wykonano obliczenia transportu osadów przy różnym usytuowaniu progów względem brzegu oraz dla różnych ich wysokości i różnych wysokości progów podwodnych. Zmiany erozyjne brzegu w obrębie Kołobrzegu, obserwowane w latach 2007-2011, były bezpośrednią przyczyną powzięcia decyzji o rozpoczęciu w 2012 roku budowy umocnień ochronnych w postaci progów podwodnych, ostróg brzegowych oraz wykonania sztucznego zasilania plaży. Obliczenia wykonane na podstawie danych Urzędu Morskiego w Słupsku z 2013 roku wykazują jednak brak skuteczności tych umocnień, gdyż we wszystkich profilach brzegowych zanotowano zmniejszenie tzw. powierzchni aktywnej. Analiza wariantu z progiem ok. 100 m od brzegu pokazała, że transport rumowiska wzdłuż brzegu dominuje nad transportem od- i dobrzegowym. Obliczona maksymalna wartość tego transportu przed progiem od strony morza jest dwa razy większa od wartości tego transportu w sytuacji bez progów. Należy spodziewać się zatem wzmożonej erozji dna przed progiem od strony morza, wywołanej wzrostem transportu wzdłuż brzegu, spowodowanym wybudowaniem progów. Ponadto okazało się, że w sytuacji ukośnego podchodzenia fali do brzegu pod kątem 30° , dodatkowo przed progiem od strony morza występuje przewaga obliczonych wartości transportu odbrzegowego nad dobrzegowym, co również może oznaczać potencjalną erozję dna przed progiem. Z drugiej jednak strony obliczenia natężenia transportu rumowiska na odcinku pomiędzy progiem a linią brzegu pokazały, że jest ono praktycznie zerowe, co oznacza stabilizację profilu pomiędzy progiem a brzegiem. W pracy przeprowadzono także analizę różnych scenariuszy, dzięki którym można było ocenić skuteczność działania progów w zależności od odległości ich posadowienia od linii brzegowej oraz od położenia korony budowli pod poziomem wody. Obliczenia pokazały, że najkorzystniejszą lokalizacją budowli byłoby położenie progów na głębokości 3.5 m, w odległości ok. 175 m od brzegu. Optymalną wysokością bu-

dowli byłaby wysokość rzędu 2.0 m. W takim przypadku obliczone wartości transportu wzdłuż brzegu oraz transportu od- i dobrzegowego w całym profilu poprzecznym są znacząco mniejsze od wartości uzyskanych dla wariantu bez progów, zaś strefa stabilizacji profilu pomiędzy progiem a linią brzegu jest znacząco szeroka. Badania wykazały, że obecne usytuowanie progów może być przyczyną zmian erozyjnych w badanym miejscu. Zaleca się zatem monitorowanie działania tych konstrukcji poprzez systematyczne i okresowe zbieranie danych tachimetrycznych plaży i batymetrycznych przekrojów podwodnych w sąsiedztwie progów.

Słowa kluczowe:

próg podwodny, transport osadów od- i dobrzegowy, wzdłużbrzegowy transport osadów, ochrona brzegu

Keywords:

submerged breakwater, cross-shore sediment transport, long-shore sediment transport, shore protection