

Prosty sposób wyznaczania optymalnej długości ostróg na piaszczystych, wielorewowych brzegach mórz bezpływowych

**dr inż. Piotr Szmytkiewicz¹, dr hab. inż. Marek Szmytkiewicz¹,
dr hab. inż. Rafał Ostrowski¹, dr inż. Tomasz Marcinkowski²**

¹Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk

²Instytut Morski Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, Gdańsk

Pierwsze ostrogi były stosowane do ochrony brzegów już w XIX wieku [5]. Począwszy od lat 50. XX wieku prowadzi się szczegółowe badania nad skutecznością ich działania, optymalizacją ich geometrii oraz oddziaływania na procesy hydrodynamiczne, litodynamiczne oraz morfodynamiczne zachodzące w ich otoczeniu.

W latach 50. i 60. XX wieku na podstawie badań na modelach fizycznych (hydraulicznych) istotny wkład do rozpoznania oddziaływania ostróg na brzegi morskie wnieśli: Johnson [17], Barcello [4], Price i Tomlinson [23, 24]. Badania tych autorów dotyczyły głównie określenia wpływu ostróg na wzdłużbrzegowy transport osadów. Kemp [19] badając ostrogi nieprzepuszczalne stwierdził, że w pewnych warunkach wysokie i długie ostrogi zatrzymywały około 50% wzdłużbrzegowego transportu rumowiska, ostrogi krótkie i wysokie około 40%, zaś niskie 30%. Z kolei Price i Tomlinson [24] podawali, że ostrogi nieprzepuszczalne przechwytywały około 30% transportowanych osadów.

Pierwszym modelem teoretycznym opisującym zmiany linii brzegowej w sąsiedztwie ostróg był model Pelnard-Considere'a z 1956 roku [9], który jednak pomijał szereg ważnych czynników (brak refrakcji i dyfrakcji fali, pomijanie od- i dobrzegowego transportu osadu, przyjęcie stałego nachylenia dna, równoległość izobat itd.). Bakker [3] rozwinął podejście Pelnard-Considere'a i uwzględnił dyfrakcję fali, do- i odrzegowy transport osadu, a strefa brzegowa przestała być opisana modelem jednej linii [11].

W latach osiemdziesiątych nastąpił na świecie szybki i intensywny rozwój metod numerycznych i w tym okresie ukazała się duża liczba prac, które wykorzystywały złożone algorytmy numeryczne, jednak nie wprowadzały istotnych zmian w podejściu Pelnard-Considere'a czy Bakker'a. Mowa tu przede wszystkim o pracach na przykład Hansona i Krausa [15], Matsuoki i Ozawy [21] czy Hansona [14].

W latach 90 XX wieku i w pierwszej dekadzie XXI wieku nadal intensywnie rozwijano metody numeryczne, podsumo-

wywano i wyciągano wnioski z rozległych badań terenowych i na modelach hydraulicznych prowadzonych na całym świecie. Według autorów niniejszej pracy najlepiej ówczesny stan wiedzy oddają publikacje Badii i in. [2], Hansona i in. [16], Kunza [20], Bacamo i Grosskopf [1], Dabessa i in. [13] oraz Nakamury [22]. Na podstawie tych prac generalne wnioski i zalecenia są następujące:

- Ostrogi mogą być stosowane na tych odcinkach brzegu, gdzie w podbrzeżu znajdują się znaczne ilości osadów piaszczystych, wystarczająco zasobne są ich źródła naturalne lub pochodzące ze sztucznego zasilania.
- Przy wypadkowym kierunku strumienia energii fal zbliżonym do prostopadłego do brzegu składowa wzdłużbrzegowa natężenia transportu osadów jest niewielka, bez względu na istniejące zasoby osadów ostrogi będą słabo oddziaływać na ten transport; z ich budowy należy zrezygnować.
- Przy ukośnym kierunku wypadkowego strumienia energii fal i znacznej podaży materiału piaszczystego (pochodzącego na przykład ze sztucznego zasilania) ostrogi będą częściowo przechwytywać przemieszczające się wzdłuż brzegu rumowisko, powodując w efekcie przyrost brzegu i spłylenie podbrzeża.
- Ostrogi – przy wystarczającej podaży materiału osadowego – są w stanie wywołać akumulację plaży, zwłaszcza w ciągu pierwszych kilku lat oddziaływania, a potem utrzymywać ten stan.

Rola ostróg ogranicza się głównie do osłabienia efektów erozji brzegu, a nie do całkowitego jego zabezpieczenia.

Jak pośrednio wykazano w pracach Kamphuisa [18] i na przykład Wise'a [27] oraz według doświadczenia autorów niniejszej pracy stosowanie globalnych, wieloskalowych modeli numerycznych (na przykład Delft3D, Mike21 i itp.) do projektowania ostróg brzegowych może nie zawsze przynosić zadowalające rezultaty. Wynika to głównie z faktu, że współoddziaływanie procesów hydro-, lito- i morfodynamicznych z konstrukcjami jest bardzo trudne do matematycznego opisanie. Stąd na przestrzeni ostatnich lat zauważalne w literaturze przedmiotu stało się odchodzenie od stosowania uniwersalnych modeli matematycznych na rzecz podejścia zindywidualizowanego (tzw. *case study*), opartego na dogłębnym rozpoznaniu warunków lokalnych.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody wyznaczania odpowiedniej długości ostróg na piaszczystych, wielorewowych brzegach mórz bezpływowch. Obliczenia wykonano na przykładzie odmorskiego brzegu Półwyspu Helskiego w okolicy miejscowości Kuźnica.

PROPONOWANA METODA WYZNACZANIA ODPOWIEDNIEJ DŁUGOŚCI OSTRÓG

Poniżej przedstawiono podstawowe elementy proponowanego sposobu optymalizacji długości ostróg brzegowych:

1. Wykonanie pomiarów sondażowych w rejonie planowanej inwestycji i wybranie reprezentatywnego profilu batymetrycznego dla tego odcinka brzegu.

2. Analiza statystyczna danych falowych pochodzących z wielolecia dla rejonu inwestycji (w tym wyznaczenie parametrów falowania i czasów ich trwania w średnim roku statystycznym).
3. Określenie scenariuszy falowych mających kluczowe znaczenie w przebudowie brzegu morskiego na rozpatrywanym odcinku.
4. Wyznaczenie średniorocznego natężenia wzdłużbrzegowego transportu osadu.
5. Określenie optymalnej długości ostróg na podstawie obliczonego rocznego rozkładu wzdłużbrzegowego transportu osadów w funkcji odległości od brzegu oraz szerokości strefy przyboju.

Analiza statystyczna danych falowych z wielolecia dla rejonu inwestycji

Pomiary falowania wzdłuż odmorskich brzegów Półwyspu Helskiego są wykonywane nieregularnie i w niewielu miejscach, z reguły w ramach krótkotrwałych ekspedycji pomiarowych. Na ich podstawie jest niemożliwe wykonanie analiz określających prawdopodobieństwo występowania fal o różnych parametrach (wysokościach, okresach i kąta podchodzenia). Dlatego też do odtworzenia falowania wykorzystywane są numeryczne modele falowania. Danymi wejściowymi do tych modeli są pola wiatrów nad Morzem Bałtykim.

W modelowaniu falowania wykorzystano wyniki obliczeń prowadzonych w ubiegłych latach w Instytucie Budownictwa Wodnego (IBW PAN) w Gdańsku, które pozwoliły na rekonstrukcję klimatu falowego na Bałtyku w okresie 44 lat (1958-2001). Do rekonstrukcji falowania wykorzystano model spektralny WAM4 [29]. Model ten jest obecnie szeroko stosowany na świecie do prognozowania falowania. Pola wiatru nad Bałtykiem, stanowiące dane wejściowe do modelu falowania, pochodziły z regionalnego modelu atmosferycznego REMO (Regional Climate Model). Rozdzielczość obliczeniowej siatki przestrzennej wynosiła około 9 km. Interpolowane w przestrzeni pola wiatru wprowadzono do modelu falowego z krokiem jednogodzinnym, a następnie wewnątrz modelu interpolowano z krokiem czasowym 300 s. W wyniku tych obliczeń dla każdego punktu prognostycznego na całym Bałtyku (węzły siatki numerycznej) otrzymano dla każdej kolejnej godziny reprezentatywne parametry fali, to jest wysokości fali znacznej oraz okresy i kierunki propagacji fali. Łącznie dla każdego punktu prognostycznego otrzymano zbiory zawierające $24 \times 365 \times 44$ zestawów wartości liczbowych.

Porównanie wyników modelowania i pomiarów falowania *in situ* oraz z pomiarami satelitarnymi pokazało, że model WAM4 poprawnie opisuje falowanie rzeczywiste i może być wykorzystywany do analizy klimatu falowego na Bałtyku [12].

Na potrzeby realizacji niniejszej pracy w celu wyznaczenia parametrów falowania głębokowodnego po odmorskiej stronie Półwyspu Helskiego przeanalizowano otrzymane z rekonstrukcji falowania na Bałtyku w okresie 44 lat (1958-2001) zbiory falowe punktów prognostycznych położonych blisko brzegów Półwyspu.

Współrzędne geograficzne wybranego punktu prognostycznego, jego odległość od brzegu i głębokość są następujące:

- współrzędne geograficzne: 54°49,872" N, 18°34,566" E,
- odległość od brzegu: ~ 9 000 m,
- głębokość: ~ 25 m.

Wyznaczenie scenariuszy falowych

Na podstawie zebranych danych falowych dla wybranego punktu prognostycznego opracowano tak zwane scenariusze falowe, to jest wyznaczono parametry falowania występujące w średnim roku statystycznym. W tym celu dla poszczególnych kierunków przyjęto przedziały wysokości fali co 0,5 m i dla każdego z nich obliczono średnie wysokości fal znacznych H_s , średnie okresy T_p , średnie kąty podchodzenia fali do brzegu θ oraz czasy ich trwania w ciągu roku. Odmorskimi kierunkami wiatrów dla brzegu w rejonie Kuźnicy są: NW, NNW, N, NNE, NE, ENE, E i ESE.

Przykład tak wyznaczonego scenariusza dla kierunku NNE zamieszczono w tabl. 1.

Zamieszczone w tabl. 1 kąty podchodzenia fali do brzegu to kąty zawarte pomiędzy promieniem fali (linią prostopadłą do grzbietu fal) a danym profilem batymetrycznym. Standardowo w zbiorach prognostycznych falowania zamieszczane są azymuty kątów falowych. Jednak przy obliczaniu transformacji falowania, prądów wzdłużbrzegowych oraz transportu rumowiska konieczne jest rozróżnienie kierunków przepływu osadów z zachodu na wschód i ze wschodu na zachód. W tym celu na podstawie znajomości azymutu profilu batymetrycznego, dla którego mają być wykonane obliczenia, przelicza się azymuty falowe na kąty (dodatnie i ujemne) podchodzenia fali do brzegu. W Polsce przyjęto konwencję, zgodnie z którą kąty fal podchodzących z lewej strony profilu batymetrycznego (czyli umownie rzecz nazywając – „z zachodu”) oznaczane są znakiem dodatnim, a kąty fal podchodzących z prawej strony (czyli „ze wschodu”) oznaczane są znakiem ujemnym. Zgodnie z tą konwencją oddziaływanie fal podchodzących do brzegu Półwyspu Helskiego z kierunków NW, NNW, N i NNE ma znak dodatni, a fal podchodzących z kierunków NE, ENE, E i ESE – znak ujemny.

Analizując azymuty promieni fali w punkcie prognostycznym i azymut profilu batymetrycznego można pokazać przez ile dni łącznie w roku statystycznym falowanie podchodzi z zachodu lub wschodu, a co za tym idzie można było określić łączną liczbę dni w ciągu roku, w których transport rumowiska jest skierowany z zachodu na wschód, a przez ile dni w kierunku przeciwnym.

Z opracowanych scenariuszy falowania dla poszczególnych kierunków wynika, że:

- falowanie generowane wiatrami z kierunków NW, NNW, N i NNE trwa łącznie w ciągu roku przez 145,2 dni w roku,
- falowanie podchodzące z kierunków NE, ENE, E i ESE trwa łącznie w ciągu roku przez 41,1 dni, to jest około 3,5 razy krócej niż z pozostałych odmorskich kierunków.

Obliczenie natężenia wzdłużbrzegowego transportu rumowiska

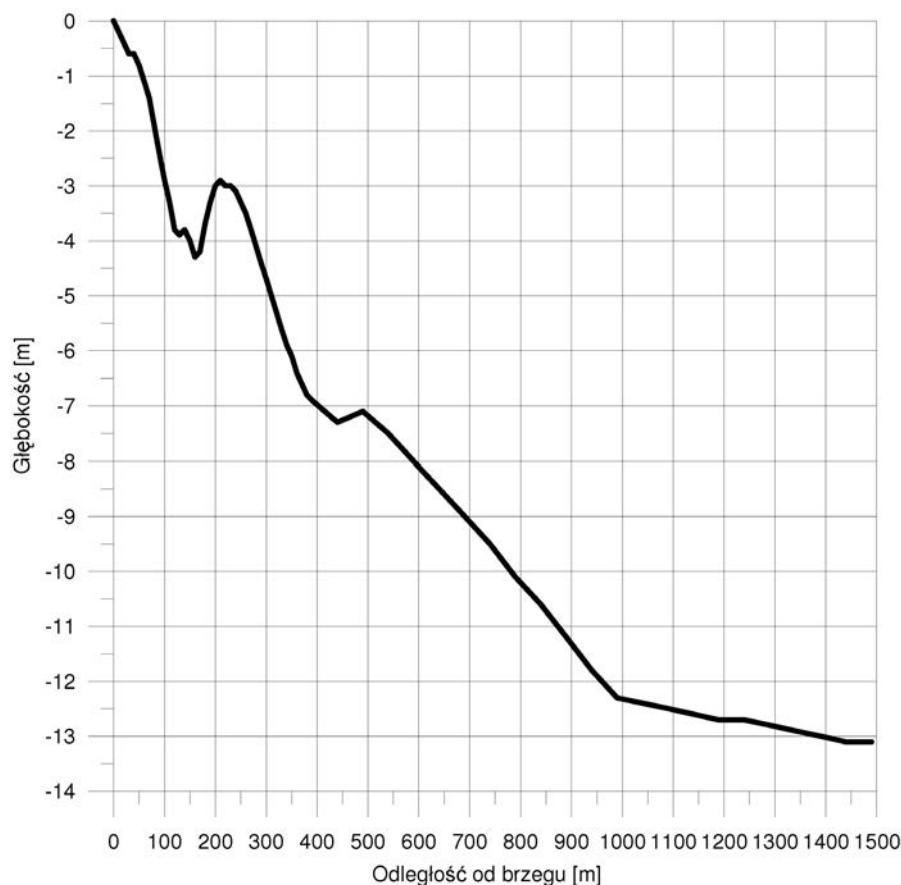
Scenariusze falowe dla wszystkich odmorskich kierunków wiatru stanowiły punkt wyjścia do obliczenia kolejno transformacji falowania, prądów wzdłużbrzegowych oraz natężenia wzdłużbrzegowego transportu osadów w reprezentatywnym profilu batymetrycznym usytuowanym na kmH 11.0. Na rys. 1 pokazano profil batymetryczny na kmH 11.0 sięgający do odległości 1500 m od brzegu i głębokości około 13 m.

Z rysunku wynika, że profil ten charakteryzuje się mocno rozbudowaną rewą, której grzbiet położony jest w odległości około 220 m od linii brzegowej.

Obliczenia transformacji falowania, prądów wzdłużbrzegowych oraz natężenia wzdłużbrzegowego transportu rumowiska wykonano opracowanym w IBW PAN modelem numerycznym SAND94 [25, 26] oraz oprogramowaniem UNIBEST-LT wersja 4.0 [28]. W obu modelach obliczenia są wykonywane dla określonych, charakterystycznych średnic ziaren osadów (d_{50} , d_{90}) oraz prędkości ich sedimentacji (w_s) reprezentatywnych dla analizowanego odcinka brzegu. Natężenie wzdłużbrzegowego transportu osadów wyznaczono modelem Bijkera [10].

Tabl. 1. Opracowany scenariusz falowy dla kierunku wiatru NNE na podstawie rekonstrukcji pola falowego z lat 1958-2001 w punkcie prognostycznym 54°49,872" N, 18°34,566" E

Kierunek	Przedziały wysokości fal [m]	Wysokość fali znacznej H_s [m]	Okres fali T_p [s]	Kąt podchodzenia fali do brzegu θ [°]	Łączny czas trwania w ciągu roku [dni]
NNE	0,0 ÷ 0,5	0,29	4,34	8,1	16,0
	0,5 ÷ 1,0	0,72	5,65	8,3	17,4
	1,0 ÷ 1,5	1,22	6,89	9,1	8,9
	1,5 ÷ 2,0	1,71	7,74	9,5	4,6
	2,0 ÷ 2,5	2,22	8,42	8,8	2,3
	2,5 ÷ 3,0	2,73	9,09	9,1	1,4
	3,0 ÷ 3,5	3,22	9,63	8,8	0,8
	3,5 ÷ 4,0	3,71	10,20	9,7	0,4
	4,0 ÷ 4,5	4,20	10,58	9,2	0,2
	4,5 ÷ 5,0	4,73	11,09	7,7	0,1
	5,0 ÷ 5,5	5,24	11,39	9,0	0,1



Rys. 1. Pomierzony profil batymetryczny w rejonie Kuźnicy na kmH 11.00

W przeprowadzonych obliczeniach założono, że osady piaszczyste w strefie brzegowej wzdłuż odmorskich brzegów Półwyspu Helskiego są w miarę jednorodne i jako reprezentatywne przyjęto następujące charakterystyczne średnice ziaren oraz prędkości ich opadania:

- średnice ziaren $\rightarrow d_{50} = 0,22 \text{ mm}$, $d_{90} = 0,38 \text{ mm}$,
- prędkość opadania ziaren $\rightarrow w_s = 0,028 \text{ m/s}$.

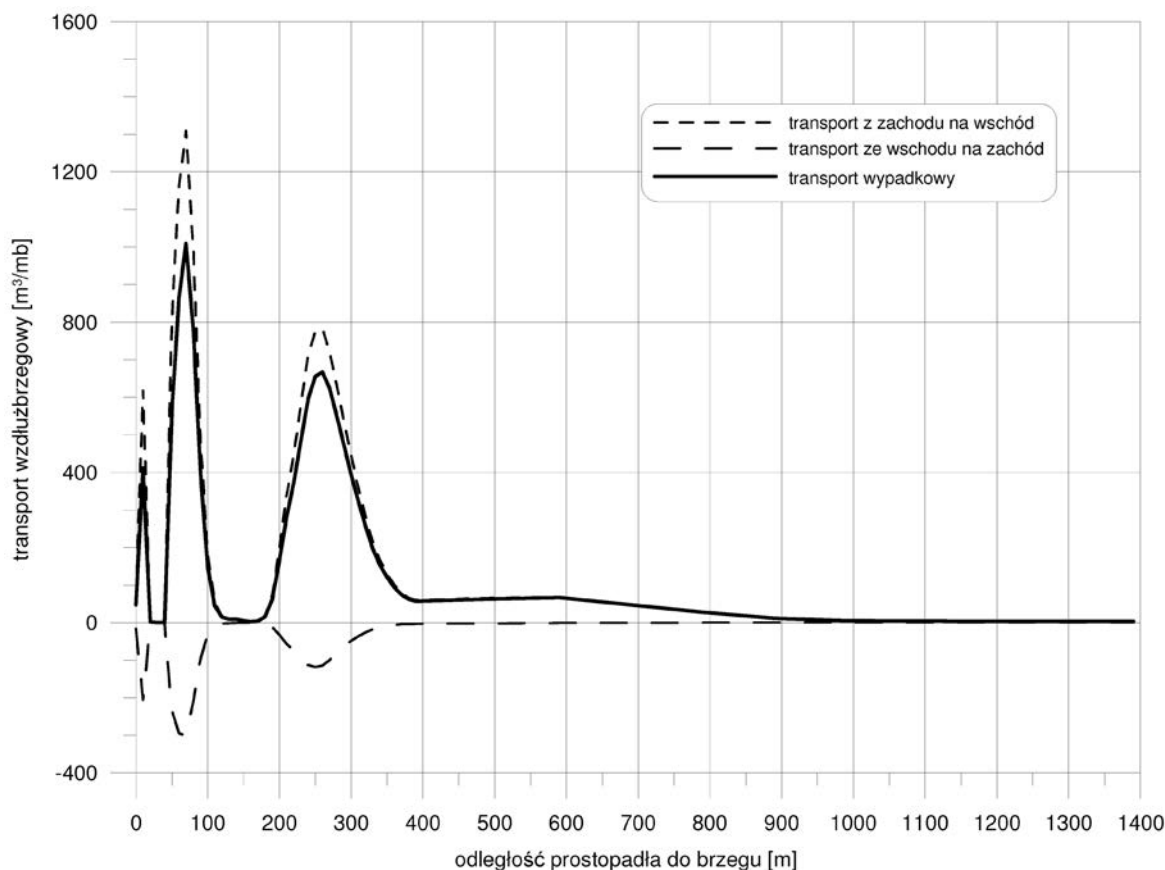
Obliczoną roczną sumaryczną wielkość wzdłużbrzegowego transportu rumowiska dla poszczególnych kierunków podchodzenia falowania do brzegu, łączne ilości przenoszonych osadów z zachodu na wschód i ze wschodu na zachód oraz wypadkowy roczny transport w ciągu roku zamieszczono w tabl. 2.

Z zamieszczonych w tabl. 2 obliczonych sumarycznych wartości natężenia wzdłużbrzegowego transportu osadów wynika, że:

- przeważający jest transport rumowiska skierowany z zachodu na wschód wynoszący łącznie 163 000 m³/rok,
- dla kierunków zachodnich największy transport występuje przy falowaniu podchodzącym z kierunku NNE i N,
- transport osadów skierowany ze wschodu na zachód jest zdecydowanie mniejszy, stanowi on około 13 ÷ 15% wartości transportu osadów przenoszonych z zachodu na wschód,
- dla kierunków wschodnich największy transport występuje przy falowaniu podchodzącym z kierunku NE i ENE,
- transport wypadkowy wynosi 138 000 m³/rok i jest skierowany z zachodu na wschód.

Tabl. 2. Obliczony sumaryczny transport osadów [m³/rok] dla poszczególnych kierunków podchodzenia falowania do brzegu, łączne ilości przenoszonych osadów z zachodu na wschód i ze wschodu na zachód oraz wypadkowy roczny transport dla profilu batymetrycznego kmH 11.00 w średnim roku statystycznym

Kierunki	Obliczony wzdłużbrzegowy transport osadów [m ³ /rok]
NW	19 000
NNW	19 000
N	54 000
NNE	70 000
łączny transport skierowany z zachodu na wschód	163 000
NE	- 13 000
ENE	- 9 000
E	- 3 000
ESE	~ 0
łączny transport skierowany ze wschodu na zachód	- 25 000
transport wypadkowy	138 000



Rys. 2. Obliczony roczny rozkład wzdłużbrzegowego transportu rumowiska w funkcji odległości od brzegu w kierunku wschodnim i zachodnim oraz wypadkowy w profilu batymetrycznym kmH 11.00

Obliczone sumaryczne wielkości transportu rumowiska nie zawierają informacji o tym, jak transport ten rozkłada się w strefie brzegowej, gdzie jego natężenie jest największe, jak daleko sięga od brzegu, itd. W celu odpowiedzenia na te pytania na rys. 2 zamieszczono obliczone rozkłady wzdłużbrzegowego transportu osadów w funkcji odległości od brzegu dla całkowitego transportu skierowanego z zachodu na wschód, całkowitego transportu w kierunku odwrotnym i transportu wypadkowego w poszczególnych profilach batymetrycznych.

Z rys. 2 oraz z analizy rezultatów obliczeń wynika, że:

- wyróżnić można trzy zasadnicze strumienie przemieszczającego się rumowiska,
- transport osadów ma maksymalny zasięg około 900 m od linii brzegowej,
- pierwszy przybrzeżny strumień osadów jest stosunkowo wąski, o szerokości około 20 m i przenoszone w nim jest tylko około 6% całkowitego transportu,
- drugi środkowy strumień osadów usytuowany jest w odległości od około 50 do około 100 m od linii brzegowej i przenoszone nim jest około 33% całkowitego transportu rumowiska,
- trzeci odmorski strumień osadów położony jest w odległości od 200 do 380 m od linii brzegowej i przemieszcza się w nim około 58% całkowitego transportu rumowiska,
- w tak zwanym „ogonie” położonym po odmorskiej stronie trzeciego pasa strumienia osadów przemieszcza się około 3% całkowitego transportu osadów.

Na podstawie otrzymanych obliczeń rozkładów natężenia transportu osadów w funkcji odległości od brzegu wyznaczono procentowy udział przenoszonego rumowiska w pasach o wzrastających szerokościach liczonych od brzegu. W przeprowadzonych ocenach przyjęto następujące szerokości pasów: 0 ÷ 70 m, 0 ÷ 100 m, 0 ÷ 150 m, 0 ÷ 200 m i 0 ÷ 500 m. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabl. 3.

Tabl. 3. Procentowy udział przenoszonego transportu w poszczególnych pasach w średnim roku statystycznym w profilu batymetrycznym kmH 11.0

Pas I 0 ÷ 70 m	Pas II 0 ÷ 100 m	Pas III 0 ÷ 150 m	Pas IV 0 ÷ 200 m	Pas V 0 ÷ 500 m
25,8%	37,6%	38,3%	40,5%	97,8%

Z porównania pokazanego na rys. 2 obliczonego rozkładu transportu rumowiska w funkcji odległości od brzegu z pokazanym na rys. 1 profilem batymetrycznym oraz zamieszczonym w tabl. 3 procentowym udziałem przenoszonego transportu w poszczególnych pasach wynika, że:

- w dolinach międzyrewowych położonych w odległościach 200 ÷ 300 m od brzegu transport rumowiska prawie nie występuje,
- w rejonie odmorskiej rewy, to jest w pasie położonym w odległości 300 ÷ 500 m od brzegu przemieszcza się 58% całkowitego transportu rumowiska.

Określenie optymalnej długości ostróg

Jak podają, między innymi, Basiński i in. [9] efektywność pracy ostróg zależy głównie od ich zasięgu w głąb strefy przyboju. Jeżeli ich długość jest mniejsza od szerokości strefy przyboju, to pełnią one rolę budowli „krótkich”. Następuje wówczas erozja wokół głowic i wymywanie materiału dennego w polach między ostrogami, szczególnie po ich zaprządowych stronach. Natomiast, jeżeli długość ostróg jest większa od szerokości strefy przyboju, stają się one budowlami „długimi”. Wówczas następuje odkładanie transportowanego rumowiska w polach między ostrogami i poszerzanie plaży. W warunkach sztormowych ostrogi są budowlami krótkimi, a w przypadku małego i umiarkowanego falowania budowlami długimi.

W celu określenia dla jakich warunków falowych projektowane ostrogi będą pracować jako konstrukcje długie lub krótkie, obliczono transformację fal głębokowodnych podchodzących do brzegu. Obliczenia te wykonano dla falowania podchodzącego z kierunku NNE (tabl. 1), to jest z kierunku, dla którego występuje największy transport osadów (tabl. 2). Wyznaczone z tych obliczeń szerokości strefy przyboju zamieszczono w tabl. 4.

Z danych przedstawionych w tabl. 4 wynika, że długość ostróg w rejonie Kuźnicy powinna wynosić około 85 m. Przy tej długości ostrogi pracują jako budowle długie dla fal o wysokościach nie przekraczających 1,5 m. Wysokości fal z przedziału 1,0 ÷ 1,5 m odpowiadają warunkom falowym występujących w strefie brzegowej podczas przeciętnych sztormów. Dla fal wyższych szerokość strefy przyboju szybko rośnie (występuje dwukrotne załamanie fali). Dla warunków falowych występujących w czasie silnych sztormów ($H_s \geq 3,0$ m) długość ostróg musiałaby wynosić co najmniej 700 m, co ze względów ekonomicznych jest nierealne.

Sumując oddzielnie czasy trwania falowania o wysokościach nieprzekraczających 1,0 m oraz o wysokościach większych dla

wszystkich scenariuszy falowych otrzymamy dla średniego roku statystycznego:

- łącznie przez 149,1 dni w ciągu roku wysokości fal są mniejsze od 1,0 m, ostrogi o długości około 85 m pracują jako budowle długie; w tych warunkach falowych następuje odkładanie transportowanego wzdłuż brzegu rumowiska w polach między ostrogami i poszerzaniem plaży,
- łącznie przez 59,6 dni w ciągu roku wysokości fal są większe od 1,0 m; ostrogi o długości około 85 m pracują jako budowle krótkie; w tych warunkach falowych następuje wymywanie materiału dennego w polach między ostrogami.

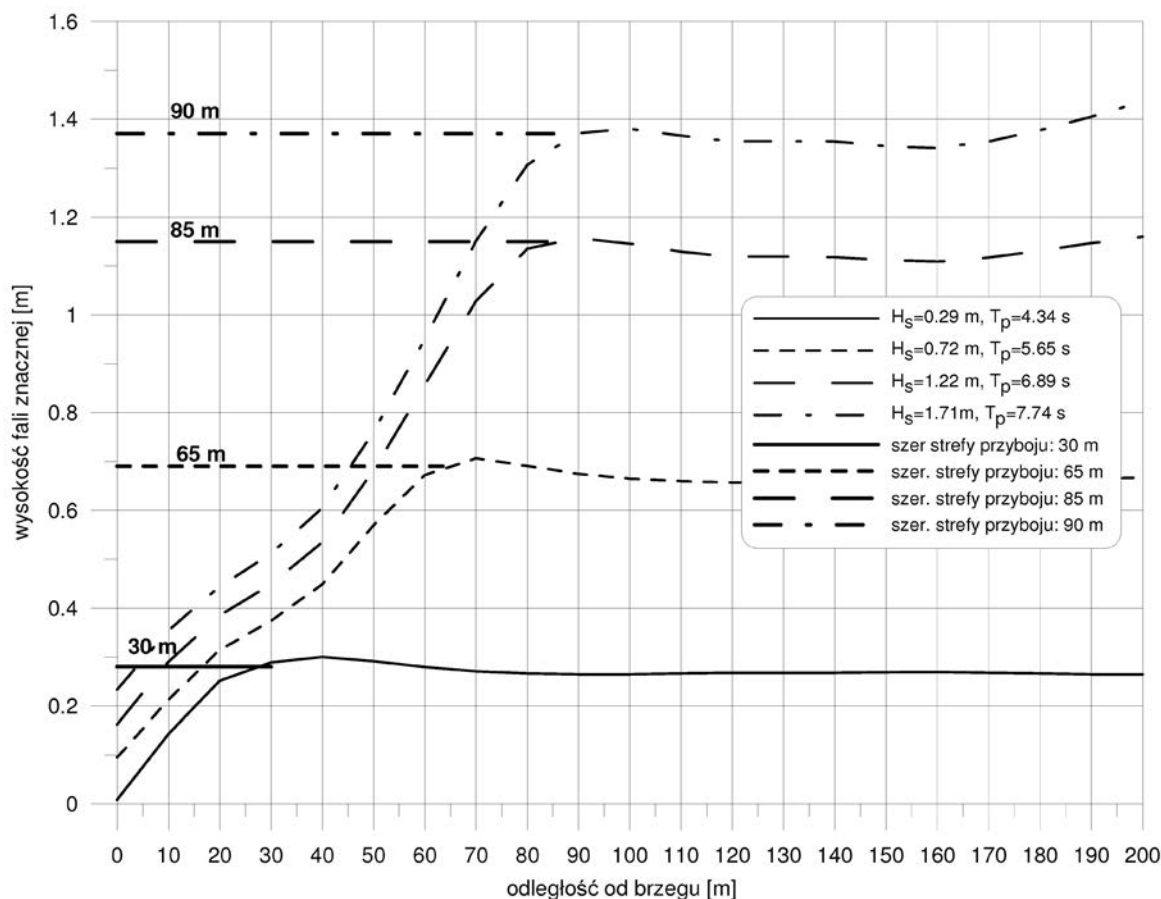
Na rys. 3 pokazano obliczoną transformację fal głębokowodnych o wysokościach fal znacznych równych: $H_s = 0,29$ m, $H_s = 0,72$ m, $H_s = 1,22$ m i $H_s = 1,71$ m (tabl. 1). Szerokości strefy przyboju w tych warunkach falowych wynosiły odpowiednio: $L_B = 30$ m, $L_B = 65$ m, $L_B = 85$ m oraz $L_B = 90$ m. W przypadku pierwszych dwóch warunków falowych ostrogi pracują jako budowle długie i gromadzą materiał w polach między ostrogami. Dla wszystkich pozostałych warunków ostrogi pracują jako budowle krótkie, kiedy materiał jest wynoszony z pól między ostrogami.

PODSUMOWANIE

Ostrogi przejęte z regulacji rzek pojawiły się na brzegu morskim południowego Bałtyku w drugiej połowie XIX wieku. Natomiast w obecnych granicach polskiego wybrzeża historia ostróg ma około 150 lat. Na Półwyspie Helskim budowę ostróg rozpoczęto w 1946 roku i kontynuowano w latach następnych. W sumie do 1970 roku zbudowano 162 ostrogi, z czego 114 było ostrogami z pali drewnianych i 46 z pali żelbetowych. Ostrogi te sięgały do kmH 12.30.

Tabl. 4. Obliczone szerokości strefy przyboju dla falowania podchodzącego z kierunku NNE

Przedziały wysokości falowania [m]	Wysokość fali znacznej H_s [m]	Okres fali T_p [s]	Szerokość strefy przyboju dla I odlądowego załamania fali [m]	Szerokość strefy przyboju dla II odmorskiego załamania fali [m]
0,0 ÷ 0,5	0,29	4,34	30	
0,5 ÷ 1,0	0,72	5,65	65	
1,0 ÷ 1,5	1,22	6,89	85	
1,5 ÷ 2,0	1,71	7,74	90	270
2,0 ÷ 2,5	2,22	8,42	100	310
2,5 ÷ 3,0	2,73	9,09	100	320
3,0 ÷ 3,5	3,22	9,63	100	650
3,5 ÷ 4,0	3,71	10,20	100	700
4,0 ÷ 4,5	4,20	10,58	100	900
4,5 ÷ 5,0	4,73	11,09	100	3000
5,0 ÷ 5,5	5,24	11,39	100	5000



Rys. 3. Obliczona transformacja fal głębokowodnych o wysokościach fal znacznych: $H_s = 0,29$ m, $H_s = 0,72$ m, $H_s = 1,22$ m, $H_s = 1,71$ m, z odpowiadającymi im szerokościami strefy przyboju: $L_B = 30$ m, $L_B = 65$ m, $L_B = 85$ m, $L_B = 90$ m

Na podstawie wieloletniej obserwacji skuteczności działania systemu ostróg na Półwyspie, oceny ich oddziaływania na brzegi oraz szeregu symulacji numerycznych przedstawionych w pracach [5, 6, 7, 8] stwierdzono, że najbardziej korzystną całkowitą długością ostróg w przypadku Półwyspu Helskiego jest dotychczas stosowana długość około 100 m, przy czym część podmorska powinna wynosić około 85 m, a część lądowa około 15 m.

Z przedstawionej w pracy metody określania optymalnej długości ostróg brzegowych na podstawie:

- analizy długookresowych danych falowych pozwalających wyznaczyć parametry falowania i czasy ich trwania w średnim roku statystycznym,
- obliczenia średniorocznego wzdłużbrzegowego transportu osadów w reprezentatywnym dla rozpatrywanego odcinka brzegu profilu batymetrycznym,
- przyjęcia warunku, aby możliwie przez jak największą część roku ostrogi pracowały jako budowle długie, to znaczy, aby ich długość była większa od szerokości strefy przyboju

otrzymano, że długość tych ostróg powinna wynosić 85 m.

Jak widać proponowana metodyka określania optymalnej długości ostróg na przykładzie budowanych ostróg na podmorskim brzegu Półwyspu Helskiego w rejonie Kuźnicy jest zgodna wieloletnimi obserwacjami skuteczności działania systemu ostróg na tym odcinku brzegu.

Przedstawiona metoda określania optymalnej długości ostróg może być zaadaptowana do dowolnego brzegu morskiego charakteryzującego się wielorewową, piaszczystą strefą brzegową. Metoda nie uwzględnia pływów. Przedstawiona metoda jest relatywnie prosta i szybka do zastosowania.

LITERATURA

1. Bacamo L., Grosskopf W.: Beach response to groins. Westhamton, New York, Coastal Sediments, Vol. 3, ASCE, Hauppauge, Long Island, June 1999, 2073-2089.
2. Badiei P., Kamphuis W., Hamilton D.: Physical experiments on the effect of groins on shore morphology. Proceedings of the 24 International Coastal Engineering Conference, ASCE, Kobe 1994, 1782-1796.
3. Bakker W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., Vol II, London 1968.
4. Barcello J. P.: Experimental study of the hydraulic behaviour of groyne system. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., London 1968.
5. Basiński T.: Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See” – Synthese, Leichtweiss-Institut für Wasserbau. Technische Universität Braunschweig. Raport wewnętrzny, 1988.
6. Basiński T.: Kształtowanie się obszarów erozyjnych na zakończeniach grup ostróg na Helu w latach 1949-1956. Materiały do monografii polskiego brzegu morskiego. Zeszyt 1. PWN, Gdańsk – Poznań 1961.

7. Basiński T., Ostrowski R., Pruszek Z., Schönofer J., Skaja M., Szmytkiewicz M., Szmytkiewicz P.: Ocena stanu i oddziaływania ostróg na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego. Raport IBW PAN w Gdańsku dla Urzędu Morskiego w Gdyni, 2011.
8. Basiński T., Onoszko J.: Oddziaływanie na profil i linię brzegową grupy ostróg ażurowych zbudowanych na Półwyspie Helskim w latach 1957 i na początku 1958 w ich pierwszym roku pracy. Materiały do monografii polskiego brzegu morskiego. Zeszyt 1. PWN, Gdańsk – Poznań 1961.
9. Basiński T., Pruszek Z., Tarnowska M., Zeidler R.: Ochrona brzegów morskich. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, 1993.
10. Bijker E. W.: Longshore Transport Computations, Journal of Waterways, Harbour and Coastal Engineering, Vol. 99, WW4., 1971.
11. Bruun P.: Sea level rise as a cause of erosion. ASCE, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., 1962, No. WW1.
12. Cieślakiewicz W., Paplińska-Swercel B.: Długoterminowe modelowanie falowania wiatrowego Bałtyku w okresie 1958-2001, Inżynieria Morska i Geotechnika Nr 4, 2005, 313-321.
13. Dabees M., Moor B., Humiston K.: Enhancement of t-groins design to improve downdrift shoreline response. Proceedings of the 29th International Coastal Engineering Conference, ASCE, Lisbon 2004, 2423-2435.
14. Hanson H.: GENESIS. A generalized shoreline change numerical model for engineering use. Report No. 1007, Lund University, Sweden 1987.
15. Hanson H., Kraus, N. C. Numerical model for the studying shoreline change in the vicinity of coastal structures. Progress Report No. 3040, Institute of Technology, University of Lund, 1980.
16. Hanson H., Thevenot M., Kraus N. C. Numerical simulation of shoreline change for longshore sand waves at groin field. Proceedings of the 25th International Coastal Engineering Conference, ASCE, Orlando, paper 127, 1996.
17. Johnson J. W.: The action of groynes on beach stabilisation. California University, Berkeley Dept. of Engineering, Technical Report, 1948, HE.
18. Kamphuis J. W.: Coastal engineering-quo vadis? Coastal Engineering, Vol. 53, 2-3, 2006, 133-140.
19. Kemp P. H.: A model study of the behaviour of beaches and groynes. Conf. Coast. Management, ICE, 1962, Vol. 22, London.
20. Kunz H.: Groynes on the East-Frisian Islands: History and experiences. Proceedings of the 25th International Coastal Engineering Conference, ASCE, Orlando 1996, 2128-2141.
21. Matsuoaka M., Ozawa Y.: Application of a numerical model to prediction of shoreline changes. Proc. Coastal Structures '83, Arlington 1983.
22. Nakamura S.: Passage rate of bedload transport due to a groin in consideration of wave climate. Book of Abstract ICCE, Shanghai, 2010, 110.
23. Price W. A., Tomlinson K. W.: The effect of groynes on eroded beaches, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., London 1970.
24. Price W. A., Tomlinson K. W.: The effect of groynes on stable beaches. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., London 1968.
25. Szmytkiewicz M.: Prądy pochodzenia falowego w morskiej strefie brzegowej. Wydawnictwo IBW PAN, 2002.
26. Szmytkiewicz M., Skaja M.: Opis modelu „SAND94”, Raport IBW PAN, Gdańsk 1998.
27. The WISE Group. Cavaleri L, Alves J. H. G. M., Ardhuin F., Babanin A., Banner M., Belibassakis K., Benoit M., Donelan M., Groeneweg J., Herbers T. H. C., Hwang P., Janssen P. A. E. M., Janssen T., Lavrenov I. V., Magne R., Monbaliu J., Onorato M., Polnikov V., Resio D., Rogers W. E., Sheremet A., McKee Smiths J., Tolman H. L., van Vledder G., Wolf J., Young I. Wave modelling – The state of the art. Progress in Oceanography, Vol. 75, 4, 2007, 603-674.
28. UNIBEST-LT Version 4.0. User's manual MS-DOS PC-program. Publisher: Delft Hydraulics, Delft, The 417 Netherlands, 1993.
29. WAMDI Group. The WAM model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. J. Phys. Oceanogr. 18, 1988, 1775-1810.