

Oddziaływanie rew na stabilność ruchu falowego w profilu poprzecznym brzegu

Mgr inż. Grzegorz Robert Cerkowniak, prof. dr hab. inż. Zbigniew Pruszek
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Wielorewowa strefa brzegowa tworzy złożony układ morfologiczny, który częściowo opisywany może być poprzez profil poprzeczny z występującymi tam rewami. Intensywność i różnorodność zmian takiego systemu brzegowego jest funkcją szeregu oddziałujących na brzeg sił zewnętrznych, wśród których kluczową rolę odgrywa falowanie, związane z nim przepływy wody

oraz zmienne poziomy wody w morzu. Przyjmując falowanie jako podstawową siłę zewnętrzną, to w przypadku wielorewowej strefy brzegowej obecność systemu rewowego powodować będzie wytracanie energii fali transformującej się w kierunku brzegu. Wytracanie/dysypacja energii występować będzie głównie poprzez załamywanie się fal nad grzbietami rew.

Celem prezentowanej pracy jest przedstawienie hipotezy, że w przypadku istnienia profilu z wieloma rewami tworzone jest przez grzbiety rew umowne dno, które definiuje – analogiczny do profilu Deana – profil dynamicznej równowagi pomiędzy dysypacją energii fali (wysokością załamującej się fali) a wysokością/zanurzeniem grzbietów rew. Do analizy przyjęto skalę czasową równą kilku dekadom (okres 1987-2008) oraz złożoną strefę brzegową charakteryzującą się obecnością kilku rew.

OBSZAR I WARUNKI BADAŃ

Do analizy przyjęto strefę brzegową w rejonie Morskiego Laboratorium Brzegowego w Lubiatowie, która ma cechy charakterystyczne dla większości brzegów południowego Bałtyku. Skłon podwodnej części brzegu charakteryzuje się w tym rejonie łagodnym nachyleniem średnio równym około $\beta = 0,015$ (przy samej linii brzegowej maksymalnie 0,04). Na badanym odcinku brzeg zbudowany jest z drobnoziarnistego piasku kwarcowego o średniej średnicy oscylującej wokół wartości równej $d_{50} \approx 0,22$ mm. Brak pływów sprawia, że jedynymi siłami generującymi ruch wody w strefie brzegowej jest falowanie wiatrowe. Złożona konfiguracja dna podwodnej części strefy brzegowej charakteryzuje się występowaniem systemu rewowego składającego się z 3 do 5 wzdłużbrzegowych podwodnych form. Pierwsza stabilna rewa występuje około 100 ÷ 120 m od linii brzegowej, druga około 250 m, trzecia 400 ÷ 450 m, a czwarta zwykle łączy się z piątą, tworząc większą zmieniającą się formę w odległości $\approx 500 \div 650$ m od brzegu. Oprócz stabilnych rew w analizowanym obszarze obserwuje się okresowe występowanie dodatkowo jednej efemeralnej rewy mającej często charakter płaskiego podwodnego wypłyenia, które ulega dynamicznej migracji i okresowemu zanikowi. Wypłyenie to powstaje pomiędzy pierwszą stabilną rewą a linią brzegową w odległości kilkudziesięciu metrów od niej i ma wpływ nie tylko na zmienność, ale i charakter form dennych występujących w płytkowodnej części strefy przyboju. Widok analizowanej strefy brzegowej wraz z trzema przyjętymi do analizy charakterystycznymi poprzecznymi profilami brzegu przedstawiono na rys. 1.

Generalnie obecność i usytuowanie rew łącznie z aktualnymi warunkami falowymi decydują o liczbie i miejscu załamania się fal. Przy mniejszym falowaniu następuje to nad

pierwszą i ewentualnie drugą rewą, tj. na obszarze odległym 100 ÷ 250 m od linii brzegowej. Przy silniejszej fali załamuje się ona zwykle kilkakrotnie nad kolejnymi, dalszymi rewami, tworząc kilka, w miarę równoległych do brzegu, linii załamania. W przypadku bardzo małego falowania załamanie fali następuje na podwodnym wypłyeniu w sąsiedztwie brzegu, jeśli takowe aktualnie istnieje bądź tuż przy samej linii brzegowej, tj. w odległościach rzędu kilku, kilkudziesięciu metrów od niej. Szorstki o średniej intensywności generują fale głębokowodne, których wysokość znaczna H_s mierzona na głębokości $h_0 \approx 15$ m, średnio dochodzi do $H_s = 2,5$ m. Maksymalne wysokości fali znacznej to 3,5 ÷ 4,5 m. Okres fali T , w tych warunkach, zmienia się w granicach od 3,5 do 6,5 s, przyjmując najczęściej średnie wartości oscylujące w granicach $T \approx 3,5 \div 4,5$ s. Podczas transformacji i załamania się fal na odcinku od głębokości $h_0 \approx 15$ m do obszaru bezpośredniego sąsiadującego z linią brzegową o głębokości $h_i \approx 0,5$ m, uśredniona (obejmująca różne wysokości fali H_{rms}), względna ilość energii dochodząca do tego miejsca wynosi około $k = E_{h=0,5m} / E_{h_0=15m} = 0,42$. Oznacza to, że średnio około 60% energii wyjściowej rozprasza się w procesie transformacji nad profilem wielorewowym, a tylko 40% dochodzi do brzegu. Uwzględniając ten fakt otrzymuje się, że średnioroczna ilość całkowitej energii fali głębokowodnej, która dociera w bezpośrednie sąsiedztwo linii brzegowej, wynosi około $(E_t)_{h=0,5m} = E_i \cdot k = 0,88 \cdot 10^5 \cdot 0,42 = 0,37 \cdot 10^5$ J/m [10].

Do analizy wykorzystano pomiary batymetrii dna w profilach poprzecznych od 1987 r. Zasięg w morze mierzonych profili był różny, tak aby obejmować wszystkie występujące w tym czasie rewy. Każda batymetria obejmowała obszar od kilkuset metrów do kilku kilometrów wzdłuż brzegu, składając się od kilku do kilkudziesięciu profili odległych od siebie o 100 m. Do szczegółowej analizy wybrano 3 charakterystyczne przekroje (profile) o numerach 6, 11, 21, które są odległe od siebie o kilkaset metrów.

KLASYCZNY PROFIL RÓWNOWAGI UŚREDNIONEGO POZIOMU DNA

W przybliżeniu pomierzone naturalne wielorewowe poprzeczne do brzegu profile często charakteryzuje się poprzez ciągłą funkcję reprezentującą uśredniony (z wielu punktów) względem głębokości profil zwany profilem Deana [2, 3]. Ogólnie ma on postać:

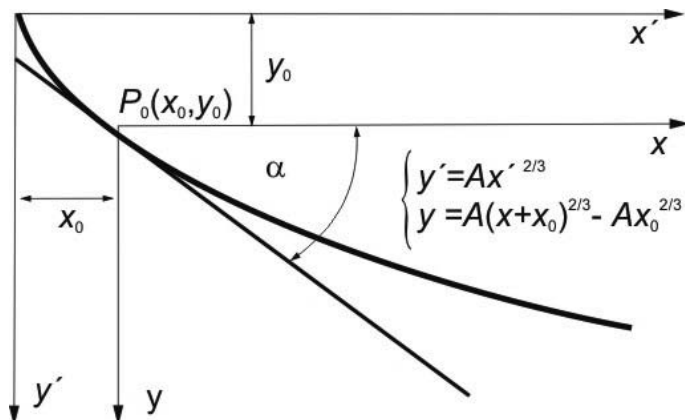
$$y' = A \cdot x'^{2/3} \quad (1)$$

Funkcja ta ma jednak swoją ułomność, gdyż w układzie współrzędnych (y', x') w niefizyczny sposób odwzorowuje profil poprzeczny na linii brzegowej (punkt $x' = 0$) (rys. 2). W tym punkcie funkcja wystramia się tak, że stytna do niej staje się pionowa. Zatem funkcja ta w sposób nierzeczywisty opisuje profil naturalny w tym obszarze. Do prawidłowego opisu profilu równowagi również w tym punkcie przyjąć można zmodyfikowaną funkcję o postaci [9]:

$$\begin{aligned} y &= A \cdot (x + x_0)^{2/3} - A \cdot x_0^{2/3} = \\ &= A \cdot \left\{ \left[x + \frac{8}{27} \left(\frac{A}{\tan \alpha} \right)^3 \right]^{2/3} - \left(\frac{2A}{3 \tan \alpha} \right)^2 \right\} \quad (2) \end{aligned}$$



Rys. 1. Obszar badań



Rys. 2. Modyfikacja opisu profilu równowagi

W ramach tak przyjętego opisu linia brzegowa znajdować się będzie w punkcie P_0 przesuniętym względem wyjściowego układu współrzędnych (x', y') o wartości x_0 i y_0 , a kąt α oznaczać będzie lokalne, rzeczywiste nachylenie dna w tym punkcie. W takim układzie początek każdego przyjmowanego do analizy profilu poprzecznego brzegu będzie zaczynać się w punkcie $P_0(x_0, y_0)$.

Występujący w równaniach (1) i (2) parametr A jest powiązany z lokalnymi morfologicznymi charakterystykami brzegu. Głównie są to takie parametry jak: liczba rew, średnica osadów tworzących dno morskie oraz średnie nachylenie podwodnego stoku dna. Wykorzystując wyniki pomiarów wykonanych w naturze oraz metodę najmniejszych kwadratów, każdy z przyjętych wielorewowych profili poprzecznych brzegu uśredniać można zmodyfikowanym równaniem (2). Wykorzystując tę procedurę określono wartości współczynnika A jako kluczowego parametru opisującego uśrednione profile, rozumiane jako klasyczne profile równowagi dna.

WIELOREWOWY PROFIL POPRZECZNY I JEGO ODDZIAŁYWANIE Z RUCHEM FALOWYM

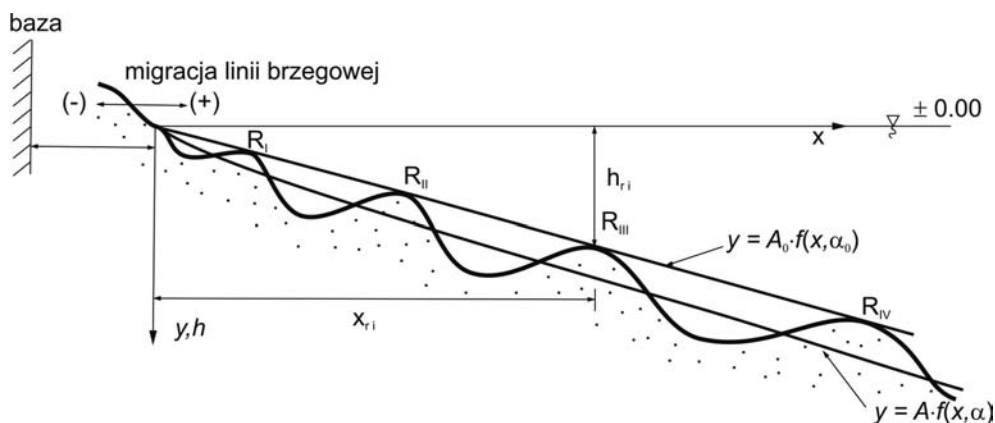
Transformujący się w kierunku brzegu, nad profilem wielorewowym, ruch falowy, oprócz zmieniającej się średniej głębokości, natrafia na naturalne „przeszkody” na dnie w postaci rew, a dokładnie ich grzbietów. W takich warunkach istniejący

na profilu poprzecznym system rewowy zdefiniować można poprzez dwa podstawowe liniowe parametry, tj. odległość x_r każdej rew od linii brzegowej (punkt $x = 0$) oraz głębokość wody h_r nad grzbietami kolejnych rew (rys. 3).

Rewy, jako duże podwodne wały piaskowe, w warunkach transformującego się nad nimi falowania, tworzą nie tylko morfologicznie złożoną batymetrię strefy przyboju, ale także silnie współoddziałują z ruchem falowym. Głównym efektem takiego procesu jest lokalnie silna deformacja profilu falowego kończąca się często wielokrotnym załamaniem się fali nad grzbietami rew i w efekcie znaczną dysypacją niesionej przez nią energii.

Różne hydrodynamiczne parametry strefy przyboju, w tym głównie wysokość fali, przy której pojawia się niestabilność profilu falowego, badane są od wielu dekad w wielu pracach. Jednymi z ostatnich szczegółowych analiz dotyczących tych procesów są prace [1, 6] czy fragmenty obszernej monografii [7]. Wyniki pierwszej z nich potwierdzają istnienie silnego związku pomiędzy wysokością załamującej się fali H_{br} a maksymalną prędkością orbitalną na powierzchni wody. Po przekroczeniu przez te prędkości wartości krytycznych następuje początek załamania fali i proces dysypacji energii. Alternatywnie do kryterium prędkości do opisu procesu załamania fali stosuje się kryterium oparte na utracie stabilności profilu falowego, tj. przekroczeniu granicznej stromości fali opisanej parametrem H_{br}/L_{br} . Parametr ten empirycznie analizowany był w wielu pracach, między innymi [4, 11, 12], czy ostatnio [6]. W wynikach pracy [6] pokazano, że związany z tym kryterium parametr $K = H_{br}/h_{br}$ w dużym stopniu zależy od charakteru samego dna (w badanym przypadku od jego nachylenia) oraz od stromości fali głębokowodnej. W przypadku nieskomplikowanego dna płaskiego o stałym nachyleniu, parametr K może zmieniać się w zakresie od około 0,5 (dno poлогіe) do nawet 1 (dno strome).

Zakładając dalej, że w przypadku dna wielorewowego lokalna utrata stabilności fali będzie następować nad grzbietami rew przy głębokościach $h_{r,i}$ do określenia wysokości załamującej się fali ($H_{br,r,i}$) (gdzie $i = 1, 2, 3, \dots$ – numer kolejnej rew) nad grzbietem każdej rew można przyjąć empiryczne równanie (3) podane w pracy [4]. Wybór ten wynika z faktu, że równanie to powstało na bazie empirycznej analizy wielu danych pomiarowych (225 zestawów danych) oraz równoczesnej analizy formuł obliczeniowych. Istotny jest także fakt, że weryfikowano je z danymi z natury i wieloma rodzajami załamania fali występującymi w różnych warunkach. Zgodnie z pracą [4] mamy:



Rys. 3. Parametry systemu rewowego

$$(H_{br})_{r,i} = 0,095(L_{br})_{r,i} \cdot \exp(4m_{r,i}) \cdot \tanh 2\pi h_{r,i} / (L_{br})_{r,i} \quad (3)$$

Długość fali występującą w równaniu (3), w obszarze transformacji fali nad dnem, iteracyjnie opisano równaniem:

$$(L_{br})_{r,i} = \left(g T^2 / 2\pi \right) \cdot \tanh \left(2\pi h_{r,i} / (L_{br})_{r,i} \right) \quad (4)$$

natomiast parametr $m_{r,i}$ wynika z nachylenia krzywej (6) w rejonie grzbietu każdej rewy i w związku z tym jest równy:

$$m_{r,i} = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{2A_o}{3(x_{r,ir})^{1/3}} \quad (5)$$

Jak wykazuje szereg obserwacji w analizowanym obszarze, okres piku fali głębowodnej T_p zmienia się najczęściej w granicach od 3,5 do 6,5 s [8, 10]. Do dalszych rozważań, na podstawie analizy posiadanych dla tego obszaru pomiarów, przyjęto uproszczoną sytuację, że w obszarze płytkowodnym średni okres fali załamującej się nad grzbietami rew oscyluje wokół wartości $T \approx 4 \div 5$ s.

Zakładając, że w skali długookresowej wysokość każdej rewy sprzężona jest z lokalną głębokością wody nad jej grzbietem, można przyjąć tezę, że równowaga systemu rewowego, definiowana położeniem/geometrią grzbietów rew, opisana może być krzywą y_o analogiczną do klasycznej funkcji Deana, która odwzorowuje uśrednione położenie dna (patrz punkt poprzedni). Fizycznie odpowiada to faktowi, że geometria rew (zanurzenie grzbietów) musi być w lokalnej równowadze z ilością „przepuszczanej” w kierunku brzegu energii fali. W tym układzie, analogicznie do koncepcji Deana, przyjmuje się, że głębokości definiowane kolejnymi grzbietami rew h_r są w równowadze z lokalną wielkością dysypacji energii fali, tj. wysokością załamującej się nad nimi fali H_{br} .

Biorąc pod uwagę te wszystkie czynniki, ogólną postać krzywej opisującej, poprzez położenie grzbietów rew, system rewowy można przyjąć w następującej formie:

$$\begin{aligned} y_o &\approx A_o \cdot f(x_{r,i}, \alpha) = A_o \cdot (x_{r,i} + x_o)^{2/3} - A_o \cdot x_o^{2/3} = \\ &= A_o \cdot \left\{ \left[x_{r,i} + \frac{8}{27} \left(\frac{A_o}{\tan \alpha} \right)^3 \right]^{2/3} - \left(\frac{2A_o}{3 \tan \alpha} \right)^2 \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

gdzie współczynnik A_o ma analogiczny charakter jak parametr A w klasycznej funkcji Deana.

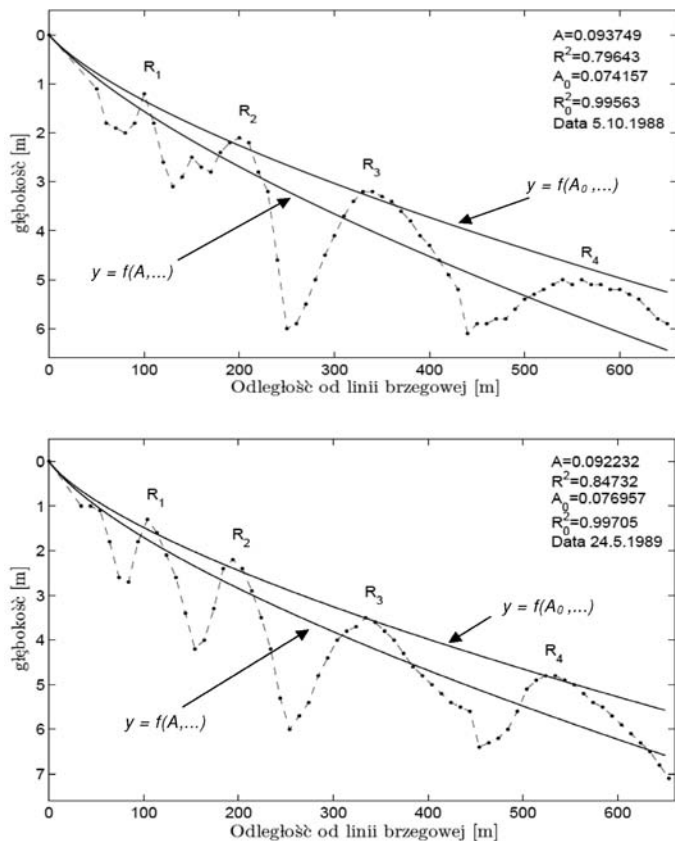
Otrzymane na podstawie pomiarów, a następnie dalszej analizy, dwa liniowe parametry charakteryzujące położenie rew ($x_{r,i}$ i $h_{r,i}$), które odpowiadają profilowi równowagi opisanemu równaniem (6) oraz parametry załamujących się nad ciągiem rew fal ($H_{br,r,i}$ oraz $(L_{br})_{r,i}$), dla jednego (profil 11) przykładowego przekroju (z trzech przyjętych do analizy) przedstawiono w tabl. 1.

Przykładowe przebiegi funkcji opisanej zmodyfikowanym równaniem Deana (2) oraz funkcji (6), wraz z odpowiadającymi im wielkościami parametrów A oraz A_o , przedstawiono na rys. 4.

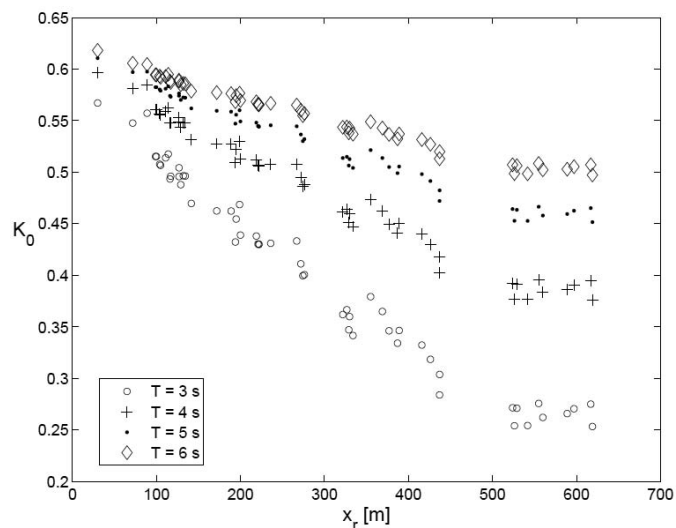
Przyjmując dalej założenie, że głębokości wynikające z istnienia umownego dna, które zdefiniowane jest poprzez rzędne grzbietów kolejnych rew $h_{r,i}$, są w równowadze z dysypacją energii fali, tj. wysokością załamującej się fali H_{br} , określić

Tabl. 1. Parametry położenia rew, współczynnik A_o oraz charakterystyki załamującej się fali

Data	Rewy (i)					
	$x_{r,i}$ [m]	$h_{r,i}$ [m]	A_o	$(L_{br})_{r,i}$ [m]	$(H_{br})_{r,i}$ [m]	$K_o = H_{br}/h_{r,i}$
87.05.16	115	1,4	0,068	13,95	0,77	0,548
	220	2,2		16,86	1,11	0,506
	375	3,4		19,80	1,53	0,450
	615	4,7		21,85	1,85	0,394
87.08.14	125	1,3	0,069	13,50	0,72	0,553
	220	2,2		16,86	1,11	0,507
	385	3,6		20,18	1,59	0,441
	595	4,8		21,97	1,88	0,391
87.10.15	90	0,7	0,066	10,17	0,41	0,585
	200	1,7		15,17	0,90	0,530
	370	3,1		19,18	1,43	0,463
	590	4,9		22,08	1,89	0,387
88.04.28	130	1,5	0,072	14,38	0,82	0,543
	220	2,1		16,55	1,07	0,512
	390	3,4		19,80	1,53	0,450
	620	5,2		22,41	1,95	0,376
88.10.05 rys 4	100	1,2	0,074	13,03	0,67	0,561
	200	2,1		16,55	1,08	0,513
	330	3,2		19,40	1,47	0,460
	560	5		22,20	1,92	0,384
89.05.24 rys 4	105	1,3	0,077	13,50	0,72	0,557
	195	2,2		16,86	1,12	0,509
	335	3,5		20,00	1,57	0,447
	525	4,8		21,97	1,88	0,392
89.09.13	100	1,2	0,072	13,03	0,67	0,561
	190	1,8		15,53	0,95	0,527
	330	3,4		19,80	1,53	0,451
	530	4,8		21,97	1,88	0,391
90.08.14	105	1,3	0,074	13,50	0,72	0,556
	195	1,9		15,89	0,99	0,522
	355	2,9		18,73	1,37	0,473
	555	4,7		21,85	1,86	0,395
96.08.24	30	0,74	0,075	10,44	0,44	0,597
	115	1,17		12,88	0,66	0,562
	235	2,2		16,86	1,12	0,508
	425	3,88		20,67	1,67	0,430
99.07.04	110	1,2	0,070	13,03	0,67	0,559
	220	2,2		16,86	1,11	0,507
	415	3,63		20,24	1,60	0,440
00.06.11	130	1,38	0,065	13,86	0,76	0,548
	265	2,14		16,68	1,09	0,508
	435	4,13		21,06	1,73	0,418
01.06.01	125	1,42	0,075	14,04	0,78	0,549
	270	2,46		17,62	1,22	0,495
	435	4,54		21,64	1,83	0,403
01.11.27	140	1,71	0,066	15,20	0,91	0,532
	325	3,08		19,14	1,43	0,464
06.06.17	115	1,46	0,076	14,21	0,80	0,548
	275	2,61		18,02	1,27	0,488
	525	5,2		22,41	1,96	0,377
06.11.28	70	0,86	0,074	11,20	0,50	0,581
	170	1,81		15,57	0,96	0,528
	320	3,17		19,33	1,46	0,462
	540	5,19		22,40	1,96	0,377
07.08.02	135	1,38	0,066	13,86	0,76	0,548
	275	2,6		17,99	1,26	0,486



Rys. 4. Przykłady zmienności średniego profilu równowagi dna (parametr A – dolna linia) oraz dna umownego tworzonego przez grzbieity rew (parametr A_0 – górna linia)



Rys. 5. Współczynnik załamania fali nad grzbieitami rew w funkcji ich odległości od brzegu dla różnych okresów fali

można lokalne wartości parametru $K_0 = H_{br} / h_{r,i}$, który wynika/steruje fizycznym układem: dynamiczna równowaga wysokość rew – wielkość dysypacji energii fali. W przypadku wielorewowej strefy przyboju wartość tak zdefiniowanego parametru K_0 jest zmienna wzdłuż osi x , będąc zależną od odległości kolejnych rew od linii brzegowej. Współczynnik załamania fali nad grzbieitami rew oprócz morfologicznych parametrów profilu poprzecznego, zgodnie z równaniami (3) i (4), zależy też od okresu fali T . Zmienność parametru K_0 dla zakresu okresów $T = 3 \div 6$ s w funkcji odległości od brzegu, tj. dla kolejnych grzbieitów rew analizowanego profilu wielorewowego przedstawiono na rys. 5.

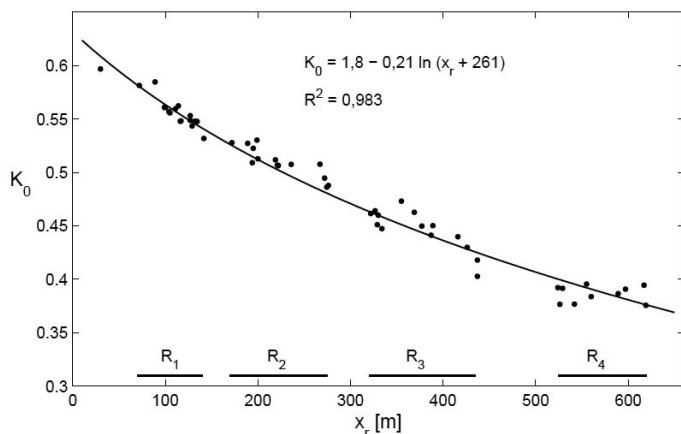
Empirycznie wyznaczoną dla brzegu wielorewowego zmienność parametru K_0 w funkcji odległości od brzegu x dla okresu fali $T = 4$ s przyjętego jako najczęściej występujący w warunkach intensywnego falowania opisuje się, ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,983$ (rys. 6), równaniem:

$$K_0 = 1,8 - 0,21 \cdot \ln(x + 261) \quad (7)$$

Dla obszarów bliższych brzegu parametr K_0 jest większy niż dla obszarów (rew) bardziej oddalonych od linii brzegowej. Otrzymane wzdłuż profilu wartości parametru $K_0 \sim 0,3 \div 0,6$ są wyraźnie mniejsze, niż zakłada się to w przypadku falowania regularnego z jednokrotnym załamaniem się fali oraz średnim poziomem dna wyznaczonym klasyczną funk-

cją Deana. Dla takich warunków standardowo przyjmuje się $K = H_{br} / h_{br} \sim 0,5 \div 0,8$, gdzie konkretne wartości, niezależnie od charakterystyk falowania, w dużym stopniu są funkcją nachylenia dna [5]. Otrzymane różnice można próbować wyjaśnić dwoma czynnikami. Pierwszy z nich to fakt, że istnienie większej liczby rew generuje o wiele bardziej złożone, trójwymiarowe pole falowo-prądowe strefy przyboju, niż ma to miejsce w przypadku dna bezrewowego o stałym nachyleniu. Drugim, wynikającym z przyjętej głównej hipotezy, jest fakt, że ciąg grzbieitów rew tworzy dla transformującego się nad nimi falowania umowne dno, które wymusza odpowiedni dla niego proces dysypacji energii. W tym układzie można przyjąć uzupełniającą hipotezę, że w przypadku większej liczby rew na profilu poprzecznym, transformujące się ku brzegowi falowanie, docierając do każdej kolejnej rew (głębokości grzbieitu), w znacznym stopniu nie zapomniło jeszcze poprzedniej rew (głębokości) i w związku z tym dostosowując się do pionowego wymiaru rew, zachowuje się tak, jakby istniało umowne dno wyznaczone poziomem ich grzbieitów.

Szczegółową przestrzenną analizą zmienności parametru K_0 wykazano, że w obszarach bliższych brzegu (głębokości nad grzbieitami rew 1 ÷ 2 m) parametr K_0 dochodzi do wartości około 0,6 ÷ 0,65, natomiast w obszarze najdalszej rew zbliża się do wartości około 0,3, a nawet 0,25 (rys. 5). Taki obraz zmian parametru K_0 powodować mogą dwie przyczyny. Pierwsza – mająca głębsze uzasadnienie fizyczne – to fakt, że na wejściu do strefy przyboju w widmie fali wiatrowej znajdują się składowe związane z falami długimi, które szybciej wyczuwają obecność dna (grzbieitów rew) i powodują pierwszą utratę stabilności ruchu falowego. Dodatkowo, w czasie sztormu, w obszarze większych głębokości, okres fali może być większy niż przyjęte 4 s, a więc fale będą dłuższe i szybciej mogą tracić swoją stabilność. W trakcie dalszej transformacji falowania, wskutek zawężania się wiatrowego widma falowego, fale stają się bardziej regularne, długość fali maleje i w konsekwencji załamanie fali następu-



Rys 6. Zmiana parametru K_0 wzdłuż wielorewowego profilu poprzecznego do brzegu dla okresu fali $T = 4$ s

je przy większych wartościach parametru K_0 . Drugą przyczyną może być związek z faktem, że nad grzbietami rew załamanie fali może następować w różny sposób. Bliżej brzegu fala bardziej wystramia się i najczęściej załamuje się gwałtownie w postaci tzw. załamania przelewowego (większe H_{br}). Dalej od brzegu, na większych głębokościach (rewa trzecia i czwarta), dysypacja energii fali ma najczęściej charakter bardziej łagodny (łamią się dłuższe składowe fali wiatrowej) i następuje w postaci załamania spływowego (mniejsze H_{br} i jednocześnie większe $h_{r,i}$), co ostatecznie powoduje obniżenie wartości parametru $K_0 = H_{br} / h_{r,i}$.

Oczywiście otrzymane wartości parametru K_0 , ze względu na możliwość występowania różnej intensywności falowania, najczęściej nie dotyczą jednocześnie wszystkich rew występujących wzdłuż profilu. Tylko w warunkach silnego falowania, kiedy załamanie fali występuje jednocześnie nad wszystkimi rewami, mamy cały zakres parametru K_0 . W warunkach średniego lub niewielkiego falowania tylko część rew aktywnie współpracuje z ruchem falowym, co skutkuje mniejszą liczbą załamania fali i odpowiadających im parametrom K_0 .

PODSUMOWANIE

Przyjęto hipotezę, że analogicznie do klasycznej koncepcji Deana dotyczącej uśrednionego położenia dna, głębokości definiowane kolejnymi grzbietami rew h_r są w równowadze z lokalną wielkością dysypacji energii fali, tj. wysokością załamującej się nad nimi fali H_{br} . Konsekwencją tego jest fakt zdefiniowania umownego dna krzywą analogiczną do funkcji Deana. Fizycznie odpowiada to sytuacji, w której geometria rew (zanurzenie grzbietów) jest w lokalnej równowadze z ilością „przepuszczanej” w kierunku brzegu energii fali.

W przypadku wielorewowej strefy przyboju i przyjęciu umownego poziomu dna zdefiniować można inną, związaną z położeniem grzbietów kolejnych rew ($h_{r,i}$) i występowaniem nad nimi załamania fali, wartość parametru $K_0 = H_{br} / h_{r,i}$, którym określa się równowagę pomiędzy dysypacją energii (wy-

sokością H_{br}) fali a geometrią (wysokością) rewy. Parametr K_0 , w takim układzie, steruje układem fizycznym wysokość rewy – dysypacja energii fali. Parametr ten zmienia się wzdłuż osi x w granicach $\sim 0,3 \div 0,6$ i zależy od odległości kolejnych rew od linii brzegowej. Dla obszarów bliższych brzegu parametr K_0 jest większy i dochodzi do wartości około 0,6, natomiast dla obszarów (rew) dalszych w stosunku do linii brzegowej i małych okresów fali parametr K_0 w obszarze najdalszej rewy oscyluje wokół wartości $0,3 \div 0,5$.

Otrzymane wzdłuż profilu wartości parametru $K_0 \sim 0,3 \div 0,6$ są wyraźnie mniejsze, niż wynika to z przypadku falowania regularnego z jednokrotnym załamaniem się fali oraz średnim poziomem dna wyznaczonym klasyczną funkcją Deana ze współczynnikiem A , ($K = H_{br} / h_{br} \sim 0,5 \div 0,8$). Różnice wynikają nie tylko ze znacznie różniącej się morfologii profilu, ale także mogą być pochodną założenia, że transformujące się nad ciągiem grzbietów rew falowanie, docierając do każdej kolejnej rewy (głębokości grzbietu), nie zapomina o poprzedniej rewie (głębokości) i zachowuje się tak, jakby istniało dno wyznaczone poziomem ich grzbietów.

LITERATURA

1. Bradford S.: Surf zone characterization for integration with remote sensing data. *Coastal Engineering* 56, 2009.
2. Dean R. G.: Beach erosion: causes, processes and remedial measures. *Critical Review in Environmental Control*, 1976.
3. Dean R. G.: Physical modelling of littoral processes. *Physical modelling in Coastal Engineering* (red. R. A. Dalrymple), Balhema (Rotterdam), Boston, 1985.
4. Kamphuis J. W.: Incipient wave breaking. *Coastal Engineering* 15, 1991.
5. Le Roux J. P.: A simple method to determine breaker height and depth for different deepwater wave height/length ratio and sea floor slopes. *Coastal Engineering* 54, 2007.
6. Liu Y., Niu X., Yu X.: A new predictive formula for inception of regular wave breaking. *Coastal Engineering* 58, 2011.
7. Massel S.: Procesy hydrodynamiczne w ekosystemach morskich. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2010.
8. Pruszek Z., Różyński G., Szmytkiewicz M., Skaja M.: Quasi-seasonal morphological shore evolution response to variable wave climate. *Coastal Sediment'99*, Hauppauge, Long Island, ASCE, 1999.
9. Pruszek Z., Różyński G., Zeidler R. B.: Statistical properties of multiple bars. *Coastal Engineering* 31, 1997.
10. Pruszek Z., Szmytkiewicz P., Ostrowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M.: Shallow-water wave energy dissipation in a multi-bar coastal zone. *Oceanologia* 50 (1), 2008.
11. Rattanapitikon W., Vivattanasirisak T., Shibayama T.: A proposal of a new breaker height formula. *Coastal Engineering Journal* 45, 2003.
12. She K., Canning P.: Geometric study of monochromatic wave breaking on beaches. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering* 133, 2007.