Jaką informację o dyssypacji energii falowej zawierają profile batymetryczne strefy brzegowej?

Dr hab. inż. Grzegorz Różyński Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Pojęcie profilu równowagi dna wprowadzono w 1954 roku jedynym parametrem morfologicznym jest głębokość akwenu [1] w formie monotonicznej funkcji potęgowej:

$$h(x) = A \cdot x^n \tag{1}$$

W równaniu (1) h jest głębokością morza w odległości x od linii brzegowej, a parametry A i n są współczynnikami empirycznymi. Teoretyczne uzasadnienia tego postulatu zawarte jest w [4], gdzie podstawowym założeniem jest stałość dyssypacji energii falowej w jednostkowej objętości wody E_{x} (W/m³) w całej strefie przyboju. Pozostałe założenia obejmują jednorodność osadów w całym, poprzecznym do brzegu, profilu batymetrycznym ($D_{50} = const$), monochromatyczność falowania, liniową teorię falową i stały współczynnik załamania fal: $\gamma = H/h = const.$ (gdzie H oznacza wysokość fali). Założenia te pozwalają na wyrażenie dyssypacji energii falowej przez równanie, w którym

i jego zmienność w kierunku odbrzegowym:

$$E_r = \frac{5}{16} \rho g^{3/2} \gamma^2 h^{1/2} \frac{dh}{dx}$$
(2)

Przy stałej dyssypacji E, rozwiązaniem tego równania jest powszechnie znana krzywa Deana:

$$h(x) = Ax^{2/3}$$
 (3)

Współczynnik A ma wymiar $(m^{1/3})$ i jest bezpośrednio związany z E:

$$A = \left(\frac{24E_r}{5\rho g^{3/2}\gamma^2}\right)^{2/3} \tag{4}$$

W równaniach (2) i (4) $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ jest przyspieszeniem ziemskim, a $\rho = 1$ 000 kg/m³ ciężarem właściwym wody. W warunkach Morza Bałtyckiego współczynnik załamania fal γ przyjmuje się równy 0,78. Stała wartość dyssypacji energii falowej oznacza jej nasycenie i przy wystarczająco długo niezmieniających się warunkach falowych konfiguracja dna osiągnie równowagę.

Związek między współczynnikiem A i parametrami osadu budującego dno był po raz pierwszy badany i opisany w pracy [10]. Z kolei, w publikacji [5] podano empiryczny związek tego parametru z prędkością opadania ziaren osadu w_s : $A = 0,067(w_s)^{0.44}$. Podobny charakter ma związek podany w [9]:

$$A \approx 2,25 \left(\frac{w_s^2}{g}\right)^{1/3} \tag{5}$$

Konceptualna prostota oraz użyteczność idei profili równowagi w modelowaniu procesów morfodynamicznych w strefie brzegowej spowodowała, że podejście to zyskało powszechną akceptację naukowców, inżynierów i decydentów. Na przykład, profile równowagi stosuje się rutynowo w projektowaniu sztucznych zasileń brzegu [2, 3]. Główną przesłanką popularności profili równowagi jest fakt, że skomplikowanych i silnie nieliniowych zjawisk związanych z dyssypacją energii falowej nie da się dokładnie opisać za pomocą istniejących obecnie modeli fizycznych; ma to miejsce szczególnie na brzegach wielorewowych, typowych dla polskiego wybrzeża [11].

Brzegi o skomplikowanej strukturze procesów morfodynamicznych, takie jak wielorewowe brzegi Bałtyku na polskim wybrzeżu, wymagają innego podejścia w celu wyodrębnienia informacji o tej strukturze. Jednym z możliwych podejść jest zastosowanie technik analizy szeregów czasowych pozyskanych przez pomiary *in-situ*. W tym kontekście należy umieścić propozycję [12], gdzie podano koncepcję empirycznych profili równowagi. Profile te są bezpośrednio związane z pomierzonymi profilami batymetrycznymi i polegają na wyodrębnieniu monotonicznych składników tych profili, które zwykle zawierają ponad 90% ich całkowitej zmienności. W koncepcji empirycznych profili równowagi złagodzono podstawowe założenie profili równowagi typu Deana, a mianowicie stałą dyssypację energii falowej w całej strefie przyboju. Dodatkowo, jeżeli kształt empirycznego profilu równowagi na pewnym odcinku pomierzonego profilu jest bardzo zbliżony do funkcji Deana, to oznacza, że na takim odcinku rzeczywiście występuje stała (nasycona) dyssypacja energii falowej, potwierdzając przyjęte przez Deana założenia.

Określenia empirycznych profili równowagi można dokonać metodami analizy szeregów czasowych, takimi jak rozkład szeregu za pomoca wzorców empirycznych [12] lub analizy widma osobliwego [13]. Monotoniczny charakter empirycznych profili równowagi gwarantuje stosowalność równania (2), w którym dodatni znak pochodnej zmian głębokości dna w kierunku odbrzegowym jest potrzebny do określenia dyssypacji energii falowej w formie ciągłej i gładkiej funkcji. Po drugie, jako że empiryczny profil równowagi zawiera ponad 90% całkowitej zmienności profilu, określoną równaniem (2), dyssypację energii falowej można uznać za względnie dokładną jej ocenę. Po trzecie, fizyczne podobieństwo empirycznego profilu równowagi do teoretycznej funkcji Deana wskazuje, że wystąpienie stanu ustalonej (nasyconej) dyssypacji energii falowej, jako efektu załamania fali, występuje w rzeczywistości na wielorewowych profilach bałtyckich.

Duży zbiór 969 profili batymetrycznych otrzymano w wyniku pomiarów dokonanych w odstepach 500 m w latach 2005 i 2011 na całym polskim wybrzeżu i obejmujących pas wydm, plażę oraz dno aż do głębokości 15 m. W obecnym studium poddano analizie 45 kilometrowy odcinek brzegu na podstawie pomiarów z 2005 roku. Głównym celem tej analizy jest określenie dwóch podstawowych klas profili brzegowych: pierwsza zawiera jedną, a druga dwie strefy stałej (nasyconej) dyssypacji energii falowej, określone na podstawie podobieństw empirycznych i deanowskich profili równowagi na odcinkach profili batymetrycznych, gdzie strefy te występują. Co istotne, można te strefy określić w oparciu o punkty przegięcia empirycznych profili równowagi. Analiza została przeprowadzona mając na uwadze charakterystykę osadów bezpośrednio związaną z najnowszą historią geologiczną Morza Bałtyckiego. Umożliwiło to określenie wzdłużbrzegowej zmienności dyssypacji energii falowej w celu identyfikacji okien energetycznych, gdzie niezdyssypowana energia falowa może docierać bezpośrednio do linii brzegowej, istotnie zwiększając ryzyko erozji w tych miejscach. Pokazuje to, że zaproponowaną metodykę można wykorzystać przy projektowaniu sztucznych zasilań w miejscach silnie narażonych na erozję.



Rys. 1. Analizowany odcinek brzegu

DANE I METODYKA ANALIZY

Na rys. 1 pokazano polski brzeg Bałtyku wraz z wschodnią i zachodnią granicą kilometrażu Urzędów Morskich (UM) (km 0 – granica z Rosją, km 428 – granica z Niemcami). Analizowany odcinek brzegu znajduje się między km 174 (rejon Łeby) a km 219 (koniec mierzei jeziora Gardno). Wszystkie pomierzone profile maja nawiązanie geodezyjne i rozmieszczone są równo co 500 m, biegnąc od odlądowego skraju wydmy/klifu, poprzez plażę aż do głębokości akwenu równej około 15 m; zazwyczaj długość profilu przekracza 2000 m.

Zastosowana metoda analizy widma osobliwego (Singular Spectrum Analysis, SSA) [13] pozwoliła na wyodrębnienie monotonicznego elementu pomierzonych profili batymetrycznych. W dużym skrócie, opiera się ona na określeniu macierzy kowariancyjnej każdego profilu i, związanych z nią za pomocą jej wartości i wektorów własnych, addytywnych wzorców zmienności, znanych jako zrekonstruowane składniki. Jeśli w profilu znajduje się n pomierzonych punktów, wówczas można wyodrębnić z dostateczną precyzją około 1/3 n zrekonstruowanych składników. Składniki te ranguje się względem ułamków całkowitej wariancji profilu (sumy kwadratów odchyłek od wartości średniej), które składniki te zawierają i sumuje począwszy od składnika, który związany jest z największym ułamkiem. Jest to składnik związany z największą wartością własną macierzy kowariancyjnej profilu. Sumowanie przerywa się, kiedy dodanie kolejnego składnika niszczy monotoniczność tworzonego w ten sposób empirycznego profilu równowagi. Analizowane profile zawierały zazwyczaj około 210 ÷ 220 elementów (pomierzonych rzędnych wydmy, plaży i dna morskiego); z tego względu analiza pozwalała na wyodrębnienie około 70 zrekonstruowanych składników. Do utworzenia empirycznego profilu równowagi zazwyczaj wystarczało jedynie 4 ÷ 5 składników związanych z największymi ułamkami wyjaśnionej przez nie wariancji profilu i największymi wartościami własnymi macierzy kowariancyjnej, co w dużym stopniu usprawniało analizę.

WYNIKI

W pracy [8] opracowano wstępny podział geologiczny dna w polskiej strefie brzegowej do celów budowlanych. Podstawowym wnioskiem z tej pracy jest stwierdzenie, że w analizowanym obszarze dominują utwory średniego i późnego Holocenu. Jedynie w rejonie mierzei jeziora Gardno, na zachód od km 205 kilometrażu brzegu UM, znajdują się wychodnie glin plejstoceńskich. Może to komplikować analizy potencjału dyssypacji energii falowej ze względu na niewystarczającą podaż materiału piaszczystego w takich miejscach, co może powodować nietypowe konfiguracje dna morskiego, odbiegające od profili typu deanowskiego.

Na rys. 2 pokazano jaką część wariancji profili brzegowych, pomierzonych w roku 2005, wyjaśniają funkcje Deana, wpisane metodą najmniejszych kwadratów w pomierzone profile batymetryczne, oraz empiryczne profile równowagi, otrzymane metodą analizy widma osobliwego. Wielkości te określono dla N = 45 profili, rozmieszczonych w równych odstępach 1 km. Wartością średnią okazało się 89,4%, minimum wyniosło jedynie 61,4% dla profilu na km 206, a maksimum 98,6% na km 199. Empiryczne profile równowagi obliczono dla profili, gdzie procent wyjaśnionej wariancji przez funkcje Deana był mało satysfakcjonujący. Z tego powodu nie określono empirycznych profili równowagi na odcinku między km 188 a km 201, gdyż funkcje Deana dla profili na tym odcinku wyjaśniły znacznie ponad 90% ich wariancji i założono, że empiryczne profile równowagi nie wniosą nowej, istotnej informacji (zob. rys. 2). Dla empirycznych profili równowagi średni procent wyjaśnionej wariancji wyniósł 96%, z maksimum (99,7%) dla km 186 i minimum (91,3%) dla km 218. Wynika z tego, że empiryczne profile równowagi wnoszą nową, istotną informację na temat morfologii brzegów morskich. Zagadnienia te przedstawiono w dalszej części artykułu.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy dla km 176. Pomierzony profil (linia ciagła) miał 4 rewy w odległości około 100, 180, 350 i 550 m od brzegu; głębokości nad ich grzbietami wyniosły odpowiednio 1,1, 1,5, 3,5 oraz 4,8 m. Rewy znajdujące się najbliżej brzegu były najlepiej zarysowane, pozostałe rewy zewnętrzne były znacznie mniejsze. Wpisana w ten profil funkcja Deana ze współczynnikiem A = 0,081 (gładka linia ciągła) uchwyciła 93,9% wariancji profilu. Empiryczny profil równowagi (linia przerywana), złożony z 4 zrekonstruowanych składników, uchwycił 96,8% wariancji pomierzonej konfiguracji dna. Najbardziej interesującym elementem empirycznego profilu równowagi był punkt przegięcia zidentyfikowany w sąsiedztwie grzbietu trzeciej rewy na głębokości ca. 3,8 m, około 340 m od brzegu. Punkt przegięcia określono na podstawie zmiany znaku drugiej pochodnej empirycznego profilu równowagi. Przy równej odległości między dwoma punktami pomiarowymi Δx , pochodną tę można określić numerycznie za pomocą równania (6):

$$h_{emp}''(x) \approx \frac{h_{emp}(x + \Delta x) - 2h_{emp}(x) + h_{emp}(x - \Delta x)}{\Delta x^2}$$
(6)

Ważność punktu przegięcia polega na tym, że począwszy od tego punktu w kierunku dobrzegowym empiryczny profil równowagi był bardzo zbliżony do krzywej Deana. Pozwala to na przyjęcie hipotezy o osiągnięciu stałej wielkości dyssypacji energii falowej w tej części profilu, zawartej w wartości współczynnika funkcji Deana A = 0,081, co odpowiada wartości dyssypacji $E_r = 89,8 \text{ W/m}^3$, otrzymanej za pomocą równania (4). Względnie prosty reżim dyssypacji energii falowej na profilu na km 176 ilustruje główny cel pracy, tzn. udowodnienie, że profile wielorewowe tworzą strefy, gdzie występuje stała (nasycona) dyssypacja energii falowej. W rejonie leżącym na zewnątrz punktu przegięcia (dalej od brzegu) należy stosować równanie (2) dla empirycznego profilu równowagi aż do głębokości zamknięcia, którą można określić za pomocą analizy klimatu falowego [12]. Prosta morfologia profilu na km 176 pozwala też na zademonstrowanie dalej idacych konsekwencji proponowanej metodyki. Po pierwsze, punkt przegięcia określa odbrzegową granicę strefy, gdzie zachodzi nasycona dyssypacja energii. Po drugie, wielkość dyssypacji ($E = 89.8 \text{ W/m}^3$) oraz długość odcinka, gdzie dyssypacja ta zachodzi (od punktu przegięcia do linii brzegowej; dla km 176 jest to około 330 - 340 m), stanowią parametry pozwalające na ocenę potencjału dyssypacyjnego profilu (dyssypację nazywamy "nasyconą", gdyż przy danej konfiguracji profilu nie może ona być większa, ponieważ osiągnięty jest w pełni rozwinięty reżim załamania fal dla tej konfiguracji). Oznaczając położenie punktu przegięcia przez x_{infl} można określić ilość energii $E_{,r}$ która ulegnie dyssypacji w kolumnie wody nad profilem Deana:



Rys. 2. Procenty wyjaśnionej wariancji profili brzegowych na badanym odcinku brzegu dla krzywych Deana oraz empirycznych profili równowagi



Rys. 3. Km 176: empiryczny profil równowagi z jedną strefą nasyconej dyssypacji energii falowej w warunkach w pełni rozwiniętego reżimu załamania fal

$$E_{d} = \int_{0}^{x_{infl}} E_{r} A x^{2/3} dx = \frac{3}{5} E_{r} A x_{infl}^{5/3} [W/m]$$
(7a)

 E_d oznacza zatem energię zdyssypowaną na 1 m bieżący brzegu w warunkach w pełni rozwiniętego reżimu załamania fal. Wykonując podobne obliczenia dla całego analizowanego odcinka brzegu (tzn. dla wszystkich pomierzonych profili), można określić funkcję potencjału dyssypacyjnego tego odcinka (w kierunku wzdłużbrzegowym); miejsca o małym potencjale będą oznaczać obszary narażone na erozję, gdy będą znacznie odbiegać od wartości średniej na tym odcinku.

Istnienie pojedynczej strefy nasyconej dyssypacji energii na profilu na km 176, co pokazano na rys. 3, zidentyfikowano także na wielu innych profilach, np. na km 178, 182, 186, 202, 204, 209 oraz 218. Znacznie ciekawsze okazały się jednak profile o bardziej złożonej morfologii na km 203, 206 i 212, na których

wykryto dwie takie strefy; profil na km 203 wybrano do szczegółowej prezentacji. Rewa pierwsza znajduje się w odległości około 100 m od brzegu, druga 210 m, trzecia 310 m oraz najdalsza czwarta 430 m od brzegu (zob. rys. 4a). Odpowiadające im głębokości nad grzbietami wynoszą odpowiednio 0,95 m, 1,8 m, 3,35 i 2,8 m. Konfigurację taką nazywa się "rewą w rynnie", przy czym najdalej leżaca rewa 4 jest najbardziej wyeksponowana. Wpisana w ten profil krzywa Deana ma współczynnik A = 0,072 i wyjaśnia 95,7% zmienności profilu. Próba wyodrębnienia empirycznego profilu równowagi przyniosła niewielką poprawę, gdyż krzywa ta zawarła w sobie 96% zmienności. Użyte tu wyrażenie "próba wyodrębnienia empirycznego profilu równowagi" jest kluczowe, gdyż otrzymana krzywa nie jest monotoniczna w rynnie zaraz za "rewą w rynnie" (330 ÷ 400 m od brzegu). Niemożność utrzymania monotoniczności empirycznego profilu równowagi była spowodowana silnie ukształtowaną



Rys. 4. Km 203: a) empiryczny profil równowagi z dwoma strefami nasyconej dyssypacji energii falowej w warunkach w pełni rozwiniętego reżimu załamania fal, b) szczegóły strefy wewnętrznej, c) szczegóły strefy zewnętrznej



Rys. 5. Km 202: profil przyległy do profilu na km 203 – oba profile są podobne z wyjątkiem mniej zaznaczonej najdalszej rewy na km 202; małe wymiary tej rewy powodują, że nie występuje tu zewnętrzna strefa dyssypacji energii



Rys. 6. Potencjał dyssypacji energii falowej na analizowanym odcinku brzegu: w jego środku zaznaczono odcinek o małym potencjale dyssypacyjnym i dużej podatności na erozję (km 190 – 200)

rewą 4. Interesującą konsekwencją utraty monotoniczności jest wystąpienie drugiego punktu przegięcia: wewnętrzny x_{infl} znajduje się na dobrzegowym skłonie rewy 4 około 400 m od brzegu, a zewnętrzny $x_{inflout}$ w rejonie podstawy tej rewy, ca. 690 m od brzegu. Pokazuje to, że duża rewa 4 jest odpowiedzialna za powstanie dwóch stref nasyconej dyssypacji energii falowej. Strefa wewnętrzna rozciąga się od linii brzegowej do dobrzegowego skłonu "rewy w rynnie", a druga od grzbietu do podstawy rewy 4, w pobliżu zewnętrznego punktu przegięcia. Wpisanie krzywej Deana w empiryczny profil równowagi od linii brzegowej do wewnętrznego punktu przegięcia dało A = 0,077wobec 0,072, którą to wartość otrzymano dla profilu pomierzonego; natężenia dyssypacji energii wynoszą odpowiednio 83,2 i 75,2 W/m³ (zob. rys. 4b). Wpisanie krzywej Deana od grzbietu rewy 4 x_{cout} do zewnętrznego punktu przegięcia x_{infout} dało współczynnik A = 0,083 (zob. rys. 4c), co odpowiada $E_r = 93,1$ W/m³. Całkowity potencjał dyssypacyjny profilu w tej strefie można określić za pomocą równania (7b):

$$E_{d} = \int_{x_{cout}}^{x_{infloat}} E_{r} A x^{2/3} dx =$$

= $\frac{3}{5} E_{r} A_{off} \left[(x_{infloat} - x_{o})^{5/3} - (x_{cout} - x_{o})^{5/3} \right] [W/m]$ (7b)

Główną różnicą między równaniami (7a) i (7b) jest to, że równanie (7b) zawiera dwa parametry: parametr Deana A_{off} oraz położenie wirtualnego przecięcia się "zewnętrznej" krzywej Deana z lustrem wody x_o . Ten drugi parametr można wyznaczyć



Rys. 7. Km 193: płaski profil o najmniejszym potencjale dyssypacyjnym energii falowej mający dwie rewy średniej wielkości

albo za pomocą metody najmniejszych kwadratów razem z A_{off} , albo zakładając, że krzywa Deana o współczynniku A_{off} wyznaczonym samodzielnie będzie zawierać punkty o współrzędnych $(x_{inflout}, h_{inflout})$ i (x_{cout}, h_{cout}) .

Szczególna charakterystyka profilu na km 203 jest wyraźnie widoczna, gdy porówna się rys. 5 z rys. 4b, c. Na rys. 5 opisano profil na km 202 mający dwie rewy w rynnie oraz słabiej zaznaczoną rewę położoną najdalej od brzegu, której grzbiet znajduje się na głębokości większej niż 4 m, a więc znacznie więcej niż ma to miejsce na km 203; mniejsze wyeksponowanie tej rewy na km 202 uniemożliwiło powstanie drugiej, zewnętrznej strefy nasyconej dyssypacji energii falowej.

Na odcinku obejmującym profile pomiędzy km 188 a 201 nie określono empirycznych profili równowagi, co było spowodowane przez fakt, że krzywe Deana wpisane w profile były w stanie wyjaśnić bardzo dużą część zmienności tych profili (por. rys. 2). Profile te charakteryzowały się występowaniem $3 \div 4$ rew średniej lub małej wielkości i zastosowanie krzywej Deana wystarczyło do zadowalająco dokładnej aproksymacji tych profili.

Ciekawą implikacją wykonanych analiz jest też fakt, że współczynniki Deana, wpisane w empiryczne profile równowagi do ich punktów przegięcia, były zawarte pomiędzy 0,077 i 0,1, co odpowiada średniej średnicy ziaren osadu tworzącego plażę (D_{50}) w granicach 0,13 \div 0,2 mm, [2]. Tymczasem, współczynniki wpisane w pomierzone profile były zawsze mniejsze, zawierając się w granicach 0,069 \div 0,085, co odpowiada $D_{50} = 0,11 \div 0,15$ mm. Porównując oceny wielkości D_{50} z pomiarami charakterystyk osadów wykonanymi na analizowanym odcinku brzegu, okazało się, że oceny D_{50} za pomocą współczynników Deana wpisanych w empiryczne profile równowagi do punktu przegięcia były bardziej realistyczne. Faktycznie pomierzone wartości D_{50} zawarte były w przedziale 0,19 \div 0,22 mm [6]. Dowodzi to bezpośrednio słuszności przyjętej metodyki opisu potencjału dyssypacyjnego profili brzegowych.

Nowym, istotnym elementem przedstawionej analizy jest możliwość oceny potencjału dyssypacyjnego odcinka brzegu E_d za pomocą równań (7a) i (7b), zależnie od tego, czy dany profil ma jedną czy dwie strefy stałej, czyli nasyconej dyssypacji energii falowej w sytuacji w pełni rozwiniętego reżimu załamania fal w strefie brzegowej. Równania te łączą w sobie nasyconą dyssypację energii falowej w jednostkowej objętości wody oraz szerokość obszaru, w którym zjawisko to zidentyfikowano. Wielkość E_{d} można interpretować jako miarę narażenia brzegu na erozję przy danej morfologii strefy brzegowej; minimalne wartości E, mogą wskazywać na miejsca szczególnie narażone na erozję w przypadku gdy wartości na profilach sąsiednich są zdecydowanie większe. Rozumowanie to przedstawiono na rys. 6, który zawiera obliczone potencjały dyssypacji energii falowej na badanym odcinku brzegu. Na rysunku tym widać wyraźnie, że odcinek brzegu między km 190 a 200 charakteryzuje się znacznie mniejszym potencjałem dyssypacji energii falowej niż odcinki sąsiednie z obu stron. Najmniejszy potencjał dyssypacyjny zidentyfikowano na km 193 (rys. 7). Występuje tam płaski profil mający jedynie dwie rewy średniej wielkości, co musi skutkować niewielką dyssypacją energii falowej przez te rewy. W ten sposób duża część niezdyssypowanej energii musi być wyzwolona bezpośrednio na brzegu, powodując intensywna, lokalna erozie. Stanowi to wyraźny kontrast w porównaniu z rys. 4 a), b), c) (km 203), gdzie duże rewy tworzą dwie strefy nasyconej dyssypacji energii falowej, dzięki czemu do linii brzegowej dochodzi jej znacznie mniej.

WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona analiza pozwoliła na rozwinięcie koncepcji empirycznych profili równowagi przez identyfikację jednej lub dwóch stref nasyconej dyssypacji energii falowej, gdzie podczas sztormów występuje w pełni rozwinięty reżim załamania fal. W tym celu do analizy pomiarów terenowych wykorzystano narzędzia typowe do analizy szeregów czasowych. Za ich pomocą zidentyfikowano obszary strefy brzegowej, w których kształt empirycznych profili równowagi jest bardzo zbliżony do krzywych Deana, co dowodzi, że w tych obszarach można założyć wystąpienie nasyconej dyssypacji energii falowej. Główna różnica względem zwykłych profili równowagi polega na tym, że na profilach wielorewowych warunki równowagi mogą istnieć jedynie w części strefy przyboju, co jest zgodne z obserwacjami, które dowodzą nieciągłości procesu załamania fal na takich profilach. Bardzo ważnym wnioskiem jest przy tym stwierdzenie, że punkty przegięcia empirycznych profili równowagi można było utożsamić z odbrzegowym początkiem strefy nasyconej dyssypacji energii falowej.

Większość analizowanych profili wielorewowych charakteryzowała się jedną strefą nasyconej dyssypacji energii falowej pomiędzy linią brzegową a punktem przegięcia empirycznego profilu równowagi. Jednakże, na niektórych profilach znalezienie monotonicznego empirycznego profilu równowagi było niemożliwe. W takich przypadkach występowały zazwyczaj dwie strefy nasyconej dyssypacji energii: strefa zewnętrzna rozciągała się wtedy między zewnętrznym punktem przegięcia (granica odbrzegowa) a grzbietem największej rewy, zwykle oddalonej dość znacznie od brzegu (granica dobrzegowa). Dla takich przypadków opracowano sposób wyprowadzenia funkcji Deana dla strefy zewnętrznej, której parametr zawiera informacje o natężeniu dyssypacji, jaka tam występuje, por. równanie (7b).

Kolejnym istotnym wnioskiem jest stwierdzenie, że parametry krzywych Deana wpisanych w empiryczne profile równowagi w strefach nasyconej dyssypacji energii są bardziej zgodne z rzeczywistymi charakterystykami osadów, z jakich zbudowany jest badany odcinek brzegu, niż krzywe wpisane w pomierzone profile. Dowodzi to właściwego uchwycenia przez proponowaną metodykę rzeczywistych warunków lito- i morfodynamicznych.

Zaproponowana metodyka może być skutecznie zastosowana do badań nad odpornością morfologicznych jednostek brzegowych na erozję. Identyfikacja obszarów o większym niż sąsiednie narażeniu na erozję może być wykorzystana przy projektowaniu planów sztucznych zasilań brzegów morskich w celu ich nieinwazyjnej ochrony. Proponowana metodyka jest bardziej dokładna niż stosowane krzywe Deana, wpisywane w całe pomierzone profile bez uwzględnienia obszarów nasyconej dyssypacji energii falowej profili wielorewowych, które można zlokalizować za pomocą punktów przegięcia empirycznych profili równowagi.

Dalsze badania nakierowane będą na ocenę wpływu lokalnych warunków geologicznych (dostępność osadów piaszczystych, występowanie wychodni glin, soczewek i przewarstwień torfowych, itp.) w strefie brzegowej na morfologię profili brzegowych i ich zdolność do dyssypacji energii falowej. Anomalie takie mogą okazać się na tyle istotne, że zastosowanie teorii profili równowagi dna w strefie przyboju może nie mieć uzasadnienia. Miejsca takie znajdują się na wybrzeżu zachodnim i będą one poddane analizie w kolejnych badaniach. Coraz bardziej powszechna praktyka regularnego monitorowania morfologii stref brzegowych stwarza doskonałe warunki do podobnych studiów wykonywanych dla warunków innych niż te występujące na Morzu Bałtyckim. W tym kontekście przedstawiona metodyka może mieć również uniwersalne zastosowania w bardziej ogólnych studiach dotyczących procesów fizycznych strefy brzegowej w ramach zintegrowanego zarządzania obszarami przybrzeżnymi.

LITERATURA

1. Bruun P.: Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. Technical Memorandum No. 44, Washington (Beach Erosion Board), 1954.

2. Coastal Engineering Manual (CEM) Part III-3, 2008. US Army Corps of Engineers.

3. Coastal Engineering Manual (CEM) Part V-4, 2008. US Army Corps of Engineers.

4. Dean R. G.: Beach Erosion: Causes, Processes and Remedial Measures. CRC Critical Reviews in Environmental Control, Vol. 6 Issue 3, Sept. 1976, 259-296.

5. Dean R. G.: Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. Proc. Coastal Sediments ,87 Conf., American Society of Civil Engineers, New Orleans, LA, 1, pp. 1-24, 1987.

6. Dubrawski R., Zawadzka-Kahlau E.: Przyszłość ochrony polskich brzegów morskich. Wydawnictwo Instytutu Morskiego, ISBN 83-85780-77-7, 2006, 1-302,.

7. Hallermeier R. J.: A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate. Coastal Engineering, Vol. 4, 1981, 253-277.

8. Kaszubowski L.J., Coufal R.: Wstępny podział geologiczno-inżynierski dna polskiej części Morza Bałtyckiego. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2010, 2010, 392-401.

9. Kriebel D., Kraus N. C., Larson M.: Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response. Proc. Coastal Sediments'91 Conf., ASCE, Seattle, 1991, 557-571.

10. Moore B. D.: Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height. MSc Thesis. University of Delaware, Newark, USA, 1982.

11. Różyński G.: Coastal Nearshore Morhology in Terms of Large Data Sets: Gdansk. Institute of Hydroengineering of the Polish Academy of Sciences, 2003, 1-170.

12. Różyński G., Lin J. G.: Data-Driven and Theoretical Beach Equilibrium Profiles: Implications and Consequences. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 141, Issue 5, 04015002, http://dx.doi.org/10.1061/ (ASCE)WW.1943-5460.0000304, 2015.

13. Różyński G., Larson M., Pruszak Z. Forced and Self-organized Shoreline Response for a Beach in the Southern Baltic Sea Determined through Singular Spectrum Analysis. Coastal Engineering, Vol. 43, 2001, 41-58.

PODZIĘKOWANIE: Wyniki badań, przedstawione w niniejszym artykule, wykonano w ramach projektu Unii Europejskiej H2020 HYDRALAB+, nr grantu 654110 – HYDRALAB-PLUS – H2020-INFRAIA-2014-2015, oraz w ramach działalności statutowej IBW PAN, finansowanej przez MNiSW.