

Wstępna propozycja rozszerzenia analizy bezpieczeństwa brzegu morskiego w Polsce

Dr inż. Piotr Szmytkiewicz, dr hab. inż. Grzegorz Różyński
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

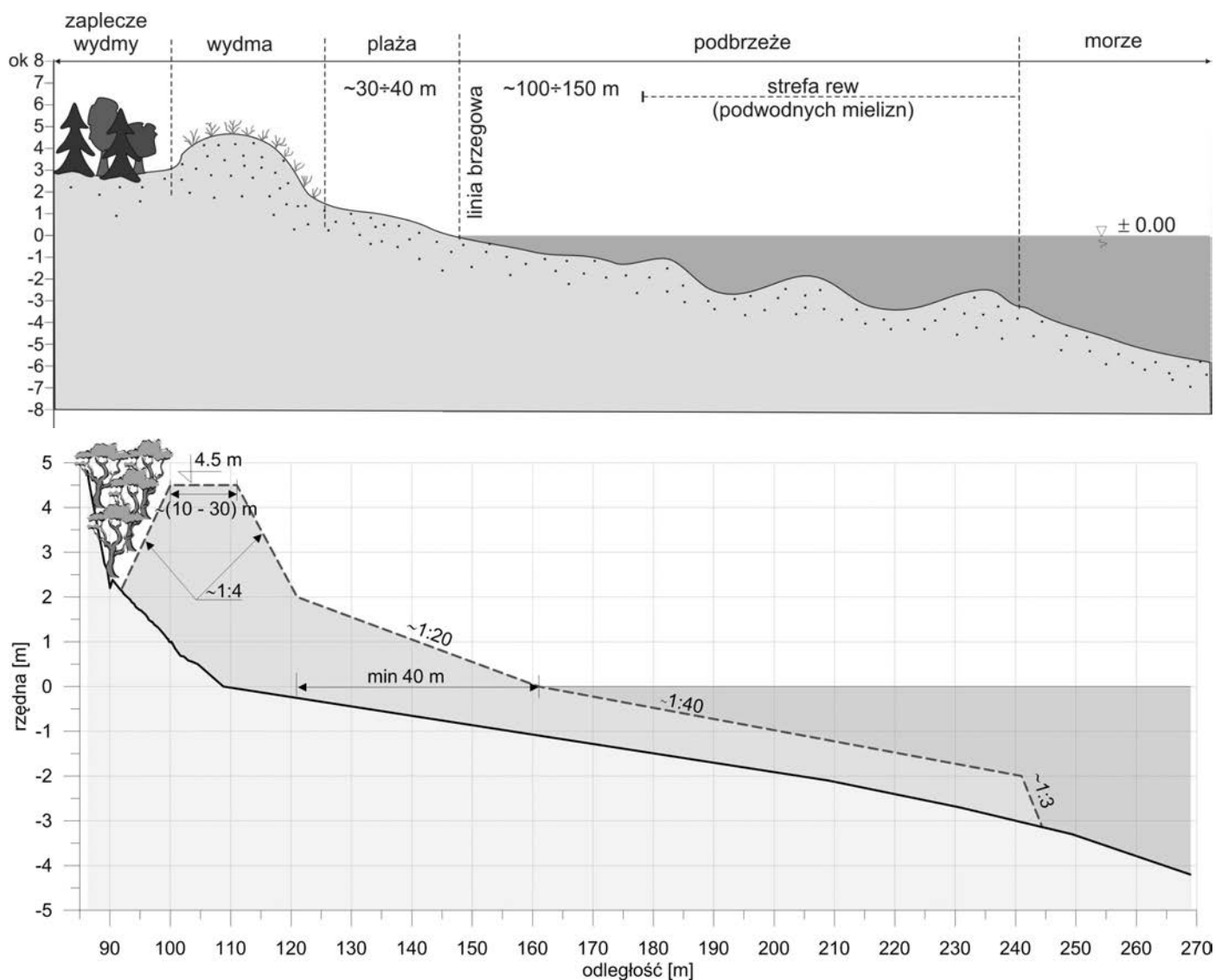
Dnia 1 października 2015 roku Senat RP bez poprawek zaakceptował nowelizację ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” [18]. W swym zamierzeniu nowelizacja ma umożliwić między innymi prowa-

dzenie monitoringu i badań całego polskiego wybrzeża w celu ustalenia aktualnego stanu wybrzeża. Biorąc pod uwagę ten cel, a także np. prace [2], [11] oraz [16], kluczowe staje się odpowiednie na pytanie, jak w obiektywny sposób prowadzić badania

dotyczące oceny erozyjności brzegu morskiego w Polsce. Jednym z podstawowych elementów takich badań jest porównywanie położenia linii brzegowej i umownej linii brzegowej morza na tle tzw. bezpiecznego profilu brzegu. Takie podejście metodyczne jest związane z powszechnym przekonaniem [1, 10, 12, 13, 14, 17], że najlepszym naturalnym zabezpieczeniem brzegu przed erozją jest tzw. bezpieczny profil brzegu, czyli odpowiednio szeroka plaża z rozbudowanym systemem rew, (rys. 1). Orientacyjne wymiary bezpiecznego profilu brzegu dla odmorskich brzegów południowego Bałtyku są następujące:

- rzędna korony wydmy: +4,5 m,
- minimalna szerokość korony wydmy: od 10 do 30 m,
- rzędna podstawy wydmy: +2,0 m,
- szerokość plaży: min. 40 m,
- nachylenie plaży 1:20,
- I rewa: odległość 150 ÷ 250 m od brzegu, rzędna korony: od -1,8 do -2,0 m,
- II rewa: odległość 350 ÷ 500 m od brzegu, rzędna korony: od -3,5 do -4,5 m,
- średnie nachylenie dna: 1:100.

Ze względu na obserwowany wzrost średniego poziomu morza [15] oraz sztormowości (liczby, czasu trwania i intensywności zdarzeń sztormowych) zjawiska erozji i zagrożenia powodziowe obszarów nadmorskich stają się powszechne [5, 6, 7, 8, 9] i prawdopodobnie nieodwracalne. Pożądany z punktu widzenia zabezpieczenia brzegu przed erozją i powodzią morskimi tak zwany bezpieczny profil brzegu jest coraz mniej powszechny zarówno w Polsce, jak i na świecie. Dlatego też tym większe znaczenie ma wdrażanie narzędzi, które pozwolą skutecznie identyfikować miejsca wystąpienia początków erozji brzegu i/lub monitorować tempo erozji w obszarach trwale zagrożonych zniszczeniem. Obowiązujący do 2023 roku Program Ochrony Brzegów Morskich przewiduje utrzymanie konfiguracji linii brzegowej z 2000 roku. Jedną z głównych metod ochrony brzegów jest według Programu sztuczne zasilanie. Punktem wyjścia każdego projektu budowlanego sztucznego zasilania jest określenie projektowanej geometrii profilu brzegowego, który powinien w możliwie właściwy sposób odpowiadać tak zwanemu bezpiecznemu profilowi brzegu. Powoduje to konieczność zdefiniowania ogólnego kryterium bezpieczeństwa brzegu mającego charakter brzegu naturalnego, lecz utrzymywanego sztucznie przez refulację. Do tej pory kryterium takie



Rys. 1. Bezpieczny profil brzegu: brzeg naturalny i sztucznie zasilany

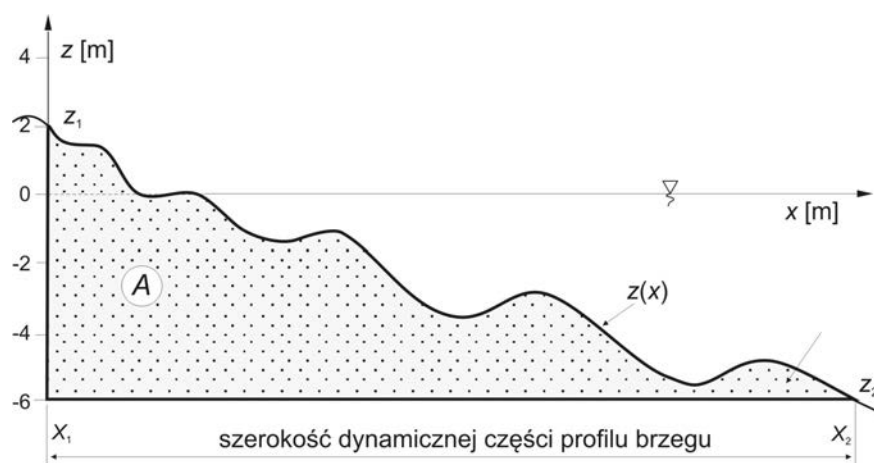
opracowano dla pojedynczych profili poprzecznych, w odcieraniu od profili sąsiednich (1D). Celem pracy jest wstępna propozycja rozszerzenia tego kryterium tak, aby uwzględniało ono również wzdłużbrzegową zmienność morfologii brzegu, a więc miało cechy 2D. Tak rozszerzone kryterium ma umożliwić dokładniejszą identyfikację erozyjnych odcinków brzegu. Granicami takich odcinków mogą być łatwo widoczne przejścia z brzegu klifowego na wydmy i odwrotnie, znaczna zmiana azymutu linii brzegowej czy wystąpienie dużego ujścia rzecznego. Granice takie mogą też być niewidoczne, na przykład, gdy dany odcinek brzegu charakteryzuje się małą miąższością osadów piaszczystych biorących udział w naturalnej ewolucji strefy brzegowej. Jeszcze inną granicą mogą być sztucznie utrzymywane kanały nawigacyjne i tory podejściowe do portów działające jak wychwytywacze naturalnie migrującego rumowiska bądź też falochrony portowe i wynikająca z ich istnienia akumulacja po stronie przypływowej oraz erozja po stronie zapływowej. W tym ostatnim przypadku czynnikiem komplikującym są nieregularnie prowadzone operacje przepuszczania osadów (by-passing), które mogą utrudniać ocenę faktycznego stanu bezpieczeństwa brzegu.

GŁÓWNE ELEMENTY JEDNOWYMIAROWEGO KRYTERIUM BEZPIECZEŃSTWA BRZEGU

Program Ochrony Brzegów Morskich z 2003 i jego nowelizacja z 2015 roku zakłada kompleksowy monitoring strefy brzegowej za pomocą profili batymetrycznych o wzdłużbrzegowym rozstawie 500 m, przedłużonych za pomocą pomiarów tachymetrycznych na płytka część strefy brzegowej i plażę. W celu wykonania pomiarów, na podstawie badań holenderskich, Instytut Morski w Gdańsku opracował jednowymiarowe kryterium bezpieczeństwa brzegu [3], znane w środowisku polskich inżynierów brzegowych i pracowników Urzędów Morskich pod nazwą „całka Cieślaka”. Na rys. 2 przedstawiono przesłanki do obliczeń „całki Cieślaka” dla każdego pomierzonego profilu batymetryczno-tachymetrycznego.

Aby wyznaczyć wartość „całki” dla zadanego profilu, przyjmuje się, że powierzchnia A jest równa:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} [z(x) - z_2] dx \quad (1)$$



Rys. 2. Elementy definiujące jednowymiarowe kryterium bezpieczeństwa brzegu

gdzie:

- najwyższą rzędną jest profil $z_1 = 2$ m,
- najniższą rzędną jest profil $z_2 = -6$ m; jest to tak zwana (roczna) głębokość zamknięcia, poniżej której transport osadów w ciągu jednego roku jest nieistotny,
- oblicza się tak zwaną aktywną powierzchnię profilu A , zawartą między z_1 a z_2 oraz pomierzonym profilem (kropkowana powierzchnia na rys. 2).

Na podstawie analiz Instytutu Morskiego bezpieczny profil brzegu na morzu otwartym (kilometraż Km 124,5 – 428) powinien być większy od $A = 1495$ m². Uznano, że profil o powierzchni mniejszej niż ta wartość ma charakter erozyjny.

Powyższe kryterium można zilustrować za pomocą wyidealizowanego profilu równowagi dna typu krzywej Deana [12], to jest hipotetycznej krzywej, jaką przyjąłoby dno w stanie równowagi hydrodynamicznej, przy stałej dyssypacji energii falowej wzdłuż profilu. Stan taki przedstawiono na rys. 3. Profil równowagi charakteryzuje się brakiem rew i jest opisany równaniem:

$$z = A_{Dean} x^{2/3} \quad (2)$$

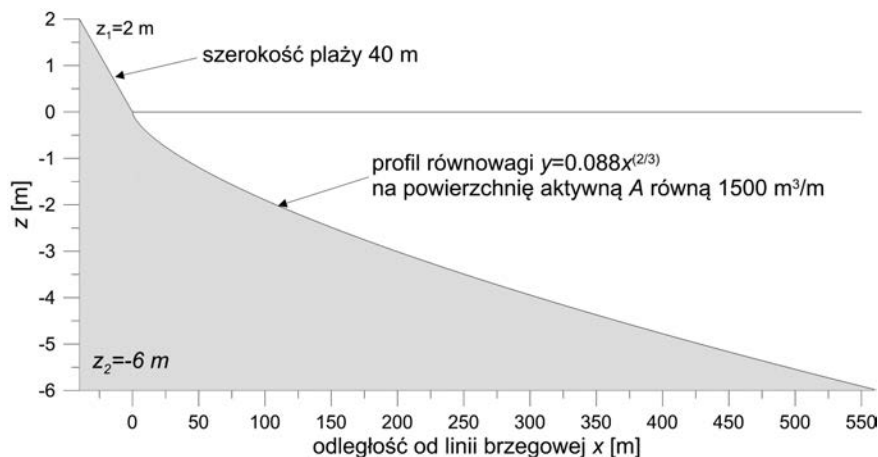
gdzie:

A_{Dean} – współczynnik związany z dominującą średnicą ziaren osadu piaszczystego D_{50} . Przy założonej szerokości plaży równej 40 m wartość współczynnika A_{Dean} dla którego powierzchnia aktywna jest równa 1500 m²/m (zaokrąglona wartość 1495), wynosi $A_{Dean} = 0,088$, a krzywa przecina rzędną z_2 w odległości 544 m od linii brzegowej.

Ciekawym wnioskiem z rys. 3 jest niewielki udział samej plaży w powierzchni aktywnej A ; niemal całość bezpieczeństwa brzegu zapewnia podwodna część profilu. Innym ciekawym wynikiem jest określenie wielkości D_{50} , czyli średniej wielkości średnicy ziaren budujących plażę i skłon podwodny w polskiej części otwartych brzegów Morza Bałtyckiego. Na podstawie [4] wielkość D_{50} odpowiadająca wartości współczynnika $A_{Dean} = 0,088$ można oszacować za pomocą wzoru:

$$A_{Dean} = 0,41(D_{50})^{0,94} \quad (3)$$

Wzór ten daje wartość D_{50} równą 0,20 mm, która jest wysoce zgodna z obserwacjami terenowymi strefy brzegowej południowego Bałtyku. Zgodność ta potwierdza też właściwy wybór kryterium stabilności brzegu (wartość 1500 m²/m) oraz wybór odmorskiej granicy strefy aktywnej ($z_2 = -6$ m).



Rys. 3. Profil równowagi odpowiadający przyjętemu kryterium bezpieczeństwa brzegu $A = 1500 \text{ m}^3/\text{m}$

Praktyczne zastosowanie jednowymiarowego kryterium bezpieczeństwa brzegu pokazano na rys. 4, na którym przedstawiono wyniki monitoringu z roku 2005 w rejonie gminy Rewal. Wykres stanowią wartości „całki Cieślaka” obliczone dla odcinka kilometrażu Urzędu Morskiego Km 362 – 380 w poszczególnych profilach oddległych od siebie o 500 m. Wyraźnie jest widoczny erozyjny charakter fragmentu tego odcinka pomiędzy Km 366 a 374 oraz wysoce niejednoznaczne wyniki dla Km 374 – 376, gdzie profile jednoznacznie erozyjne przeplatają się z profilami silnie akumulacyjnymi.

ROZSZERZONE KRYTERIUM BEZPIECZEŃSTWA BRZEGU

Rozszerzenie jednowymiarowego kryterium bezpieczeństwa brzegu musi uwzględniać istnienie profili sąsiednich w bliższej i dalszej oddległości od badanego miejsca, to znaczy uwzględnienie informacji, jaką one zawierają. Wobec tego, teoretycznie

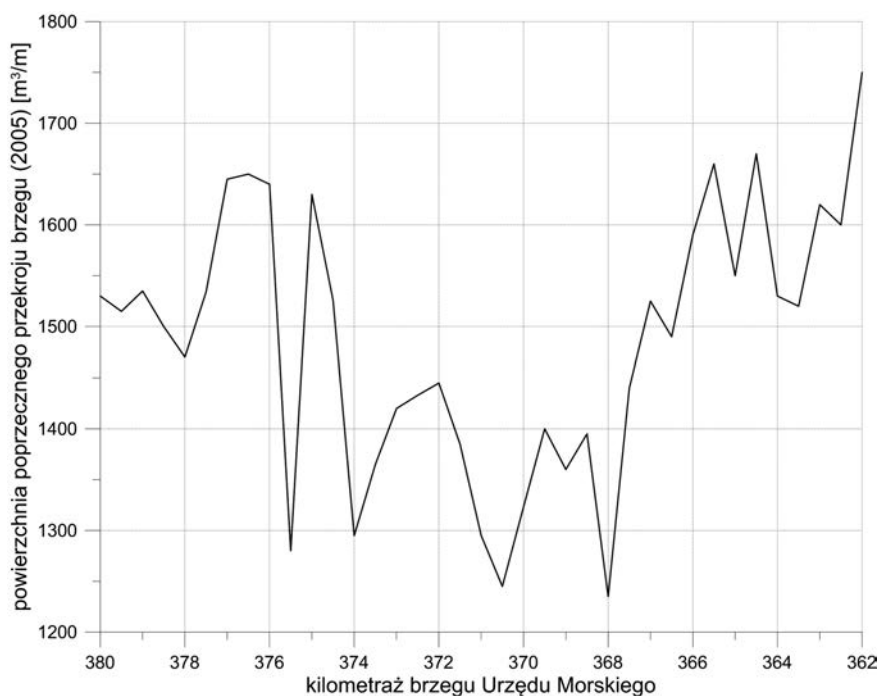
najlepszą metodą rozszerzenia jednowymiarowego kryterium bezpieczeństwa brzegu jest ważone uśrednianie badanego profilu oraz profili sąsiednich. Z drugiej strony, rozszerzone kryterium powinno obejmować jedynie profile najbardziej istotne dla badanego miejsca, a więc odcinek uśredniania powinien być na tyle krótki, żeby nie zachodziła konieczność określania wag, która to operacja może być uciążliwa i w dużym stopniu zależna od danej sytuacji brzożowej. Na rys. 5 przedstawiono proponowane sposoby uśredniania w celu otrzymania najbardziej uniwersalnej metody obliczania rozszerzonego kryterium bezpieczeństwa brzegu.

Operację uśredniania obliczonych dla poszczególnych profili wartości całki Cieślaka można wyrazić wzorem:

$$V_{a,b} = \frac{1}{b-a} \int_a^b V(y) dy \quad (4)$$

gdzie:

$V(y)$ – reprezentuje wartości kryterium bezpieczeństwa w sposób ciągły na całym analizowanym odcinku.



Rys. 4. Funkcja jednowymiarowego kryterium bezpieczeństwa brzegu na Km 362 – 380 pomiaru z 2005 roku

Ze względu na fakt, że monitoring strefy brzegowej jest wykonywany w profilach oddległych od siebie co 500 m, wzór (4) należy zmodyfikować, zastępując całą sumą:

$$V_{a,b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (5)$$

W najprostszym przypadku odcinki $b - a$ są rozłączne, czyli należy określić wartości średnie do odpowiednio dobranych krotności 500 m, tworzących takie rozłączne odcinki. Metodą prób i błędów określono długość odcinka uśredniania $L = b - a = 2$ km, a więc przyjęto pięć profili jako podstawę uśredniania ($n = 5$). Uśrednione wartości badanego odcinka w gminie Rewal przedstawiono w formie grubej linii przerywanej na rys. 5. Metoda ta umożliwiła dokładną identyfikację początku obszaru erozyjnego od Km 366,5. Niestety, identyfikacja zachodniego krańca erodowanego odcinka na Km 374 nie jest już tak precyzyjna ze względu na silnie zmienne wartości jednowymiarowego kryterium w tym rejonie.

Bardziej precyzyjna identyfikacja stanu brzegu jest możliwa przy zastosowaniu średniej ruchomej, używając wzoru (5) do zadanej podstawy uśredniania przy każdym przejściu o 500 m. Ponownie, stosując metodę prób i błędów, obliczono uśrednione wartości dla $L = 2$ km ($n = 5$) oraz $L = 3$ km ($n = 7$). Przedstawiono je na rys. 5 jako linia przerywana ($L = 2$ km) oraz jako linia kropkowana ($L = 3$ km).

Wyniki otrzymane dla obu długości odcinków uśredniania są do siebie bardzo zbliżone, przy czym przyjęcie dłuższej podstawy uśredniania skutkuje otrzymaniem gładziej funkcji rozszerzonego kryterium bezpieczeństwa brzegu. W obu przypadkach uzyskano prawidłową identyfikację początku i końca odcinka erozyjnego (Km 366,5 oraz 375). Co więcej, podobieństwo obu wyników dowodzi ich wiarygodności. Jednakże, ze względów interpretacyjnych lepiej jest przyjąć dłuższy odcinek uśredniania ($L = 3$ km), co uzasadniono na rys. 6.

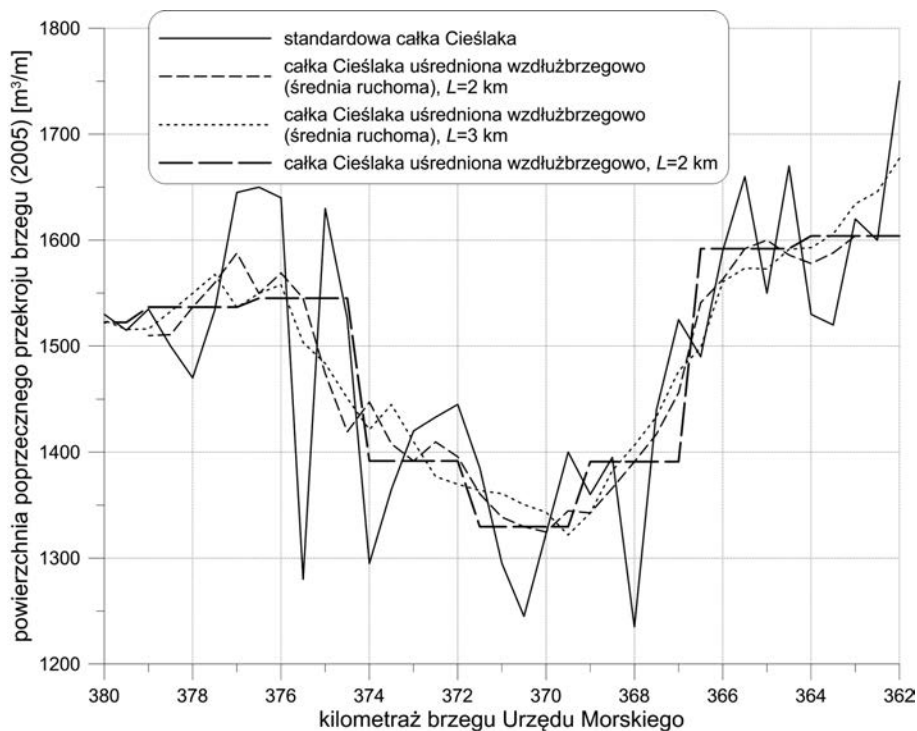
Gładki wykres funkcji rozszerzonego kryterium bezpieczeństwa brzegu pozwala na względnie łatwe numeryczne szacowanie jej pierwszej i drugiej pochodnej. Pierwsza pochodna wyznacza położenie punktów o maksymalnej tendencji erozyjnej (lub akumulacyjnej, o ile takie występują). Dużo bardziej istotne są jednak punkty zerowania się drugiej pochodnej, związane z punktami przebiegu wykresu. Zerowanie się drugiej pochodnej odpowiada wartościom ekstremalnym pierwszej pochodnej, czyli miejscom najszybszej zmienności badanego wykresu. Miejsca te wyznaczają punkty skrajne odcinka erozyjnego. Wobec tego rozszerzone kryterium bezpieczeństwa brzegu umożliwia precyzyjne i stosunkowo jednoznaczne określenie granic odcinków erozyjnych przez wyznaczenie miejsc zmiany znaku drugiej pochodnej.

WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

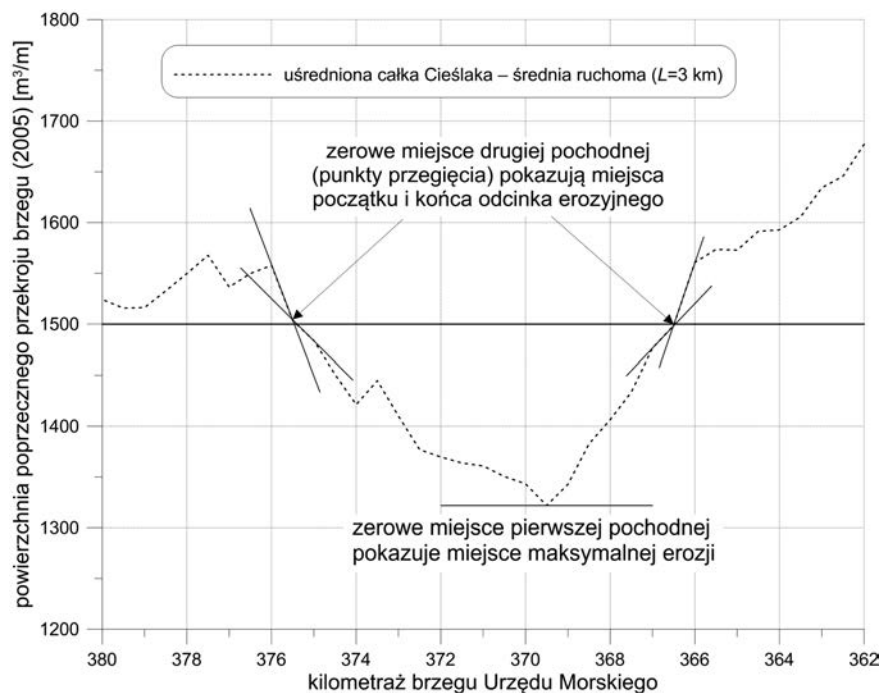
Dokonano rozszerzenia powszechnie obowiązującego kryterium bezpieczeństwa brzegu poprzez uwzględnienie wzdłuż-brzegowej zmienności wartości tego kryterium.

Rekomendowaną metodą określenia rozszerzonych wartości kryterium jest numeryczne uśrednianie aktywnych powierzchni profili (A) na odcinkach o długości $2 \div 3$ km (5 do 7 profili batymetrycznych w odległościach co 500 m) za pomocą okienka średniej ruchomej o podstawie $n = 5$ lub 7. Bliskie wartości uśrednionych parametrów w danym punkcie przy różnych podstawach uśredniania stanowią kryterium zgodności wyników.

Preferowaną podstawą uśredniania jest siedem profili, co odpowiada $L = 3$ km długości uśredniania. Identyfikacja miejsc zmian znaku drugiej pochodnej tak zmodyfikowanego kryterium bezpieczeństwa brzegu jest równoznaczna z określeniem miejsc najbardziej intensywnej zmienności powierzchni profilu aktywnego A. Zazwyczaj miejsca takie określają początek



Rys. 5. Warianty rozszerzonego kryterium bezpieczeństwa brzegu



Rys. 6. Rozszerzone kryterium bezpieczeństwa brzegu – interpretacja

i koniec odcinka erozyjnego. Zerowanie się drugiej pochodnej stanowi ważne kryterium erozyjności brzegu morskiego stanowiące uzupełnienie kryterium związanego z wartością całki Cieślaka wynoszącą 1500 m^3 .

Rozszerzone kryterium bezpieczeństwa brzegu może pozwolić na bardziej precyzyjną analizę bezpieczeństwa brzegu, szczególnie w sytuacjach, gdy jest to brzeg naturalny lub chroniony za pomocą sztucznego zasilania lub gdy analizowany odcinek sąsiaduje z portami, gdzie wzdłużbrzegowy transport osadów jest procesem modyfikowanym czynnikami antropogenicznymi (by-passing). W takich sytuacjach wartości jednowymiarowego kryterium różnią się bardzo znacznie między poszczególnymi profilami, co utrudnia prawidłową identyfikację odcinków szczególnie narażonych na erozję oraz utrudnia planowanie np. kolejnych operacji sztucznego zasilania.

LITERATURA

1. Bakker W. T.: Coastal Dynamics, Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 34, ISBN: 978-981-2703-73-6, 2013.
2. Boniecka H., Gajda A., Gawlik W., Szmytkiewicz M., Skaja M., Szmytkiewicz P., Chrzastowska N., Piotrowska D.: Monitoring i badania dotyczące aktualnego stanu brzegu morskiego – ocena skuteczności systemów ochrony brzegu morskiego zrealizowanych w okresie obowiązywania wieloletniego „Programu ochrony brzegów morskich”. Wydawnictwo wewnętrzne Instytutu Morskiego nr 6793, 2013.
3. Cieślak A. (redakcja): Podstawy przyrodnicze, techniczne i organizacyjno-prawne oraz przedsięwzięcia strategii ochrony brzegów morskich, 2000. Synteza pracy wykonanej w ramach Projektu Celowego pt. Strategia ochrony brzegów morskich Nr 9T 12C 069 97 C/3636/ 2000, WW IM nr 5721, Gdańsk, 2000.
4. Hanson, H., Kraus, N.: GENESIS, Generalized model for simulating shoreline change, Technical Rep. CERC 89-19, Washington, USA, 1989.
5. <http://nj1015.com/jersey-shore-beach-erosion-seen-up-and-down-coast/> (strona www z 06.10.2015).
6. <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2015/100615-noaa-awards-1.1-million-to-support-coastal-communities-facing-changing-sea-levels-and-coastal-flooding.html> (strona www z 06.10.2015).
7. <http://www.sbs.com.au/news/article/2015/09/23/coastal-erosion-heavy-flooding-forecast-pacific> (strona www z 06.10.2015).
8. <http://www.smh.com.au/environment/climate-change/south-coast-beach-erosion-worse-than-predicted-says-experts-20150929-gjxqmx.html> (strona www z 06.10.2015).
9. <http://www.times-standard.com/environment-and-nature/20150926/scientists-increased-coastal-erosion-likely-due-to-stronger-el-niño-events> (strona www z 06.10.2015).
10. Kamphuis J. W.: Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 30, 2nd Edition, ISBN: 978-981-283-484-3, 2010.
11. Ostrowski R., Skaja M.: Zależność stabilności brzegów Półwyspu Helskiego od sztucznego zasilania. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2011, 495-502.
12. Pruszek Z.: Dynamika brzegu i dna morskiego. Wydawnictwo IBW PAN, ISBN: 8385708-28-6, 1998.
13. Pruszek Z.: Brzeg morski: procesy fizyczne obszaru płytko- i nadwodnego. Wydawnictwo IBW PAN ISBN: 9788385708742, 2014a.
14. Pruszek Z., Skaja M., Problemy dynamiki i ochrony brzegu morskiego. Wydawnictwo IBW PAN, ISBN: 9788385708773, 2014b.
15. Stramska M., Chudziak N.: Recent multiyear trends in the Baltic Sea level. Oceanologia no 55, 2013, 319-337.
16. Szmytkiewicz M., Cerkowniak G., Ostrowski R., Schönhofner J., Skaja M., Stella M., Swerpel B., Szmytkiewicz P.: Określenie wzdłużbrzegowego zoptimalizowanego sposobu odłożenia urobku z prac czerpalnych na odcinkach brzegu morskiego od Gdańska Brzeźno do Gdyni Orłowo i od Jastrzębiej Góry do rejonu Dębek. IBW PAN, C28/2015, 2015.

17. US ACE, Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100, CECW-CE, 2002.

18. Ustawa z dnia 28 marca 2003 roku o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz.U. 2003 nr 67 poz. 621).

PODZIĘKOWANIE: Niniejsza publikacja powstała w ramach projektu nr 2012/05/B/ST10/00926 sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC201/05/B/ST10/00926.