

**OKREŚLENIE TENDENCJI ROZWOJOWYCH BRZEGU NA PODSTAWIE  
BADAŃ TELEDETEKCYJNYCH**

**TRENDS IN COAST DEVELOPMENT AS DETERMINED BY REMOTE  
SENSING RESEARCH**

**Joanna Dudzińska-Nowak**

Zakład Teledetekcji i Kartografii Morskiej, Instytut Nauk o Morzu,  
Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Szczeciński

SŁOWA KLUCZOWE: strefa brzegowa, zmiany brzegu, teledetekcja, Bałtyk Południowy

**STRESZCZENIE:** Obserwowane w ostatnich latach na świecie sukcesywne nasilenie się procesów erozji brzegu (Zawadzka 1999, Pruszek 2003, Living with erosion... 2004) powoduje coraz szersze zainteresowanie naukowców, reprezentujących różne dziedziny nauki, problemami strefy brzegowej. Jednakże złożoność zachodzących na brzegu morskim procesów, ich przyczyn i uwarunkowań, stwarza poważne problemy w ich opisie. Wielokrotnie podejmowane próby wyjaśnienia mechanizmów reakcji zachodzących w strefie brzegowej, jak do tej pory, nie dały zadowalających wyników. Poznanie prawidłowości rozwoju linii brzegowej ma kluczowe znaczenie dla rozwoju regionalnego i zagospodarowania przestrzennego, szczególnie w aspekcie bezpieczeństwa brzegu i jego infrastruktury, a także planowania rozwiązań prawnych i finansowych w odniesieniu do obszarów zagrożonych zniszczeniem. Wykorzystanie w badaniach metod teledetekcyjnych może przyczynić się do wyznaczenia obszarów ulegających morfodynamicznym procesom erozji i akumulacji, a co za tym idzie do poznania prawidłowości rozwoju brzegu. Szczególnie do tego celu przydatne są przetworzone fotogrametrycznie zdjęcia lotnicze, które pozwalają na przeprowadzenie szczegółowych, krótko- i długookresowych obserwacji obejmujących swoim zasięgiem znaczny obszar. Celem prezentowanych badań było odtworzenie położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu wybrzeża Gminy Rewal w latach 1938, 1951, 1973 i 1996 oraz określenie na tej podstawie wielkości zmian i tendencji rozwojowych brzegu. W wyniku przeprowadzonych pomiarów określono wielkość i tempo zmian zachodzących w tym rejonie. Wykazano wyraźny charakter erozyjny analizowanego wybrzeża. Zaobserwowano znaczne zróżnicowanie wielkości zmian nawet na sąsiadujących ze sobą, jednorodnych geomorfologicznie, odcinkach brzegu. Wyznaczenie szczególnie zagrożonych odcinków brzegu, o znacznej wielkości i dynamice zmian erozyjnych, ma duże znaczenie zarówno dla samorządów lokalnych, jak i instytucji odpowiedzialnych za bezpieczeństwo brzegu, szczególnie w aspekcie obserwowanego nasilenia się zjawiska erozji.

## **1. ZARYSOWANIE PROBLEMU**

Zachodzące w strefie brzegowej morza zróżnicowane procesy hydro-, morfo- i litodynamiczne powodowane są oddziaływaniem wielu różnorodnych czynników zmiennych zarówno w czasie jak i w przestrzeni. Powodowana przez nie erozja brzegu, nasilająca się w ostatnich latach powoduje coraz szersze zainteresowanie naukowców reprezentujących różne dziedziny nauki problemami strefy brzegowej. Jednakże

złożoność zachodzących na brzegu morskim procesów, ich przyczyn i uwarunkowań, stwarza poważne problemy w ich opisie. Ich złożoność nie pozwala ani na bezpośrednie odtworzenie w warunkach laboratoryjnych, ani na szczegółowy opis za pomocą modeli matematycznych. Wielkość zmian położenia linii brzegowej jest wypadkową oddziaływania wielu czynników, między innymi zmian poziomu morza, ilości wezbrań sztormowych, wielkości spiętrzenia sztormowego, czasu trwania i sposobu ucichania sztormu, napelnienia Bałtyku, oddziaływania budowli hydrotechnicznych. Dotychczas nie określono wagi wpływu poszczególnych czynników na wielkość zmian brzegu. Wielokrotnie podejmowane próby wyjaśnienia mechanizmów reakcji zachodzących w strefie brzegowej, jak do tej pory, nie dały zadowalających wyników. W zrozumieniu mechanizmu rozwoju brzegów bardzo istotne jest powiązanie czynników sprawczych z powodowanym przez nie efektem w postaci zmian morfologii brzegu, gdyż tylko poprawne zrozumienie wzajemnych relacji pozwoli na prowadzenie odpowiedzialnej gospodarki w szeroko rozumianej strefie brzegowej oraz podejmowanie skutecznych działań ochrony brzegów.

Możliwość zniszczenia brzegu w czasie wezbrań sztormowych, a co za tym idzie niebezpieczeństwo uszkodzenia istniejącej infrastruktury, wymusza podejmowanie przez Urząd Morski różnorodnych działań zabezpieczających. Jednakże każda ingerencja człowieka w strefie brzegowej powoduje, w mniejszym lub w większym stopniu, zakłócenie przebiegu naturalnych procesów i nie zawsze przynosi spodziewane rezultaty. Analiza historii metod ochrony brzegu obszaru badań, przeprowadzona na podstawie dokumentacji technicznej, w ramach projektu MESSINA, pozwoliła na określenie ich wpływu na modyfikację naturalnych procesów morfo dynamicznych i dokładniejsze rozpoznanie skutków ich oddziaływania na zmiany brzegu. W aspekcie nasilania się zjawiska erozji brzegu wiedza ta ma duże znaczenie, szczególnie w planowanych działaniach zabezpieczających.

Celem prezentowanych badań było odtworzenie położenia linii podstawy wydmy/podnóża klifu wybrzeża leżącego w obrębie Gminy Rewal w latach 1938, 1951, 1973 i 1996, określenie na tej podstawie wielkości zmian brzegu oraz wyznaczenie obszarów ulegających morfodynamicznym procesom akumulacji i erozji. Badania wielkości zmian brzegu przeprowadzono w ramach projektu badawczego KBN 3PO4E05023 –Teledetekcyjne badania tendencji zmian położenia linii brzegowej wybrzeża Zatoki Pomorskiej. Wpływ zabiegów i budowli hydrotechnicznych na modyfikację tendencji rozwojowych brzegu badano w ramach projektu Interreg IIIC MESSINA – Managing European Shorelines and Sharing Information on Nearshore Areas.

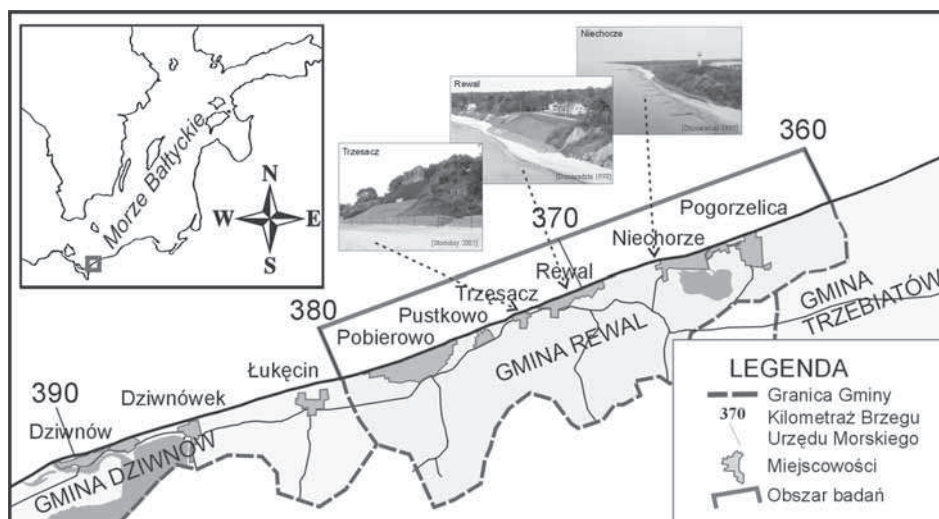
## **2. OBSZAR BADAŃ**

Obszar badań obejmuje 17 km wybrzeża południowego Bałtyku. Administracyjnie stanowi strefę brzegową Gminy Rewal w województwie Zachodniopomorskim, w obrębie której znajdują się miejscowości Pobierowo, Pustkowo, Trzęsacz, Rewal, Niechorze i Pogorzelica (Rys.1). Zachodnią część obszaru badań stanowi równina morenowa, w obrębie której występuje typowy, czynnie abradowany brzeg klifowy osiągający wysokość 10–22 m nad poziom plaży w rejonie latarni morskiej w Niechorzu. Zbudowany jest z osadów glacialnych, fluwioglacialnych, zastoiskowych i rzecznych z cienką (1-2 m) pokrywą piasków eolicznych, a miejscami w kierunku

wschodnim z gruba pokrywą piasków wydmych. Wschodnią część obszaru badań stanowi Mierzeja Liwska zbudowana z osadów akumulacji morskiej, tworząca brzeg wydmy o wysokościach 6-8 m. W rejonie Pogorzelic występują nadmorskie wydmy wałowe o wysokości 10 m (Dobrcki, Zachowicz 2005).

Klifowemu brzegowi morskiemu towarzyszy wąska żwirowo-piaszczysta plaża o szerokości zmieniającej się w granicach 10-40 m. Mierzei Liwskiej towarzyszy plaża o płaskim profilu z wyraźnym wałem brzegowym. Po zachodniej stronie ujścia kanału Liwka jest ona wąska, do 35 m, żwirowo-piaszczysta, natomiast po stronie wschodniej jest piaszczysta o szerokości 40-50 m (Dobrcki, Zachowicz 2005).

Batymetria podbrzeża w rejonie badań wskazuje na wyrównane nachylenie dna, bardziej strome w jego środkowej części. Izobata 5 m przebiega średnio w odległości 200-500 m, a izobata 10 m w odległości 500-1300 m od brzegu. Występują 2 lub 3 wały rewowe, przy czym najwyraźniej zaznacza się rewa druga występująca 100-150 m od linii brzegowej (Dobrcki, Zachowicz 2005).



Rys.1. Mapa obszaru badań

Ze względu na silną erozję brzegu i zagrożenie infrastruktury na obszarze badań występują rejonny zabezpieczone budowlami hydrotechnicznymi. Jak wynika z przeprowadzonej analizy historii umocnień brzegowych najwcześniej, już w 1874 roku zaczęto chronić brzeg w Niechorzu. Konieczność ochrony klifu, na którym znajduje się funkcjonująca nieprzerwanie od 1866 roku latarnia morska wymusiła budowę systemu ostróg i opaski brzegowej (368.5-367.2 km). Funkcjonujący system ochrony brzegu (Rys.1) prawdopodobnie był przyczyną wzmożonej erozji brzegu w kierunku wschodnim, która doprowadziła do prawie całkowitego umocnienia brzegu na odcinku od latarni morskiej aż do ujścia kanału Liwka (368.5-365.9 km). Początek ochrony brzegu w Rewał datuje się na rok 1939, kiedy to na zachodnim skraju miejscowości wybudowano grupę ostróg (372-371.25 km). Zabieg ten spowodował wzmożoną erozję brzegu po ich wschodniej stronie i powstanie zatoki erozyjnej zagrażającej budynkom. Dodatkowo w tym rejonie obserwowane były bardzo silne wysięki wód gruntowych z klifu, które wzmagały jego cofanie. Wymusiło to budowę kolejnych zabezpieczeń,

poprzez opaski palisadowe, aż do złożonego systemu ochrony brzegu klifowego (370.85-370.55 km), który funkcjonuje do dzisiaj (Rys.1). Jednak po obu jego stronach utworzyły się zatoki erozyjne, które znacznie powiększają zagrożony obszar. W Trzęsaczu pierwszą opaskę zabezpieczającą brzeg, której zadaniem była ochrona klifu, na którym znajdują się ruiny gotyckiego kościoła parafialnego wybudowano w 1986 roku (373.04-372.96 km). Obecnie wybudowano nowy system zabezpieczenia osuwającego się klifu (Rys.1) i tym samym ruin stanowiących atrakcję turystyczną regionu, jako pomnik niszczącej działalności morza (Dudzińska-Nowak, 2006).

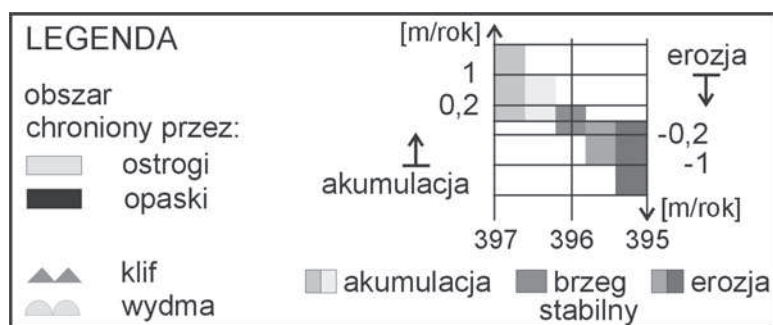
### 3. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Do określenia zmian brzegu wykorzystano 3 serie zdjęć lotniczych z 1951, 1973 i 1996 roku oraz niemiecką fotomapę z 1938 roku, które zostały przetworzone fotogrametrycznie. Serię barwnych zdjęć z 1996 roku (1:26000) poddano procesowi ortorektyfikacji, uzyskując jednorodny pod względem skali zbiór ortofotografii w układzie odniesienia PUWG1992/19, na których średni błąd kwadratowy określenia położenia obiektu wynosi 0,53 m. Na ich podstawie poddano procesowi rektyfikacji pozostałe, panchromatyczne serie zdjęć historycznych z 1951 i 1973 roku oraz fotomapę z 1938 roku. Średni błąd kwadratowy określenia położenia obiektu na zdjęciach lotniczych z 1951 roku wynosi 2,77 m, z 1973 roku - 2,37 m, zaś na fotomapie z 1938 - 4,66 m. Zmiany brzegu w poszczególnych przedziałach czasowych obarczone są maksymalnym błędem zależnym od wykorzystywanych roczników zdjęć i wynoszą odpowiednio 5.42m dla przedziału czasowego 1938-51, 3.89m dla okresu 1951-73 i 2.78 dla okresu 1973-96 (Dudzińska-Nowak *et al.*, 2005, Dudzińska-Nowak, 2006). Do zwiększenia dokładności prezentowanych badań mogłoby przyczynić się jedynie przeprowadzenie procesu ortorektyfikacji historycznych zdjęć lotniczych, które w tym przypadku nie było możliwe ze względu na brak metryk kalibracji kamer, którymi wykonano zdjęcia. Ze względu na niezadowalającą jakość materiałów źródłowych z 1938 roku, dla fragmentu obszaru badań (374,5-367,1 km) nie przeanalizowano wielkości zmian w przedziale czasowym 1938-51.

W prezentowanych badaniach zmiany linii brzegowej morza dotyczą zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu. Jak wykazano w pracach Furmańczyka i Musielaka i innych (Musiela *et al.*, 1991, Furmańczyk, 1994) linia podstawy wydmy/podnóża klifu jest jednym z najlepszych wskaźników do określenia stanu i wieloletniej dynamiki brzegu, spośród możliwych do interpretacji na zdjęciach lotniczych. Stanowi ona odpowiednik linii wysokiej wody wykorzystywanej do określania zmienności wybrzeży pływowych (Stafford *et al.*, 1971, El-Ashry, 1977, Leatherman, 1983, 1993).

Na każdej z czterech serii zdjęć zidentyfikowano położenie linii podstawy wydmy lub podnóża klifu. Mierzono prostopadle, co 10 m, odległość wyznaczonej dla każdej serii zdjęć linii podstawy wydmy / podnóża klifu od linii bazowej, wyznaczonej na podstawie kartograficznie określonych stałych punktów odniesienia pomiarów, które stanowił kilometr Urzędu Morskiego. Następnie obliczono wartości różnic położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu w badanych latach i sporządzono wykresy rzeczywistych zmian brzegu. Wyznaczono wartość zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu w przedziałach czasowych 1938-51, 1951-73, 1973-96 w metrach (Rys.3) i m/rok oraz przeprowadzono klasyfikację wielkości zmian brzegu

(Rys.2), co pozwoliło na określenie tendencji rozwojowych brzegu oraz tempa zmian (Dudzińska-Nowak, 2006). Wydzielono dwie klasy brzegu akumulacyjnego, o niewielkiej wielkości zmian zawierających się przedziale  $0.2 \div 1$  m/rok oraz zmianach znacznych, większych niż 1 m/rok, klasę brzegu stabilnego, na którym zachodzące zmiany mieszczą się w granicach  $\pm 0.2$  m/rok oraz dwie klasy brzegu o charakterze erozyjnym, niewielkich, gdzie zmiany mieszczą się w przedziale  $-0.2 \div 1$  m/rok i znacznych powyżej -1 m/rok (Rys.4, Rys.5, Rys.6). Wartości graniczne klasy brzegu stabilnego ( $\pm 0.2$  m/rok) zostały wyznaczone na poziomie 1,5 krotności błędu określenia wielkości zmian brzegu w m/rok dla przedziałów czasowych 1951-73 i 1973-96. Wprawdzie dla okresu 1938-51 wartości te powinny wynosić  $\pm 0,4$  m/rok, lecz ze względu na fakt, że wyniki dla tego przedział czasowego nie obejmowały całego odcinka badań oraz mając na uwadze potrzebę ujednoczenia klasyfikacji dla całego badanego okresu przyjęto wartości jak dla pozostałych przedziałów. Szerzej zostało to opisane w pracy Dudzińskiej-Nowak (2006).



Rys.2. Kryteria klasyfikacji wielkości zmian położenia linii podstawy wydmy w m/rok oraz symbole typów brzegu i obszaru chronionego zabudową hydrotechniczną prezentowane na diagramach

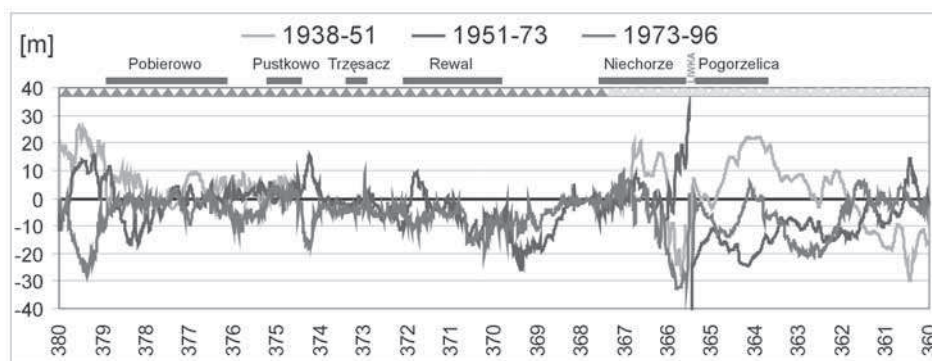
#### 4. REZULTATY BADAŃ

Na podstawie wykresu zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóza klifu w przedziałach czasowych 1938-51, 1951-73 i 1973-96 przeanalizowano charakter zmian zachodzących w tym rejonie (Rys.3). We wszystkich okresach zaobserwowano znaczne zróżnicowanie wielkości zmian nawet na sąsiadujących ze sobą, jednorodnych geomorfologicznie, odcinkach brzegu.

W przedziale czasowym 1938-51 obserwowana jest wyraźna przewaga obszarów, na których występuje zjawisko akumulacji, szczególnie silnej w rejonie miejscowości Pogorzelica, Niechorze i na zachód od Pobierowa. Znaczna erozja, powyżej 20 m (2-2,5 m/rok), notowana była na krótkich odcinkach w rejonie bardzo dynamicznego ujścia kanału Liwka i na wschód od Pogorzelicy. Fragmenty brzegu akumulacyjnego i erozyjnego występują przemiennie, a zmiany położenia linii podstawy wydmy/podnóza klifu wahają się w przedziale od -20 do 20 m (2m/rok) i tylko w rejonie Pobierowa i Pustkowa wielkości przesunięcia są zdecydowanie mniejsze, wahają się w przedziale od -5 do 10 m (0.5-1 m/rok). Dużą dynamiką zmian charakteryzują się obszary w rejonie Pogorzelicy oraz na odcinku brzegu klifowego, w zachodniej części



Pobierowa. Jednak dynamika zmian przeważającej części wybrzeża klifowego jest wyraźnie słabsza, niż wybrzeża wydmowego.



Rys.3. Zmiany położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu w przedziałach czasowych 1938-51, 1951-73, 1973-96

W okresie 1951-73 wyraźnie zmienia się charakter zmian brzegu, widoczne jest kurczenie się zasięgu obszarów akumulacyjnych. Znacznie zmniejszyła się również wielkość akumulacji, która jedynie na bardzo krótkim odcinku w rejonie kanału Liwka osiągnęła 30 m. Nasileniu uległo natomiast zjawisko erozji brzegu, obserwowane na znacznym odcinku obszaru badań w rejonie Pobierowa, Trzęsacza, Rewala i Pogorzelnicy. Wielkość erozji brzegu była znaczna, a w rejonie ujścia kanału Liwka osiągnęła nawet 40 m. Na odcinku od Pobierowa do Rewala wartości przesunięcia linii podnóża klifu zdecydowanie maleją do ok.  $\pm 5$  m ( $< 0.3$  m/rok). Znaczne cofnięcie się linii podstawy klifu widoczne jest na wschód od Rewala – 25 m (1 m/rok) oraz na wschód od Niechorza – 15 m (0.6 m/rok).

W kolejnym okresie 1973-96 obserwowane jest dalsze nasilenie się tendencji erozyjnych szczególnie widoczne na zachód od Pobierowa, na wschód od Pustkowa i we wschodniej części Rewala, gdzie linia podnóża klifu cofnęła się maksymalnie o 25 m, 18 m i 20 m, co oznacza tempo erozji ok. 1 m/rok. Znaczne cofnięcie się linii podstawy wydmy przekraczające 20 m widoczne jest w rejonie ujścia kanału Liwka, a tendencja erozyjna utrzymuje się w kierunku wschodnim aż do kilometra 362. Dalej w kierunku wschodnim brzeg jest wyraźnie stabilny, a zmiany nie przekraczają  $\pm 5$  m (0.2 m/rok). W tym okresie wyraźnie zmniejszeniu uległa ilość akumulacyjnych fragmentów brzegu jak i wielkość akumulacji. Lokalnie wielkość erozji jest znaczna i przy zwiększeniu długości erodowanych odcinków obserwowane jest nasilenie zjawiska erozji i zwiększenie erodowanej powierzchni brzegu. Równocześnie w latach 1973-96 doskonale widoczne jest zmniejszenie się amplitudy zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu, a na większości obszaru zmiany nie osiągają tempa 1 m/rok.

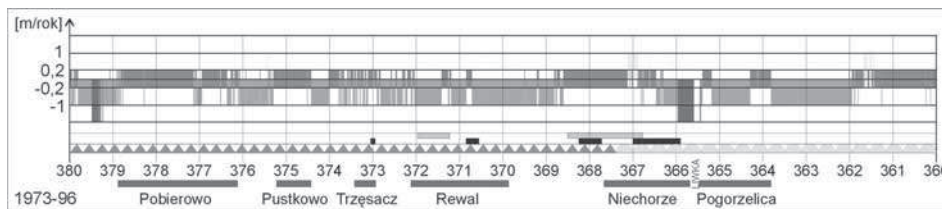
Z punktu widzenia bezpieczeństwa brzegu wskazanie miejsc o stałej, długookresowej tendencji rozwoju pozwala podjąć odpowiednie kroki w celu jego zabezpieczenia. Odcinki brzegu o tendencji akumulacyjnej są relatywnie bezpieczne, a odcinki o tendencji erozyjnej są zagrożone. Na badanym obszarze przeważają odcinki brzegu o stałej, jednokierunkowej erozyjnej tendencji rozwoju. Około 30% stanowią odcinki brzegu oscylującego, o zmiennej tendencji rozwoju, które są szczególnie ważne ze względu na intensywność i nieprzewidywalność kierunku zachodzących zmian.

Tabela 1. Średnia wartość zmiany brzegu i odchylenie standardowe w przedziałach czasowych

przedział czasowy	1938-51	1951-73	1973-96
średnia wartość zmiany brzegu (m)	3,42	-4,18	-6,26
odchylenie standardowe (m)	10,89	9,50	8,32

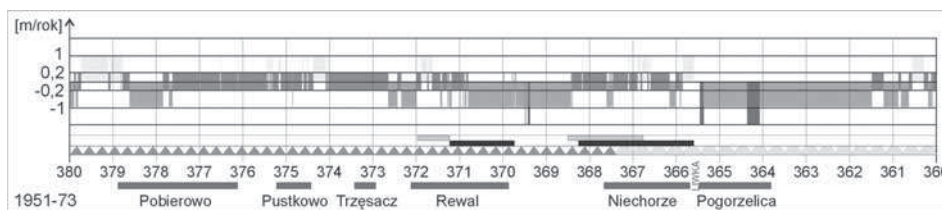
Z Tabeli 1 wynika, że w kolejnych przedziałach czasowych wielkość odchylenia standardowego sukcesywnie maleje. Oznacza to, że stopniowo zmniejsza się zróżnicowanie wielkości zmian na poszczególnych odcinkach brzegu. Można stwierdzić, że obliczone średnie wartości zmian brzegu badanego odcinka wskazują na wyraźny charakter erozyjny obszaru badań, zaś wielkości odchylenia standardowego na zmniejszanie się dynamiki tych zmian, co jest również widoczne na prezentowanych wykresach (Rys.3, Rys.4, Rys.5, Rys.6).

W wyniku przeprowadzonej klasyfikacji wielkości zmian brzegu wyraźnie widoczne jest zróżnicowanie charakteru tych zmian w poszczególnych przedziałach czasowych. W okresie 1938-51 (Rys.4) w rejonie na zachód od Pobierowa, w Niechorzu i Pogorzeliczy występowały obszary silnych zmian akumulacyjnych  $>1$  m/rok, które zanikły w kolejnych latach. Silne tendencje erozyjne ( $>1$  m/rok) występowały po zachodniej stronie ujścia kanału Liwka oraz przy wschodnim krańcu obszaru badań na odcinku 361.2 – 360 km. Na większości obszaru przeważały tendencje akumulacyjne o wielkości zmian  $0.2 \div 1$  m/rok rozdzielone odcinkami brzegu o charakterze stabilnym ( $0.2 \div -0.2$  m/rok).



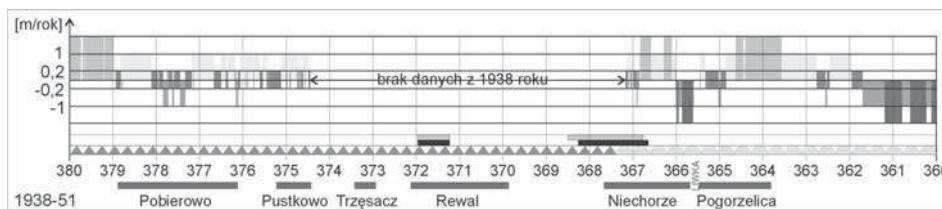
Rys.4. Klasyfikacja zmian położenia linii podstawy wydmy w latach 1938-51

W przedziale czasowym 1951-73 (Rys.5) widoczne jest wyraźne zanikanie obszarów o silnych tendencjach. Odcinki brzegu o silnej tendencji akumulacyjnej w poprzednim okresie, zmieniły swoją tendencję na akumulacyjną, brzeg stabilny, a nawet erozyjną i silnie erozyjną. Świadczy to o wyraźnym zmniejszeniu wielkości zmian brzegu oraz o wielokierunkowej tendencji rozwoju. Większość obszaru badań stanowiły odcinki brzegu o charakterze stabilnym ( $0.2 \div -0.2$  m/rok) i erozyjnym ( $-0.2 \div -1$  m/rok). Odcinki brzegu o silnej tendencji erozyjnej występowały jedynie w rejonie kilometra 369.4, po wschodniej stronie ujścia kanału Liwka oraz we wschodniej części Pogorzeliczy.



Rys.5. Klasyfikacja zmian położenia linii podstawy wydmy w latach 1951-73

W przedziale czasowym 1973-96 (Rys.6) obserwowane jest dalsze zanikanie odcinków brzegu o tendencji akumulacyjnej, co świadczy nasilaniu się tendencji erozyjnych. Jest to szczególnie widoczne na odcinkach brzegu o jednokierunkowym charakterze zmian. Odcinki o tendencji akumulacyjnej w poprzednim okresie przekształciły się w odcinki brzegu stabilnego, zaś odcinki brzegu stabilnego zmieniły swoją tendencję na erozyjną. Odcinki brzegu o silnej tendencji erozyjnej występowały jedynie na zachód od Pobierowa i po zachodniej stronie ujścia kanału Liwka.



Rys.6. Klasyfikacja zmian położenia linii podstawy wydmy w latach 1973-96

Ogólne tendencje zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóza klifu wykazane w niniejszej pracy pozostają w dużej zgodności ze zmianami położenia linii brzegowej wyznaczonymi przez Zawadzka (1999) dla okresu 1875-1979. Na obszarze badań wyróżniony został układ akumulacyjno-erozyjny, co potwierdza zróżnicowanie zachodzących procesów.

Na analizowanym obszarze oddziaływanie budowli hydrotechnicznych na brzeg widoczne jest głównie w postaci zatok erozyjnych występujących na zakończeniach budowli, w cofaniu się linii brzegowej odcinków zabezpieczonych ostrogami i lekkimi opaskami oraz w zmianach szerokości plaży w bezpośrednim sąsiedztwie budowli. W efekcie powoduje ono stopniowe wydłużanie się odcinków brzegu niszczonego w sąsiedztwie budowli ochronnych, czyli nasilanie zjawiska erozji. W świetle uzyskanych wyników można stwierdzić, że ingerencja hydrotechniczna wpływa w sposób trwały i znaczący na przebieg procesów zachodzących w strefie brzegowej oraz na tempo niszczenia brzegów powodując znacznie większe tempo erozji w sąsiedztwie chronionych odcinków brzegu niż na silnie abradowanych brzegach naturalnych (Dudzińska-Nowak, 2006).

## 5. WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad zmiennością morfologii strefy brzegowej z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych oraz przeanalizowano zmiany



położenia linii podstawy wydmy / podnóza klifu, jako wskaźnika tendencji rozwojowych brzegu. Dotychczasową wielkość zmian brzegu określono metodą teledetekcyjną na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych w ciągu ostatnich 60 lat.

Przeprowadzona analiza dokładności przetworzenia zdjęć lotniczych i wykonanych pomiarów wykazała, że przetworzone fotogrametrycznie zdjęcia lotnicze w skalach ok. 1:25000 mogą i powinny być wykorzystywane w dokumentowaniu zmienności brzegu morskiego (Dudzińska-Nowak *et al.*, 2005). Widoczna różnica średniego błędu kwadratowego pomiędzy ortofotografiami dla 1996 roku i seriami historycznych zdjęć, które zostały poddane kalibracji (1951, 1973) nie zmniejsza ich przydatności w prezentowanych badaniach. Do zwiększenia dokładności prezentowanych badań mogłoby przyczynić się jedynie przeprowadzenie procesu ortorektyfikacji historycznych zdjęć lotniczych.

Zarejestrowane na zdjęciach lotniczych sytuacje obrazują sumaryczny efekt oddziaływania procesów zachodzących na brzegu, a więc przeprowadzony na ich podstawie pomiar pośrednio uwzględnia wszystkie czynniki oddziałujące na zmiany położenia linii podstawy klifu w badanym okresie, m. in. zmiany poziomu morza, zniszczenia powstałe wskutek wzbrań sztormowych, oddziaływanie budowli hydrotechnicznych, jak również erozję klifu w wyniku oddziaływania wód gruntowych itp.

We wszystkich okresach zaobserwowano znaczne zróżnicowanie wielkości zmian, nawet na sąsiadujących ze sobą, jednorodnych geomorfologicznie, odcinkach brzegu.

Porównując wykresy wykonane dla przedziałów czasowych 1938-51, 1951-73, 1973-96 (Rys.4, Rys.5, Rys.6) zauważono wyraźne zmniejszenie się wielkości akumulacji. W kolejnych okresach odcinki brzegu akumulacyjnego stają się coraz krótsze, a przyrosty coraz mniejsze. Zaobserwowano również nasilenie się tendencji erozyjnych widoczne, jako zwiększenie ilości odcinków brzegu erodowanego.

W kolejnych okresach zauważono również stopniowe zmniejszanie się dynamiki procesów zachodzących na brzegu widoczne w zmniejszaniu wartości odchylenia standardowego, w spowolnieniu tempa zmian i zanikaniu odcinków brzegu charakteryzujących się silnymi tendencjami akumulacyjnymi (>1 m/rok) i erozyjnymi (>-1 m/rok) oraz w zwiększeniu ilości odcinków brzegu o charakterze stabilnym (0.2 ÷ -0.2 m/rok).

Badania porównawcze 4 serii historycznych zdjęć lotniczych pozwoliły nie tylko na określenie wielkości zmian położenia linii podstawy wydmy w badanym okresie 60 lat, ale przede wszystkim pozwoliły na poznanie dynamiki tych zmian, poprzez analizę stanów pośrednich, co stanowi cenną informację w badaniach nad rozwojem brzegu. Określenie obszarów charakteryzujących się dużą dynamiką i zmiennością procesów morfodynamicznych oraz miejsc relatywnie stabilnych ma duże znaczenie w aspekcie bezpiecznego planowania inwestycji i ochrony nadmorskich obszarów zurbanizowanych.

## 6. LITERATURA

Dobrcki R., Zachowicz J., (red.) 2005. Objasnienia do Mapy Geodynamicznej Polskiej Strefy Brzegowej Bałtyku. Skala 1:10000, Państwowy Instytut Geologiczny Oddział Pomorski, Arkusz: 7 - Pobierowo, 8 - Rewal, 9- Pogorzelica.

Dudzińska-Nowak J., Furmańczyk K., 2005. Wykorzystanie historycznych zdjęć lotniczych do analizy zmian brzegu na przykładzie fragmentu wybrzeża Zatoki Pomorskiej. *Roczniki Geomatyki*, Tom III, zeszyt 4, s. 53-61.

Dudzińska-Nowak J., 2006. Zmienność morfologii strefy brzegowej, jako wskaźnik tendencji rozwojowych brzegu. Instytut Nauk o Morzu US, Szczecin, Rozprawa doktorska.

El-Ashry M.T, 1977. Air photography and coastal problems. *Benchmark Papers in Geology*. No.38. 427.

Furmańczyk K, 1994. Współczesny rozwój strefy brzegowej morza bezplywowego w świetle badań teledetekcyjnych południowych wybrzeży Bałtyku. Uniwersytet Szczeciński. *Rozprawy i Studia*, Tom 161.

Leatherman S.P., 1983. *Shoreline mapping: A comparison of techniques*. Shore and Beach. Vol.51. s. 28-33.

Leatherman S.P., 1993. *Remote sensing applied to coastal change analysis*. Gurney. Foster. Parkinson [ed]. Global Change Atlas.

*Living with coastal erosion in Europe. Sediment and space for sustainability*. Results from EUROSION study. European Communities 2004.

Musielak S., Furmańczyk K., Osadcuk K., Prajs J., 1991. *Fotointerpretacyjny Atlas Dynamiki Strefy Brzegu Morskiego*. Lata 1958-1989. Odcinek Swinoujście-Pogorzelica. Skala 1:5000. 21 sekcji. Instytut Nauk o Morzu US, OPGK Szczecin, pod red Musielaka. Wyd. Urząd Morski Szczecin.

Pruszek Z., 2003. *Akweny morskie. Zarys procesów fizycznych i inżynierii środowiska*. IBW PAN. Gdańsk.

Stafford D.B., Langfelder J., 1971. *Air photo survey for coastal erosion*. Photogrametric Engineering. No.6. 556-575.

Zawadzka-Kahlau E., 1999. *Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku południowego*. GTN. IBW. Gdańsk.

## **TRENDS IN COAST DEVELOPMENT AS DETERMINED BY REMOTE SENSING RESEARCH**

KEY WORDS: coastal zone, coastline changes, remote sensing, southern Baltic

### **Summary**

In the last years, the intensity of erosion processes have been observed worldwide (Zawadzka 1999, Pruszek 2003, Living with erosion...2004). Consequently, coastal zone problems have become a focus of interest for researchers representing different scientific disciplines. The complexity of processes operating in the coastal zone, their causes, and effects are very difficult to describe and analyse. Previous efforts to explain interactions between the litho-, hydro-, and atmosphere were not successful. Using remote sensing data makes it possible to collect short- and long-time observation series on coastline changes, whereby coast development processes may be followed. Photogrammetric georeferenced aerial photographs, taken in different years, supply short and long-term observation series.

The area of study was a 20 km long stretch of the western Polish coast in the Rewal municipality (Maritime Bureau km 380-360). Analyses were carried out based on 4 series of aerial photograph taken in 1938, 1951, 1973, and 1996. The 1996 series was used to develop an orthophotomap, which was subsequently used to calibrate the remaining series (1938, 1951, and 1973). The dune base /cliff foot line was identified on every picture in each year. The changes in the location was calculated in different time spans (1938-51, 1951-73, 1973-96). Results of the calculations were used to analyse trends in the coast development and the rate of the changes; classification of dynamics changes was effected as well.

Based on coastline change diagrams for 1938-1951, 1951-1973 and 1973-96, the magnitude of coast accretion and erosion in the area were analysed. As indicated by the results obtained, the Rewal municipality coast is erosive. In all the periods analysed, a substantial diversity of the magnitude of changes was observed, even in neighbouring, morphologically homogenous areas. The temporal analysis indicates an increase in the length of the coast affected by erosion; at the same time, the accretion area has been reduced; the accumulative sections of the coast have become shorter and shorter.

The situation recorded in aerial photographs represents a net effect of coastal processes, so measurements taken indirectly incorporate effects of every factor that produced changes in the dune base /cliff foot line position in an individual period, e.g., sea level changes, storm surge damages, impacts of coastal defence structure (link side effect), and other human activities. Application of aerial photographs to measurements of dune base line changes makes it possible to look for patterns in coastline development. Identification of dangerous sections of the coast, affected by heavy coastal erosion and high dynamics of changes is very important for spatial planning, coastal protection, and their activities, particularly in the part of the coast exposed to erosion hazard.

dr Joanna Dudzińska-Nowak  
e-mail: [jotde@univ.szczecin.pl](mailto:jotde@univ.szczecin.pl)  
tel. 091 4442353  
fax: 091 4442451