

**WYKORZYSTANIE HISTORYCZNYCH ZDJĘĆ
LOTNICZYCH DO ANALIZY ZMIAN BRZEGU
NA PRZYKŁADZIE FRAGMENTU
WYBRZEŻA ZATOKI POMORSKIEJ**

**ANALYSIS OF THE COASTLINE CHANGES
WITH THE USE OF HISTORICAL AERIAL PHOTOGRAPHS
OF A PART OF THE POMERANIAN BAY**

Joanna Dudzińska-Nowak, Kazimierz Furmańczyk

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

Słowa kluczowe: zdjęcia lotnicze, strefa brzegowa, zmiany linii brzegowej
Keywords: air photographs, coastal zone, coastline changes

Wstęp

Poznanie prawidłowości zmian położenia linii brzegowej ma zasadnicze znaczenie dla przewidywania zmian jakie mogą zajść w strefie brzegowej pod wpływem przyspieszonego wzrostu poziomu morza obserwowanego w ostatnim dziesięcioleciu, szczególnie w aspekcie zagrożenia erozją brzegów. Prawidłowości rozwoju linii brzegowej mają kluczowe znaczenie dla rozwoju regionalnego, zagospodarowania przestrzennego, rozwoju turystyki oraz ochrony krajobrazu, z naciskiem na bezpieczeństwo brzegu i jego infrastruktury, a także planowanie rozwiązań prawnych i finansowych w odniesieniu do obszarów zagrożonych zniszczeniem. Mimo rozwoju nowych technik, przetwarzanie fotogrametryczne zdjęć lotniczych strefy brzegowej, ze względu na jej specyfikę, stwarza duże problemy. W ramach projektu badawczego, realizowanego w Zakładzie Teledetekcji i Kartografii Morskiej Uniwersytetu Szczecińskiego, „Teledetekcyjne badania tendencji zmian położenia linii brzegowej wybrzeża Zatoki Pomorskiej (3P04E05023)” finansowanego ze środków KBN, przetworzono historyczne zdjęcia lotnicze, w sposób umożliwiający ich wykorzystanie w badaniach strefy brzegowej. W efekcie otrzymano 4 serie zdjęć lotniczych w jednolitym układzie PUWG1992/19 stanowiące materiał wyjściowy do określenia położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu w poszczególnych rocznikach. Pozwoliły one na określenie zmian brzegu, w badanym okresie czasu.

Obszar badań obejmuje wschodnie wybrzeże Zatoki Pomorskiej od Świnoujścia do Dźwierzyna. Na obszarze tym występują dwa typy brzegów: klifowe zbudowane z osadów plejstoceńskich i barierowo-wydmowe zbudowane z osadów holocenijskich. Brzegi klifowe wystę-

pują w miejscach, gdzie wysoczyzna morenowa dochodzi bezpośrednio do linii brzegowej. Brzegi barierowo-wydmowe rozwijają się w miejscach bezpośredniego kontaktu z morzem obszarów niskich i płaskich (Musielak, 2005).

Zmiany linii brzegowej morza w prezentowanych badaniach dotyczą zmian położenia linii podstawy wydmy lub linii podnóża klifu. Linia styku wody i lądu, jako bardzo dynamiczna i zmieniająca się nawet pod wpływem większego falowania nie może być traktowana jako punkt odniesienia (Furmańczyk, Musielak 1993, Furmańczyk 1994). Natomiast analiza zmian położenia linii podstawy wydmy lub podnóża klifu może być traktowana jako miarodajny wskaźnik dynamiki brzegu (Dudzińska-Nowak, Furmańczyk 2005).

Materiały: mapy i zdjęcia lotnicze

Mapy. Do opracowania wybrano jednostrefowy układ odniesienia PUWG1992/19 oparty na elipsoidzie GRS-80 (*Geodetic Reference System 1980*). Wykorzystano 18 arkuszy map topograficznych w skali 1:10000 wydanych w latach 1970-1980 przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w układzie odniesienia PUWG1965. Arkusze map zeskanowano na skanerze bębnowym OCE 9400 (Geomar S.A.) i poddano procesowi kalibracji geometrycznej. Następnie na podstawie 29 punktów siatki topograficznej dokonano zmiany odwzorowania na układ odniesienia PUWG1992/19. Do szczegółowej analizy obszaru strefy brzegowej wykorzystano mapy Pasa Technicznego Urzędu Morskiego w skali 1:2000 wydane w latach 1987-89 przez Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne w Szczecinie w układzie odniesienia PUWG1965. Badany obszar obejmuje 84 arkusze map. Arkusze map, tak jak w przypadku map topograficznych, zeskanowano na skanerze bębnowym OCE 9400 (Geomar S.A.) i poddano procesowi kalibracji geometrycznej oraz dokonano zmiany odwzorowania na układ odniesienia PUWG1992/19.

Zdjęcia lotnicze. Do opracowania wykorzystano cztery serie historycznych zdjęć lotniczych, obejmujących swoim zasięgiem obszar wybrzeża od Świnoujścia na zachodzie do Kołobrzegu na wschodzie, znajdujących się w zbiorach Zakładu Teledetekcji i Kartografii Morskiej Uniwersytetu Szczecińskiego (ZTiKM US).

1. Seria panchromatycznych, niemieckich fotomap wykonanych w 1938 roku w skali 1:25000. Data wykonania zdjęć lotniczych, z których sporządzono fotomapy nie jest znana, a materiały źródłowe nie są dostępne.

Fotomapy zostały udostępnione dzięki uprzejmości prof. Reinharda Zoelitz-Moellera, dyrektora Instytutu Geografii i Geologii Uniwersytetu w Greifswaldzie w postaci rastrowej. 14 arkuszy fotomapy poddano procesowi kalibracji w celu zmiany odwzorowania na układ odniesienia PUWG1992/19.

2. Dwie serie panchromatycznych zdjęć lotniczych

- zdjęcia wykonane w 1951 roku w skali 1:22 000 (35 szt.)

- zdjęcia wykonane w 1973 roku w skali 1:28 000 (31 szt.)

Diapozytywy zdjęć lotniczych zostały zeskanowane na skanerze fotogrametrycznym UltraScan 5000 przez firmę ECO GIS z Warszawy z rozdzielczością 21 ęm (piksel terenowy wielkości 0,46 metra w przypadku zdjęć w skali 1:22 000 i 0,59 metra w skali 1:28 000). Zdjęcia w postaci rastrowej zapisano w formacie TIF i poddano procesowi kalibracji w celu zmiany odwzorowania na układ odniesienia PUWG1992/19.

3. Seria barwnych zdjęć lotniczych wykonanych w 1996 roku w ramach Programu PHARE (w skali 1:26 000) – 49 diapozytywów zdjęć położonych w 22 szeregach. Diapozytywy zdjęć lotniczych zeskanowano dzięki uprzejmości prof. J. Jachimskiego oraz dra A. Boronia z Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej Akademii Górniczo-Hutniczej na skanerze fotogrametrycznym Photoscan TD1. Rozdzielczość skanowania wynosiła 21 μ m (piksel terenowy wielkości 0,55 metra).

Przetworzenie zdjęć lotniczych

Przetworzenie zdjęć wykonanych w 1996 roku

Serię barwnych zdjęć z 1996 roku wykorzystano do opracowania ortofotomapy. Całość prac związanych z wykonaniem ortofotomapy przeprowadzono na cyfrowej stacji fotogrametrycznej INPHO udostępnionej dzięki uprzejmości firmy Geomar S.A.

Aerotriangulacja. Programem Match-AT wykonano aerotriangulację (kameralne zagęszczanie osnowy terenowej). Zidentyfikowano na zdjęciach 95 punktów terenowej osnowy fotogrametrycznej – tzw. fotopunktów (ang. *Ground Control Point* – GCP), których współrzędne terenowe odczytano z cyfrowych map topograficznych w skali 1:10000 (PUWG1992/19). Z map tych odczytano również współrzędne płaskie środków rzutów (ang. *projection center*), a jako współrzędne wysokościowe przyjęto wysokość fotografowania. Zidentyfikowano na zdjęciach 1528 punktów wiążących (ang. *tie point*) zdjęcia w szeregach i między szeregami. Wykorzystując parametry kamery lotniczej oraz ww. współrzędne przeprowadzono kolejno: orientację wewnętrzną i zewnętrzną zdjęć lotniczych, a następnie wyrównanie aerotriangulacji. Wyniki wyrównania spełniają warunki określone w wytycznych technicznych (G-1.8, 1984) dla zdjęć lotniczych w skalach 18000–35000, tj., błędy średnie wyznaczenia współrzędnych punktów zidentyfikowanych na zdjęciach (czyli punktów naturalnych) mieszczą się odpowiednio dla X,Y w przedziale 63–122 cm, a dla Z do 200 cm.

Ortorektifikacja. Następnie programem OrthoMaster v.4.0. przeprowadzono ortorektifikację zdjęć lotniczych w celu usunięcia zniekształceń tych zdjęć, spowodowanych różnicami wysokości powierzchni terenu oraz odchyleniem osi optycznej kamery od pionu w momencie wykonania zdjęcia. Do przetworzenia różniczkowego wykorzystano numeryczny model rzeźby terenu obejmujący obszar wybrzeża Zatoki Pomorskiej o szerokości 2 km, wygenerowany w ZTiKM US na podstawie cyfrowych map topograficznych w skali 1:10000 (cięcie warstwicowe 1.25 m). W wyniku uzyskano jednorodny pod względem skali zbiór ortofotografii w PUWG1992/19.

Uproszczone przetworzenie zdjęć z roku 1951 i roku 1973 oraz fotomap z roku 1938

Kalibracja. W przypadku starszych zdjęć lotniczych (historycznych) zgromadzenie wszystkich danych, niezbędnych do przeprowadzenia procesu ortorektifikacji, było praktycznie niemożliwe. Dlatego nie utworzono z tych roczników zdjęć ortofotomapy. Wykonano natomiast, stosując program Erdas Imagine v.8.6, kalibrację zdjęć lotniczych do PUWG1992/19 z wykorzystaniem omówionych w poprzednim rozdziale ortofotografii. Kalibracja polega na identyfikacji kilku GCP, o znanych współrzędnych terenowych, na ekranie

i określeniu ich współrzędnych w układzie współrzędnych ekranowych. Następnie wykonywana jest transformacja z układu współrzędnych ekranowych do układu współrzędnych terenowych. Zastosowanie takiej metody nie pozwala na poprawne przekształcenie geometrii całego obszaru zdjęcia lotniczego z rzutu środkowego na rzut ortogonalny, co jest niezbędnym warunkiem uzyskania kartometrycznego obrazu. Z tego względu zdecydowano się na wykorzystanie w dalszym opracowaniu jedynie użytecznej części zdjęcia, tj. takiej, w obrębie której przesunięcia liniowe punktów spowodowane zarówno deniwelacją terenu jak i nachyleniem zdjęcia są najmniejsze i mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. Przy takim podejściu dokładność zastosowanej metody jest wystarczająca i pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników pomiarów.

Trudności w przetwarzaniu zdjęć lotniczych strefy brzegowej. Przetwarzanie fotogrametryczne zdjęć lotniczych strefy brzegowej, ze względu na jej specyfikę, jest zadaniem trudnym pomimo rozwoju nowych technik pomiarowych. Problem tkwi w niemożności poprawnego określenia parametrów orientacji zdjęcia, którego znaczną część stanowi obraz wody. Występuje tu swoisty konflikt. Najbardziej przydatnymi do analiz brzegu byłyby zdjęcia z punktem głównym na morzu, i co za tym idzie z dobrze widocznymi elementami plaży, ale na tych zdjęciach nie ma możliwości równomiernego rozmieszczenia GCP. Pozostaje więc konieczność wykorzystywania zdjęć z punktem głównym na lądzie, na których można we właściwy sposób zaprojektować GCP, ale na których w przypadku wybrzeża klifowego interpretacja staje się niemożliwa. Najlepsze dopasowanie uzyskuje się dla obszaru zdjęcia otoczonego GCP w terenie o małych deniwelacjach (Kurczyński, Preuss, 2000). Brzeg morski, szczególnie klifowy, charakteryzuje się dosyć dużymi różnicami wysokości terenu, które dla klifów w rejonie miejscowości Rewal i Niechorze wynoszą do 20 m, ale już dla klifów wyspy Wolin sięgają nawet 95 m (wzgórze Gosań). GCP należy projektować na terenach stabilnych, czyli jedynie na lądzie i w pewnej odległości od dynamicznej strefy brzegowej, a więc na wysokości reprezentowanej przez koronę klifu (10–95 m). Położenie elementów brzegu będzie obciążone, nawet po kalibracji, błędami deniwelacji i nachylenia zdjęcia, które szczegółowo omówiono w rozdziale „Analiza dokładności uproszczonego przetwarzania zdjęć”. Dodatkowe utrudnienie stanowią występujące często w pobliżu brzegu obszary zalesione, w których lokalizacja GCP jest bardzo trudna, a najczęściej niemożliwa.

Transformacja liniowa. Jak wyżej opisano, z braku innych możliwości, kalibrację wcześniejszych (historycznych) zdjęć lotniczych wykonano programem Erdas Imagine v.8.6 na podstawie ortofotografii sporządzonych ze zdjęć z 1996 roku (PUWG1992/19). W celu uniknięcia, w procesie przetwarzania, rozciągania obszaru zdjęcia, które spowodowałyby niemożliwe do wyeliminowania przesunięcia położenia punktów, a w rezultacie zwiększenie błędów, przeprowadzono transformację liniową z wykorzystaniem wielomianu 1 stopnia. GCP lokalizowano głównie w obrębie użytecznej części zdjęcia wybierając, jako najbardziej niezmiennie w czasie, miejsca przecięcia się osi dróg i ulic. W efekcie otrzymano 4 serie zdjęć lotniczych w jednolitym układzie PUWG1992/19 stanowiące materiał wyjściowy do określenia położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu w poszczególnych rocznikach. Pozwoliły one na pomiar zmian brzegu, a tym samym na określenie miejsc szczególnie zagrożonych w aspekcie erozji morskiej.

Analiza dokładności uproszczonego przetworzenia zdjęć

Dokładność kalibracji zdjęć lotniczych uzależniona jest od (Kurczyński, Preuss 2000; Bartoszewicz i in. 1974; Ciołkosz i in. 1999):

- 1) błędów wynikających z geometrii zdjęcia lotniczego:
 - a) przesunięć liniowych spowodowanych różnicami wysokości powierzchni terenu,
 - b) przesunięć liniowych spowodowanych nachyleniem zdjęcia,
- 2) dokładności danych referencyjnych (w tym przypadku ortofotografii),
- 3) poprawności lokalizacji punktów referencyjnych GCP na zdjęciach,
- 4) równomiernego rozmieszczenia punktów referencyjnych GCP na obszarze całego zdjęcia,
- 5) jakości radiometrycznej i geometrycznej zdjęć.

Równomierne rozmieszczenie GCP (pkt. 4). Dla zdjęć strefy brzegowej warunek ten nie może być spełniony.

Deniwelacja terenu (pkt. 1a). Wartość przesunięcia obiektu na zdjęciu spowodowana deniwelacją terenu zależy od jego położenia względem punktu nadirowego i może wynieść nawet 17 m dla skali 1:26 000, tj. w najbardziej niekorzystnym przypadku (gdy punkt na zdjęciu znajduje się w odległości 50 mm od punktu nadirowego, a deniwelacje terenu osiągają 100 m). Z obliczeń wynika, że na obszarach wydmych, gdzie deniwelacje dochodzą do 10 m, nawet przy niekorzystnym położeniu GCP maksymalny błąd lokalizacji wyniesie 1,7 m. Na obszarze niewysokich klifów, gdzie deniwelacje dochodzą do 20 m, przy najbardziej niekorzystnym położeniu GCP maksymalny błąd lokalizacji wyniesie do 3,4 m. Przy interpretacji obszarów o dużych deniwelacjach terenu – powyżej 50 m (klify wyspy Wolin) przy niekorzystnym położeniu punktu GCP maksymalny błąd może osiągnąć nawet 17 m, co właściwie wyklucza dany obszar z opracowania.

Nachylenie zdjęcia (pkt. 1b). Dla maksymalnego kąta odchylenia osi optycznej kamery od pionu (3°) przesunięcie liniowe spowodowane nachyleniem zdjęcia w najbardziej niekorzystnym przypadku wynosi 13,4 m na zdjęciach w skali 1:22000, 15,8 m na zdjęciach w skali 1:26 000 i 17 m na zdjęciach w skali 1:28000. Najczęściej jednak kąt nachylenia zdjęcia wynosi $\sim 1,5^\circ$ co automatycznie redukuje wielkość przesunięć liniowych o połowę.

Geometria zdjęcia (pkt. 1) Maksymalny błąd wynikający z geometrii zdjęcia lotniczego jest określony przez sumę błędów spowodowanych różnicami wysokości powierzchni terenu i nachylenia zdjęcia. W najbardziej niekorzystnym przypadku na skraju zdjęcia, na obszarach wydmych wyniesie on 15,1 m dla zdjęć w skali 1:22 000 i 18,7 m dla zdjęć w skali 1:28 000. Na obszarach niewysokich klifów wyniesie on 16,8 m dla zdjęć w skali 1:22000 i 20,4 m dla zdjęć w skali 1:28000, a przy deniwelacjach terenu dochodzących do 95 m (klify wyspy Wolin) i interpretacji obiektów w oddaleniu od punktu głównego może wynieść 33,9 m (ok. 1,5 mm na zdjęciu).

Wszystkie zdjęcia lotnicze są obciążone tymi błędami, natomiast ortofotografie są już ich pozbawione.

Analiza dokładności kalibracji. W celu oceny dokładności kalibracji historycznych zdjęć lotniczych, która w sposób bezpośredni wpływa na dokładność pomiarów na zdjęciach, dla każdego rocznika zdjęć (1938, 1951, 1973, 1996) sporządzono, stosując program Erdas Imagine v.8.6., geometryczną warstwę wektorową zawierającą GCP. Punkty te wybrano (zlokalizowano) głównie w pasie przybrzeżnym. Wybierano głównie punkty znajdujące się na przecięciu osi dróg, ze względu na jednoznaczność ich lokalizacji oraz najmniejszą, spo-

śród innych obiektów odfotografowanych na zdjęciu, zmienność czasową, co odgrywa znaczącą rolę przy kalibracji zdjęć historycznych, wykonanych w przedziale czasowym rzędu kilkudziesięciu lat. Jako warstwę referencyjną przyjęto warstwę stworzoną dla ortofotografii ze zdjęć z 1996 roku, zawierającą 238 GCP. Następnie zidentyfikowano te same punkty na zdjęciach historycznych (1938 – 100 GCP, 1951 – 156 GCP, 1973 – 168 GCP). Zróżnicowana liczba zidentyfikowanych punktów dla poszczególnych serii zdjęć wynika z faktu, iż na niektórych zdjęciach wcześniejszych niemożliwe było określenie lokalizacji GCP z powodu zmian zagospodarowania terenu (np. punkt znajdował się na nowo wybudowanym skrzyżowaniu), ze względu na zmieniającą się strukturę roślinności oraz z powodu zasłonięcia danego punktu przez inne obiekty (np. drzewa, budynki).

Na podstawie porównania położenia (współrzędnych terenowych X,Y) GCP zlokalizowanych na zdjęciach z poszczególnych roczników z warstwą referencyjną obliczono wielkości średniego błędu kwadratowego (ang. *real mean square error* – RMS) określającego dokładność kalibracji zdjęć lotniczych odpowiednio dla roczników zdjęć 1938, 1951, 1973 względem ortofotografii 1996. Obliczony błąd RMS dla poszczególnych roczników zdjęć wynosi: 4,66 m dla serii niemieckich fotomap z 1938 roku, 2,77 m dla serii zdjęć z 1951 roku, 2,37 m dla serii zdjęć z 1973 roku. Analizując te wyniki należy pamiętać, że dotyczą one tylko części użytecznej zdjęć, na której zlokalizowano GCP, a na pozostałym obszarze wartości przesunięcia położenia są na tyle duże, że wykluczają wykorzystanie tych obszarów zdjęć z dalszego opracowania..

Największym średnim błędem kwadratowym RMS obarczone są pomiary na niemieckich fotomapach. Wynika to z faktu, że nie dysponowano oryginalnymi zdjęciami, a tylko materiałem przetworzonym, który został obciążony błędami w procesie przetwarzania, na które składają się zniekształcenia powstałe w procesie wytwarzania fotomapy, zniekształcenia papieru fotograficznego oryginalnych fotomap, zniekształcenia w procesie skanowania. Wartości RMS dla pozostałych serii zdjęć nie przekraczają 5 pikseli.

Selekcja materiału do dalszego opracowania. Ze względu na brak możliwości lokalizacji punktów na plaży, GCP znajdują się na klifie lub na obszarze wydmy, a więc wyżej niż linia podstawy wydmy / podnóża klifu. W zależności od usytuowania tej linii w stosunku do punktu głównego zdjęcia dokładność pomiaru jej położenia określa RMS dla danej serii zdjęć, błąd deniwelacji oraz przesunięcie spowodowane nachyleniem zdjęcia. Założono, że linię podstawy wydmy / podnóża klifu można zidentyfikować na zdjęciu lotniczym z błędem rzędu ± 1 m. Na podstawie analizy usytuowania linii podstawy wydmy / klifu na poszczególnych zdjęciach z uwzględnieniem jej odległości od punktów nadirowego, izocentrycznego i obszarów podwójnego pokrycia oraz wysokości brzegu wyselekcjonowano odcinki brzegu gdzie maksymalny błąd zniekształcenia obrazu potencjalnie nie powinien przekroczyć 2 m w terenie.

Pomiar linii brzegowej

Na czterech seriach zdjęć lotniczych (1938, 1951, 1973, 1996) badanego obszaru zinterpretowano położenie linii podstawy wydmy lub podnóża klifu określając w ten sposób przebieg linii brzegowej w danym roku. Na podstawie Map Pasa Technicznego w skali 1:2000 odczytano lokalizację punktów kilometrażu Urzędu Morskiego, które po połączeniu stanowiły łamaną linię bazową do pomiaru zmian brzegu. Mierzono odległość od linii bazowej do

wyznaczonej linii podstawy wydmy/podnóża klifu, prostopadle do linii bazy w odstępach co 10 m osobno dla każdego rocznika zdjęć. Następnie obliczono różnicę odległości w okresach 1938–1951, 1951–1973, 1973–1996, która stanowi rzeczywiste zmiany brzegu. Ze względu na zbyt duże błędy pominięto w badaniach obszary wysokich klifów wolińskich.

Analiza wyników pomiaru

Wyniki pomiaru linii podstawy wydmy dla rejonów ujść rzecznych przedstawiono na wykresach (rys. 1, 2 i 3). Oś pionowa określa wartość zmian położenia linii podstawy wydmy w przedziałach czasowych 1938–1951, 1951–1973, 1973–1996 [m], a oś pozioma przedstawia lokalizację według kilometrażu brzegu Urzędu Morskiego [km]. Odcinki brzegu w rejonie ujściowym rzek Świny (rys.1), Dziwny (rys.2) i Regi (rys.3) charakteryzują się zróżnicowaną dynamiką zachodzących procesów morfodynamicznych, przy czym ich przebieg na każdym z tych obszarów wygląda inaczej.

Ujście Świny. Obszar ujściowy rzeki Świny charakteryzuje się największą dynamiką zmian. Zwraca uwagę fakt, że zmiany te nie są równomierne w czasie. Największą akumulację obserwujemy w okresie 1938–1951. Na zachodnim brzegu Świny przekroczyła ona 160 m, a na wschodnim 100 m. Tak ogromny przyrost wynika z faktu, że w okresie przed II wojną światową obszar plaży w Świnoujściu był intensywnie wykorzystywany na potrzeby wypoczywającej tam ludności, co znacznie ograniczało możliwości ekspansji roślinności wydmowej. W czasie wojny i w latach powojennych roślinność wydmy bardzo szybko rozprzestrzeniła się, powiększając znacznie obszar wydmy i tym samym w znaczący sposób przesuwając linię podstawy wydmy w stronę morza. W późniejszych latach, 1951–1973 wyraźnie widać zmniejszenie przyrostu plaży szczególnie na zachodnim brzegu rzeki, jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie falochronu ujściowego przekracza on 20 m. Zmiany w tym samym okresie na wschodnim brzegu również są mniejsze, ale w dalszym ciągu przyrosty można zaliczyć do znacznych. W latach 1973–1996 akumulacja na zachodnim brzegu pozostaje na poziomie z poprzedniego okresu. Natomiast na wschodnim brzegu w tym okresie, wielkość przyrostu brzegu ulega znacznemu obniżeniu, a w rejonie km 422–423 możemy obserwować nawet erozję. Pomimo wyraźnego zmniejszenia się tempa akumulacji w badanym okresie czasu widoczny jest akumulacyjny charakter tego odcinka brzegu.

Ujście Dziwny. Zupełnie inny charakter ma brzeg w rejonie ujścia rzeki Dziwny. W rejonie tym widoczna jest bardzo wyraźna tendencja erozyjna. W latach 1938–1951 zachodni brzeg Dziwny szczególnie pomiędzy km 392–394 był silnie erodowany. W następnych latach odcinek ten nadal zachowuje tendencję erozyjną. Wielkość ubytków brzegu znacznie się zmniejsza, ale równocześnie zmienia się z akumulacyjnego na erozyjny charakter odcinka 394–395 km. Wschodni brzeg rzeki Dziwny również ma charakter erozyjny. W latach 1938–1973 obejmował on fragment brzegu pomiędzy 388 a 391 km, natomiast w latach 1973–1996 obejmował już praktycznie cały przedstawiony obszar. Widoczna w rejonie km 390–391 akumulacja może być wynikiem skutecznych zabiegów ochrony brzegu (sztucznego zasilania plaży) prowadzonych przez Urząd Morski w Szczecinie na tym odcinku w latach 1988, 1993 i 1996.

Ujście Regi. Dużą dynamikę zmian możemy obserwować w rejonie ujścia rzeki Regi. Na zachodnim brzegu rzeki w badanym okresie nastąpiło odwrócenie tendencji rozwojowych brzegu. W latach 1938–1951 na odcinku 354–356 km nastąpiła znaczna akumulacja (ok.30

m) natomiast w pobliżu ujścia rzeki brzeg miał charakter erozyjny. W latach 1951–1973 na odcinku 352,30-355,80 km nastąpiła akumulacja plaży. W późniejszym okresie nastąpiła stabilizacja brzegu charakteryzująca się zmniejszeniem przyrostów plaży przy zachowaniu akumulacyjnego charakteru. Znaczną akumulację można obserwować jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie falochronów ujściowych rzeki Regi. Na wschodnim brzegu Regi pogłębiła się tendencja erozyjna na odcinku 350,50-352 km i zmieniła się z akumulacyjnej w latach 1938–1951 na erozyjną w późniejszym okresie na odcinku 348,50-350,50.

Wnioski

Zastosowana metoda kalibracji historycznych zdjęć lotniczych z wykorzystaniem wielomianu 1 stopnia może być z powodzeniem stosowana w przypadku brzegów wydmych i niewysokich klifów (do 20 m w zależności od przebiegu linii brzegowej w stosunku do punktu głównego zdjęcia). W przypadku badanego obszaru od Świnoujścia do Dźwirzyna oznacza to wykluczenie z analizy obszaru wysokich klifów wolińskich.

Wykorzystana metoda pozwoliła na określenie zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu praktycznie w sposób ciągły. W odróżnieniu od dotychczas stosowanych w państwowym monitoringu brzegu pomiarów w profilach co kilkaset metrów, może ona w przyszłości pozwolić na opisanie prawidłowości zmian brzegu.

Przeprowadzone badania porównawcze dla serii zdjęć z 1938, 1951, 1973 i 1996 roku pozwoliły nie tylko na określenie wielkości zmian położenia linii podstawy wydmy / podnóża klifu 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.

W rejonie ujść rzecznych obserwowana jest zróżnicowana dynamika brzegu. Spośród przedstawionych fragmentów największe, akumulacyjne zmiany położenia linii podstawy wydmy obserwujemy w rejonie ujścia rzeki Świny, co wynika z jego lokalizacji w obszarze konwergencji wzdłużbrzegowych potoków rumowiska. Dużą dynamikę zmian, ale znacznie mniejszą niż w przypadku Świny, wykazuje również ujście Regi. Jednak na tym obszarze zmiany zachodzą w obu kierunkach. Zachodni brzeg wykazuje niewielką tendencję akumulacyjną, natomiast na wschodnim brzegu zmiany są zdecydowanie większe i mają charakter erozyjny. Najmniejszą dynamikę wykazuje ujście rzeki Dziwny o wyraźnie erozyjnej tendencji.

Analiza dynamiki zmian położenia linii podstawy wydmy w rejonie odcinków ujściowych rzek potwierdziła badania tendencji zmian brzegu Musielaka (Musielak, Furmańczyk, 2005) wykazując, że obszary te charakteryzują się dużym zróżnicowaniem i zmiennością działających procesów morfodynamicznych.

Przeprowadzone badania mogą być przydatne w ochronie brzegu, przy określaniu miejsc ulegających dynamicznym zmianom oraz miejsc relatywnie stabilnych. Wyznaczenie takich odcinków brzegu ma szczególne znaczenie w aspekcie zagrożenia obszarów zurbanizowanych erozją oraz bezpiecznego planowania inwestycji w tym obszarze w ramach zintegrowanego zarządzania obszarami przybrzeżnymi.

Literatura

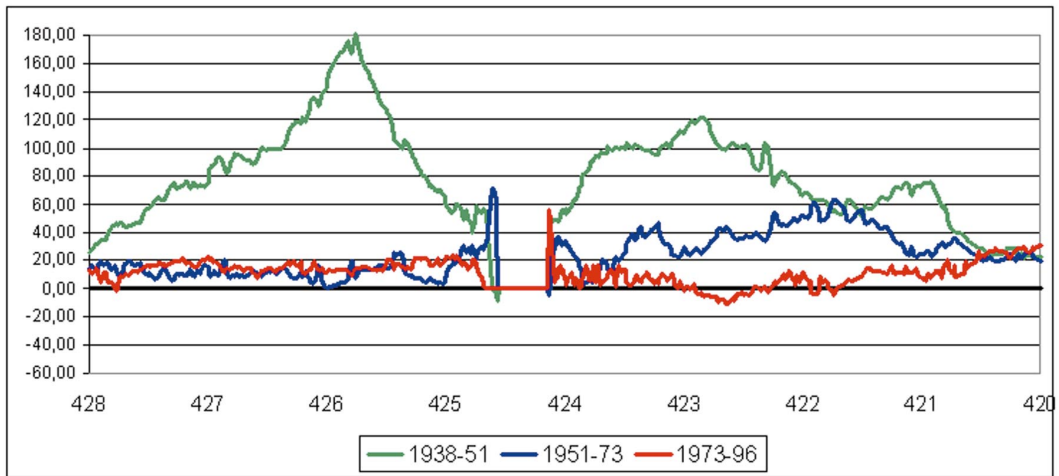
- Bartoszewicz S., Pęczek L., Preuss R., 1974: Ćwiczenia z fotogrametrii. Część I. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
- Ciołkosz A., Miszański J., Olędzki J.R., 1999: Interpretacja zdjęć lotniczych. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Dudzińska-Nowak J., Furmańczyk K., 2005: Zmiany położenia linii brzegowej Zatoki Pomorskiej (w latach 1938-1996). Środowisko przyrodnicze wybrzeży Zatoki Pomorskiej i Zalewu Szczecińskiego. Wybrane aspekty. red. Borówka R.K. Musielak S. Szczecin. s.72-78.
- Furmańczyk K., Musielak S., 1993: Analiza zmian brzegów i prognoza zagrożeń Półwyspu Helskiego w świetle badań teledetekcyjnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 1. s.18-22.
- Furmańczyk K., 1994: Współczesny rozwój strefy brzegowej morza bezpływowego w świetle badań teledetekcyjnych południowych wybrzeży Bałtyku. Uniwersytet Szczeciński, *Rozprawy i studia* t.161. Szczecin. 150 s.
- Musielak S., Furmańczyk K., 2005: Fizyczno-geograficzna charakterystyka odcinka Niechorze – Międzyzdroje. ZZOP w Polsce – stan obecny i perspektywy. Problemy erozji brzegu. Szczecin. s.73-83.
- Kurczyński Z., Preuss R., 2000: Podstawy fotogrametrii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
- Wytyczne techniczne G-1.8 Aerotriangulacja analityczna 1984: Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Warszawa.

Summary

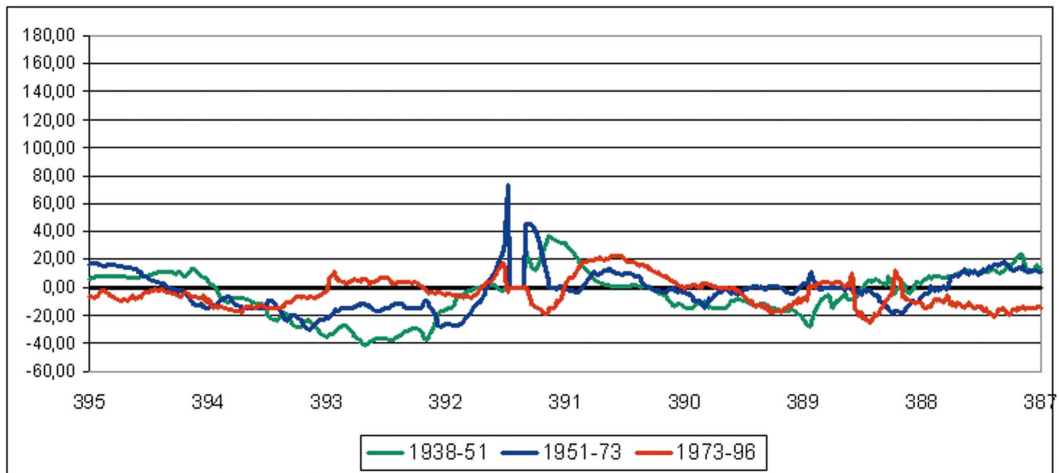
The knowledge about long- and short-term coastal changes plays a key role in Integrated Coastal Zone Management processes. This project was realized in the Laboratory of Remote Sensing and Marine Cartography of the University of Szczecin, within the framework of „Remote sensing research of the tendency the coastline changes of the Pomeranian Bay (3P04E05023)” financed from the State Committee for Scientific Research (KBN) resources. The following data were used in this project: historical aerial photographs taken in 1938, 1951, 1973, 1996, topographic maps in the scale 1:10000, technical belt maps in the scale 1:2000 and DEM created for 2 km wide coastal belt. The area of research is 100 km long and is located at the Eastern part of Pomeranian Bay from Swinoujście to Kolobrzeg. On the basis of the aerial photographs taken in 1996 with the use of DEM and OrthoMaster software an orthophotomap was created. The others aerial photographs taken in 1938, 1951 and 1973 were calibrated on the basis of this orthophotomap. Finally, all aerial photographs and maps were transferred into the same coordinate system PUWG1992/19. A dune base line / cliff food line and the geodetic monuments (kilometrage of the coast) were identified on every picture. Changes of dune base line / cliff food line location in time were measured. Results were presented for three selected areas of the coast located near Swina, Dziwna and Rega river mouths. The analysis of the coastal changes in the river mouth areas shows that this sections of the coast are very dynamic and have a big variability of the morphodynamic processes. This research can be useful in the protection of the coast, indicating relatively stable or dynamic places along the coast. The knowledge about such places is very important in the aspect of erosion hazard and safe planning in the Integrated Coastal Zone Management.

mgr Joanna Dudzińska-Nowak
Doktorantka Instytutu Nauk o Morzu US
jotde@univ.szczecin.pl

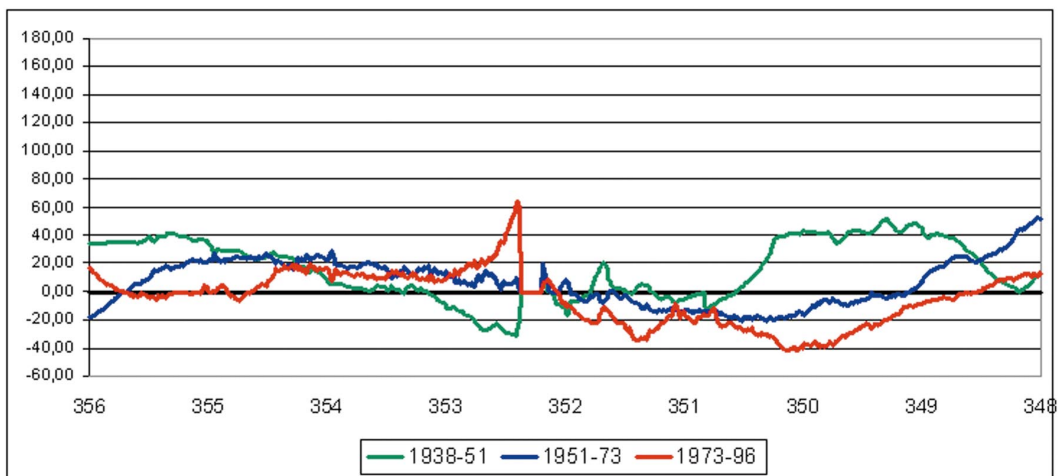
dr hab. Kazimierz Furmańczyk, prof. US
kaz@sus.univ.szczecin.pl



Rys. 1. Zmiany położenia linii brzegowej w rejonie rzeki Świny w latach 1938–1996



Rys. 2. Zmiany położenia linii brzegowej w rejonie rzeki Dziwny w latach 1938–1996



Rys. 3. Zmiany położenia linii brzegowej w rejonie rzeki Regi w latach 1938–1996