

Analiza zdjęć lotniczych oraz wyników pomiarów geodezyjnych w badaniach dynamiki strefy brzegowej sztucznych zbiorników wodnych – zbiornik Jeziorsko, rzeka Warta

Using of the aerial photogrammetry and terrain measuring in monitoring shore zone of Jeziorsko Reservoir (Warta River, Central Poland)

Halina Kaczmarek

Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, ul. Kopernika 19, 87-100 Toruń; halina@geopan.torun.pl

Zarys treści: W artykule przedstawiono możliwości zastosowania połączonej analizy zdjęć lotniczych, wyników terenowych pomiarów geodezyjnych oraz technik DGIS, z wykorzystaniem oprogramowania środowiska GIS, w badaniach kształceń strefy brzegowej zbiornika zaporowego Jeziorsko na Warcie. Metoda ta pozwoliła zrekonstruować stan strefy brzegowej zbiornika w końcowym etapie jego napełnienia, a następnie monitorować dynamikę jej rozwoju w różnych okresach funkcjonowania.

Zbiornik Jeziorsko na rzece Warcie został utworzony w latach 1986–1992. Jest to drugi pod względem powierzchni i czwarty pod względem pojemności sztuczny zbiornik wodny w Polsce. Przy maksymalnym napełnieniu akwen ten ma 16 km długości, a jego pojemność wynosi 202,3 mln m³. W tych warunkach długość brzegów zbiornika wynosi 44,3 km. Zdecydowana większość brzegów nieumocnionych jest aktywna, 67% ma charakter abrazyjny, a 7% akumulacyjny (Banach, Grobelska 2003). Brzegi zbiornika rozwijają się w obrębie silnie zaburzonych glacialnych i fluwioglacialnych utworów zlodowacenia środkowopolskiego oraz punktowo w ilach plioceńskich. Zbiornik Jeziorsko cechują wysokie, około 5-metrowe, roczne wahania stanów wody.

W badaniach wykorzystano dwie serie zdjęć lotniczych, wykonane w 1991 i 2004 r., przy maksymalnych stanach wody w zbiorniku, ortofotomapę w skali 1:10 000 z 1996 r. oraz mapy topograficzne w skali 1:10 000 przedstawiające stan otoczenia zbiornika przed jego utworzeniem. Prowadzone od 2008 r. pomiary terenowe obejmowały powtarzalne, 2–3 razy w roku: w okresie wczesnowiosennym przy niskim stanie wody, w okresie późnowiosennym przy maksymalnym stanie wody i ponownie przy niskim stanie wody w okresie jesiennym, precyzyjne pomiary geodezyjne za pomocą tachymetru elektronicznego Wild TC 500 firmy Leica, odbiornika DGPS firmy Trimble oraz taśmy mierniczej w obrębie sieci założonych reperów. Otrzymane wyniki opracowano w oprogramowaniu ArcGIS, co pozwoliło na ich doprowadzenie do jednego układu współrzędnych i skali. Dla materiałów fotogrametrycznych po przetworzeniu uzyskano dokładność poziomą 0,5 m. Analiza materiałów fotogrametrycznych oraz pomiarów terenowych pozwoliła na wyliczenie średniego rocznego tempa abrazyji brzegu zbiornika Jeziorsko w latach 1991–2004, 2004–2009 oraz współczesnego natężenia tego procesu, tj. w latach 2008–2009. W całym okresie funkcjonowania zbiornika Jeziorsko (lata 1991–2009), krawędź klifu cofnęła się od 4,6 do 25,1 m, tj. od 0,26 do 1,39 m/r., średnio 1 m/r. W pierwszym okresie funkcjonowania zbiornika (lata 1991–2004), tempo abrazyji brzegów wynosiło od 0,35 do 1,63 m/r., podczas gdy w latach 2004–2009 wahało się od 0,26 do 1,28 m.

Obecne tempo przemieszczania klifu, określone na podstawie pomiarów geodezyjnych wykonywanych w obrębie założonej sieci monitoringowej, wynosi od 0,1 do 0,3 m/r. Punktowo tempo abrazyji osiąga 1 m/r.!

Słowa kluczowe: analiza zdjęć lotniczych, zbiornik zaporowy, dynamika strefy brzegowej

Abstract: The paper aims at presenting the contemporary research methods based on the aerial photogrammetry and terrain measuring with used to Geographical Information Systems (GIS), which may be used for supporting and analyzing the morphodynamic processes (geomorphological and fluvial) of reservoirs. Due to the fact there had been no earlier research,

it was necessary to use a method which would give a competent quality and credibility measure of the changes. Author have aimed to reconstruct the conditions of the bank dynamics since 1986. The Jeziorsko Reservoir was created between 1986–1992 on the Warta River, and it is one of the largest reservoirs on the Polish lowlands. The reservoir is 16 km long and its capacity exceeds 202.3 mln m³, the coast line has over 44.3 km, of which more then 63% unreinforced reservoir shores is active, i.e. it has got abrasive (56%) or accumulative (7.0%) character (Banach, Grobelska 2003). The banks are built with Quaternary glacial sediments (tills, sands and clays), and in a few places with Pliocene clays. Since 1992, when the filling was completed, the coast line has started the evolution of accumulation, abrasion and erosion processes. The high water level fluctuations during the exploitation of the reservoir amount to 5 m·y⁻¹. Additionally, they intensify the natural coast transformations. The following cartographic and photogrammetric materials were used: a topographic maps at a scale of 1:5000, 1:10 000 aerial photographs taken in 1991 and 2004 and an orthophotomap from 1998 at 1:1000 scale. Data from field studies were collected by means of the Global Positioning System (GPS).

The changes in the reservoir coastal zone detected on the aerial photographs were mainly situated in the highest bank zone. Thanks to the use of the GIS, the achieved horizontal mean accuracy was below 0.5 m for photogrammetry. At present, the database makes use of a mobile as well as a desktop GIS.

During the entire exploitation period of the Jeziorsko Reservoir, 1991–2009, the cliff edge has moved from 4.6 to 25.1 m i.e. from 0.26 up to 1.39 m annually, av. 1 m a year. In the first analysed period of the reservoir functioning, 1991–2004, the recession rate amounted from 0.35 to 1.63 m annually, whereas in 2004–2009 it oscillated from 0.26 up to 1.28 m. At present the rate of the cliff movement equals from 0.1 up to 0.3 m a year, locally it reaches 1 m a year.

The main goal of the researchers is to create a model of the coastal line evolution on the reservoir high water fluctuations.

Key words: photogrammetry, dam reservoir, monitoring, dynamics of shore zone

Wprowadzenie

W badaniach strefy brzegowej zbiorników zaporowych bardzo poważnym i często napotykanym problemem jest brak informacji o jej początkowym stanie, w tym szczególnie o cechach morfometrycznych strefy brzegowej oraz charakterze i aktywności procesów kształtujących brzegi zbiornika już na etapie jego napełniania wodą. Badania dynamiki strefy brzegowej rozpoczynane są zazwyczaj dopiero po kilkuletnim okresie funkcjonowania zbiornika (Grobelska 2006), co uniemożliwia przeprowadzenie pełnej ilościowej i jakościowej oceny zmian obserwowanych w obrębie kształtującej się strefy brzegowej w stosunku do jej stanu początkowego. Skuteczną metodą umożliwiającą określenie dynamiki strefy brzegowej, w przypadku braku stałego monitoringu procesów abrazyjnych i stokowych, jest analiza zdjęć lotniczych z różnych okresów uzupełniona bieżącymi pomiarami geodezyjnymi, a następnie kartograficzne opracowanie wyników uzyskanych obiema metodami w oprogramowaniu GIS.

W artykule przedstawiono wyniki badań dynamiki strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko uzyskane scharakteryzowaną wyżej metodą. Określono również możliwości metody oraz jej dokładność. Pomiary pośrednie, oparte na analizie zdjęć lotniczych i map topograficznych, umożliwiły rekonstrukcję początkowego zasięgu, charakteru i parametrów strefy brzegowej zbiornika. Z kolei geodezyjne pomiary terenowe, wykonywane tachymetrem elektronicznym Leica TC Wild 500 oraz odbiornikiem DGPS firmy Trimble, pozwoliły na ocenę obecnego tempa zachodzących przekształceń.

Obszar badań

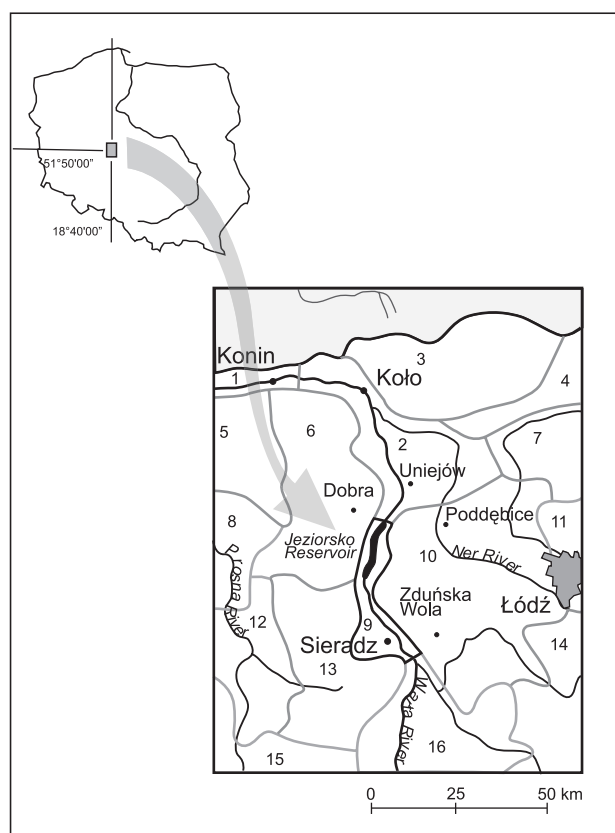
Zbiornik Jeziorsko został utworzony w wyniku spiętrzenia wód rzeki Warty. Zapora zamknęła zlewnię o powierzchni 9021,8 km². Średni roczny przepływ na zaporze w Skęczniewie wynosi 49,8 m³/s (Stachy 1986). Wstępne napełnianie zbiornika rozpoczęto w 1986 r., natomiast maksymalną rzędną piętrzenia osiągnięto w 1992 r. (Orłowski 1999, Szewczyk 2007). Jest to czwarty pod względem pojemności i drugi, co do powierzchni sztuczny zbiornik wodny w Polsce.

Zbiornik Jeziorsko leży w obrębie Niecki Sieradzkiej i zajmuje południkowo przebiegający odcinek doliny Warty. Bezpośrednie otoczenie niecki stanowią wysoczyzny czwartorzędowe, o wysokości do 150 m n.p.m. (Banach, Grobelska 2003). Obszar ten leży w strefie krawędziowej Niecki Łódzkiej i monokliny przedsudeckiej (Klatkowa, Załoba 1990, 1992, Załoba 1996) (ryc. 1). Najstarszymi występującymi w podłożu czwartorzędowym utworami są silnie spękanne margle górnokredowe. Zalegają one na głębokości średnio 5–40 m, lokalnie 2–3 m. Utwory kredy stanowią bezpośrednie podłoże pokrywających ten obszar utworów plejstocénskich, w których rozwija się strefa brzegowa zbiornika Jeziorsko (Baranowski, Mańkowska 1972, 1973, Buraczyński 1986).

Strefę brzegową zbiornika budują głównie gliny zwałowe i utwory fluwioglacjalne zlodowacenia środkowopolskiego stadiału Warty oraz piaski i mułki rzeczne vistulianu. Lokalnie towarzyszą im osady glaciolimniczne, deluwia gliniaste oraz koluwia czynnych osuwisk. Przy niskich stanach wody w zbiorniku rozmywaniu przez fale podlegają aluwia Warty. Proces ten występuje w górnej i środkowej części zbior-

nika. Krawędź doliny Warty, ograniczająca zbiornik jeszcze przed jego utworzeniem, na znacznych odcinkach miała charakter erozyjny. Porozcinana jest ona licznymi dolinkami erozyjno-denudacyjnymi, częściowo wykorzystywanymi przez małe cieki. Lokalnie występowały tu również osuwiska (Banach, Grobelska 2003).

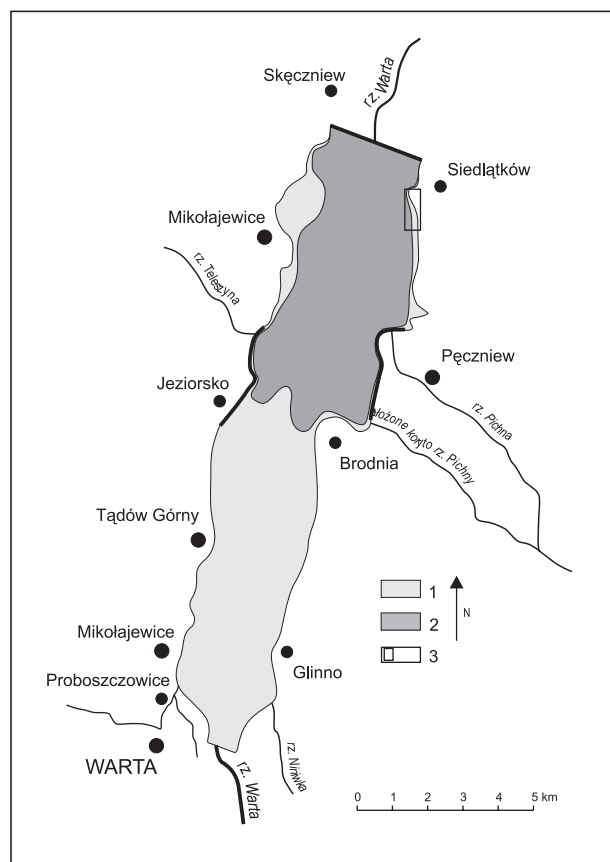
Istotny wpływ na morfodynamikę strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko mają duże, cykliczne wahania stanów wody, które są wynikiem pełnionych przez ten zbiornik funkcji, tj. przeciwpowodziowej i retencyjnej. Zmiany stanów wody w cyklu rocznym



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle jednostek fizycznogeograficznych Polski (na podstawie Kondracki J., 1994. Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne. PWN, Warszawa)

Regiony: 1 – Dolina Konińska, 2 – Kotlina Kolska, 3 – Wysoczyzna Kłodawska, 4 – Równina Kutnowska, 5 – Równina Rychwalska, 6 – Wysoczyzna Turecka, 7 – Równina Łowicko-Błońska, 8 – Wysoczyzna Kaliska, 9 – Kotlina Sieradzka, 10 – Wysoczyzna Łaska, 11 – Wzniesienia Łódzkie, 12 – Kotlina Grobowska, 13 – Wysoczyzna Złoczewska, 14 – Wysoczyzna Bełchatowska, 15 – Wysoczyzna Wieruszowska, 16 – Kotlina Szczercowska

Fig. 1. Localization of a study area according to physico-geographical division of Poland (base Kondracki J., 1994). Geography of Poland, Mezoregions physico-geographical (in Polish) PWN, Warsaw
Regions: 1 – Konin Valley, 2 – Kolo Basin, 3 – Kłodawa Plain, 4 – Kutno Plain, 5 – Ryhwald Plain, 6 – Turek Upland, 7 – Lowicz-Blonsk Plain, 8 – Kalis Upland, 9 – Sieradz Basin, 10 – Lask Upland, 11 – Lodz Hills, 12 – Grabow Basin, 13 – Zloczew Upland, 14 – Belchatow Upland, 15 – Wieruszow Upland, 16 – Szczercow Basin



Ryc. 2. Zbiornik Jeziorsko

1 – powierzchnia zbiornika przy maksymalnym stanie wody, 2 – powierzchnia zbiornika przy stanie minimalnym, 3 – obszar szczególnych badań

Fig. 2. Jeziorsko Reservoir

1 – reservoir surface during maximum water level, 2 – reservoir surface during minimum water level

wynoszą w badanym zbiorniku około 5 m. Stany maksymalne przypadają na okres wiosenno-letni, kiedy to następuje napełnianie zbiornika, a minimalne na okres jesienno-zimowy, po stopniowym opróżnieniu zbiornika trwającym od początku lipca do połowy grudnia. Od połowy kwietnia do końca czerwca w zbiorniku utrzymywany jest stały poziom wody (NPP = 120,5 m n.p.m.). Związane jest to z zapewnieniem optymalnych warunków siedliskowych w okresie lęgowym ptactwa wodnego gniazdującego w cofce zbiornika.

Zbiornik Jeziorsko zajmuje całą równinę zalewową Warty. W zależności od stanu wody długość zbiornika zmienia się od 16 do 7 km, przy nieznacznej zmianie szerokości wynoszącej około 2,5 km; średnia głębokość wynosi od 1,7 do 5,2 m. Przy maksymalnej rzędnej piętrzenia powierzchnia zbiornika osiąga 42,3 km², a objętość – 202,3 mln m³, podczas gdy przy stanach minimalnych wartości te wnoszą odpowiednio: powierzchnia 19,6 km² (przy absolutnym minimum 17,6 km²) i objętość zaledwie 36,4 mln m³ (przy absolutnym minimum 30,2 mln m³) (Szewczyk 2007). W czasie trwania minimalnych stanów

wody, odsłania się okresowo ponad połowa powierzchni akwenu (ryc. 2).

Metody

Badania strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko były dotychczas bardzo nieregularne i nie obejmowały początkowego etapu jej kształtowania. Pierwsze, jednorazowe badania terenowe wykonano w 1999 r., tj. po 7 latach od rozpoczęcia eksploatacji zbiornika (Banach, Grobelska 2003). Do badań tych powrócono dopiero w 2008 r. i są one kontynuowane do chwili obecnej. Brak wyników pomiarów z początkowego okresu funkcjonowania zbiornika uniemożliwił bezpośrednią ocenę przekształceń, jakie zaszły w obrębie strefy brzegowej w efekcie funkcjonowania zbiornika i jego obecnej aktywności. W celu uzupełnienia brakujących danych przeprowadzono analizę archiwalnych materiałów fotogrametrycznych, tj. zdjęć lotniczych, połączoną z terenowymi pomiarami geodezyjnymi i DGPS wykonaną w oprogramowaniu środowiska GIS. Poniżej zaprezentowano zastosowane metody, dokładność uzyskanych wyników oraz ocenę ich przydatności w tego typu badaniach.

Zasadniczo wykorzystano dwa rodzaje pomiarów: pośrednie, oparte na analizie zdjęć lotniczych, które umożliwiły rekonstrukcję początkowego zasięgu i parametrów strefy brzegowej zbiornika, oraz pomiary bezpośrednie wykonane w terenie za pomocą przyrządów geodezyjnych, takich jak tachymetr elektroniczny Leica TC Wild 500 i odbiornik DGPS firmy Trimble.

Pomiary pośrednie – fotogrametria lotnicza

Podstawową metodą zastosowaną w niniejszych badaniach była fotogrametria lotnicza (Majde, Niepokulczycki 1972, Bernasik 2000, Kurczyński, Preuss 2000). Pierwszym etapem pracy ze zdjęciami lotniczymi jest ich skanowanie. Wykonuje się je bezpośrednio na materiałach źródłowych – kliszach fotograficznych. Rozdzielczość skanowania wynosi 720 pikseli/cm dzięki czemu możliwe jest przeniesienie pełnej informacji bez straty danych. Zapis zdjęć dokonywany jest na plikach TIFF z uwagi na brak kompresji, przez co nie dochodzi do pogorszenia ich jakości w miarę kolejnych zapisów i filtrowań. Niesie to jednak za sobą zwiększenie ich rozmiaru do około 250 MB w przypadku zdjęć czarno-białych oraz 700 MB w przypadku zdjęć kolorowych. Na dalszym etapie obróbki zdjęcia są kadrowane w celu zmniejszenia ich wielkości, a co za tym idzie – przyspieszenia pracy oprogramowania. Uwzględniając przeciętną wielkość kliszy zdjęcia oraz rozdzielczość optyczną skanu, po przeliczeniu na wartości rzeczywiste uzyskuje się wielkość

jednego piksela rzędu 0,25–0,30 m. Jest to wartość determinująca cały tok dalszych postępowań oraz skalę i dokładność uzyskiwanych wyników, które będą przymowały wartości decymetrów.

Czynnikiem determinującym użyteczność tej metody jest dostępność materiałów archiwalnych. W przypadku zbiornika Jeziorsko dysponowano dwiema seriami zdjęć lotniczych:

- zdjęcia lotnicze z 1991 r., wykonane w skali 1:27 000; zdjęcia te, co niezwykle istotne, zostały wykonane w miesiąc po pierwszym napełnieniu zbiornika, co pozwala na pełną rekonstrukcję jego strefy brzegowej w początkowym okresie funkcjonowania;
- zdjęcia lotnicze z 2004 r., wykonane w skali 1:26 000.

Należy tu podkreślić, że najlepszym materiałem możliwym do wykorzystania na tym etapie analizy jest ortofotomapa. Dobrej klasy materiał tego typu pozbawiony jest błędów wynikających ze skośności zdjęcia. Ponadto obraz wpasowany jest w określone układy współrzędnych geograficznych. Niestety tego rodzaju materiały są trudno dostępne i przedstawiają zazwyczaj obraz wybranego obszaru z jednego nalu. W przypadku zbiornika Jeziorsko wykorzystano barwną ortofotomapę w skali 1:10 000 z 1996 r.

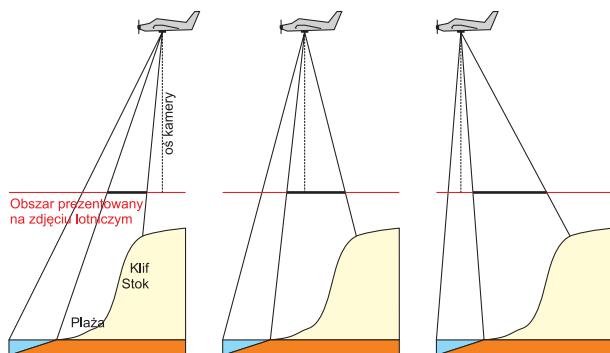
Kolejnym etapem analizy jest rektyfikacja zdjęć. Jeśli to możliwe, na tym etapie wykorzystuje się współczesne ortofotomapy, jak choćby platformę GEOPORTAL (www.geoportal.gov.pl), do których, na podstawie zbieżności punktów charakterystycznych dopasowuje się pozostałe materiały fotogrametryczne. Jeśli nie ma dostępu do ortofotomapy, wpasowanie można wykonać na podstawie domiarów do planów geodezyjnych lub po określeniu współrzędnych punktów charakterystycznych bezpośrednio w terenie. W tym celu korzysta się z pomiarów geodezyjnych przy użyciu tachymetrów lub odbiorników GPS. Rektyfikacja odbywa się za pomocą oprogramowania GIS. W jej trakcie uzyskuje się informacje o błędach wpasowania materiałów RMS (The Root Mean Square RMS – błąd opisujący różnicę pomiędzy podstawowym punktem kontrolnym a nową lokalizacją punktu uzyskaną w efekcie procesu transformacji). Błąd ten, uzyskiwany przez dobrego operatora przy wykorzystaniu kilkunastu punktów rektyfikacyjnych, nie powinien odbiegać od wielkości jednego piksela, czyli w analizowanym przypadku około 0,3 m.

Zdjęcia lotnicze dają często jedyną możliwość rekonstrukcji badanej strefy brzegowej oraz pozwalają na dokonanie oceny jej dynamiki w ujęciu wieloletnim. Metoda ta pozwala również na ocenę przekształceń na dużych obszarach. W trakcie analizy materiału fotogrametrycznego ujawniane są również dodatkowe informacje o terenie niedostępnym lub trudnym do uchwycenia w przypadku tradycyjnego kartowania. Metoda ta pozwala np. na analizę tempa zarastania zatok, stwierdzenie obecności

form efemerycznych oraz ocenę wpływu zmian stanów wody na roślinność wodną i nadbrzeżną. W czasie analizy zdjęć lotniczych należy zwrócić szczególną uwagę na położenie obszaru odwzorowanego na zdjęciu względem środka kamery. O ile obszary do niego zbliżone pozostają bez większych zniekształceń, o tyle skrajne fragmenty zdjęć, szczególnie powierzchnie nachylone (stromie brzozy, klify) mogą ulec pozornemu zniekształceniu (ryc. 3) (Kaczmarek, Tyszkowski 2009).

Największym ograniczeniem wynikającym z wykorzystania zdjęć lotniczych w analizach morfodynamicznych jest jednak różna długość okresów pomiędzy poszczególnymi nalotami. Zdjęcia zwykle wykonywane są w różnych odstępach czasu i różnych porach roku. Z tego też względu trudno na ich podstawie określić tempo procesu (cm/rok) w konkretnym okresie, np. miesiącu, gdyż przerwy pomiędzy kolejnymi seriami zdjęć wynoszą po kilka lat, a badany proces ma charakter nieregularny. Należy wobec tego pamiętać, że wartość np. przemieszczenia krawędzi klifu jest średnią arytmetyczną za dany okres. Ponadto zdjęcia wykonane w okresie wegetacji utrudniają bądź całkowicie uniemożliwiają dokładne określenie przebiegu strefy brzegowej. Każdorazowo należy dysponować także powiązaniem stanów wody w zbiorniku (wysokość w metrach nad poziomem morza) z datami wykonania zdjęć. Informacje te pozwolą na powiązanie zdjęć lotniczych z podkładem hipsometrycznym. Umożliwia to określenie tempa abrazji lub akumulacji, a przy dobrej jakości zdjęcia również wykrycie charakterystycznych form w strefie brzegowej.

Szczegółowa analiza zdjęć lotniczych umożliwia też identyfikację aktywnych geodynamicznie brzegów zbiornika. Pozwala to na skoncentrowanie pomiarów terenowych na wytypowanych wcześniej odcinkach brzegów, co jest szczególnie istotne w przypadku badania akwenów o długiej linii brzo-



1

Ryc. 3. Zależność pomiędzy zdjęciem lotniczym a osią kamery

1 – zmieniający się zasięg widocznej strefy brzegowej

Fig. 3. Aerial photogrammetry connections with camera axis

1 – apparent change of shore zone width

wej. Aktywne strefy brzegów, m.in. podlegające abrazji klify, zaznaczają się na zdjęciach lotniczych odpowiednio jasnym fotofonem. Metoda wydzielenia takich fragmentów strefy brzegowej polega na określeniu klas tonów szarości (0–255) w strefie brzegowej i ich bilansowaniu na dwóch kolejnych seriach zdjęć lotniczych. Przedziały wartości klas mogą się zmieniać w trakcie filtrowania, jednak dla całej serii zdjęć powinny być proporcjonalne. Wykorzystanie funkcji oprogramowania GIS umożliwiającego analizę rastrów, używanej powszechnie do obliczeń zmian ukształtowania powierzchni terenu, można przystosować tak, aby wskazywały przemieszczenie aktywnej części brzozy. Obszar nieaktywny, pokryty roślinnością, charakteryzuje się szarym umiarkowanym fotofonem, w tonach szarości są to wartości od 110 do 130, podczas gdy świeże klify i oispiska reprezentują wartości od 58 do 85. Należy wówczas automatycznie wyszukać na rastrach piksele, w których zmiana tonów wynosi od 25 do 40. Przedstawiona wyżej metoda, ciągle jeszcze doskonała, może w przypadku dobrej jakości materiałów fotogrametrycznych oraz dokładności analizującego, szczególnie na etapie rektyfikacji zdjęć, być skutecznym narzędziem wykorzystywanym do identyfikacji aktywnych odcinków strefy brzegowej zbiorników wodnych (Kaczmarek, Tyszkowski 2009).

Pomiary bezpośrednie

Pomiary tachymetryczne

Jedną z najczęściej stosowanych metod w badaniach przekształceń strefy brzegowej są tradycyjne pomiary geodezyjne, przy użyciu niwelatorów, teodolitów lub – od kilkunastu lat – tachymetrów elektronicznych. W niniejszych badaniach wykorzystano tachymetr elektroniczny Leica TC Wild 500. Metody geodezyjne pozwalają na uzyskiwanie dokładności pionowej i poziomej pomiaru rzędu kilku milimetrów, nawet na dużych odległościach. Ich zaletą jest możliwość prostego dowiązania się do istniejącej sieci geodezyjnej. Metoda ta ze względu na dużą dokładność pomiaru doskonale sprawdza się w miejscach o niewielkiej dynamice, takich jak chociażby wolno przemieszczające się osuwiska w strefach krawędziowych czy strefie brzegowej sztucznego zbiornika wodnego.

Pomiary GPS

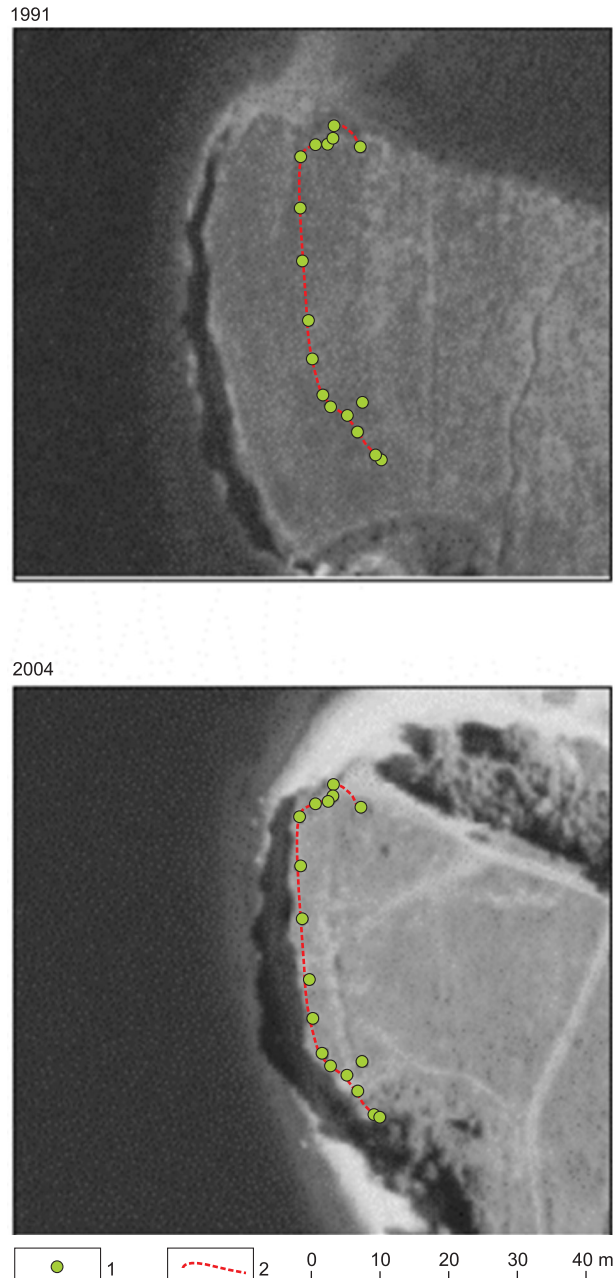
Drugą z metod pomiaru bezpośredniego jest pomiar aktualnego położenia krawędzi klifu odbiornikiem GPS o odpowiednio dużej precyzji pomiaru, takim jak np. zastosowanym w badaniach zbiornika Jeziersko GPS Trimble GeoXT wykorzystujący różnicowe poprawki sygnału DGPS (Differential Glo-

bal Positioning System) (Kaczmarek, Tyszkowski 2009). Aktualnie na większości obszaru Polski możliwy jest darmowy odbiór z sieci naziemnych stacji referencyjnych. Odbiornik korzystający z poprawek DGPS pozwala wyeliminować błędy zegara satelity, efemerydy, opóźnienia jonosferyczne i troposferyczne. Przed rozpoczęciem pomiarów wskazane jest jednak sprawdzenie czasu, w jakim konstelacja satelitów będzie najbardziej korzystna (wartość PDOP). Funkcja ta dostępna jest w standardowym oprogramowaniu odbiornika oraz na wielu witrynach internetowych. Niewątpliwym atutem tej metody jest szybkość i łatwość pomiaru. W ciągu zaledwie kilkunastu godzin jedna osoba może z łatwością umiejscowić w układzie współrzędnych geograficznych kilkukilometrowej długości odcinek brzegu zbiornika. Metoda ta umożliwia określenie jego położenia z dokładnością od 0,3 do 0,7 m. „Nałożenie” uzyskanych w ten sposób pomiarów na zdjęcie lotnicze pozwoliło na ocenę wielkości zaistniałych przekształceń w obrębie strefy brzegowej od momentu utworzenia zbiornika do chwili obecnej (Kaczmarek, Tyszkowski 2009).

Wyniki

Uzyskane w wyniku zastosowania powyższej metodyki informacje oraz wyniki pomiarów zarówno pośrednich, jak i bezpośrednich zostały zapisane w bazach danych ArcGIS i poddane dalszej obróbce. Zestawienie map topograficznych, zdjęć lotniczych oraz wykonanych w terenie pomiarów geodezyjnych umożliwiło zrekonstruowanie wielkości przekształceń na dwukilometrowym fragmencie strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko od momentu jego utworzenia do chwili obecnej oraz w dwóch podokresach, tj. w latach: 1992–2004 i 2004–2009 (ryc. 4) (Kaczmarek 2010). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że w okresie funkcjonowania zbiornika Jeziorsko, to jest w latach 1991–2009, krawędź klifu na analizowanym odcinku brzegu przemieściła się od 4,6 do 25,1 m, tj. od 0,26 do 1,39 m/r., średnio 1 m/r. W pierwszym z analizowanych podokresów (1991–2004) tempo cofania brzegu wynosiło od 0,35 do 1,63 m/r., podczas gdy w latach 2004–2009 wahało się od 0,26 do 1,28 m. Współczesne tempo przemieszczania klifu, określone na podstawie szczegółowych pomiarów geodezyjnych, wynosi od 0,1 do 0,3 m/r., a punktowo nawet 1 m/r.

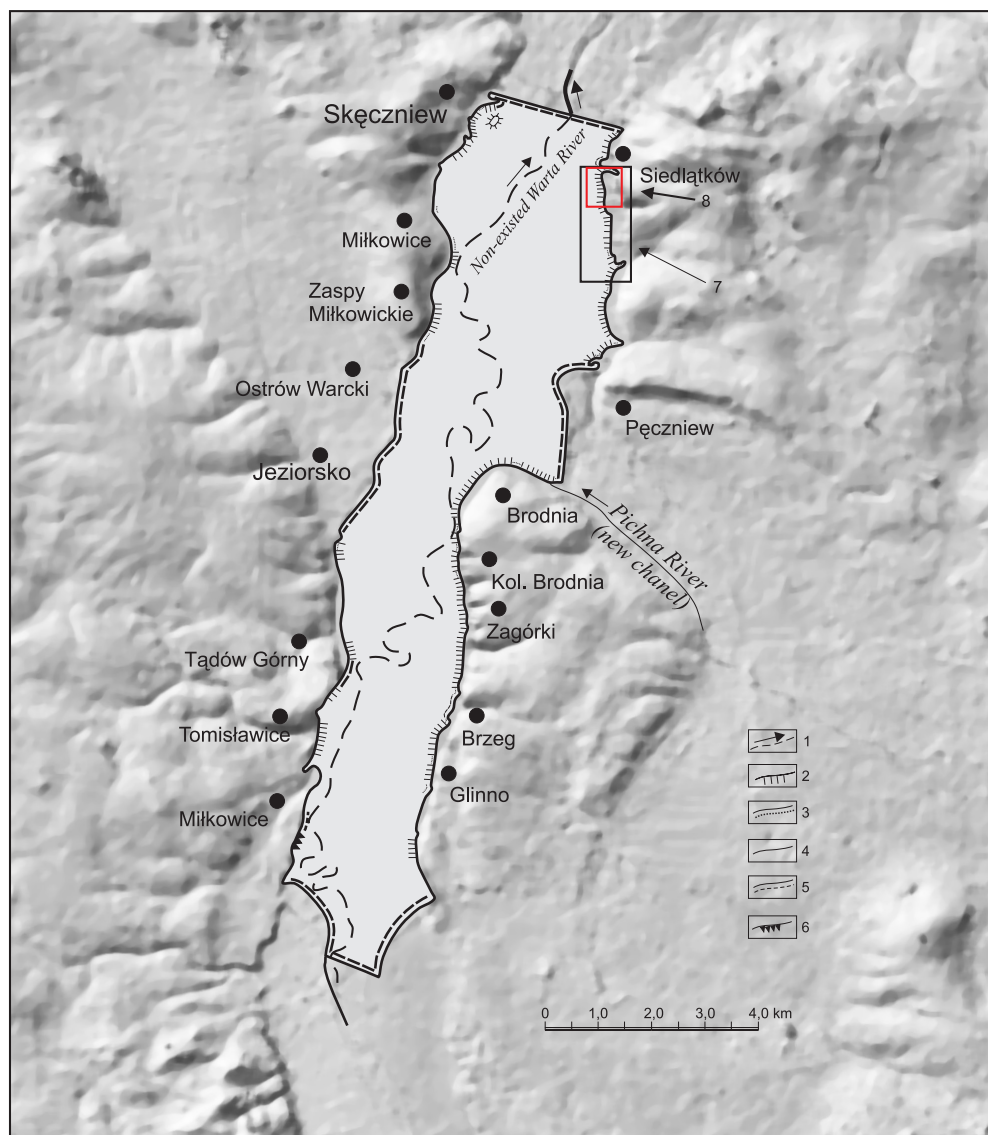
Przy odpowiednio dobrej jakości zdjęciach lotniczych, wyraźnych zarysach linii brzegowej i klifów przedstawiona metoda pozwala określić zmiany zasięgu linii brzegowej z dokładnością od 0,5 do 1,5 m, a w wyjątkowych wypadkach z dokładnością nawet od 0,2 do 0,3 m. Są to wartości możliwe do zaakceptowania w przypadku badań stref brzegowych charakteryzujących się dużą aktywnością geodynamiczną.



Ryc. 4. Przykład kompilacji zdjęć lotniczych i pomiarów terenowych DGPS wraz z wyznaczonym na ich podstawie obecnym przebiegiem krawędzi klifu – marzec 2009 r. – północny fragment wschodniego brzegu zbiornika Jeziorsko, lokalizacja na rycinie 5
1 – lokalizacja punktów pomiarowych DGPS, 2 – obecny przebieg krawędzi klifu

Fig. 4. Example of compilation aerophotos and terrain measuring by DGPS with shore zone edge course – march 2009. North fragment of Jeziorsko Reservoir east shore zone, detailed location on figure 5
1 – DGPS measuring points, 2 – current cliff edge course

Metoda ta z zadowalającą precyzją pozwala na dokonywanie ocen zróżnicowania rozwoju stref brzegowych w czasie i przestrzeni, szczególnie w przypadku dużych zbiorników wodnych.



Nr (No)	Metry (Metres)			%			Metry/rok (Metres/year)		
	1991–2004	2004–2009	1991–2009	1991–2004	2004–2009	1991–2009	1991–2004	2004–2009	1991–2009
1	16,9	2,3	19,2	88,0	12,0	100,0	1,30	0,46	1,07
2	16,9	2,5	19,4	87,1	12,9	100,0	1,30	0,50	1,08
3	21,2	1,8	23,0	92,2	7,8	100,0	1,63	0,36	1,28
4	17,4	1,2	18,6	93,5	6,5	100,0	1,34	0,24	1,03
5	18,0	2,6	20,6	87,4	12,6	100,0	1,38	0,52	1,14
6	10,4	1,5	11,9	87,4	12,6	100,0	0,80	0,30	0,66
7	20,0	2,1	22,1	90,5	9,5	100,0	1,54	0,42	1,23
8	18,9	0,8	19,7	95,9	4,1	100,0	1,45	0,16	1,09
9	22,9	1,0	23,9	95,8	4,2	100,0	1,76	0,20	1,33
10	20,8	1,8	22,6	92,0	8,0	100,0	1,60	0,36	1,26
11	4,6	0,0	4,6	100,0	0,0	100,0	0,35	0,00	0,26
12	9,8	2,1	11,9	82,4	17,6	100,0	0,75	0,42	0,66
13	16,4	2,4	18,8	87,2	12,8	100,0	1,26	0,48	1,04
14	18,0	3,2	21,2	84,9	15,1	100,0	1,38	0,64	1,18
15	17,2	5,2	22,4	76,8	23,2	100,0	1,32	1,04	1,24
16	16,5	3,9	20,4	80,9	19,1	100,0	1,27	0,78	1,13
17	13,1	2,2	15,3	85,6	14,4	100,0	1,01	0,44	0,85
18	8,6	0,5	9,1	94,5	5,5	100,0	0,66	0,10	0,51
19	12,6	1,0	13,6	92,6	7,4	100,0	0,97	0,20	0,76
20	7,2	2,2	9,4	76,6	23,4	100,0	0,55	0,44	0,52
21	17,9	7,2	25,1	71,3	28,7	100,0	1,38	1,44	1,39

Ryc. 5. Strefa brzegowa zbiornika Jeziorsko – typologia brzegów wraz z tempem abrazyji klifów w wyznaczonym obszarze badań szczegółowych

1 – zatopione rzeki, 2 – brzeg abrazyjny, 3 – brzeg akumulacyjny, 4 – brzeg neutralny, 5 – brzeg umocniony, 6 – brzeg erozyjny, 7 – obszar badań szczegółowych, 8 – obszar prezentowany na rycinie 4

Fig. 5. Shore zone of Jeziorsko Reservoir – typology (base Banach, Grobelska 2003, changed) and speed of active cliff movements

1 – non-existent river, 2 – abrasive bank, 3 – accumulative bank, 4 – neutral bank, 5 – artificial bank, 6 – erosional bank, 7 – detailed study area, 8 – area presented on aerophotos on figure 4. Table contain detailed measurements dates in study area

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały skuteczność metody polegającej na połączeniu pomiarów pośrednich i bezpośrednich, a następnie na analizie i syntezie uzyskanych wyników w programach środowiska GIS w badaniach nad rozwojem strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko. Takie podejście może być z powodzeniem zastosowane w badaniach stref brzegowych innych zbiorników zaporowych, jezior i mórz. Zaletą tej metody jest łatwość wymiany informacji między różnymi użytkownikami, w tym szczególnie między pracownikami naukowymi administracją i nadzorem technicznym zajmującym się obsługą i eksploatacją zbiorników.

Podziękowania

Praca została wykonana ze środków Ministerstwa Nauki i Edukacji w ramach projektu nr N N306 0330 33.

Literatura

Banach M., Grobelska H., 2003. Stan dynamiki strefy brzegowej zbiornika Jeziorsko, *Słupskie Prace Geograficzne, Pomorska Akademia Pedagogiczna*, 1: 91–106 Słupsk.

Baranowski J., Mańkowska A., 1972. *Mapa geologiczna Polski w skali 1:200 000*. Arkusz Kalisz, B. Wydawnictwa Instytutu Geologicznego.

Baranowski J., Mańkowska A., 1973. *Mapa geologiczna Polski w skali 1:200 000*. Arkusz Kalisz, A. Wydawnictwa Instytutu Geologicznego.

Bernasik J., 2000. *Elementy fotogrametrii i teledetekcji*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków.

Buraczyński Z., 1986. Badania geologiczno-inżynierskie (na zbiorniku Jeziorsko), *Gospodarka Wodna*, 8: 185–187.

Grobelska H., 2006. Ewolucja strefy brzegowej Zbiornika Pakoskiego (Pojezierze Gnieźnieńskie). *Prace Geograficzne* 205. IGiPZ PAN, Warszawa.

Kaczmarek H., 2010. Development of the shore zone of the Jeziorsko Reservoir (Warta River, Central Poland). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica* 21: 16–24.

Kaczmarek H., Tyszkowski S., 2009. The use of the aerial and ground photogrammetry in the Jeziorsko Reservoir shore zone monitoring (The Warta River, Central Poland). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica* 2: 7–12.

Klatkowa H., Załoba M., 1990. *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000*, Ark. Warta. Warszawa.

Klatkowa H., Załoba M., 1992. *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000*. Ark. Warta. Warszawa.

Kurczyński Z., Preuss R., 2000. *Podstawy fotogrametrii*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Majde A., Niepokulczycki M., 1972. Fotogrametryczny pomiar skutków abrazji na zbiornikach śródlądowych. *Gospodarka Wodna* 1: 11–16.

Orłowski W., 1999. Techniczna charakterystyka zbiornika retencyjnego Jeziorsko na Warcie. W: *Eksploatacja i oddziaływanie dużych zbiorników nizinnych na przykładzie zbiornika Jeziorsko*. Konferencja Naukowo-Techniczna, Uniejów: 7–17.

Stachý J. (red.), 1986. *Atlas Hydrologiczny Polski*. 2, 1. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

Szewczyk G., 2007. *Zbiornik wodny Jeziorsko*. RZGW, Poznań.

Załoba M., 1996. Ślady oscylacji lądolodu warciańskiego we wschodniej części międzyrzecza Warty i Prosnicy. *Acta Geographica Lodzensia*, 71: 275–287.