



## PRZEMIANY WYBRANYCH ODCINKÓW STREFY BRZEGOWEJ ZBIORNIKA SULEJOWSKIEGO

### Transformations of selected sections of the shoreline zone of Sulejów Reservoir

ALEKSANDRA NISZTUK<sup>1</sup>, MACIEJ KOSSOWSKI<sup>2</sup> , MAŁGORZATA FRYDRYCH<sup>3</sup> 

**Zarys treści.** Artykuł analizuje przemiany strefy brzegowej Zbiornika Sulejowskiego, po przeszło 50 latach eksploatacji. Analizę przeprowadzono na podstawie zdjęć lotniczych z lat: 2004, 2009, 2015, 2021 oraz danych fotogrametrycznych, pozyskanych z bezzałogowego statku powietrznego. Największą aktywnością wykazały się brzegi zlokalizowane w bezpośredniej strefie oddziaływania rzek zasilających zbiornik, szczególnie Pilicy i Luciaży, gdzie zaznaczał się proces akumulacji i przyrastania brzegów. Podnoszący się poziom aluwiumów stabilizowany jest przez wkraczającą roślinność, której sukcesja wynosi miejscami nawet ponad 5 m na rok. W miarę oddalania się od źródeł transportowanego materiału, skala omawianego zjawiska maleje. Tempo przyrastania brzegów w środkowej i dolnej strefie zbiornika jest znacznie mniejsze. Działanie niszczące wody zaznaczyło się przeważnie punktowo, a abrazja nie miała istotnego wpływu na stan brzegów. Wśród wybranych odcinków testowych, były też takie, które wykazały się wysoką stabilnością i przez rozpatrywany okres pozostały w prawie nienaruszonym stanie. Analizowane odcinki brzegu zaklasyfikowano do typu akumulacyjnego i neutralnego. Zbiornik Sulejowski na znacznym fragmencie strefy brzegowej osiągnął dojrzałe stadium rozwoju.

**Słowa kluczowe:** strefa brzegowa, sztuczny zbiornik, zmiany morfologiczne, akumulacja, abrazja, zdjęcia lotnicze, Zbiornik Sulejowski

**Abstract.** The article analyses changes in the Sulejów Reservoir shoreline after more than 30 years of exploitation. Research was based on aerial photographs from the years 2004, 2009, 2015 and 2021 and photogrammetric data from an unmanned aerial vehicle. Activity was most significant along shores in the immediate influence zone of the rivers feeding the reservoir, particularly the Pilica and Luciaża rivers, where accumulation and shoreline growth processes were evident. The rising level of alluvium is stabilised by encroaching vegetation, with succession exceeding 5 metres per year in places. As distance from transported material sources increases, the scale of the phenomenon decreases. The shoreline growth rate is significantly lower in the middle and lower parts of the reservoir. Erosional water activity was visible only locally, and abrasion did not significantly affect shoreline conditions. Among the selected test sections, some showed high stability and remained in almost unchanged condition over the studied period. The analysed areas were classified as either accumulation or neutral types. The Sulejów Reservoir's shoreline has reached a mature stage of development along much of its length.

**Key words:** shoreline, artificial reservoir, morphological changes, accumulation, abrasion, aerial photographs

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, absolwentka kierunków geomonitoring oraz geoinformacja; e-mail: alexnisz.an@gmail.com

<sup>2</sup> Uniwersytet Łódzki, Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, ul. Banacha 12/16, 90-237 Łódź; e-mail: maciej.kossowski@edu.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0001-8586-1579

<sup>3</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: malgorzata.frydrych@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0001-8837-7416

## Wprowadzenie

Obszary przybrzeżne jezior stanowią strefę przejściową między wodą a lądem. Ten pas odgrywa kluczową rolę siedliskową i ma istotne znaczenie dla ochrony jezior. W przypadku naturalnych zbiorników wodnych procesy kształtowania stref brzegowych osiągnęły już stadium zaawansowane, co można rozumieć jako względną stabilizację i wolne tempo kolejnych przemian (Siligardi i in. 2016; Kaczmarek 2018). Inaczej sytuacja ta wygląda w wypadku zbiorników antropogenicznych, zwłaszcza przepływowych. Rzeźbotwórczą determinantą zmian w tego typu akwenach jest m.in. oddziaływanie rzeki zasilającej. To czynnik, który jest nieodzownym elementem funkcjonowania zbiornika. Ma on bezpośredni wpływ na dostarczanie zawiesiny oraz fizyczne kształtowanie stref brzegowych.

Istnieje szereg czynników biotycznych i abiotycznych decydujących o kierunku przemian strefy brzegowej, np.: morfometria obiektu, wahania poziomu wód, budowa geologiczna, ukształtowanie terenu, czynniki klimatyczne, szata roślinna oraz działalność człowieka (Banach 1994; Hillbricht-Ilkowska 2005; Siligardi i in. 2016; Kaczmarek 2018). Reżim eksploatacyjny zbiornika odgrywa istotną rolę w kształtowaniu strefy brzegowej, co dostrzegalne jest coraz wyraźniej wraz z rozwojem badań. Wahania poziomu wód wpływają na czas oddziaływania falowania na poszczególne części strefy brzegowej. Zakres i zmienność tych wahań wpływają zarówno na intensywność procesów, jak i na ich przebieg oraz wzajemne zależności (Banach, Spanilá 2000; Kaczmarek, 2018). Roślinność wzdłuż brzegów jeziora pełni szereg istotnych funkcji. Rośliny wraz z ich systemami korzeniowymi mogą wspierać poprawę jakości wody, wspomagać osadzanie się zawieszin oraz usuwać zanieczyszczenia (Smith, Hellmund 1993). Dodatkowo, korzenie roślin zabezpieczają linię brzegową przed erozją, wspierając stabilizację brzegów.

Pomimo złożoności zagadnienia, badania nad morfodynamiką strefy brzegowej sztucznych zbiorników zaporowych w Polsce nie są wystarczająco rozpowszechnione. W przeszłości badania skupione były na zbiornikach górskich i wyżynnych (Korołec 1968; Kieras i in. 1973; Kostecki 1975; Dabkowski 1978; Mroczek i in. 1984; Waclawski 1986; Zietara 1992, 1994; Heliasz 2000; Kozielska-Sroka i in. 2010; Zydron i in. 2010; Rzętała 2014). Znacznie mniej opracowań dotyczy zbiorników nizinnych, które często skupiały

się na dużych obiektach (Majde, Niepokulczycki 1972; Banach 1981, 1988, 1994, 2004, 2006; Banach, Grobelska 2003; Kostuch i in. 2005; Grobelska 2006; Kaczmarek, Tyszkowski 2009; Kaczmarek 2010, 2018; Majecki 2014). W obecnym stanie wiedzy o rozwoju stref brzegowych zbiorników zaporowych wyraźny jest niedostatek badań poświęconych mniejszym zbiornikom.

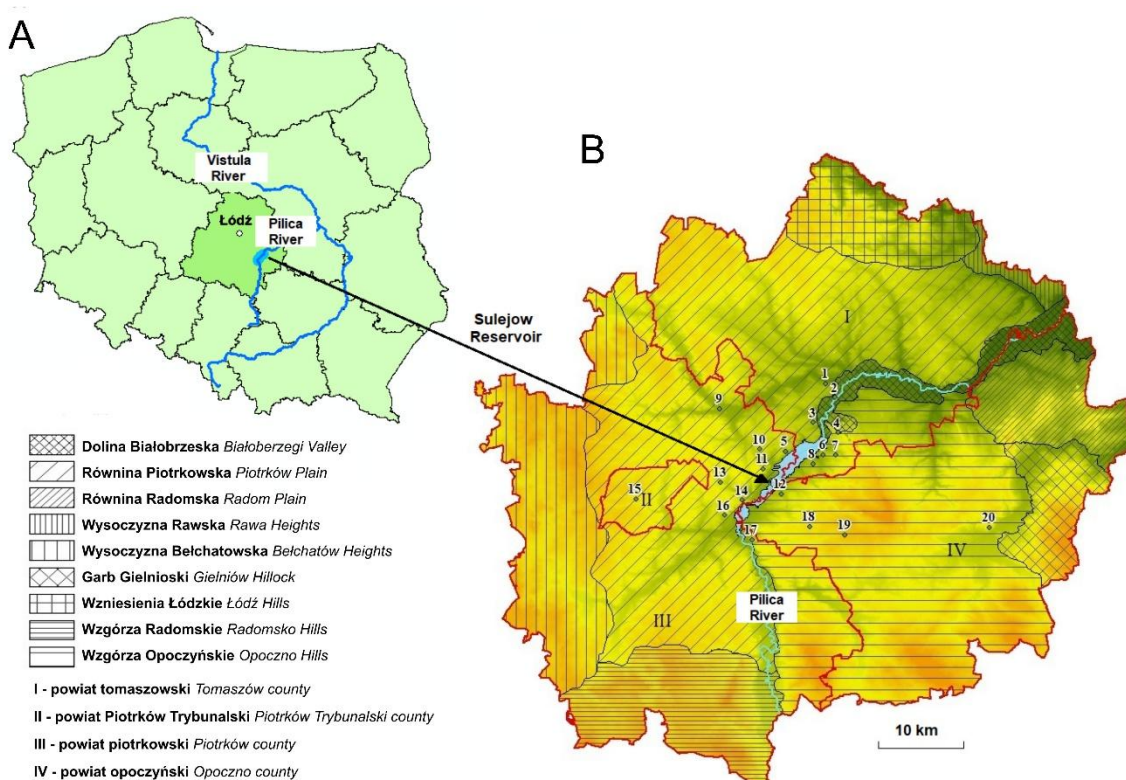
Zbiornik Sulejowski położony w Polsce Centralnej stanowi przykład nizinnego zbiornika zaporowego o średniej wielkości. Pomimo długiego okresu funkcjonowania, nie został przeanalizowany pod kątem dynamiki morfologicznej strefy brzegowej. Nadrzędnym celem badań jest ocena rozwoju strefy brzegowej Zbiornika Sulejowskiego w latach 2004–2021 oraz rozpoznanie dominujących procesów wpływających na kształtowanie brzegów i wysp zbiornika.

## Obszar badań

Zbiornik Sulejowski powstał w wyniku spiętrzenia wód rzeki Pilicy (rys. 1). Betonowo-ziemna zaporę, o długości 1200 m i wysokości 16 m, która służy także celom komunikacyjnym, stanęła na 138,9 km rzeki, w miejscowości Smardzewice. Zbiornik, oddany do użytku 20 grudnia 1973 roku, był w tamtych czasach jednym z największych obiektów hydrograficznych w centralnej Polsce (Ambrożewski 2013).

Głównym celem powstania zbiornika było zapewnienie należytych zasobów wodnych na potrzeby komunalne i przemysłowe dla aglomeracji łódzkiej. Przyjęte założenie było spełniane przez okres 40 lat. W 2013 roku zapadła jednak decyzja o rezygnacji pozyskiwania wody powierzchniowej ze Zbiornika Sulejowskiego. Zbiornik obecnie pełni następujące funkcje: rekreacyjną, turystyczną, hodowlaną, energetyczną (działa na nim elektrownia wodna o mocy 4 MW) i ochrony przeciwpowodziowej oraz przed negatywnymi skutkami suszy (tab. 1–2) (Ambrożewski 2013; Michna 2013).

Zbiornik położony jest w dorzeczu Wisły, na jej najdłuższym lewobrzeżnym dopływie – Pilicy, która ma swoje źródła na wysokości 348 m n.p.m. i charakteryzuje się średnim rocznym przepływem prawie 23 m<sup>3</sup>/s z wielolecia 1972–2010 (dane dla stacji wodowskazowej Sulejów, KZGW 2022). Pilica tuż przed ujściem do akwenu przyjmuje wody Luciąży (rys. 2A). Rzeka ta, odznacza się przepływem około dziesięciokrotnie niższym od swojego recypienta, ale dostarcza największą ilość zawiesziny do akwenu (Wagner, Zalewski 2000).



Rys. 1. Położenie Zbiornika Sulejowskiego na tle podziału administracyjnego Polski (A) oraz regionalizacji fizycznogeograficznej według Solona i in. (2018) (B) miejscowości wspomniane w tekście: 1 – Tomaszów Mazowiecki, 2 – Brzostówka, 3 – Nagórzyce, 4 – Smardzewice, 5 – Swolszewice Duże, 6 – Tresta, 7 – Twarda, 8 – Karolinów, 9 – Wolbórz, 10 – Golesze Duże, 11 – Bronisławów, 12 – Zarzęcin, 13 – Koło, 14 – Barkowice Mokre, 15 – Piotrków Trybunalski, 16 – Barkowice, 17 – Podklasztorze (Sulejów), 18 – Konstantynów, 19 – Mniszków, 20 – Opoczno (dane: Geoportal 2022)

Fig. 1. Sulejów Reservoir location against the background of Poland's administrative division (A) and physico-geographical regionalisation according to Solon et al. (2018) (B) sites mentioned in the text: 1 – Tomaszów Mazowiecki, 2 – Brzostówka, 3 – Nagórzyce, 4 – Smardzewice, 5 – Swolszewice Duże, 6 – Tresta, 7 – Twarda, 8 – Karolinów, 9 – Wolbórz, 10 – Golesze Duże, 11 – Bronisławów, 12 – Zarzęcin, 13 – Koło, 14 – Barkowice Mokre, 15 – Piotrków Trybunalski, 16 – Barkowice, 17 – Podklasztorze (Sulejów), 18 – Konstantynów, 19 – Mniszków, 20 – Opoczno (data: Geoportal 2022)

Tabela 1

Parametry Zbiornika Sulejowskiego (Ambrożewski 1998; Michna 2008)

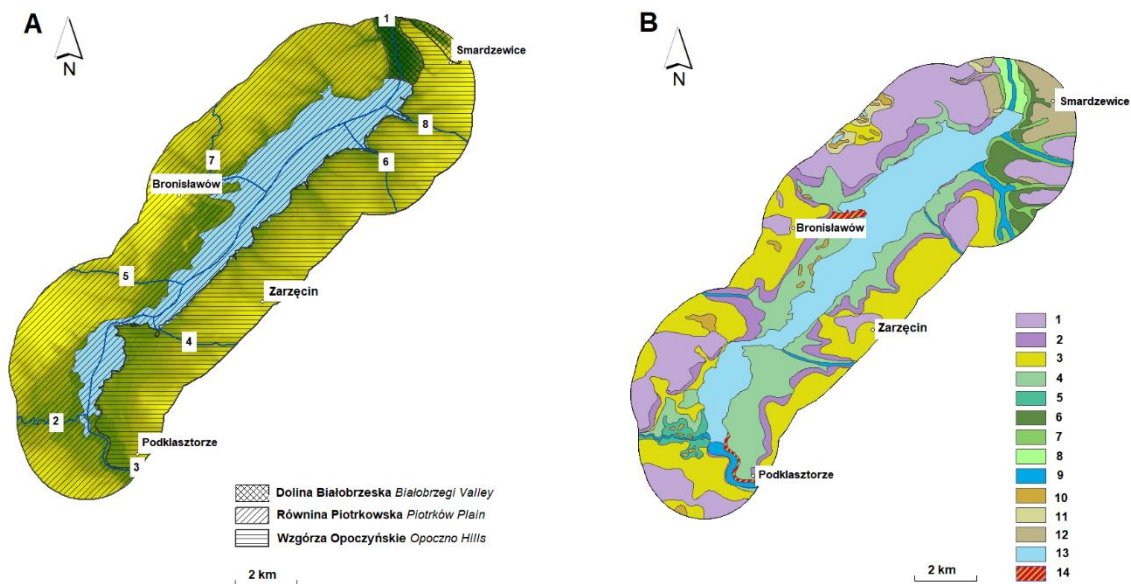
Parameters of the Sulejów Reservoir (Ambrożewski 1998; Michna 2008)

Charakterystyka	Wartość
<b>Powierzchnia zbiornika</b>	
Maksymalna	2380 ha
Minimalna	630 ha
<b>Podstawowe parametry zbiornika</b>	
Średnia szerokość	1,5 km
Maksymalna długość	25 km
Średnia głębokość (przy Normalnym Poziomie Piętrzenia)	3,3 m
<b>Pojemność zbiornika</b>	
Całkowita	75 mln m <sup>3</sup>
Powodziowa	10 mln m <sup>3</sup>
Użyteczna	61 mln m <sup>3</sup>

Tabela 2

Charakterystyki przepływów Zbiornika Sulejowskiego (Ambrożewski 1998)  
Flow characteristics of the Sulejów Reservoir (Ambrożewski 1998)

Charakterystyka	Wartość [m <sup>3</sup> /s]
<b>Przepływy</b>	
$Q_{\min}$	3,9
$Q_{\text{śr. roczne}}$	26,9
$Q_{50\%}$	150
$Q_{1\%}$	560
$Q_{0,1\%}$	793
<b>Gospodarka wodna</b>	
Przepływ gwarantowany	13,9



Rys. 2. A – Ukształtowanie terenu okolic Zbiornika Sulejowskiego (dane: Geoportal 2022) oraz jego dopływy  
1 – Pilica, 2 – Luciąża, 3 – Radońka, 4 – Dopływ z Konstantynowa, 5 – Dopływ z Koła, 6 – Struga,  
7 – Dopływ z Goleśz Dużych, 8 – Dopływ z Twardej

B – mapa geomorfologiczna strefy otaczającej Zbiornik Sulejowski (na bazie Brzeziński 1992)  
1 – wysoczyzna morenowa płaska, 2 – krawędzie i stoki wysoczyzn, 3 – równiny sandrowe i wodnolodowcowe,  
4–8 – terasy rzeczne różnego wieku, 9 – dna dolin rzecznych, 10 – wydmy, 11 – równiny piasków przewianych,  
12 – równiny denudacyjne, 13 – antropogeniczny zbiornik wodny, 14 – wał przeciwpowodziowy

A – Topography of the area surrounding the Sulejów Reservoir (data: Geoportal 2022) and its tributaries  
1 – Pilica, 2 – Luciąża, 3 – Radońka, 4 – Tributary from Konstantynów, 5 – Tributary from Koło, 6 – Struga,  
7 – Tributary from Goleśze Duże, 8 – Tributary from Twarde

B – Geomorphological map of the zone surrounding the Sulejów Reservoir (base on Brzeziński 1992)  
1 – flat moraine plateau, 2 – edges and slopes of plateaus, 3 – sandur and glaciofluvial plains,  
4–8 – fluvial terraces of various ages, 9 – river valley floors, 10 – dunes, 11 – wind-blown sand plains,  
12 – denudation plains, 13 – anthropogenic water reservoir, 14 – flood embankment

W otoczeniu Zbiornika Sulejowskiego dominują osady czwartorzędowe o różnej miąższości – od 40 m w Barkowicach do 15 m w Zarzęcinie. W dolinach rzek występują plejstoceny piaski i żwiry polodowcowe, oraz młodsze osady rzeczne i torfy (rys. 2B) (Szałamacha 1989, 1992). Przepuszczalne osady piaszczyste i żwirowe zalegają na skałach kredowych, obejmujących zarówno kredę dolną, jak i górną (Brzeziński 1992). Są to głównie gezy margliste oraz mułowce marglisto-piaszczyste, które w rejonie Smardzewic tworzą wychodnie skalne zwięzające dolinę Pilicy i stanowiące podłoże dla budowy zapory.

Obszar otoczenia w odległości dwóch kilometrów od brzegów Zbiornika Sulejowskiego, mimo podziału na trzy jednostki fizycznogeograficzne (rys. 1), ma podobną morfologię, z rzędnymi sięgającymi maksymalnie 200 m n.p.m., a w dolinach rzek około 170 m n.p.m. Część południowo-zachodnia, położona w obrębie Równiny Piotrkowskiej, obejmuje wyższe terasy dolinne, w tym dzielnicę Sulejowa – Podklasztorze, gdzie wzdłuż brzegu Pilicy wzniesiono wały ochronne o długości 4,64 km (Kot 2003). W obszarze centralnym i południowym występują równiny sandrowe i wodnolodowcowe oraz płaska wysoczyzna morenowa. W dolinach rzek znajdują się niższe tarasy akumulacyjne o różnym wieku (Brzeziński 1992). Wschodnia część obszaru, należąca do Wzgórz Opoczyńskich, charakteryzuje się deniwelacjami rzędu 10 m, natomiast Dolina Białobrzaska w rejonie Smardzewic osiąga najniższe wysokości, około 155 m n.p.m.

Użytkowanie terenu okolic strefy brzegowej zbiornika jest zróżnicowane. Największy obszar zajmują lasy iglaste (Będkowski, Jaskulski 2024), ale występują również obszary zajęte przez lasy liściaste, porastające obszar występowania parowów w rejonie Barkowic Mokrych, czy też rezerwat przyrody „Lubiaszów”, zlokalizowany na zachód od Bronisławowa chroniący ponad dwustuletnie dęby (Strzezińska i in. 2004). Nie bez powodu omawiany obszar został włączony do granic Sulejowskiego Parku Krajobrazowego.

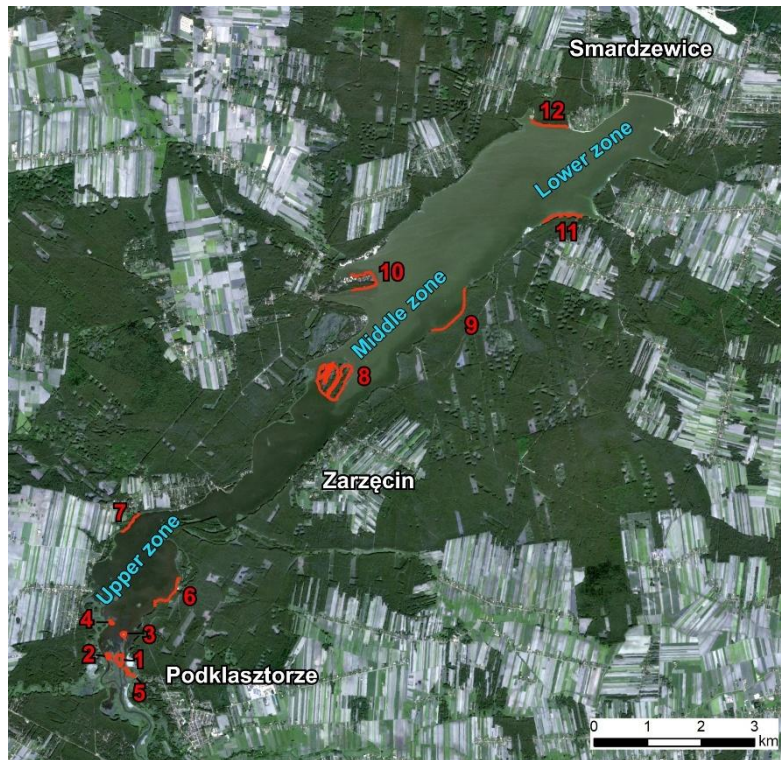
## Metody badań

Pojęcie strefy brzegowej jezior jest definiowane w różny sposób w zależności od źródła (Wetzel 2001; Ostendorp i in. 2004; Rowan i in. 2006; Soszka, Skocki 2008). Najczęściej strefa zbiornika wodnego (ang. *shorezone*) obejmuje zarówno litoral, który rozciąga się do maksymalnej głębokości 1 metra, jak i strefę nadbrzeżną (ang. *rip-*

*arian zone*). Ta strefa może sięgać do 50 metrów w głąb łądu od linii brzegowej, wyznaczonej przez najwyższy poziom wody (Siligardi i in. 2016). Pojęcie „brzeg” ma węższe znaczenie i odnosi się do pasa położonego pomiędzy górnym zasięgiem strefy brzegowej a linią osiągniętą przez wodę przy jej najniższym poziomie (Banach 1994). Głównym wskaźnikiem opisującym dynamikę brzegu zbiornika wodnego jest tempo erozji klifu, mierzone przez zmiany w położeniu jego korony (Brown i in. 2005). Korona klifu jest widoczna niezależnie od poziomu wody, zarówno w czasie niskiego, jak i wysokiego stanu w zbiorniku, w przeciwieństwie do jego podstawy (Kaczmarek 2018). W sytuacji analizy zmian brzegu niskiego porośniętego roślinnością trudno jest precyzyjnie ustalić przebieg linii brzegowej. Dlatego w badaniach przeanalizowano linię zasięgu roślinności ustabilizowanej, analizując wypływanie się strefy brzegowej zbiornika oraz występujących w jego obrębie wysp oraz tempo sukcesji roślinnej. Podejście takie pozwoliło zminimalizować błędy pomiarowe i ograniczyć wpływ krótkoterminowych zmian poziomu wody, wynikających z czynników hydrometeorologicznych (np. opadów, wezbrań) i tymczasowe fluktuacje linii brzegowej związane z okresową zmianą poziomu wód zbiornika. Analizowano zasięg roślinności tworzącej szuwały wysokie, których występowanie nie podlegało w dużym stopniu wpływowi okresowych wahań stanów wód zbiornika oraz zmianom sezonowym (roślinność udokumentowano podczas nalotów dronem zarówno w porze letniej jak i zimowej).

W niniejszej pracy podstawę badań stanowiły ortofotomapy, udostępnione przez serwis geportal.gov.pl, którego operatorem jest Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Wykorzystano ujęcia Zbiornika Sulejowskiego wykonane w zakresie światła widzialnego RGB oraz bliskiej poczerwieni CIR. Wykorzystano zdjęcia z: 01.01.2004, 01.01.2009, 17.03.2015 oraz 19.06.2021 (wielkość piksela: 2004 – 0,5 m; 2009 – 0,5 m; 2015 – 0,25 m; 2021 – 0,25 m). Pojedyncze zdjęcia zostały połączone w oprogramowaniu ArcGIS for Desktop w wersji 10.4.1.

Zbiornik Sulejowski został podzielony na trzy strefy badawcze: górną, środkową i dolną. W obrębie każdej z nich wybrano reprezentatywne odcinki strefy brzegowej, które poddano analizie. W sumie wyznaczono 12 obszarów testowych na brzegach oraz wyspach zbiornika. Zakres obserwacji został przedstawiony na rysunku 3. Dalsze etapy analizy obejmowały wektoryzację linii brzegowej w obrębie wyznaczonych obszarów testowych dla poszczególnych lat objętych bada-



Rys. 3. Ortofotomapa Zbiornika Sulejowskiego z lokalizacją obszarów testowych (dane: Sentinel-2A 2022)  
1–12 – obszary testowe opisane w tekście

Orthophotomap of the analysed test areas (data: Sentinel-2A 2022)  
1–12 – study areas described in the text

niem. Podczas wektoryzacji w niektórych przypadkach napotkano trudności związane głównie z obecnością cienia rzucanego przez drzewa, który częściowo zasłaniał rzeczywiste granice linii brzegowej. W takich sytuacjach, w celu zachowania spójności i poprawności interpretacji, niektóre odcinki zostały określone w sposób interpolacyjny, zgodnie z przewidywanym zasięgiem ich położenia, bazując na dostępnych danych i morfologii terenu.

W celu weryfikacji interpretacji danych ze zdjęć lotniczych na wybranych fragmentach strefy brzegowej gdzie zaobserwowano największe zmiany wykonano naloty fotogrametryczne bezzałogowym statkiem powietrznym. Naloty przeprowadzono w roku 2021, a na podstawie pozyskanych zdjęć opracowano ortofotomapy. Do realizacji zadania użyto drona DJI Phantom 4 RTK. Urządzenie zaprogramowano indywidualnie na potrzeby automatycznego nalotu fotogrametrycznego w obrębie wybranych odcinków brzegu. W celu zmaksymalizowania szansy optymalnego połączenia zdjęć pokrycie poprzeczne między szeregami ustawiono na 50%, zaś pokrycie podłużne na 70%. Za dokładność pomiarów odpowiadała

geolokalizacja GPS, wykonywana w czasie rzeczywistym w trakcie wykonywania każdego ze zdjęć, wraz z poprawkami lokalizacji uzyskanymi dzięki systemowi RTK. Dostęp do systemu RTK został zrealizowany przez Leica Geosystem SmartNet RTK/RTN. Naloty fotogrametryczne wykonywano na wysokości 120 m (AGL Above Ground Level) i prędkość przelotowej 11 m/s, otrzymując w ten sposób rozdzielczość terenową na poziomie około 3,2 pix/cm (GSD – Ground Sampling Distance). Pozyskany materiał został poddany geoprzetwarzaniu w programie DJI Terra Pro. Produktem końcowym były cyfrowe ortofotomapy nadające się do dalszego przetwarzania oraz analiz w oprogramowaniu GIS. W tym przypadku jednym z procesów budowania ortofotomozajki jest realizacja procesu ortorektifikacji, który skupia się na zastąpieniu rzutu środkowego wykonanego zdjęcia rzutem ortogonalnym. Takim zabiegiem eliminuje się wszelakie zniekształcenia, które wpływałyby na zafałszowanie wyników badań. Efektem tejże obróbki jest materiał badawczy o wysokiej dokładności, mogący posłużyć w ocenie nawet niewielkich form rzeźby terenu (Witek i in. 2013).

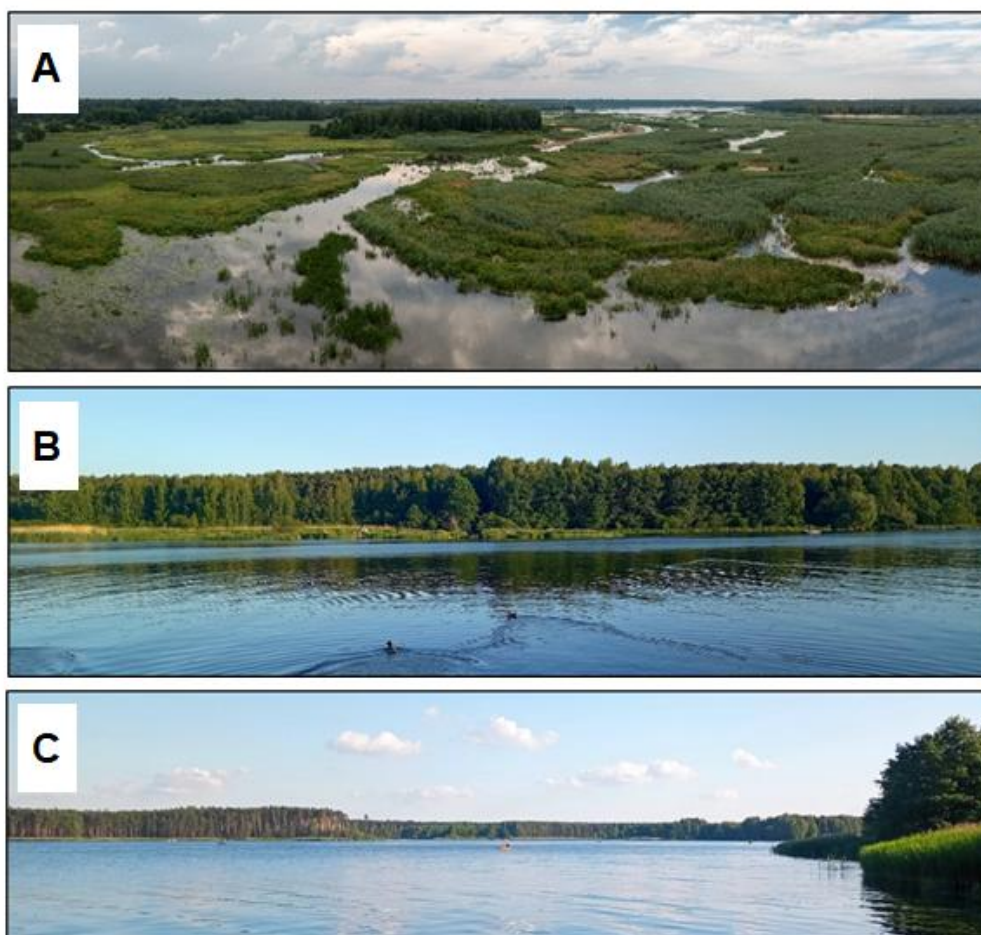
## Analiza zmian wybranych odcinków strefy brzegowej

### Rozwój górnej części zbiornika

#### Obszar testowy 1

Pierwszym obszarem poddanym analizie w górnej części zbiornika (fot. 1) było skupisko niewielkich wysp, których stan w 2004 roku został przedstawiony na rysunku 4A. Wyspy te zostały naturalnie podzielone przez koryto Pilicy na dwie części: zachodnią – obejmującą jedną wyspę, oraz wschodnią – składającą się z licznych mniejszych wysp. Analiza zmian na przestrzeni lat wykazała, że już w 2009 roku wyspy w części wschodniej połączyły się. Sukcesja roślinna i łączenie się wysp

skutkowało sukcesywnym zmniejszeniem się długości linii brzegowej z 1471 m w 2004 roku do 890 m w 2021 roku (tab. 3). Tempo sukcesji roślinnej było na tyle dynamiczne, że w 2021 roku pierwotnie oddzielne wyspy uległy całkowitemu scaleniu (rys. 4A). Maksymalny przyrost zasięgu roślinności w latach 2004–2021 wyniósł 48 m (tab. 4) przy czym największe różnice odnotowano pomiędzy 2004 a 2009 rokiem. W latach 2009–2015 w północnej części zbiornika doszło do cofnięcia się linii zasięgu roślinności o 28 m. Z wyjątkiem tej części analizowanego obszaru, wszędzie dominowała tendencja do przyrastania. Ze względu na swoje położenie w bezpośredniej strefie ujścia Pilicy do zbiornika retencyjnego, obszar ten cechuje się wysoką wrażliwością na



Fot. 1. A – Południowa część strefy górnej – strefa delty Zbiornika Sulejowskiego (fot. M. Kossowski 2021)

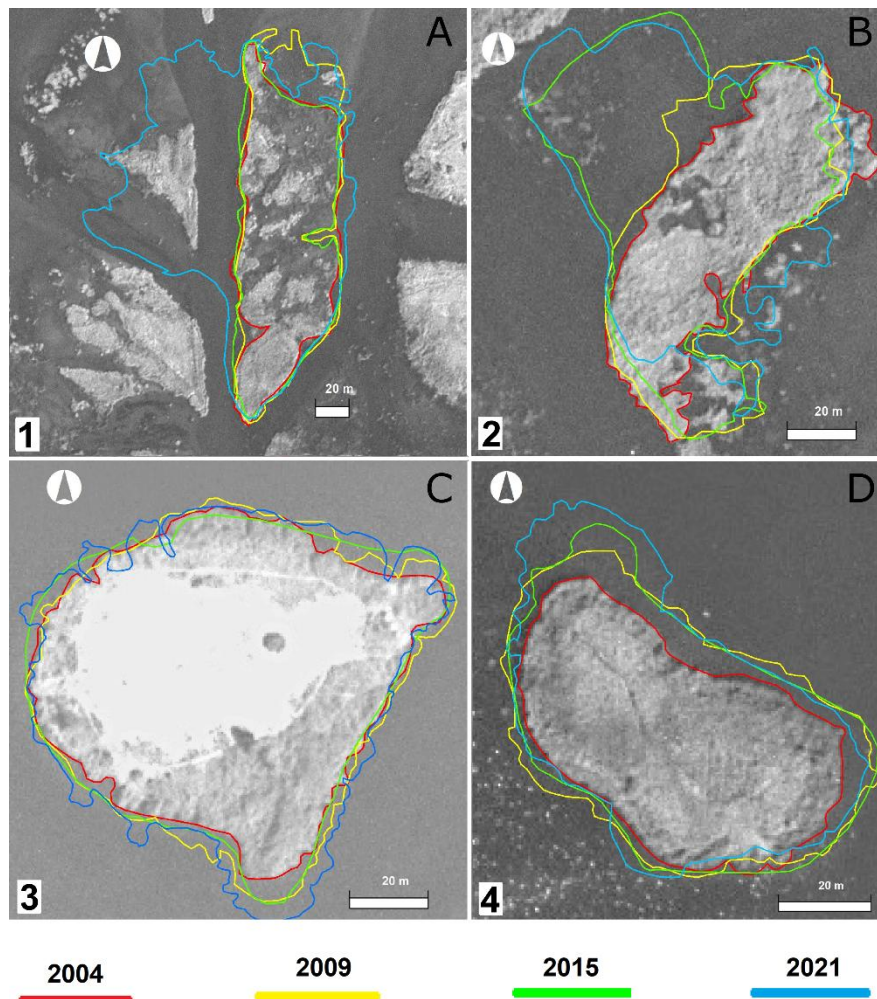
B – Północna część strefy górnej – Barkowice Mokre, widok na brzeg wschodni (fot. A. Nisztuk 2021)

C – Północna część strefy, widok na południe (fot. A. Nisztuk 2021)

A – Southern part of upper zone – reservoir delta zone,

B – Northern part of upper zone – Barkowice Mokre, view of eastern shore

C – Northern part of upper zone, view southwards



Rys. 4. Dynamika zmienności wysp w górnej części Zbiornika Sulejowskiego (obszary badawcze 1–4) (dane: Geoport 2022)

Dynamics of island variability in upper part of Sulejów Reservoir (study areas 1–4) (data: Geoport 2022)

zmiany hydrodynamiczne i morfologiczne, wynikające z rozszerzenia koryta przy zmniejszeniu prędkości przepływu. Zmniejszenie energii przepływu w tej strefie sprzyja intensywnej akumulacji osadów transportowanych przez rzekę (Schumm 2007). Wśród osadów deponowanych na dnie dominują mułki oraz piaski, które mogą zatrzymywać się na przeszkodach terenowych – w tym przypadku na wyspach. Proces ten jest dodatkowo wzmacniany przez zwiększoną siłę tarcia w płytkiej strefie cofki, gdzie maksymalna głębokość wód osiąga około 1,5 m (Jaskulski i in. 2018). W efekcie następuje sukcesywny wzrost powierzchni wysp poprzez akumulację materiału osadowego.

Ostateczne połączenie wysp było jednak wynikiem nie tylko akumulacji osadów, ale również zmian w strukturze koryta rzecznej. W strefie delty Pilicy koryto rzeki rozdziela się na trzy

główne odnogi. Do 2015 roku najważniejszą rolę w odprowadzaniu wód do zbiornika pełniło koryto środkowe. Jednak w kolejnych latach rzeka podlegała reorganizacji, w wyniku której stopniowo zwiększał się przepływ przez wschodnią odnogę. W konsekwencji koryto wschodnie uległo poszerzeniu i stało się dominującą drogą odpływu wód. Równocześnie koryto zachodnie niemal całkowicie straciło znaczenie, a udział koryta środkowego w zasilaniu zbiornika uległ istotnemu zmniejszeniu. Zmiany te doprowadziły do ograniczenia przepływu w przesmyku między wyspami, co skutkowało spowolnieniem przepływu i sprzyjało dalszej akumulacji osadów oraz rozwojowi roślinności szuwarowej. Ostatecznie, reorganizacja systemu rzecznej Pilicy okazała się kluczowym czynnikiem determinującym zmienność analizowanego obszaru.



Tabela 3

Długość linii brzegowej (m) poszczególnych odcinków w kolejnych latach pomiarowych  
Shoreline length (m) of individual sections in subsequent measurement years

Nr obszaru testowego	2004	2009	2015	2021
1	1471	1070	1088	890
2	389	352	425	487
3	341	363	343	458
4	216	249	258	272
5	404	547	525	675
6	946	926	892	1058
7	553	579	553	581
8	5132	5136	5477	5591
9	1150	1152	1177	1148
10	1215	1194	1180	1274
11	910	1019	905	1041
12	770	776	753	885

Tabela 4

Maksymalny przyrost (+) oraz cofnięcie (-) zasięgu roślinności ustabilizowanej w strefie brzegowej zbiornika pomiędzy poszczególnymi latami

Maximum advance (+) and retreat (-) of stabilized shoreline vegetation between individual years

Nr obszaru testowego	2004–2009	2009–2015	2015–2021	2004–2021
1	+41 m 0	+32 m -28 m	+23 m -8 m	+48 m -2 m
2	+20 m -15 m	+40 m -5 m	+15 m -18 m	+53 m -24 m
3	+6 m -<1m	+4 m -5 m	+7 m -2 m	+11 m -<1 m
4	+7 m -2 m	+6 m -5 m	+11 m -1 m	+16 m -5 m
5	+44 m 0	+18 m -40 m	+74 m 0	+93 m 0
6	+3 m -2 m	+3 m -3 m	+10 m -5 m	+12 m -6 m
7	+14 m -3 m	+3 m -3 m	+5 m -<1 m	+14 m -4 m
8	+32 m -6 m	+22 m -18 m	+14 -33 m	+40 m -11 m
9	+<1 m -<1 m	+<1 m -<1 m	+<1 m -<1 m	+<1 m -<1 m
10	+8 m -6 m	+3 m -6 m	+10 m -2 m	+6 m -13 m
11	+31 m -2 m	+17 m -26 m	+25 m -10 m	+48 m -8 m
12	+3 -3	+3 -3	+5 -5	+7 m -6 m

#### Obszar testowy 2

Druga z analizowanych wysp (rys. 4B), ze względu na swoje położenie, podlega silnemu oddziaływaniu koryta rzeki Luciąży. Długość linii brzegowej odpowiadającej zasięgowi roślinności uległa wyraźnemu zwiększeniu w badanym okresie, osiągając przyrost około 100 m (tab. 3). Najintensywniejszy rozwój roślinności odnotowano w latach 2004–2009 w północno-zachodniej części wyspy, gdzie zasięg sukcesji zwiększył się o około 40 m. W części południowej z kolei zaobserwowano stopniowe cofanie się brzegu, sięgające maksymalnie 24 m. Odcinek ten stanowi wklęsły brzeg zakola koryta, charakteryzujący się dominacją procesów erozyjnych. Erozja materiału brzegowego przyczynia się do wzbogacenia zawiesziny transportowanej przez rzekę, co potwierdza znaczny przyrost powierzchni wyspy w jej północno-zachodniej części, gdzie występuje lokalna strefa akumulacyjna. Powstanie tej strefy jest efektem spowolnienia przepływu i ograniczenia siły transportowej rzeki. W obrębie analizowanej wyspy zarejestrowano wysokie tempo sukcesji roślinnej – granica zasięgu roślinności od 2004 roku przesunęła się o ponad 50 m (tab. 4).

#### Obszar testowy 3

Kolejna analizowana wyspa (rys. 4C) charakteryzuje się znacznie mniejszą dynamiką zmian niż wcześniej rozpatrywane przypadki. W latach 2004–2015 zaobserwowano niewielką zmianę w długości linii brzegowej wyspy natomiast w latach 2015–2021 nastąpił jej wyraźny wzrost (tab. 3) na skutek wzrostu powierzchni wyspy oraz zwiększenia rozwinięcia linii brzegowej (rys. 4C). Maksymalny przyrost zasięgu roślinności nastąpił w południowej części obszaru i wyniósł 11 m. Przyrost powierzchni wyspy koncentruje się w południowej i północnej części wyspy, podczas gdy pozostałe jej fragmenty nie wykazują istotnych zmian na przestrzeni lat. Na obszarze odnotowano znikome wartości cofania się linii roślinności. Kluczowym czynnikiem wpływającym na mniejszą dynamikę zmian jest lokalizacja wyspy. Obszar ten znajduje się ponad 300 m dalej na północ w porównaniu do obszarów badawczych 1 i 2. Większa odległość od ujścia Pilicy skutkuje zmniejszoną ilością transportowanej zawiesziny, co ogranicza intensywność procesów akumulacyjnych, choć nadal pozostają one zauważalne.

#### Obszar testowy 4

Wyspa w czwartym obszarze testowym (rys. 4D) położona jest najdalej na północ spośród odcinków analizowanych w górnej strefie zbiornika. Pomimo zbliżonych warunków lokalizacyjnych

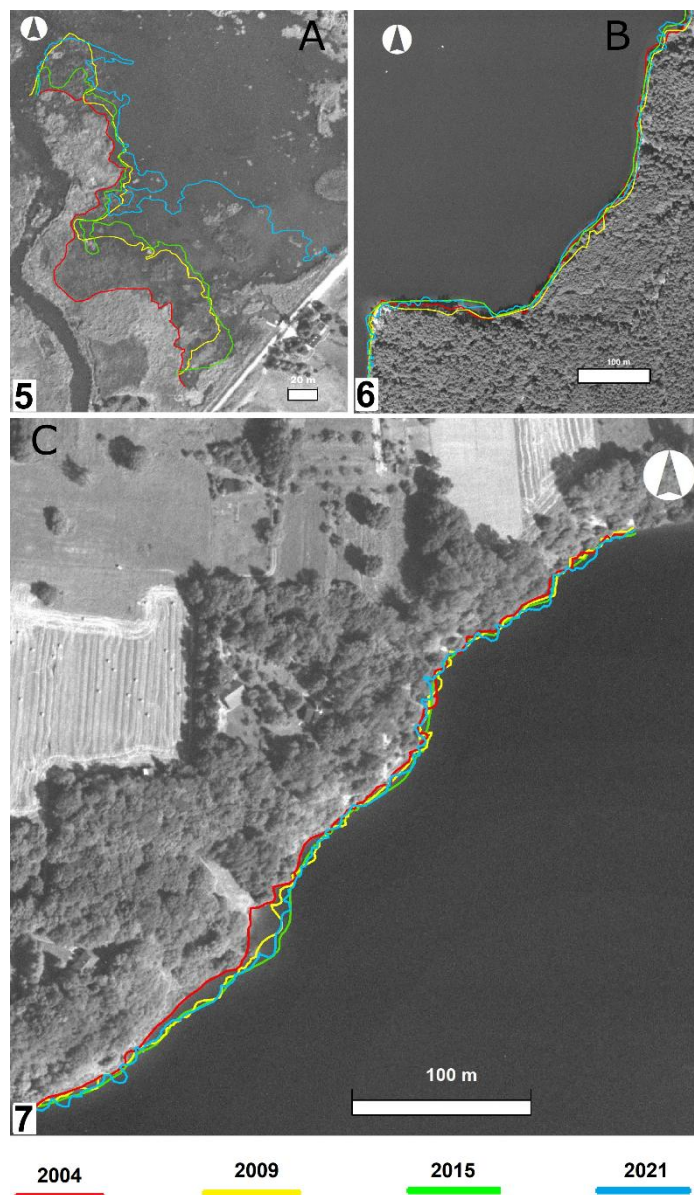
do wyspy nr 3, charakteryzuje się wyraźnie większym przyrostem powierzchni. Długość linii brzegowej wyspy systematycznie wzrastała w całym badanym okresie (tab. 3), a największy przyrost zasięgu roślinności odnotowano w jej północnej części, gdzie wyniósł około 16 m. W zachodnim fragmencie wyspy zaobserwowano natomiast niewielkie cofanie się zasięgu roślinności, sięgające około 5 m.

Zaobserwowane zmiany są ściśle związane z położeniem wyspy względem brzegów zbiornika. Obiekt ten znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie lewej strefy brzegowej akwenu, tworząc przesmyk o szerokości około 10 m. Przepływ wody przez ten wąski odcinek skutkuje lokalnym zwiększeniem prędkości nurtu, co sprzyja rozwojowi procesów erozyjnych. W wyniku tego zjawiska dochodzi do cofania się linii brzegowej, szczególnie wyraźnego po roku 2009 (tab. 4). Materiał erodowany z tego fragmentu wyspy transportowany jest następnie przez nurt i deponowany w części północnej, gdzie energia przepływu ulega osłabieniu. W efekcie w tym rejonie zachodzi sukcesywny proces akumulacji, prowadzący do stopniowego zwiększania powierzchni wyspy.

#### Obszar testowy 5

Obszar testowy 5 obejmuje fragment brzegu położonego w południowo-wschodniej części górnej strefy zbiornika. Na tym obszarze półwysp utworzony przez roślinność obecny w 2004 roku oddzielał koryto Pilicy od niewielkiej zatoki (rys. 5A). Obszar ten uległ znacznym modyfikacjom w latach 2004–2021. Ze względu na swoją morfologię obszar ten jest zdominowany przez procesy akumulacyjne. Analizowany odcinek znajduje się w bezpośredniej bliskości ujścia Pilicy, co powoduje, że część przepływających wód kierowana jest do zatoki. Znaczna część materiału transportowanego przez rzekę osadza się w jej obrębie, prowadząc do dwóch kluczowych procesów - stopniowego wypełniania zatoki aluwiami oraz sukcesji roślinnej w kierunku północnym.

Istotne zmiany można zaobserwować już na zdjęciach lotniczych z 2009 roku (rys. 6A, B), na których widoczny jest wzrost zasięgu brzegu na całej analizowanej długości (maksymalnie o 44 m). Proces ten został dodatkowo wzmocniony przez powstanie nowego koryta Pilicy po 2004 roku, które oddzieliło analizowany obszar od łądu. Nowy odcinek rzeki biegnie wzdłuż wału przeciwpowodziowego i uchodzi bezpośrednio do zatoki, czyniąc ją basenem sedymentacyjnym, intensywnie zasilanym osadami zarówno od południa, jak i od północy. Na zdjęciu lotniczym



Rys. 5. Dynamika zmienności brzegów w górnej części Zbiornika Sulejowskiego (obszary badawcze 5–7) (dane: Geoportal 2022)

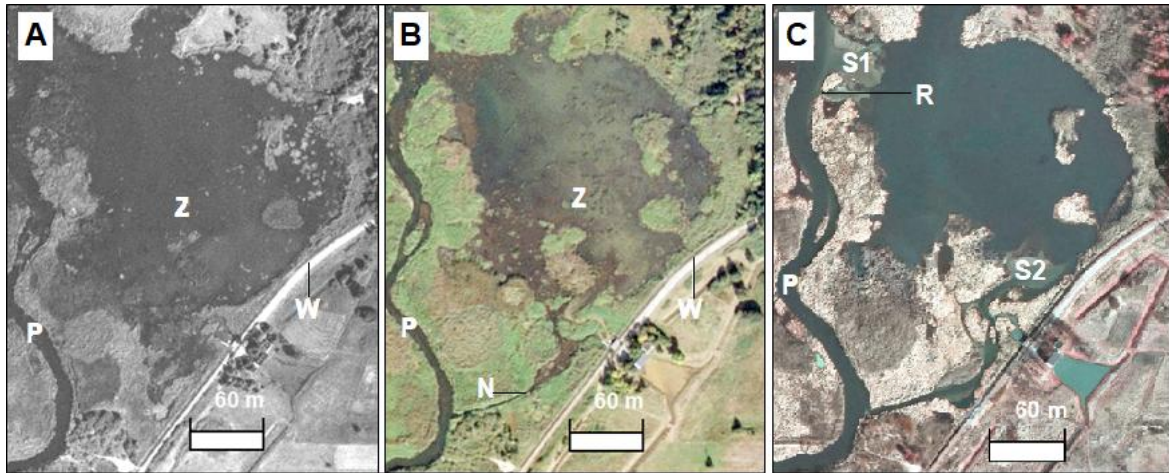
Dynamics of shoreline variability in upper part of Sulejów Reservoir (study areas 5–7) (data: Geoportal 2022)

z 2015 roku widoczne są m.in. formujące się stożki napływowe zbudowane z transportowanego materiału (rys. 6C). Jedynie w części najbardziej wysuniętej na północ granica roślinności uległa wyraźnemu cofnięciu pomiędzy rokiem 2009 a 2015 (o około 40 m). Było to wynikiem działalności nurtu Pilicy, który doprowadził do erozji części osadów.

W 2021 roku nie zanotowano zmian związanych z cofnięciem się linii roślinności – cały brzeg wykazał tendencję wzrostową. Przyrost roślinności zaobserwowano także na północnym krańcu strefy brzegowej, w miejscu wcześniejszego przerwania jej ciągłości. W latach 2004–2021 odnoto-

wano przesunięcie zasięgu roślinności na analizowanym obszarze o wartość przekraczającą 90 m (patrz. tab. 4). Wśród badanych obszarów, to właśnie ten odcinek strefy brzegowej odznacza się największym tempem wypłycania i sukcesji roślinnej.

Przemiany południowej części strefy brzegowej zbiornika mogą być związane z intensywną działalnością antropogeniczną. O jej znaczeniu świadczy przykładowo sztuczny nasyp osadów, uchwycony na zdjęciach z drona, znajdujący się nieco na północ od omawianego miejsca. Jest to materiał wydobyty z dna Pilicy w ramach prac refulacyjnych (fot. 2), wynikających z konieczności



Rys. 6. Fragment wschodniego brzegu Zbiornika Sulejowskiego (obszar testowy nr 5) na zdjęciach lotniczych w latach: A – 2004, B – 2009, C – 2015 (Geoportal 2022)

P – Pilica, Z – zatoka, N – nowe koryto Pilicy, W – wał przeciwpowodziowy, S1, S2 – stożki napływowe, R – miejsce rozmycia brzegu

Part of eastern shoreline (test site 5) in aerial photographs from the years: A – 2004, B – 2009, C – 2015 (Geoportal 2022)

P – Pilica River, Z – bay, N – new Pilica riverbed, W – flood embankment, S1, S2 – alluvial fans, R – location of shoreline erosion



Fot. 2. Lato 2021 – prace pogłębiarskie w górnej części Zbiornika Sulejowskiego

A – widok na północ

B – zmieniony brzeg wschodni zbiornika (fot. M. Kossowski 2021)

Summer 2021 – dredging works in upper part of reservoir

A – view to northwards,

B – altered eastern shore of reservoir

zmniejszenia ryzyka zalania terenów otaczających zbiornik. Otrzymane wyniki dla roku 2021 mogą zatem pozostawać w bezpośrednim związku z prowadzonymi pracami pogłębiarskimi w okolicy odcinka badawczego nr 5 w korycie Pilicy (projekt „Udrożnienie i stabilizacja koryta rzeki Pilicy w km od 153+000 do 159+300”; Wody 2022).

#### Obszar testowy 6

Brzeg wschodni nr 6 (rys. 5B) zbudowany jest z piasków rzecznych, pokrytych lasem iglastym, którego obecność sprzyja stabilizacji podłoża. Główny nurt płynie po przeciwnej stronie zbiornika (Jaskulski i in. 2018) przez co analizowany odcinek nie jest narażony na wzmożoną erozję. Przyrost i cofanie się zasięgu roślinności są niewielkie i w żadnym okresie pomiarowym nie przekroczyły 10 m (w całym okresie badawczym wyniosły 12 m) i mieści się w granicach błędu pomiarowego. Jedyną prawidłowość jaką zaobserwowano, to postępujące cofanie niewielkiego półwyspu w południowej części obszaru. Fragment ten jest bowiem szczególnie eksponowany na działanie energii falowania wody. Niewielki przyrost zasięgu roślinności odnotowano na północ od tego odcinka.

#### Obszar testowy 7

Ostatni analizowany odcinek w tej części zbiornika ma formę wysokiej skarpy (rys. 5C) i zlokalizowany jest w obrębie miejscowości Barkowice Mokre. Zgodnie z opracowaniem Jaskulskiego i in. (2018), obszar ten jest szczególnie narażony na oddziaływanie procesów abrazyjnych. Głębokość zbiornika w tym miejscu osiąga około 4 m, a wzdłuż brzegu przebiega główny nurt rzeki Pilicy. Pomimo tych warunków hydrodynamicznych, analizowany odcinek nie wykazuje tendencji do cofania linii brzegowej - pozostaje stabilny, a w jego środkowej części odnotowano nawet lokalny przyrost zasięgu roślinności o około 14 m. Kluczowym czynnikiem warunkującym stabilność tego fragmentu brzegu jest jego budowa geologiczna. Jest to jedyny odcinek brzegowy zbiornika, którego podłoże tworzy glina lodowcowa, a nie piasek. Ten spoisty, znacznie bardziej odporny na erozję osad skutecznie chroni brzeg przed destrukcyjnym oddziaływaniem falowania i prądu wody, co umożliwia jego zachowanie w niemal niezmienionej morfologii.

### Rozwój środkowej części zbiornika

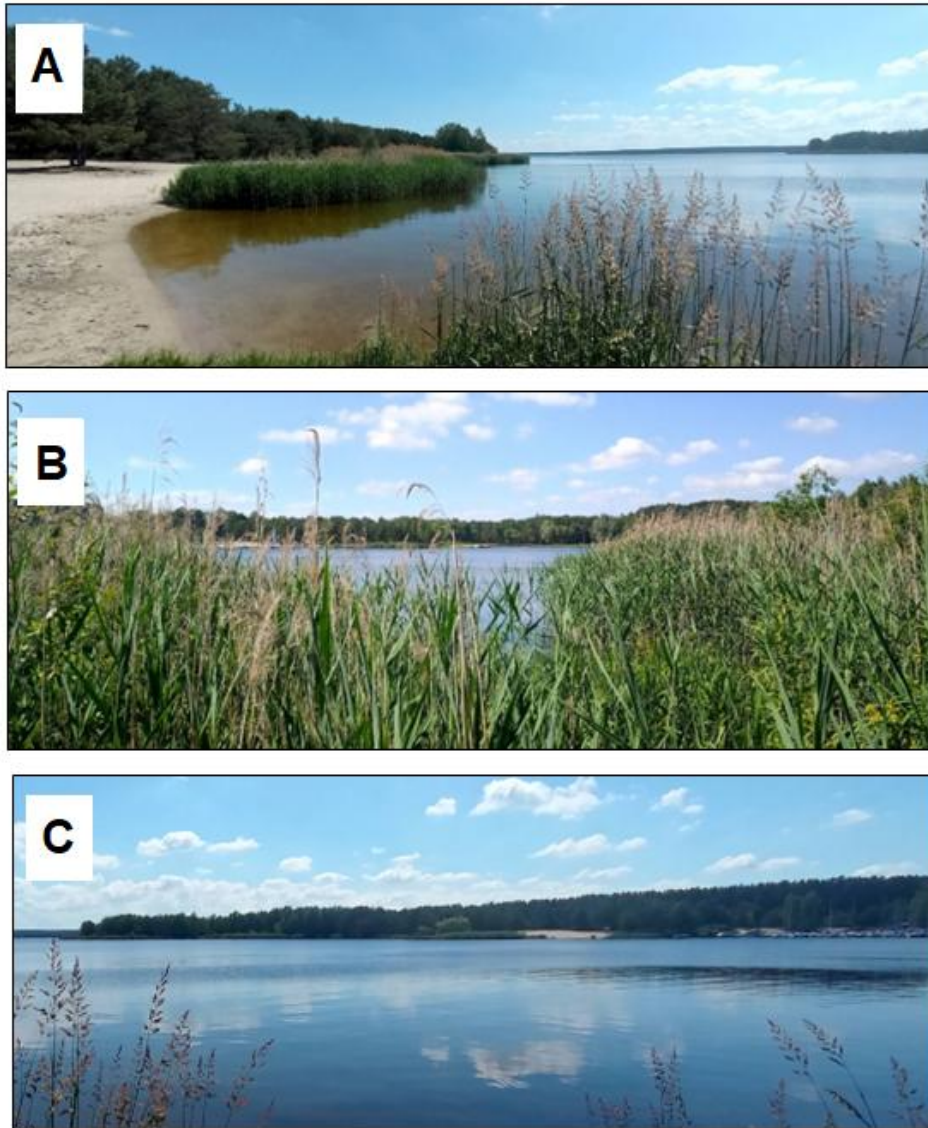
#### Obszar testowy 8

W środkowej strefie zbiornika Sulejowskiego (fot. 3) znajduje się największa pod względem powierzchni wyspa (rys. 7A). Liczy ona ponad 5 km obwodu, a pole jej powierzchni wynosi około 265 m<sup>2</sup>. Długość linii brzegowej wykazywała sukcesywny wzrost o w sumie ponad 40 m (tab. 3). Obiekt ten leży w niewielkiej odległości od zachodniego brzegu rezerwaru, naprzeciwko miejscowości Zarzęcin. Znaczna część linii brzegowej wyspy nie uległa zmianie i wykazuje znaczną stabilność. Natomiast w niektórych miejscach nastąpiło wyraźne przesunięcie zasięgu roślinności. Największa zmiana dokonała się w latach 2004–2009 (+32 m) oraz 2015–2021 (-33 m). W całym okresie badawczym dominował przyrost zasięgu roślinności, skupiony jedynie w północnej części wyspy. Do postępu sukcesji roślinnej przyczynia się w głównej mierze znikomy ruch wody. Nurt wody zaznacza się wzdłuż lewego brzegu oraz na północ od wyspy, zaś w zatokach wcinających się w wyspę, woda stagnuje. Takie warunki przyczyniły się m.in. do dołączenia po roku 2004 sąsiadującej wyspy do omawianego obiektu w jego północnej części, na skutek porośnięcia płycizny, która dotychczas je rozdzielała.

Proces abrazji na wyspie uwidocznił się na jej południowo-wschodnim brzegu. Równoległe do tego fragmentu przepływa główny nurt Pilicy, który powoduje powolne cofanie się linii brzegowej. Pozostały obszar łądu jest statyczny i nie wykazuje istotnych przemian. Wyspa jest bowiem w znacznym stopniu umocniona drzewami, co hamuje erozję jej brzegów.

#### Obszar testowy 9

Dziewiątym obiektem badań (rys. 7B) jest odcinek prawego brzegu Zbiornika o długości około 1150 m, oddalony od ujścia Pilicy o około 8,5 km. Badany obszar na przestrzeni 17 lat praktycznie nie wykazał zmian (tab. 4). Strefa ta zbudowana jest z piasków rzecznych, stanowi element terasy dolinnej wyższej i wyróżnia się stosunkową stromością w porównaniu do innych fragmentów brzegu. Głębokość akwenu u jej podstawy to nawet 5 m (Jaskulski i in. 2018). Odcinek na całej



Fot. 3. A – Zachodnia strefa brzegowa Zbiornika Sulejowskiego w Bronisławowie  
B – Roślinność szuwarowa porastająca lewy brzeg  
C – Widok na sztuczny nasyp w Bronisławowie (fot. A. Nisztuk 2021)

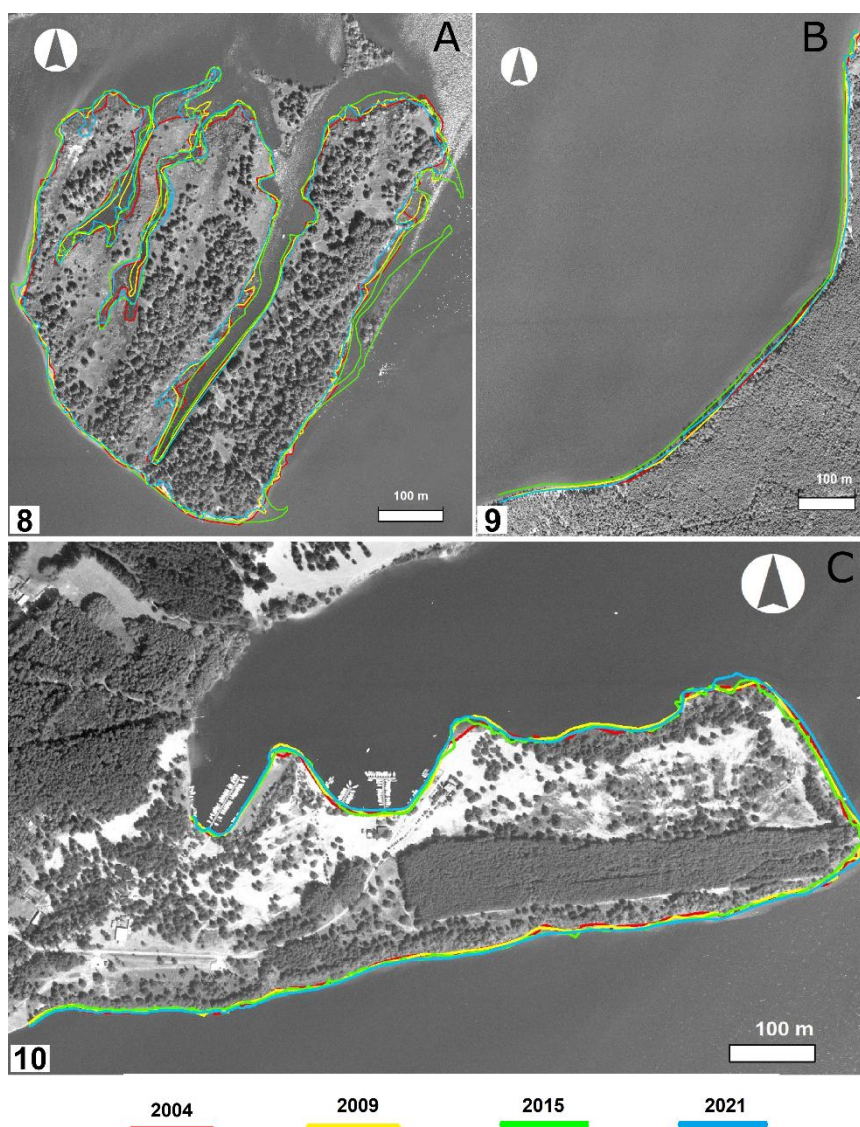
A – Western shoreline zone in Bronisławów  
B – Reed vegetation covering the left bank  
C – View of the artificial embankment in Bronisławów

długości porasta las iglasty. Rozpatrywana strefa brzegowa charakteryzuje się także znikomym rozwinięciem brzegu. Działalność wody w tej części akwenu sprowadza się do wyrównywania strefy brzegowej. Bardzo wyrównana linia brzegowa znacznie ogranicza możliwość rozpoczęcia zaawansowanego cyklu abrazyjnego. Brak wypukłości lądu i znaczna głębokość, nie sprzyja także zjawisku akumulacji.

Obszar testowy 10

Obszar testowy 10 zlokalizowany jest po przeciwnej, zachodniej stronie brzegu zbiornika wzglę-

dem obszaru testowego 9. Analizowany odcinek brzegu ma długość około 1200 m (tab. 3) i przyjmuje formę cypla (rys. 7C). Charakteryzuje się on wysokim stopniem stabilności oraz niewielką dynamiką sukcesji roślinnej. Obszar ten powstał w wyniku prac technicznych – jest to sztuczny nasyp, co prawdopodobnie wiąże się z dużym stopniem zagęszczenia gruntu. Właściwość ta ogranicza podatność brzegu na niszczące oddziaływanie wody. Jedynie na krańcu cypla zaobserwowano cofnięcie się zasięgu roślinności o 13 m w latach 2004–2021. Występowanie erozji na tym odcinku potwierdza obecność jasnej smugi wymywanego



Rys. 7. Dynamika zmienności brzegów w środkowej części Zbiornika Sulejowskiego (obszary badawcze 8–10) (dane: Geoportal 2022)

Dynamics of shoreline variability in the central part of the Sulejów Reservoir (study areas 8–10) (data: Geoportal 2022)

osadu na zdjęciach lotniczych. W tym miejscu największy wpływ na kształtowanie linii brzegowej wywiera główny nurt rzeki oraz falowanie. Nie wielkie obszary przyrostu zasięgu roślinności (maksymalnie 6 m w latach 2004–2021) koncentrują się w obrębie zatok, gdzie występują większe płycizny sprzyjające akumulacji osadów i rozwojowi roślinności przybrzeżnej.

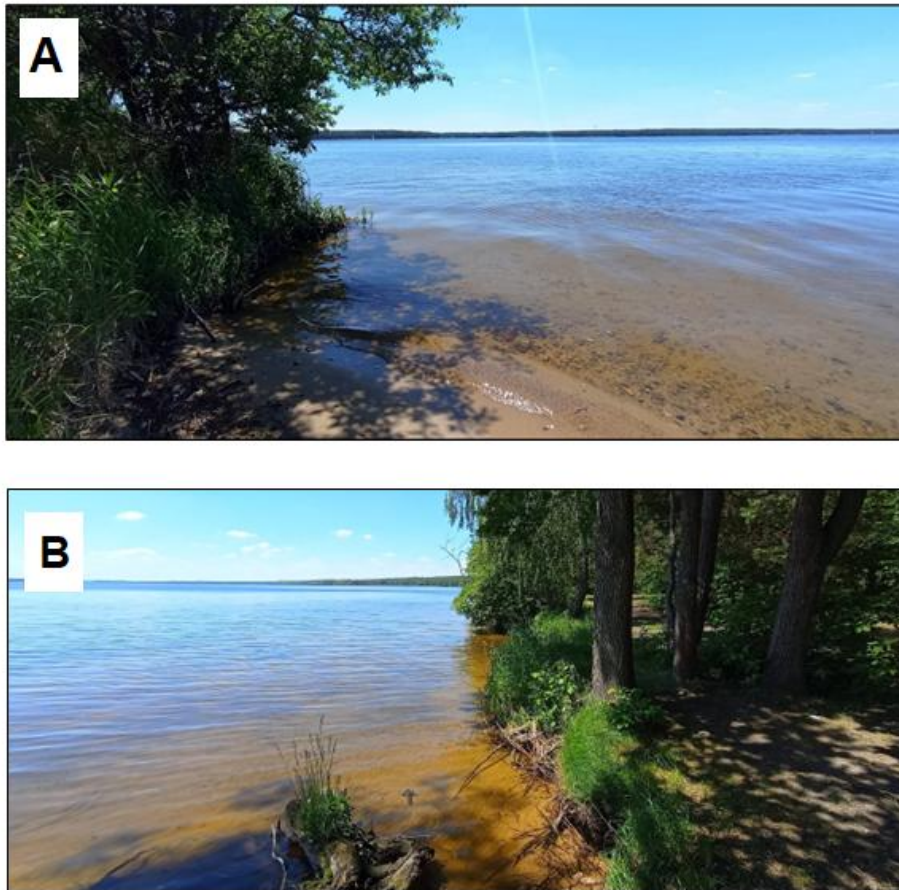
### Rozwój dolnej części zbiornika

Obszar testowy 11

Jedenasty analizowany odcinek strefy brzegowej położony jest około 3 km na południe od zapory w Smardzewicach (fot. 4). Spośród wszystkich

fragmentów badanych w środkowej i górnej części Zbiornika Sulejowskiego, omawiana strefa wyróżnia się znaczną zmiennością zasięgu roślinności (rys. 8A). Sukcesja roślinna była obserwowana na poszczególnych odcinkach w każdym z analizowanych okresów, przy czym największy przyrost zasięgu odnotowano w latach 2004–2009 (31 m). Maksymalny przyrost zasięgu roślinności w całym okresie pomiarowym wyniósł 48 m. W latach 2009–2015 na niektórych odcinkach zaobserwowano również cofnięcie granicy roślinności sięgające 26 m.

Zwiększona dynamika procesów w tym rejonie wynika z położenia analizowanego odcinka w sąsiedztwie ujścia Strugi. Dodatkowo, około



Fot. 4. A – Brzeg zachodni Zbiornika Sulejowskiego w Smardzewicach, widok na północ  
B – Brzeg zachodni w Smardzewicach, widok na południe (fot. A. Nisztuk 2021)

A – Western shoreline in Smardzewice, view to the north  
B – Western shoreline in Smardzewice, view to the south

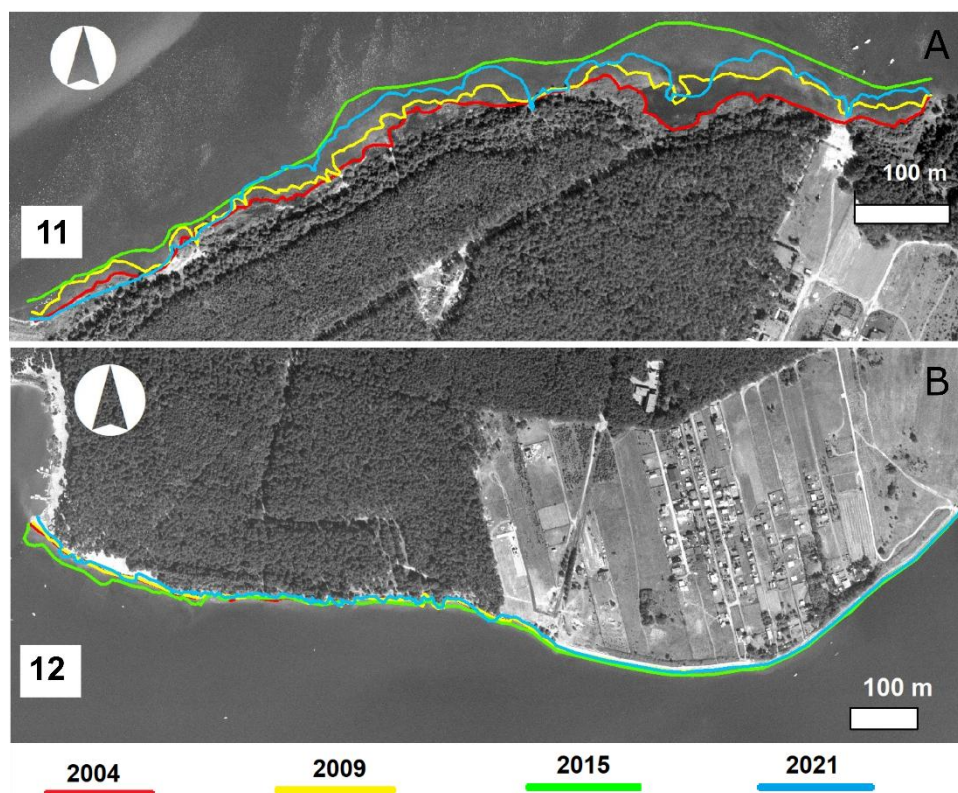
1,5 km dalej na północ zbiornik zasilany jest przez dopływ z Twardej. Oba ciekі dostarczają materiał osadowy, który jest następnie transportowany i deponowany wzdłuż brzegów, przyczyniając się do akumulacji w obrębie platformy przybrzeżnej. Proces ten sprzyja powstawaniu płytkich łąch podwodnych, widocznych na zdjęciach lotniczych, które z czasem ulegają sukcesywnemu zarastaniu. W efekcie dochodzi do stopniowego przesuwania się granicy zasięgu roślinności w kierunku akwenu. Można przypuszczać, że w przypadku braku aktywnego oddziaływania dopływów powierzchniowych, analizowany fragment brzegu charakteryzowałby się znacznie wyższym stopniem stabilności, analogicznym do obserwowanego po przeciwnej stronie zbiornika.

Obszar testowy 12

Ostatni analizowany odcinek strefy brzegowej (rys. 8B) charakteryzuje się wysokim stopniem

stabilności morfologicznej. Linie zasięgu roślinności, wyznaczone dla poszczególnych okresów pomiarowych, w znacznej części pokrywają się, co wskazuje na minimalną dynamikę zmian. Nie wielkie przejawy abrazji (do 6 m) odnotowano jedynie w zachodniej części odcinka oraz lokalnie na wypukłych fragmentach brzegu. Przyrost zasięgu roślinności występuje głównie w małych zatokach, gdzie osiąga maksymalnie 7 m. Stosunkowo niska dynamika procesów w tej części zbiornika wynika z jej położenia – obszar ten znajduje się w znacznej odległości od źródeł dopływającego materiału osadowego, a głębokość akwenu jest tu większa niż w pozostałych analizowanych odcinkach. W rezultacie warunki hydrodynamiczne są mniej sprzyjające zarówno dla akumulacji osadów, jak i do rozwoju sukcesji roślinnej, co skutkuje utrzymywaniem się brzegu w stanie niemal pełnej stabilizacji.





Rys. 8. Dynamika zmienności brzegów w dolnej części Zbiornika Sulejowskiego (obszary testowe 11 i 12) (dane: Geoportal 2022)

Dynamics of shoreline variability in the lower part of the Sulejów Reservoir (study areas 11 and 12) (data: Geoportal 2022)

## Dyskusja

W latach 2004–2021 większość analizowanych odcinków strefy brzegowej Zbiornika Sulejowskiego ulegała przekształceniom. Procesami determinującymi ewolucję były: akumulacja oraz erozja, działające z przyczyn naturalnych, ale i antropogenicznych. Z tych dwóch zjawisk, to właśnie akumulacja powodowała modyfikacje o największym stopniu. Jej efektem było wypływanie się strefy przybrzeżnej i postęp sukcesji roślinnej. W wyniku budowy zbiornika zaporowego doszło do podniesienia bazy erozyjnej, co zapoczątkowało procesy akumulacji deltowej, która w dalszym stopniu występuje. Szmidt i in. (2024) przeanalizowali zmiany morfologii dna zbiornika sprzed inwestycji i po jego wybudowaniu i również zaobserwowali wyraźne ślady procesów akumulacji w górnej części zbiornika. Zwrócili uwagę na to, że charakterystyczna delta zbiornika rozwija się między dwoma przewężeniami, gdzie doszło do zasypania dawnego koryta rzecznej oraz formowania wysp i stożków napływowych. Powstawanie stożków napływowych widoczne jest rów-

nież na zdjęciach lotniczych. Proces wypływania się zbiorników zaporowych i powstawania delt w ich górnych strefach jest powszechny. Przykładem bardzo wyraźnie rozwiniętej delty jest ta, która rozwinęła się w Zbiorniku Jeziorsko (Rdzany i in. 2022, 2024).

W obrębie strefy brzegowej Zbiornika Sulejowskiego miejscami zaobserwowano występowanie również procesu erozji, która zachodziła przeważnie pod wpływem zmian organizacji przepływu wód rzecznych w strefie deltowej, erozji wód płynących oraz w mniejszym stopniu falowania wód zbiornika. Działanie niszczące zaznaczało się głównie na odcinkach wypukłych brzegu oraz w obrębie wysp. Zarejestrowane cofnięcia się zasięgu roślinności występowały najczęściej w obrębie obszarów gdzie wcześniej nastąpił ich przyrost lub w obszarach bardzo płytkich i podatnych na zmiany związane z funkcjonowaniem zbiornika. Zmiany te związane były przeważnie z erozją wód płynących w strefie deltowej spowodowanych reorganizacją systemu odpływu oraz cyklicznym obniżaniem bazy erozyjnej na skutek wahań poziomu wód w zbiorniku. Na całej dłu-

gości brzegu zbiornika nie zarejestrowano klasycznych klifów a abrazja brzegów miała bardzo ograniczony wymiar. Dla porównania, odcinki brzegów Zbiornika Jeziorsko w latach 1991–2011, uległy recesji na skutek abrazji o wartości od 5,7 m do 47,6 m (Kaczmarek 2018).

Wśród obszarów testowych były też takie, które odznaczały się wysoką stabilizacją, a ewentualne zmiany w zasięgu linii brzegowej zachodziły na niewielką skalę. Na podstawie zauważonych prawidłowości stworzono klasyfikację uwzględniającą typy brzegów omawianego akwenu (tab. 5). Brzegi akumulacyjne to te, które na dominującej długości odcinka systematycznie zwiększały swój zasięg. Z kolei pod pojęciem brzegów neutralnych należy rozumieć miejsca nie wykazujące sukcesywnej tendencji przyrastającej lub cofającej. Brzegi erozyjne, na których zaobserwowano cofanie się zasięgu roślinności zostały odnotowane tylko na niewielkich fragmentach analizowanych odcinków badawczych.

Dynamika zaobserwowanych zmian w obrębie zbiornika była zróżnicowana przestrzennie. Największe przekształcenia zachodziły w obszarach położonych w pobliżu ujść rzek doprowadzających wodę do zbiornika. Dopływy te determino-

wały dostawę materiału osadowego oraz jego deponowanie, co w konsekwencji prowadziło do przyrostu dna i stopniowego zmniejszania głębokości akwenu. Takie warunki sprzyjały rozwojowi sukcesji roślinności. Procesy te są szczególnie dobrze widoczne w strefie deltowej zbiornika, która wykazuje wyraźne cechy postępującej agradacji. O zaawansowaniu tego zjawiska świadczą obserwowane przyrosty powierzchni analizowanych wysp. W okresie od 2004 do 2021 roku zasięg roślinności na niektórych z nich zwiększył się miejscami o około 50 m, natomiast na odcinku brzegu nr 5 odnotowano wzrost sięgający niemal 100 m. Tempo sukcesji roślinnej w tej części zbiornika jest wysokie i maksymalnie wynosi około 5,5 m rocznie. Wraz z oddalaniem się od źródeł zawiesiny, tempo zmian maleje.

W północnej części górnej strefy zbiornika, wahania linii brzegowej oscylują wokół wartości rzędu kilku metrów. Podobnie sytuacja ma się w środkowej i górnej części rezerwaru. Odcinki testowe oznaczone nr 9 i 12 praktycznie nie uległy transformacji w rozpatrywanym czasie. Na tej podstawie można stwierdzić, że Zbiornik Sulejowski na znacznym fragmencie strefy brzegowej osiągnął dojrzałe stadium rozwoju.

Tabela 5

Klasyfikacja typów wybranych brzegów Zbiornika Sulejowskiego  
Classification of selected shoreline types of the Sulejów Reservoir

Część zbiornika	Nr obszaru badawczego	Typ brzegu na dominującej części odcinka
Górna	1	Akumulacyjny
	2	Akumulacyjny
	3	Akumulacyjny
	4	Akumulacyjny
	5	Akumulacyjny
	6	Neutralny
	7	Neutralny
Środkowa	8	Neutralny
	9	Neutralny
	10	Neutralny
Dolna	11	Akumulacyjny
	12	Neutralny

## Wnioski

Analiza przekształceń strefy brzegowej Zbiornika Sulejowskiego w latach 2004–2021 wskazuje na istotne, choć zróżnicowane przestrzennie procesy

akumulacyjne i erozyjne. Dominującym zjawiskiem była akumulacja, która doprowadziła do stopniowego wypłykania przybrzeżnych partii zbiornika i sprzyjała intensywnemu rozwojowi sukcesji roślinnej, zwłaszcza w obszarach delto-

wych. W rejonach ujść dopływów, gdzie dostarczany materiał osadowy ulegał deponowaniu, następował wyraźny przyrost dna i zmniejszanie głębokości akwenu. Z kolei procesy erozyjne, choć mniej intensywne, były zauważalne na wybranych odcinkach, głównie w wyniku reorganizacji dróg przepływu wody. W efekcie Zbiornik Sulejowski, szczególnie w swojej górnej strefie, wykazuje cechy zaawansowanego stadium rozwoju, z wyraźnie ukształtowanymi obszarami akumulacyjnymi i względnie stabilnymi odcinkami linii brzegowej. Całość obserwacji pozwala na wnioskowanie, że dynamika tych procesów jest ściśle związana z lokalnymi warunkami hydrologicznymi i morfologicznymi, a omawiany akwen osiągnął na znacznych odcinkach dojrzały stan równowagi morfologicznej.

## Literatura

- Ambrożewski Z. 1998. Ogólna ocena 25 lat eksploatacji zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 440-443.
- Ambrożewski Z. 2013. Budowa zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 457-464.
- Banach M. 1981. Abrazja brzegów a zamulanie zbiornika Włocławek. *Gospodarka Wodna* 11-12: 283-287.
- Banach M. 1988. Główne procesy a osady w strefie brzegowej zbiornika Włocławek. *Przeгляд Geograficzny* 60: 267-299.
- Banach M. 1994. Morfodynamika strefy brzegowej zbiornika Włocławek. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 161. Wrocław-Warszawa-Kraków.
- Banach M. 2004. Ewolucja strefy brzegowej zbiorników zaporowych. *Dokumentacja Geograficzna IGiPZ PAN* 31: 11-12.
- Banach M. 2006. Changes in geomorphology of new shoreline after the filling of the Włocławek artificial lake. *Prace Geograficzne UJ* 116: 23-32.
- Banach M., Spanilá T. 2000. Geodynamic evolution of water reservoir banks. *Acta Montana, IRSM AS CR, Series A* 15(116): 45-66.
- Banach M., Grobelska H. 2003. Stan dynamiki brzegów zbiornika Jeziorsko. *Shupskie Prace Geograficzne* 1: 91-106.
- Będkowski K., Jaskulski M. 2024. Changes in forest habitat types in the vicinity of Sulejów Reservoir, Pilica River, Poland. *Acta Geographica Lodziensia* 114: 97-109.
- Brown E.A., Wu Ch.H., Mickelson D.M., Edil T.B. 2005. Factors controlling rates of bluff recession at two sites on Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research* 31: 306-321.
- Brzeziński H. 1992. Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Sulejów. PIG, Warszawa.
- Dabkowski S.L. 1978. Wyniki wstępnych badań abrazji brzegu zbiornika Nysa. *Gospodarka Wodna* 10: 312-316.
- Geoportal (Główny Urząd Geodezji i Kartografii). 2022. Online: <https://www.geoportal.gov.pl/> (data ostatniego dostępu: 16.06.2022).
- Grobelska H. 2006. Ewolucja strefy brzegowej zbiornika Pąkoskiego, Pojezierze Gnieźnieńskie. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 205.
- Heliasz Z. 2000. Zjawiska geodynamiczne w strefach brzegowych zbiorników Solina-Myczkowce i Tresna-Porąbka. W: S. Ostaficzuk (red.) *Dynamiczna ocena i prognoza geologicznych zagrożeń wywołanych powodzią – na przykładzie Nysy Kłodzkiej, górnej Soły i górnego Sanu-Solinki*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków: 169-190.
- Hillbricht-Ilkowska A. 2005. Ochrona jezior i krajobrazu pojeziernego – problemy, procesy, perspektywy. *Kosmos* 54(4): 285-302.
- Jaskulski M., Szmidt A., Zbiciński I., Ziemińska-Stolarska A., Adamiec J. 2018. Konstrukcja mapy batymetrycznej na podstawie badań sonarowych sztucznego zbiornika wodnego na przykładzie Zalewu Sulejowskiego. *Teledetekcja Środowiska* 59: 5-12.
- Kaczmarek H. 2010. Analiza zdjęć lotniczych oraz wyników pomiarów geodezyjnych w badaniach dynamiki strefy brzegowej sztucznych zbiorników wodnych – zbiornik Jeziorsko, rzeka Warta. *Landform Analysis* 13.
- Kaczmarek H. 2018. Ewolucja strefy brzegowej nizinnych zbiorników zaporowych w warunkach dużych wahań poziomu wody na przykładzie zbiornika Jeziorsko na Warcie. Wyd. PAN IGiPZ, Warszawa.
- Kaczmarek H., Tyszkowski S. 2009. Using of the aerial and ground photogrammetry in monitoring shore zone of Jeziorsko Reservoir (Warta River, Central Poland). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica* 2: 7-12.
- Kieras W., Majka J., Racinowski R. 1973. Próba określenia ilościowej charakterystyki abrazji na zbiorniku Solińskim. *Gospodarka Wodna* 4: 129-131.
- Korolec H. 1968. Procesy brzegowe i zmiany linii brzegowej Jeziora Mikołajskiego. *Prace Geograficzne IG PAN* 73.

- Kostecki M. 1975. Wstępne obserwacje nad transformacją brzegów zbiornika w Tresnej. *Gospodarka Wodna* 4: 144-145.
- Kostuch R., Masłanka K., Szymacha A. 2005. Inicjacja abrazji brzegu zbiornika Domaniów. *Acta Agrophysica* 5(2): 307-313.
- Kot K. 2003. Charakterystyka zlewni Pilicy, 30 lat zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna*, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie, Inspektorat Warszawa, nr 12/2003.
- Kozielska-Sroka E., Michalski P., Zydrón T. 2010. Uwarunkowania geotechniczne i hydrodynamiczne transformacji północnej strefy brzegowej zbiornika Czorsztyn-Niedzica w trakcie jego eksploatacji. W: *Pieniny – zaporą – zmiany*, Monografie Pienińskie 2: 63-82.
- KZGW (Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej). 2022. Online: [www.kzgw.gov.pl/files/mzpmrp/zal1](http://www.kzgw.gov.pl/files/mzpmrp/zal1) (data ostatniego dostępu: 16.06.2022)
- Majde A., Niepokulczycki M. 1972. Fotogrametryczny pomiar skutków abrazji na zbiornikach śródlądowych. *Gospodarka Wodna* 1: 11-16.
- Majecki P. 2014. Wykorzystanie fotogrametrii bliskiego zasięgu w badaniach tempa erozji wybrzeży klifowych Zbiornika Jeziorsko (k. Sieradza). *Przegląd Geologiczny* 62(11): 744-747.
- Michna A. 2008. 35 lat eksploatacji zbiornika Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 481-485.
- Michna A. 2013. 40 lat eksploatacji zbiornika Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 484-486.
- Mroczek J., Ślusarczyk U., Waćławski M. 1984. Charakterystyka abrazji brzegów zbiornika Żywieckiego po 10 latach eksploatacji. *Czasopismo Techniczne* 84(3): 5-11.
- Ostendorp W., Schmieder K., Jönk K. 2004. Assessment of human pressures and their hydro-morphological impacts on lakeshores in Europe. *Ecohydrology & Hydrobiology* 4.
- Rdzany Z., Szmidt A., Frydrych M., Kossowski M. 2022. Wpływ powodzi z 2010 roku na morfologię południowej części dna Zbiornika Jeziorsko. *Acta Geographica Lodziensia* 112: 77-95.
- Rdzany Z., Szmidt A., Kossowski M. 2024. Zmiany morfologiczne cofki zbiornika Jeziorsko na tle przemian dna doliny Warty między Woźnikami a Uniejowem w antropocenie. *Acta Geographica Lodziensia* 116: 51-70.
- Rowan J.S., Carwardine J., Duck R.W., Bragg O.M., Black A.R., Cutler M.E.J., Soutar I., Boon P.J. 2006. Development of a technique for Lake Habitat Survey (LHS) with applications for the European Union Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine & Freshwater Ecosystems* 16.
- Rzętała M.A. 2014. Wybrane przemiany geomorfologiczne mis zbiorników wodnych i ocena zanieczyszczeń osadów zbiornikowych w warunkach zróżnicowanej antropopresji (na przykładzie regionu górnośląskozagłębiowskiego). *Wyd. Uniwersytetu Śląskiego*, Katowice.
- Schumm S. 2007. River Variability and Complexity. *Environmental & Engineering Geoscience* 13(1): 78-80.
- Sentinel-2A (Copernicus Data Space Ecosystem). 2022. Online: <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2> (data ostatniego dostępu: 16.06.2022).
- Siligardi M., Zennaro B., Nowicka B., Nadolna A. 2016. SFI metoda oceny funkcjonalności stref brzegowych jezior. *Gospodarka Wodna* 12: 410-417.
- Smith D.S., Hellmund P.C. (red.). 1993. Ecology of Greenways: Design and Function of Linear Conservation Areas. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Solon J. et al. 2018. Physicogeographical mesoregions of Poland: verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91.
- Soszka H., Skocki K. 2008. Wytyczne do oceny hydromorfologicznej jezior polskich zgodnie z brytyjską metodą Lake Habitat Survey (LHS). IOŚ, Warszawa.
- Strzezińska L., Lis J., Pasieczna A., Bojowska I., Tomassi-Morawiec H., Gabryś-Godlewska A. 2004. Objąsnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski 1:50 000, arkusz Sulejów. PIG, MŚ, Warszawa.
- Szałamacha G. 1992. Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Sławno. PIG, Warszawa.
- Szałamacha G. 1989. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, 1:50 000, arkusz Sławno. Wydawnictwa Geologiczne, PIG, Warszawa.
- Szmidt A., Jaskulski M., Kossowski M. 2024. Morphological changes in the section of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice in the years 1968–2016. *Acta Geographica Lodziensia* 116: 251-267.

- Wacławski M. 1986. Niektóre zagadnienia abrazji brzegów karpaccich zbiorników wodnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Budownictwo Wodne i Inżynieria Sanitarna* 37: 1-105.
- Wagner I., Zalewski M. 2000. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir — consequences for restoration. *Ecological Engineering* 16: 79-90.
- Wetzel R.G. 2001. *Limnology*. 3rd edition. Academic Press, London.
- Witek M., Jeziorska J., Niedzielski T. 2013. Możliwości wykorzystania bezzałogowej fotogrametrii lotniczej do identyfikacji przekształceń antropogenicznych w dolinach rzecznych. *Landform Analysis* 24: 115-126.
- Wody (Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie). 2022. Online: [warszawa.wody.gov.pl](http://warszawa.wody.gov.pl) (data ostatniego dostępu: 16.06.2022).
- Zietara T. 1992. Wstępne wyniki badań i prognozy dotyczące przebiegu niszczenia brzegów zbiornika w Dobczycach. *Roczniki Naukowo-Dydaktyczne WSP w Krakowie. Prace Geograficzne* 14: 95-107.
- Zietara T. 1994. Niszczenie brzegów zbiornika "Besko" przez współczesne procesy geomorfologiczne. *Roczniki Naukowo-Dydaktyczne WSP w Krakowie. Prace Geograficzne* 15: 167-180.
- Zydroń T., Kozielska-Sroka E., Michalski P., Drys D., Kruk E., Płonka M. 2010. Badania postępu procesu abrazji brzegów zbiornika Czorsztyn-Niedzica. *Górnictwo i Geoinżynieria* 34(2): 663-673.

## Summary

This study examines the long-term morphological evolution of the shoreline zone of the Sulejów Reservoir (central Poland) (Fig. 1, 2) more than five decades after its construction. Artificial reservoirs represent highly dynamic geomorphological systems, in which shoreline development is controlled by the interaction of hydrodynamic, sedimentary, biological and anthropogenic factors. Despite the widespread presence of such reservoirs in Poland, detailed studies of shoreline morphodynamics in lowland dam reservoirs remain limited. The Sulejów Reservoir, one of the largest lowland reservoirs in central Poland, has not previously been analysed in terms of long-term shoreline transformation. The main objective of this research was therefore to assess the spatial and temporal variability of shoreline development between 2004 and 2021 and to identify the dominant processes controlling the evolution of selected shoreline sections and islands within the reservoir.

The analysis was based on multi-temporal remote sensing data, including orthophotomaps from 2004, 2009, 2015 and 2021, supplemented by high-resolution photogrammetric data acquired using an unmanned aerial vehicle (UAV) in 2021. To minimise the influence of short-term water level fluctuations, shoreline changes were assessed using the boundary of stabilised shoreline vegetation, which reflects long-term accumulation and erosion processes more reliably than instantaneous waterlines do. The reservoir was divided into three zones (upper, central and lower), and twelve representative test sections were selected for detailed analysis (Fig. 3). Shoreline positions were vectorised in a GIS environment, and changes in shoreline length, as well as maximum advance and retreat of vegetation, were calculated for each time interval.

The results demonstrate that the shoreline of the Sulejów Reservoir is predominantly shaped by accumulation processes, while erosion and abrasion play a secondary and mostly local role. The most dynamic changes occurred in the upper part of the reservoir (Fig. 4–6, photo 1, 2), particularly in the direct influence zone of the Pilica and Łuciąża Rivers. In this zone, intensive sediment deposition led to the rapid shallowing of the nearshore zone and the expansion of islands. In some locations, the shoreline advanced by more than 5 m per year due to rapid vegetation succession. As

sediment accumulated in shallow zones, previously separate islands gradually merged into larger, continuous landforms. The formation and growth of deltaic forms were strongly controlled by a decrease in flow velocity at the river–reservoir transition and by changes in the distribution of river channels supplying the reservoir.

In the central part of the reservoir, shoreline dynamics were markedly lower (Fig. 7, photo 3). Most sections exhibited high stability, with only localised zones of vegetation advance occurring in shallow bays and areas of reduced hydrodynamic energy. Islands in this zone showed a mixed pattern of slow accumulation and limited erosion, depending on their exposure to the main current of the Pilica River and the degree of vegetation cover. Artificially reinforced or anthropogenically modified shorelines were particularly resistant to erosion, confirming the importance of substrate properties and human intervention in shoreline stability.

Dynamics were lowest in the lower part of the reservoir (Fig. 8, photo 4), where the distance from sediment sources is greatest and water depth increases. Here, shoreline positions remained almost unchanged throughout the study period, and both accumulation and abrasion were limited to small, localised sections. Only shorelines near minor tributary inflows showed enhanced sedimentation and vegetation development, indicating that even small sediment sources can locally influence shoreline evolution under favourable hydrodynamic conditions.

Overall, the study shows that, after more than 50 years of operation, large sections of the Sulejów Reservoir shoreline have reached a mature stage of geomorphological development, characterised by relative stability and dominance of accumulation processes. The spatial variability of shoreline change is primarily controlled by proximity to sediment supply, hydrodynamic conditions, geological substrate and vegetation cover, while anthropogenic activities such as dredging and embankment construction locally modify natural trends. The results provide valuable insight into the long-term functioning of lowland dam reservoirs and highlight the importance of integrating remote sensing and UAV-based methods into shoreline monitoring. These findings may support future reservoir management strategies, particularly in the context of sediment management, ecological restoration and adaptation to changing hydrological conditions.