





## WPŁYW POWODZI Z 2010 ROKU NA MORFOLOGIĘ POŁUDNIOWEJ CZĘŚCI DNA ZBIORNIKA JEZIORSKO

### The impact of the 2010 flood on the morphology in the southern part of the Jeziorsko Reservoir bottom

ZBIGNIEW RDZANY<sup>1</sup> , ALEKSANDER SZMIDT<sup>1</sup> , MAŁGORZATA FRYDRYCH<sup>1</sup> ,  
MACIEJ KOSSOWSKI<sup>2</sup> 

**Zarys treści.** W artykule podjęto próbę określenia zmian geomorfologicznych i sedimentologicznych w południowej części Zbiornika Jeziorsko, zaistniałych pomiędzy latami 2009 i 2011, głównie jako skutek powodzi w maju i czerwcu 2010 roku. Zobrazowano dane przestrzenne, m.in.: zasięg procesów depozycyjnych, objętość i rozkład miąższości osadów oraz zmiany kształtu form rzeźby powstałych w górnej części zbiornika i w jego najbliższym sąsiedztwie w zasięgu dna doliny Warty, a także inne, powiązane z nimi zmiany środowiskowe. W tym celu wykorzystano: dane pomiarowe LiDAR (*Light Detection and Ranging*) z lotniczego skanowania laserowego ALS (*Airborne Laser Scanning*) pozyskane w latach 2009 i 2011, zdjęcia lotnicze i satelitarne z dotychczasowego okresu istnienia zbiornika oraz przed jego powstaniem (1976–2022) oraz archiwalne dane kartograficzne, geologiczne, hydrologiczne i botaniczne. Stwierdzono, że powódź spowodowała m.in.: częściowe zapełnienie koryt w obrębie delty, podniesienie powierzchni obszarów międzykorytowych, zakłócenie regularności zarysów wcześniej ukształtowanych koryt i form międzykorytowych oraz utworzenie kilkudziesięciu drobnych pagórków o średnicy od kilku do kilkunastu metrów i wysokości do 1 m. Miąższość zdeponowanych osadów na przeważającej części obszaru osiąga 0,5–1,0 m, przy pojawieniu się niewielkich terenów cechujących się ich ubytkiem. Stwierdzono powiązanie zasięgu akumulacji rumowiska w następstwie powodzi ze środkową i północną częścią delty, szczególnie w strefie roślinności wysokiej.

**Słowa kluczowe:** dolina Warty, centralna Polska, powódź, osady deltowe, dane pomiarowe LiDAR, zamulanie zbiorników zaporowych

**Abstract.** The article attempts to determine geomorphological and sedimentological changes in the southern part of the Jeziorsko Reservoir occurring in 2009–2011 mainly as a result of floods in May and June 2010. The spatial data include: range of deposition processes, volume and thickness distribution of sediments and changes in the shape of relief forms in the upper part of the reservoir; as well as other related environmental changes. For this purpose, the following were used: data of Airborne Laser Scanning (ALS) surveys made in 2009 and 2011, aerial and satellite photography taken throughout the reservoir's existence, as well as archival cartographic, geological, hydrological and botanical data. It was found that the outcomes of the flood included: partial filling of the channels within the delta, vertical accretion of flood sediments in the areas between channels, disturbance of the regularity of the outlines of older forms and the creation of several tens of small (several to more than ten meters in diameter) hilly forms rarely exceeding 1 m in height. The thickness of the deposited sediments in most of the area reaches 0.5–1.0 m, with the appearance of small, slightly depressed areas. Areas where measurement errors may occur have been identified. These are mainly reservoirs deeper than 0.5 m. They were excluded from further analysis. The extent of sediment accumulation following the flood was found to be related to the highest, central and northern part of the delta, especially in the zone of tall vegetation.

**Keywords:** Warta River valley, central Poland, flood, delta deposits, LiDAR data, siltation of dam reservoirs

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: zbigniew.rdzany@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-9059-9904; e-mail: aleksander.szmidt@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-8269-6368; e-mail: małgorzata.frydrych@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0001-8837-7416

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

## Wprowadzenie

Problemy związane z transportem rumowiska i akumulacją aluwii w sztucznych zbiornikach i strefach ich cofki są przedmiotem badań w wielu krajach świata. Zagadnienia te także w Polsce zaczęto dostrzegać w okresie powojennym, co miało związek z uruchamianymi kolejno sztucznymi zbiornikami wodnymi (m.in.: Bolesta 1966; Williams, Wolman 1984; Verstraeten i in. 2006; Madeyski i in. 2008; Rzętała 2014).

Badania tempa depozycji osadów i cech sedimentologicznych odkładanego materiału są ważne z punktu widzenia żywotności zbiornika. Istotne zredukowanie pojemności ogranicza szereg funkcji zbiorników. W starszych pracach zwracano uwagę na tempo redukcji pojemności zbiornika przyjmując tzw. kryterium Hartunga (1959), 80-procentowego zapełnienia osadami jako stanu zakończenia jego funkcjonowania. Obecnie często stosowane jest kryterium zwane HLT (*half-life time*) (Pitt, Thomson 1984), nawiązujące do 50-procentowego zapełnienia zbiornika. Ścisłej – określenie HLT dotyczy czasu, po upływie którego stopień zamulenia wynosi 50%. Dowiedziono bowiem, że już takie zapełnienie osadami upośledza skutecznie szereg kluczowych funkcji zbiornika. Michalec (2012), opierając się na tym założeniu, na podstawie badań małych zbiorników w Karpatach i na wyżynach określił ich żywotność na zaledwie 17–40 lat. Większe zbiorniki mają z reguły znacznie dłuższy okres żywotności. Według Łajczaka (1989), faza zamulania do 80% pojemności może trwać nawet od dwustu do kilku tysięcy lat. Dane te dotyczą jednak głównie zbiorników górskich. Pod tym względem zbiorniki nizinne są znacznie słabiej rozpoznane. Według Światowej Komisji ds. Zapór, która działała w latach 1997–2001 (*Dams...* 2000; Verstraeten i in. 2006), średnie roczne zmniejszenie się pojemności początkowej zbiorników na świecie, wyrażone w procentach pojemności początkowej, waha się w granicach 0,5–1,0% objętości, a w niektórych przypadkach osiąga 4,0–5,0% objętości.

W przypadku Zbiornika Jeziorsko zagadnienie akumulacji po trzydziestu latach istnienia zbiornika przedstawiono w materiałach IMGW (*Badania...* 2010) oraz w artykule Wicher-Dysarz i Dysarza (2016). Badacze ci zastosowali kilka procedur badawczych,

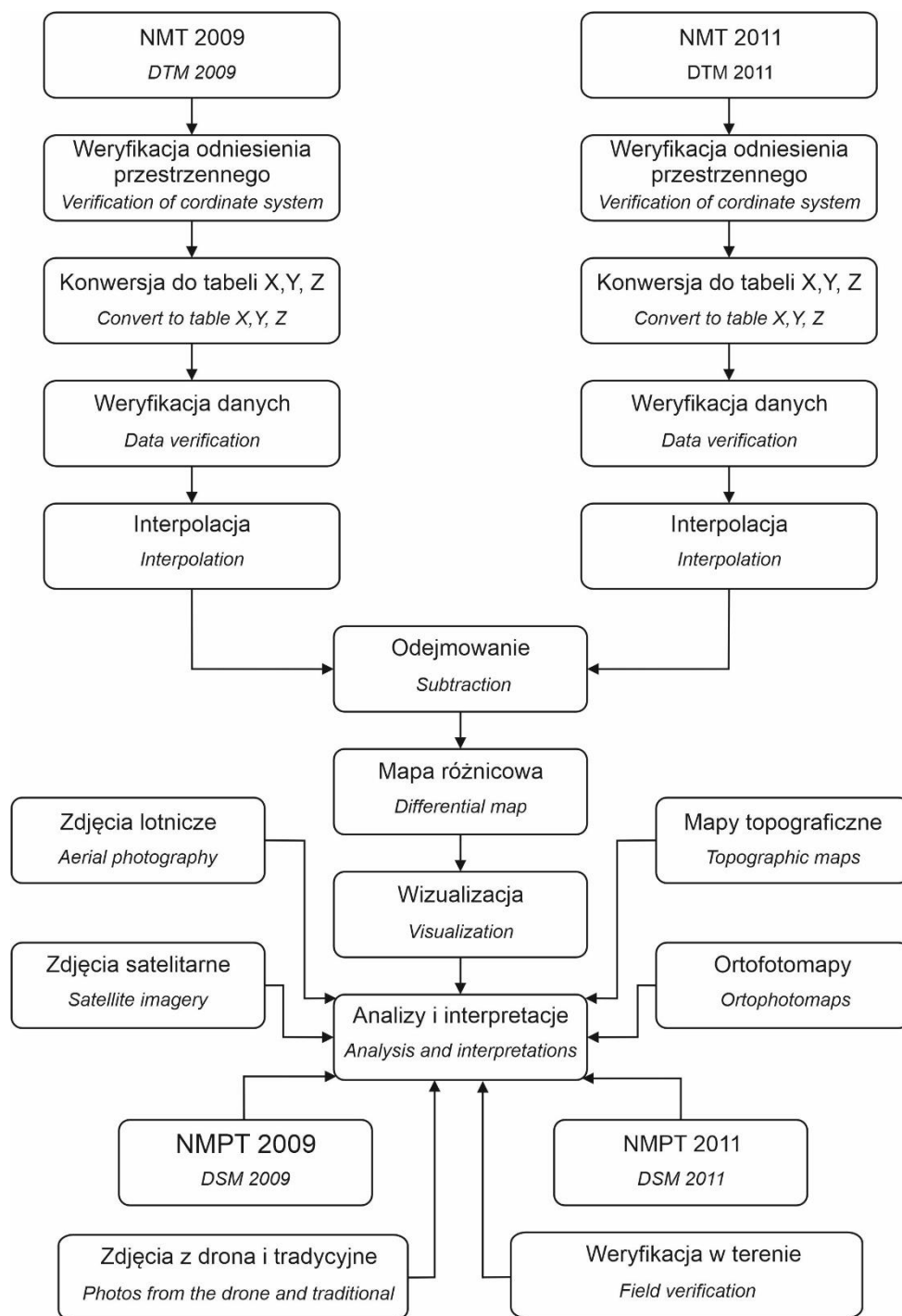
uznając metodę profilowania geodezyjnego za metodę wiodącą. Otrzymane, zróżnicowane dane w zależności od przyjętej metody, świadczą o znacznych różnicach ich dokładności. Z tego powodu należy szukać nowych metod. Do nich należą metody GIS, zwłaszcza z użyciem danych pomiarowych LiDAR. Autorzy podjęli próbę wykorzystania takich materiałów, pochodzących z lotniczego skaningu laserowego, dokonanych w roku poprzedzającym i następującym po powodzi, która wystąpiła w maju i czerwcu 2010 roku.

Celem głównym niniejszej pracy jest identyfikacja obszarów poddanych erozji i akumulacji oraz określenie ilościowych i jakościowych zmian morfologicznych, które nastąpiły w 2010 roku w wyniku powodzi i jej następstw w dolinie Warty w południowej, deltowej części dna Zbiornika Jeziorsko i na sąsiednich terenach jego cofki. Na podstawie wstępnej analizy terenów popowodziowych autorzy założyli, że realizacja tego celu pozwoli na określenie znaczenia powodzi w procesie zamulania zbiornika. Jest przy tym szansa na uzyskanie bardziej precyzyjnych danych pomiarowych w stosunku do poprzednich badań – przynajmniej na obszarze powyżej poziomu zbiornika ze względu na użycie wyników pomiarów LiDAR.

## Metody i materiały

Najważniejsze dane pomiarowe, wykorzystane do analizy zmian w rzeźbie terenu stanowią modele GRID wykonane w latach 2009 i 2011 (rys. 1) powstałe na podstawie danych z lotniczych skanowań laserowych (ALS). Numeryczny model terenu (NMT) pochodzący z pomiarów w 2009 roku udostępniony został w rozdzielczości poziomej co najmniej 0,5 m i dokładności pionowej 0,2 m przez firmę MGGP Areo w Warszawie. Drugi zestaw danych pochodzący z 2011 roku pozyskany został z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii (GUGiK) w formie GRID o rozdzielczości poziomej co najmniej 1,0 m i dokładności pionowej co najmniej 0,2 m.

W celu przeanalizowania czynników oddziałujących na jakość NMT, w szczególności terenów pod wodą oraz pokrytych roślinnością, wykorzystano Numeryczne Modele Pokrycia Terenu (NMPT) dla lat 2009 i 2011 oraz dane ALS dla roku 2011 udostępnione przez GUGiK.



Rys. 1. Schemat zastosowanej procedury badawczej

Research procedure diagram

W badaniach uwzględniono także zdjęcia satelitarne i lotnicze z dotychczasowego okresu istnienia zbiornika oraz sprzed jego powstania (1976–2022), jako źródła danych pomocniczych, które ukazują zmiany w analizowa-

nym odcinku doliny w szerszym przedziale czasu. Kluczowe znaczenie miały dane pochodzące z okresu 2009–2011, ukazujące obraz morfologiczny badanego obszaru przed i po wystąpieniu powodzi w 2010 roku. Wykorzy-

stanie danych pomiarowych LiDAR w świetle wcześniejszych badań (por. Wicher-Dysarz, Dysarz 2016), wnosi nową jakość w badaniu skutków powodzi w dolinie Warty zarówno z punktu widzenia zmian morfologicznych, jak i poznania specyfiki zapełniania się zbiorników. Wskazuje na to duży rozrzut wyników przy zastosowaniu różnych modeli obliczeniowych, a zestawionych przez cytowanych autorów. Należy wspomnieć, że dane LiDAR ze skanowania naziemnego i lotniczego były już wykorzystywane z powodzeniem przez Kaczmarek (2018) do rozpoznania dynamiki procesów litoralnych w Zbiorniku Jeziorsko.

Ze względu na wspomniane różnice co do rozdzielczości pozyskanych danych z lat 2009 i 2011 w pierwszej kolejności modele NMT z lat 2009 i 2011 w formatach IMG (IMAGINE) oraz ASC (Esri ArcGIS) zostały przekonwertowane do formatu Esri ArcGIS GRID i ujednolicone do Państwowego Układu Współrzędnych Geodezyjnych 1992. Procedurę tę wykonano w programie ESRI ArcGIS 10.8. W drugim kroku, na podstawie NMPT dla roku 2009 oraz danych ALS dla roku 2011 oraz ortofotomap, określono obszar zasięgu wody w momencie wykonywania pomiarów. Takie postępowanie służyło wyeliminowaniu niepewnych danych, ponieważ w przypadku wartości współrzędnej Z pochodzących ze skaningu laserowego opisaną techniką, często występują błędy bezpośrednio generowane dla obszarów pokrytych wodą. Dla obu okresów pomiarowych wygenerowano warstwy wektorowe zawierające obszary zasięgu wody a następnie je zsumowano. Procedury te wykonano w programie ESRI ArcGIS 10.8 i QGIS 3.26. Obszary te zostały później wyłączone z wyliczeń i interpretacji związanych z oceną depozycji i erozji osadów. W następnym kroku model GRID został przekonwertowany do formy tabelarycznej XYZ. Następnie, dane te w programie Golden Software Surfer 16 zostały posortowane i przeszukane pod względem nieprawidłowości (wartości znacząco odbiegające od parametrów morfometrycznych analizowanego terenu), które mogły powstać podczas automatycznego przetwarzania surowych danych pomiarowych. Znalezione tego typu punkty zostały usunięte z tabeli.

Tak przygotowane dane ujednolicono pod względem przestrzennym, tj. zredukowano rozdzielczość poziomą modelu z 2009 roku do 1,0 m i zreinterpolowano modele z obu okre-

sów w tej samej siatce przestrzennej. Procedurę wykonano w programie Golden Software Surfer 16, stosując ze względu na rozmiar danych metodę naturalnych sąsiadów. Z tak powstałych gridów przy pomocy warstwy wektorowej z zasięgami wody w programie ESRI ArcGIS 10.8 wyodrębniono obszary analizy i następnie za pomocą funkcji Spatial Analyst/Tools/Math/Minus wykonano model różnicowy (DoD) obrazujący zmiany ukształtowania powierzchni terenu (Wheaton 2008). Zakres niepewności otrzymanego modelu wynosi  $0,2\text{ m} \pm 0,2\text{ m}$  na podstawie danych pozyskanych od producentów modelu z lat 2009 (MGGP Areo w Warszawie) i 2011 (GUGiK).

Jak podkreśla Wheaton (2008), przy analizie wyników modelu różnicowego ważne jest określenie niepewności modeli wejściowych, opisujących powierzchnię nowszą i starszą. Za pomocą takich miar możemy określić, na ile zmiany w ukształtowaniu powierzchni terenu wynikają z procesów zachodzących w środowisku, a na ile są wynikiem błędów pomiarowych oraz samego przetwarzania danych. Jeśli jest to możliwe, oceny można dokonać za pomocą szeregu narzędzi geostatystycznych na podstawie precyzyjnych danych pomiarowych uzyskane bezpośrednio w terenie, np. za pomocą tachimetru, tyczek, czy GPS. Przydatne są też takie oceny wykonane opierając się na rozkładzie punktów w danych pomiarowych i pochodnych NMT, a także danych fotogrametrycznych. W przypadku obszaru badań autorzy dysponowali danymi ALS tylko dla 2011 roku, w związku z tym zdecydowali się wykorzystać i zsumować tylko ogólną dokładność dla obu modeli określoną przez producentów, czyli po  $\pm 0,2\text{ m}$ . Miejsca, gdzie zmiany na powierzchni terenu były mniejsze niż  $0,2\text{ m}$ , wykluczono z dalszej analizy. Model różnicowy jest uważany przez wielu badaczy za wartościową metodę analizy rzeźby, tym bardziej, że niektórzy specjaliści wskazują na fakt redukcji części błędów modeli wziętych do porównania (np. Borkowski 2015).

W badaniach wykorzystano także inne typy danych uzupełniających:

- zdjęcia satelitarne z lat 2015–2022 z misji Sentinel-2 oraz z lat 2009–2011 z programu Landsat (satelita Landsat 5),
- zdjęcia lotnicze z 1976 roku (sprzed powstania Zbiornika Jeziorsko w skali 1:10000) oraz ortofotomapy w różnych przedziałach widma z lat 2009–2021 (moduł archiwizacji 1:2000 do 1:5000),

- zdjęcia z dronów (RGB) pozyskane podczas jednego nalotu w lipcu 2021 roku oraz trzech nalotów w marcu i kwietniu 2022 roku z pułapu 100–120 m przy wykorzystaniu drona DJI Phantom z funkcją RTK, wyposażonego w odbiornik GNSS,

- dane autorów z rekonesansowych obserwacji i dokumentowania fotograficznego wybranych obiektów przyrodniczych otoczenia zbiornika z lat 2010–2022,

- dane hydrologiczne o stanie wód i natężeniu przepływu rzeki Warty w latach 2005–2015 w punkcie wodowskazowym Sieradz udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej,

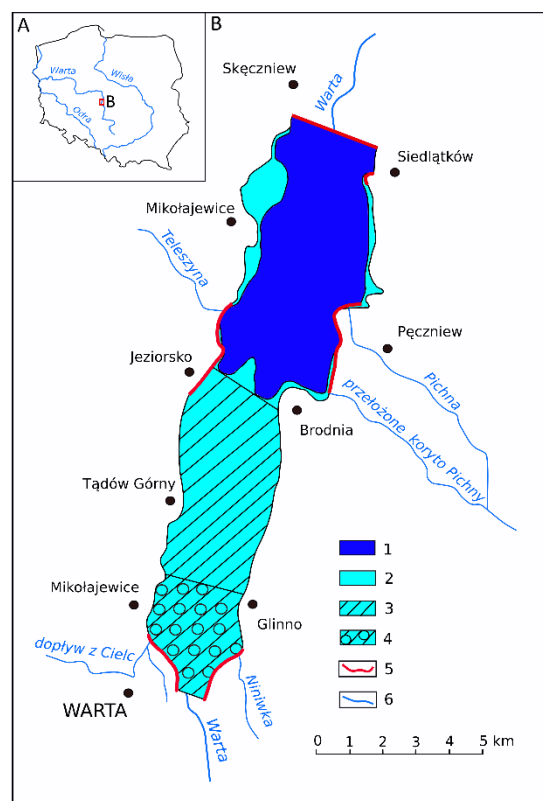
- dane pozyskane z literatury, m.in. informacje hydrologiczne i dotyczące zasięgu formacji roślinnych.

Prace końcowe związane z prezentacją kartograficzną wykonano w pierwszej kolejności w programach ESRI ArcGIS 10.8 oraz Golden Software Surfer 16 (przygotowanie warstw wynikowych) oraz w programach Inkscape 1.2.1 oraz CorelDRAW 24 (ostateczne składanie map i rysunków).

## Obszar i obiekt badań

Zbiornik Jeziorsko znajduje się w dolinie rzeki Warty od km 484+300 (zapora czołowa) do km 503+655 (most drogowy w miejscowości Warta) (rys. 2). Ma przebieg południkowy i zajmuje 16-kilometrowy odcinek terasy zalewowej i terasy nadzalewowej niskiej o szerokości 1,8–3,5 km, średnio 2,6 km przy stanie maksymalnym. Wskaźnik wydłużenia akwenu wynosi 6,2.

Zbiornik Jeziorsko był budowany od 1975 roku. Został po raz pierwszy wypełniony do rzędnej 114,8 m n.p.m. w 1986 roku, co oznaczało praktycznie oddanie go do użytku. Maksymalną rzędną piętrzenia 121,5 m n.p.m. osiągnął w 1992 roku. Przy maksymalnym piętrzeniu pojemność całkowita wynosi 202,0 mln m<sup>3</sup>, zaś powierzchnia całkowita osiąga 42,3 km<sup>2</sup>. Parametry te sytuują go w Polsce na drugim miejscu pod względem zajmowanej powierzchni i na czwartym pod względem pojemności. Elektrownia wodna Jeziorsko (Łyszkowice) o mocy 4,89 MW została uruchomiona w 1995 roku, a w 1996 roku całą inwestycję uznano za zakończoną (Wicher-Dysarz, Dysarz 2016).



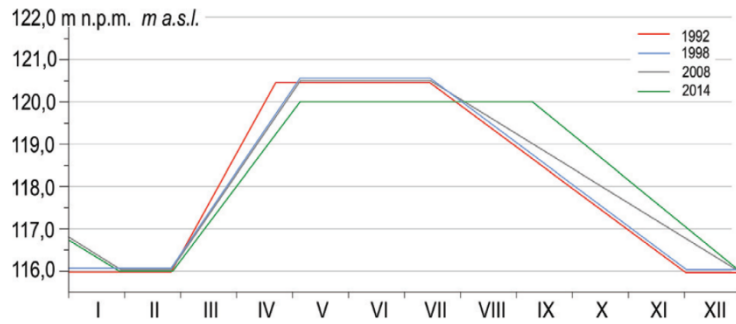
Rys. 2. Główne elementy Zbiornika Jeziorsko wg Grobelskiej (2008), zmienione

- 1 – powierzchnia zbiornika przy stanie minimalnym,
- 2 – powierzchnia zbiornika przy stanie maksymalnym,
- 3 – rezerwat ornitologiczny „Jeziorsko”, 4 – fragment rezerwatu objęty wycinką drzew,
- 5 – zapory i obwałowania, 6 – cieki wodne

Main elements of the Jeziorsko Reservoir according to Grobelska (2008), slightly changed

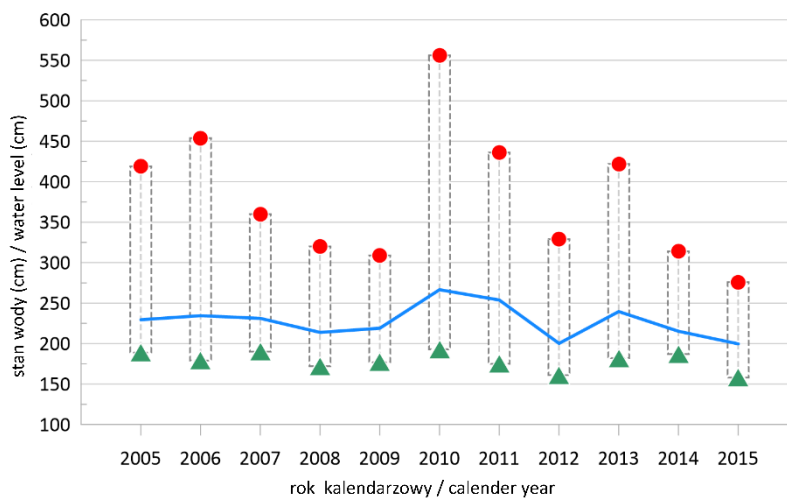
- 1 – reservoir area at minimum filling, 2 – reservoir area at maximum filling, 3 – ornithological reserve "Jeziorsko", 4 – part of the reserve covered by logging,
- 5 – dams and embankments, 6 – watercourses

W trakcie realizacji inwestycji dokonano licznych zmian w środowisku doliny Warty na ok. 16-kilometrowym odcinku między miastem Warta a wsią Skęczniew. O skali robót budowlanych świadczą dane według Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Poznaniu (Białek 2007). W szczególności prace objęły: przemieszczenia mas gruntu, które np. przy budowie nasypów zapór objęły 3,5 mln m<sup>3</sup>, budowę ekranów żelbetowych i innych umocnień betonowych o łącznej objętości ok. 350 tys. m<sup>3</sup>, regulację rzeki Warty wraz z obwałowaniem, która została przeprowadzona na odcinku 9 km, zlikwidowanie 255 zagród wiejskich i przesiedlenie 504 rodzin. Poza zasięg zbiornika przemieszczono także cmentarz po-



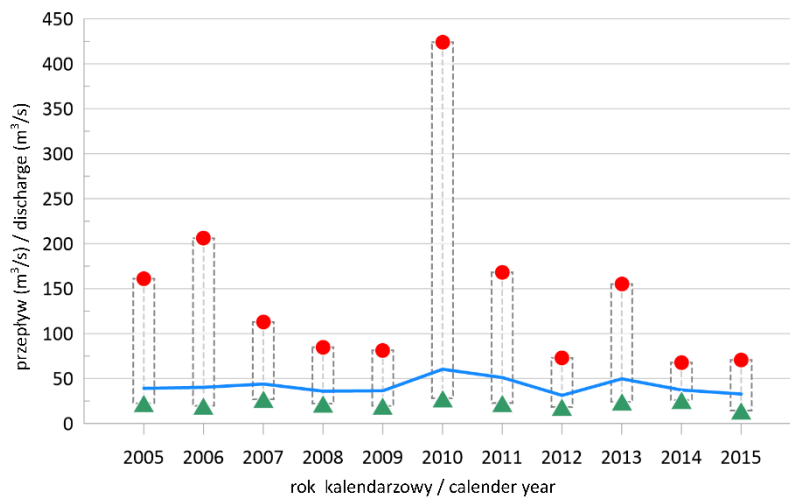
Rys. 3. Reżim eksploatacyjny Zbiornika Jeziorsko wg Kaczmarek (2018) na przykładach z lat sprzed i po powodzi z 2010 roku

The exploitation regime of the Jeziorsko Reservoir according to Kaczmarek (2018) on examples from before and after the 2010 flood



Rys. 4. Stany wody Warty w przekroju wodowskazowym Sieradz w latach 2005–2015 (IMGW 2022) (trójkąt - minimalne, koło - maksymalne, linia ciągła - wartości średnie)

Water levels of the Warta river at the Sieradz water gauge in 2005–2015 (triangle – minimum, circle – maximum, continuous line – average values)



Rys. 5. Przepływy Warty w przekroju wodowskazowym Sieradz w latach 2005–2015 (IMGW 2022) (trójkąt – minimalne, koło – maksymalne, linia ciągła – wartości średnie)

Discharges of the Warta River at the Sieradz water gauge in 2005–2015 (triangle – minimum, circle – maximum, continuous line – average values)

przez ekshumacje ponad 1300 grobów. Ponadto utworzono stawy rybne o powierzchni 220 ha.

Powierzchnia lustra wody zmienia się w granicach 17,6–39,0 km<sup>2</sup>. Zmiany poziomu wody mogą sięgać 5,5 m (od 116,0 m n.p.m. do 121,5 m n.p.m.). Oznacza to zmiany pojemności od 30,2 mln m<sup>3</sup> do 202,3 mln m<sup>3</sup>. Średnia głębokość wynosi 4,8 m. Wahań stanów wody są więc duże, co wynika z funkcji retencyjnych i przeciwpowodziowych (rys. 3, 4). Stany wysokie utrzymywane są w okresie wiosenno-letnim, przy czym od połowy kwietnia do końca czerwca występują stały poziom piętrzenia, nie przekraczający poziomu normalnego (do 2013 roku NPP=120,5 m n.p.m., od 2014 roku NPP=120,0 m n.p.m.). Stany niskie przypadają na okres jesienno-zimowy (Banach, Grobelska 2003; Grobelska 2008).

Przepływ Warty w profilu Sieradz (km 521) w latach 1970–2015 wynosił od NNQ= 4,4 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (2015) do WWQ=424 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (2010). Przepływ średni roczny w tym czasie miał wartość ok. 47 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. W całym tym okresie rok 2010 (rys. 4 i 5) wyróżnił się wyjątkowymi ekstremalnymi stanami wód i wartościami przepływów (IMGW 2022).

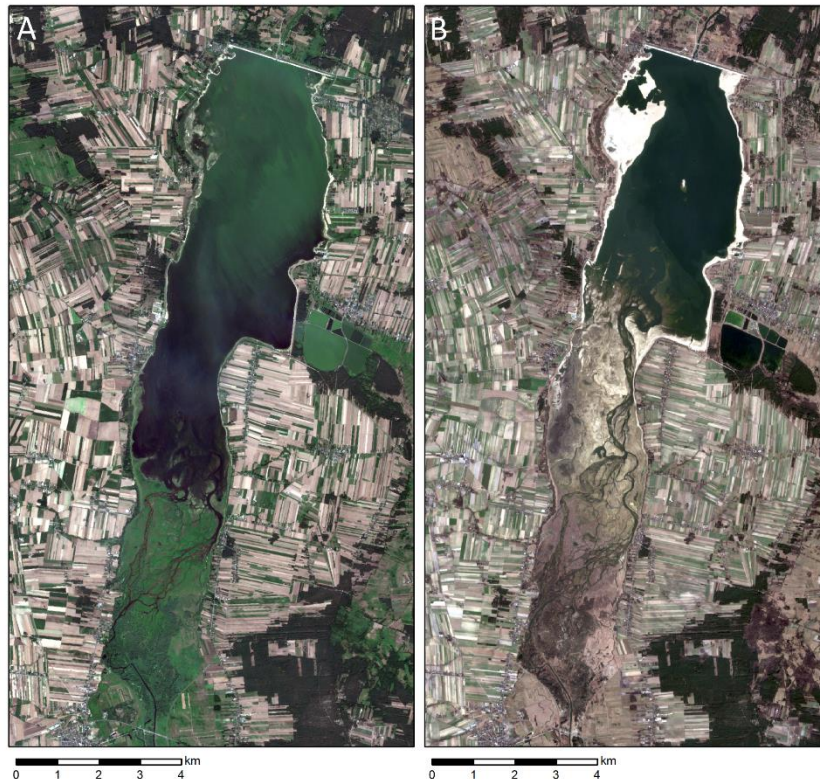
Stały, intensywny rozwój roślinności nadrzecznej i kolonii ptactwa wodnego spowodował założenie rezerwatu ornitologicznego „Jeziorsko” w 1998 roku. Zajmuje on południową, większą część zbiornika (55% powierzchni), która odsłania się niemal całkowicie przy niskich jesienno-zimowych stanach wody (rys. 2; fot. 1, 2, 3). Na obszarze tym występuje 250 gatunków ptaków, w tym 150 gatunków gniazdujących (Grobelska 2008). Występują tu gęste zarośla, w przewadze wierzbowe i trzcinowe (fot. 2 i 3). Szczegółowe badania nad zróżnicowaniem szaty roślinnej przeprowadzone zostały przez Wojterską i Ratyńską (2019).

Od początku istnienia zbiornika rozpoczęły się zmiany wywołane jego funkcjonowaniem – zarówno w strefie brzegowej, jak i na dnie, szczególnie w części południowej, wlotowej. Wody zbiornika zalały (w części południowej i częściowo w środkowej) powierzchnię terasy zalewowej oraz (głównie w części północnej i częściowo w środkowej) obszary terasy nadzalewowej niskiej (por. Forsyśki 2005). Strefa brzegowa zbiornika uformowała się na granicy terasy zalewowej z terasą nadzalewową wyższą oraz w dolnej części zboczy doliny w miejscach, gdzie nie było wykształ-

conej terasy nadzalewowej wyższej. U wylotów doliny Teleszyny i Pichny zostały zbudowane betonowe zapory boczne, a na południu między Proboszczowicami a Glinem utworzono wały o łukowatym przebiegu. Pojawienie się rozległej tafli zbiornika o znacznej zmienności poziomów uruchomiło szereg procesów morfologicznych. Nasilenie abrazyj przy wyższych stanach wód uformowało aktywne klify, na których odsłoniły się szczegóły budowy geologicznej – głównie na brzegu północno-wschodnim, czyli na zachodnim skraju Wysoczyzny Łaskiej wzdłuż kępy wysoczyznowej, na której leży wieś Brodnia. Strefa ta została poddana wieloaspektowym badaniom geologicznym i geomorfologicznym (m.in. Klatkova, Załoba 1991; Forsyśki 2005; Czarnecki, Goździk 2008; Kaczmarek 2010a, b, 2018; Frydrych 2013; Frydrych, Rdzany 2018).

Badania strefy brzegowej o długości 44,3 km, przeprowadzone zostały głównie z zastosowaniem metod geodezyjnych, GIS i teledetekcji (Banach, Grobelska 2003; Grobelska 2008; Twardy 2008; Kaczmarek, Tyszkowski 2009; Kaczmarek 2010a, b, 2018). Badania te dowiodły, że zdecydowana większość brzegów nieumocnionych jest aktywna, choć udziały poszczególnych typów wybrzeży (abrazyjnego z klifami do ok. 10 m wysokości, akumulacyjnego, neutralnego, biogenicznego) stopniowo się zmieniały. Przy tym w pierwszych latach funkcjonowania zbiornika zaznaczył się okres najbardziej dynamicznego ich kształtowania (Kaczmarek 2018).

Bardzo istotnym problemem funkcjonowania sztucznych zbiorników wodnych jest akumulacja rumowiska wleczonego i zawieszonoego, przynieszonego przez rzekę. Głównym dostawcą materiału do Zbiornika Jeziorsko jest rzeka Warta, choć nie jedynym, bo ujście swoje ma tu kilka małych cieków: Pichna (nowe koryto i Stara Pichna), Stara Niniwka, Urszulinka (nowe koryto), Dopływ z Cielec (zwana także strugą Mazur z Kanałem Augustynowskim w Proboszczowicach), dopływ z Kolonii Socha w Tomisławicach, dopływ z Emilianowa w Tomisławicach i Teleszyna w Ostrowie Warckim (rys. 2). Jest także kilka rozcięć stoków doliny spowodowanych sporadycznymi przepływami wód splukiwania po ulewnych deszczach i roztopach zimowo-wiosennych. Znaczenie tych niewielkich dopływów jest głównie negatywne ze względu na wprowadzane do zbiornika zanieczyszczenia –



Fot. 1. Zbiornik Jeziorsko przy wysokim stanie piętrzenia (fot. Sentinel-2, 05.08.2022) (A) i niskim stanie piętrzenia wód (fot. Sentinel-2, 21.03.2022) (B)

Jeziorsko Reservoir at high damming level (A) and low damming level (B)



Fot. 2. Krajobraz deltowej części Zbiornika Jeziorsko – widok z drona. Widoczne charakterystyczne systemy płytkich koryt rozdzielające wyspy porośnięte gęstymi zaroślami (fot. M. Kossowski 20.07.2021)

Landscape of the delta part of the Jeziorsko Reservoir – view from the drone. The characteristic systems of shallow channels separating the islands covered with dense shrubs are visible





Fot. 3. Tądów Górny. Powierzchnia delty pokryta głównie roślinnością szuwarową. Miąższość mułowo-piaszczystych osadów deltowych wynosi około 1,0 m (fot. Z. Rdzany, 11.03.2022)

The surface of the delta is covered mainly with rush vegetation. The thickness of the silty-sandy delta sediments is about 1.0 m

– głównie bytowe i pochodzenia rolniczego. Natomiast udział w dostarczaniu rumowiska fluwialnego i proluwiiów jest znikomy w stosunku do zdolności akumulacyjnych wód Warty.

Jak wspomniano, zbiornik zajmuje odcinek doliny o wysokim zagrożeniu wezbraniemi. Powodzie odnotowano dwukrotnie w czasie istnienia zbiornika, w latach 1997 i 2010. Wicher-Dysarz i Dysarz (2016) zwracają uwagę na duże znaczenie tych zjawisk w akumulacji osadów. Wyraźnie zaznaczyły się one depozycją rumowiska w części wlotowej zbiornika w 1997 roku, w jego najwyższej części. Skutkiem procesów akumulacyjnych było zmniejszenie się spadku podłużnego zwierciadła wody w górnej części, a także powyżej mostu w zasięgu miasta Warta. Stwierdzono także w latach 1998–2004 niewielkie ślady erozji w pobliżu tego mostu. Przedwojski i Wicher (1999) wykazali w analizie skutków powodzi z 1997 roku zasypanie rumowiskiem nieuregulowanego odcinka koryta o długości 2,85 km (od km 497+800 do km 500+650) oraz koryta uregulowanego na odcinku 0,850 km (od km 500+850 do km 501+700).

Przebieg powodzi z 2010 roku w porównaniu z tym zjawiskiem z 1997 roku został znacznie słabiej rozpoznany, co stało się głównym impulsem podjętych badań.

## Wyniki badań

Przystępując do badań skutków powodzi z 2010 roku, przeanalizowano zmiany morfologii jakie następowały sukcesywnie od pierwszego wypełnienia zbiornika w 1986 roku, ze szczególnym uwzględnieniem skutków poprzedniej powodzi w 1997 roku. Analiza zdjęć lotniczych z lat 1986–1997 oraz z okresu między powodzią z lat 1997 i 2010 uwidacznia wyraźne, stale postępujące, ale stosunkowo umiarkowane zmiany, które zachodziły w morfologii południowej, cofkowej części zbiornika. Zasypanie głównego, uregulowanego koryta Warty, co udokumentowali Przedwojski i Wicher (1999) po powodzi z 1997 roku, okazało się nietrwałe. Naniesione osady uległy stopniowej erozji w następnych latach. Na zdjęciach *Google Earth Pro* z kwietnia 2004 roku oraz z sierpnia 2009 roku widoczne jest koryto w jednolitym fototonie. Natomiast zakola koryta nieuregulowanego, które zostało w 1997 roku całkowicie zasypane na odcinku 2,85 km (Przedwojski i Wicher 1999, *vide* Wicher-Dysarz i Dysarz 2016) wykazuje obecność piaszczystych odsypów centralnych i nieregularnych stożków podwodnych, które mogły powstać w 1997 roku jako stożki krewasowe (fot. 4). Stożki te zostały tylko częściowo rozmyte lub przemodelowane. Może to wskazywać na ogólnie słabszą erozję po 1997 roku w tych zakolach, odchodzących od koryta antropogenicznego prawie prostopadle w stosunku do koryta głównego.

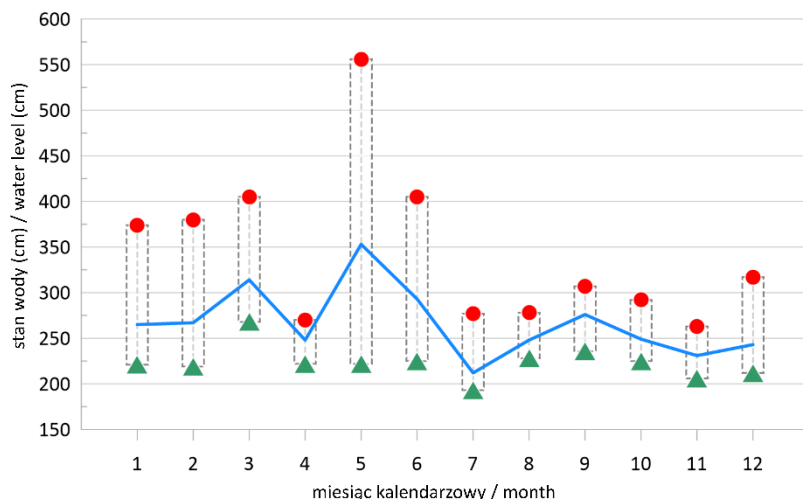


Fot. 4. Fragment delty Warty w okolicach wsi Proboszczewice w 2009 roku

1 – koryto uregulowane, 2a i 2b – zakola koryta nieuregulowanego z łachami i stożkami krewasowymi (fot. *Google Earth Pro* 2009)

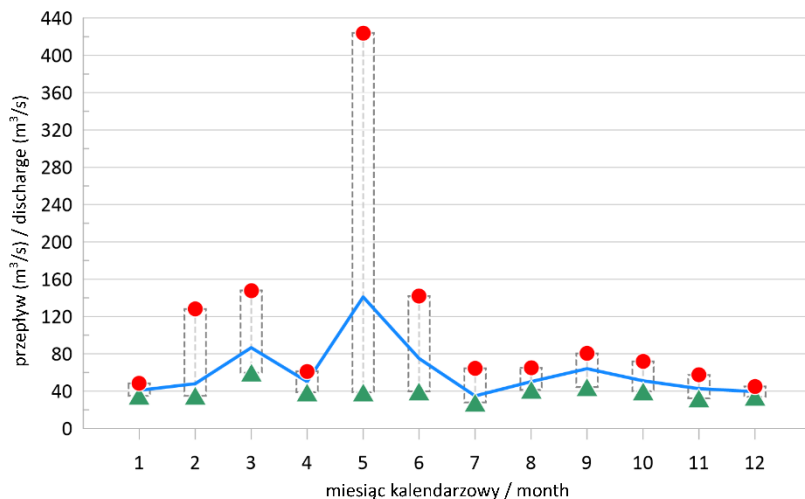
The fragment of the Warta delta near the village of Proboszczewice in 2009

1 – regulated channel, 2a and 2b – bends of the unregulated channels with levees and crevasse fan



Rys. 6. Stany wody Warty w przekroju wodowskazowym Sieradz w 2010 roku (IMGW 2022) (trójkąt – minimalne, koło – maksymalne, linia ciągła – wartości średnie)

Water levels of the Warta river at the Sieradz water gauge in 2010  
(triangle – minimum, circle – maximum, continuous line – average values)

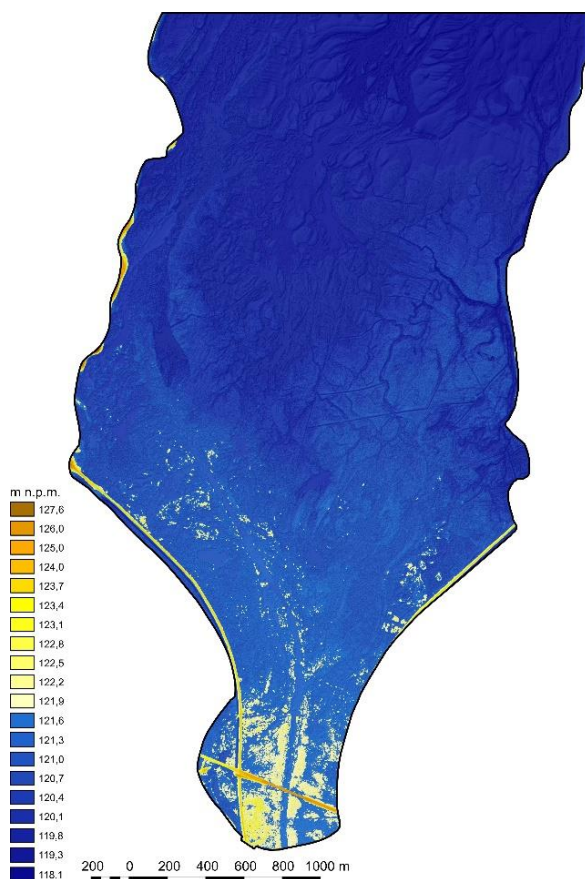


Rys. 7. Przepływy Warty w przekroju wodowskazowym Sieradz w 2010 roku (IMGW 2022) (trójkąt – minimalne, koło – maksymalne, linia ciągła – wartości średnie)

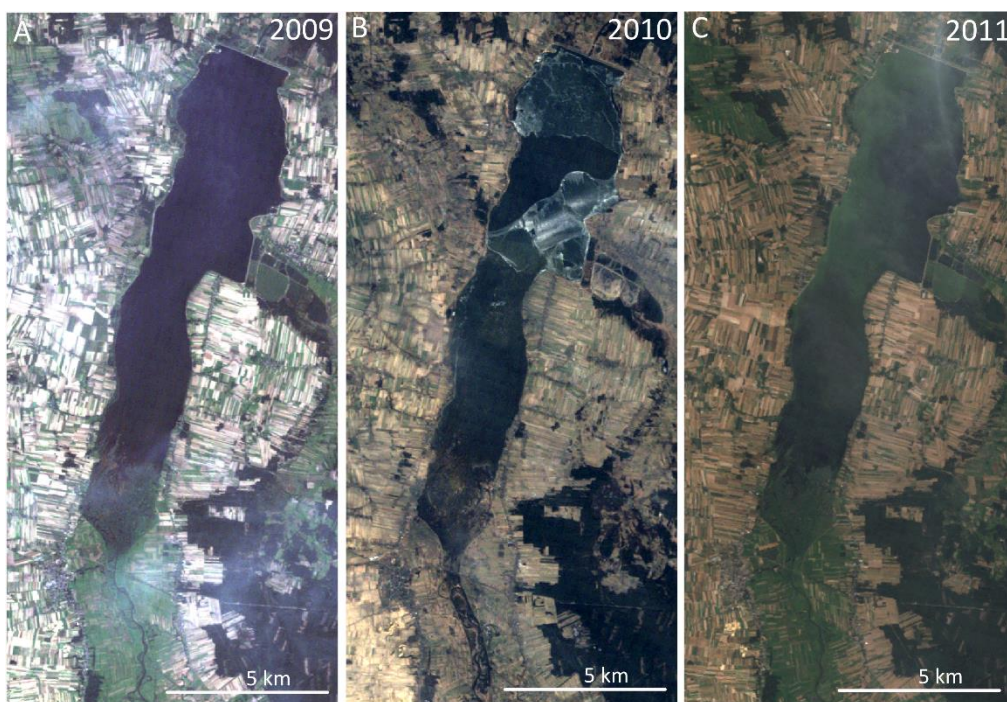
Discharges of the Warta River at the Sieradz water gauge in 2010  
(triangle – minimum, circle – maximum, continuous line – average values)

Na tle prześlędzonych zmian morfologicznych i sedymentologicznych w Zbiorniku Jeziorsko do czasu powodzi z 2010 roku przeanalizowano dane dotyczące przebiegu i skutków tego zjawiska. Powódź tę cechowały parametry stanów wody i przepływów Warty najbardziej ekstremalne w historii istnienia Zbiornika Jeziorsko (rys. 6 i 7). Poziom maksymalnego piętrzenia wody został wówczas nawet minimalnie przekroczony i osiągnął 121,6 m n.p.m. (Kaczmarek 2018). Jeśli przyjąć, że lustro wody nie ulega pochyleniu, to przy tak przyjętym poziomie piętrzenia,

w strefie delty zbiornika występowałyby wysępki o wysokości nieprzekraczającej 1 m (rys. 8). W rzeczywistości jednak lustro wody było pochylone z południa na północ. Opierając się na symulacji uwzględniającej parametry hydrologiczne między zaporą a wodowskazem w Sieradzu ( $WWQ=440 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), autorstwa Dysarza i Wicher-Dysarz (2011), poziom wody przy moście mógł osiągnąć około 123,5 m n.p.m., co oznacza zrównanie z górną powierzchnią wałów przeciwpowodziowych. Można więc przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że nawet najwyższe części strefy

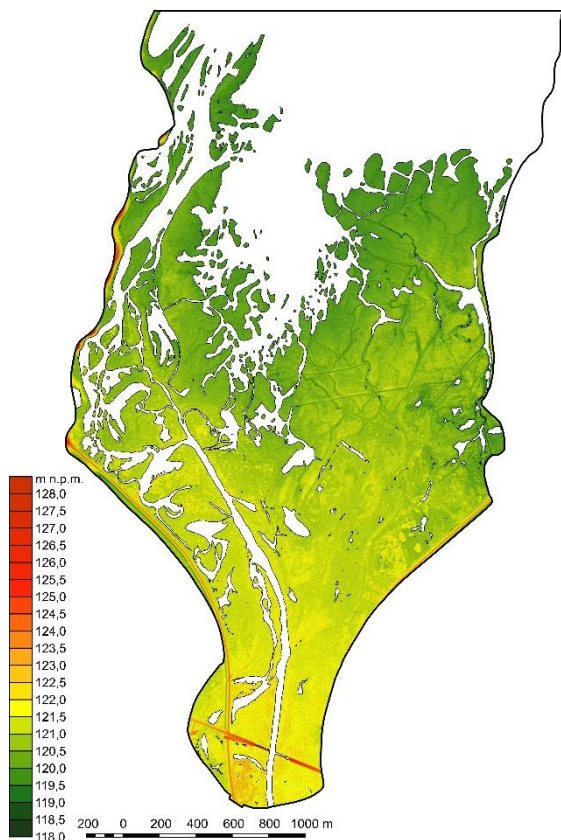


Rys. 8. Symulacja wypełnienia zbiornika do poziomu 121,6 m n.p.m.  
Simulation of filling the reservoir to the level of 121.6 m a.s.l.



Fot. 5. Porównanie danych z satelity Landsat 5 z 10.08.2009 (A), 12.07.2010 (B) i 15.07.2011  
Comparison of data from the Landsat 5 satellite from August 10, 2009 (A), July 12, 2010 (B) and July 15, 2011

cofki, co najmniej do mostu (w okolicach km 503+800), znalazły się pod wodą. Potwierdzają to zdjęcia satelitarne. Opisywana powódź zakończyła się w pierwszej połowie czerwca, ale jeszcze 12 lipca 2010 roku zdjęcie z satelity Landsat 5 (fot. 5) ukazywało zatopienie całej powierzchni zbiornika (widoczna była ponad wodą tylko wysoka roślinność), a na południe od mostu w mieście Warta – podtopienie całego pasa międzywała na odcinku co najmniej 5 km.

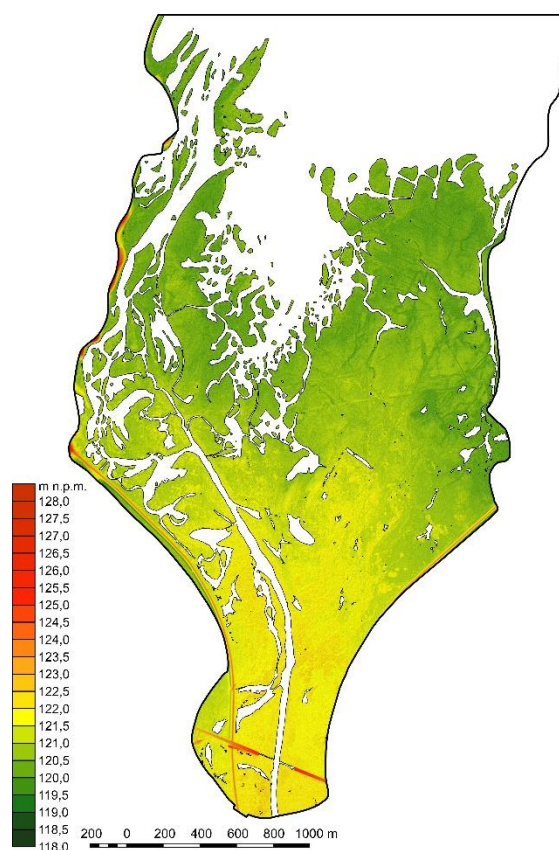


Rys. 9. Morfologia południowej części Zbiornika Jeziorsko w 2009 roku  
NMT na podstawie danych LiDAR o rozdzielczości poziomej 1,0 m

Morphology of the southern part of the Jeziorsko Reservoir in 2009  
DTM based on LiDAR data with a horizontal resolution of 1.0 m

Na modelu NMT z 2009 roku, sprzed powodzi (rys. 9) widać wyraźnie, że koryta drugorzędne, często wykształcone w zbiorniku na liniach dawnych starorzeczy (istniejących przed budową zbiornika), mają zwykle regu-

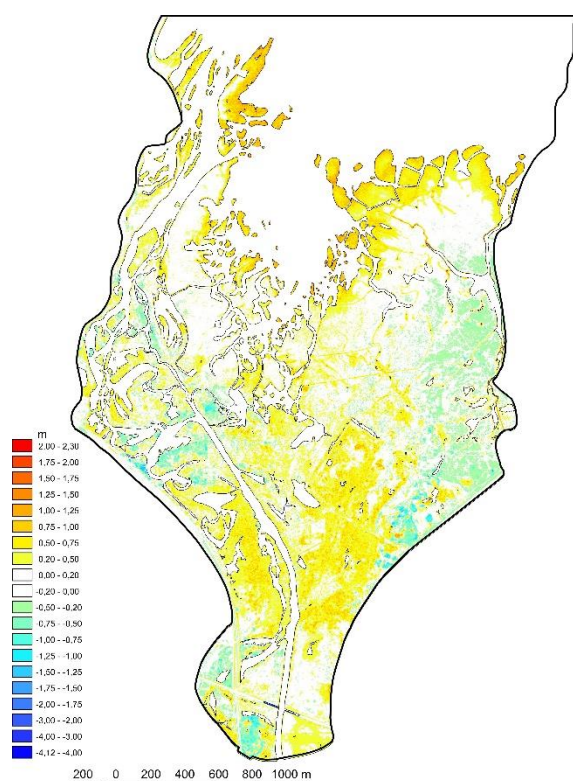
larne zarysy. Między korytami rozpościerają się liczne rozległe równinne wyspy, pokryte roślinnością. Są one widoczne na zdjęciach lotniczych i przy porównaniu modeli NMT i NMTP. W środkowej i północnej części analizowanego obszaru, często w miejscu starorzeczy i paleomeandrów widoczne są obniżenia świadczące o funkcjonowaniu stałych lub okresowych nurtów w okresach wyższych stanów wód w zbiorniku. Formy między obniżeniami korytowymi charakteryzują się małym urozmaiceniem. Wykazują znaczne podobieństwo do łąk śródkorytowych (fot. 2), lecz odznaczają się znacznie większą rozległością – nawet wielokrotnością powierzchni w stosunku do odsypów z odcinków koryta Warty powyżej i poniżej zbiornika.



Rys. 10. Morfologia południowej części Zbiornika Jeziorsko w 2011 roku  
NMT na podstawie danych LiDAR o rozdzielczości poziomej 1,0 m

Morphology of the southern part of the Jeziorsko Reservoir in 2011  
DTM based on LiDAR data with a horizontal resolution of 1.0 m

Analiza modeli NMT z lat 2009 (rys. 9) oraz 2011 (rys. 10), a także modelu różnicowego (rys. 11) ukazuje łagodne podwyższenie badanej powierzchni w części środkowej i północnej rzędu 0,2–0,5 m, a lokalnie nawet do 0,75 m i stosunkowo nieznaczne obniżenie po jego środkowo-zachodniej i środkowo-wschodniej stronie (do ok. 0,5 m). Jednocześnie widoczne jest częściowe wypełnienie niemal wszystkich obniżen korytowych, rozdzielających równinne obszary pozakorytowe. Potwierdza to model różnicowy NMT (rys. 11), który jednocześnie ukazuje, że wypełnienia obniżen tylko miejscami przekraczają miąższość 0,75 m – głównie w północnej części analizowanego obszaru.



Rys. 11. Zmiany morfologii wlotowej części delty Warty powstałe w latach 2009–2011 na podstawie danych pomiarowych LiDAR

Changes in the morphology of the inlet part of the Warta delta made in 2009–2011 on the basis of LiDAR measurement data

Niezależnie od ogólnego podniesienia powierzchni w części środkowej i północnej obszaru, zarówno na modelu z 2011 roku, jak na modelu różnicowym NMT (rys. 11) uwiadczenia się szereg drobnych, nieregularnych form – zarówno wklęsłych, jak i wypukłych.

Zarysy głównych partii delty są nadal wyraźne jak na analogicznym modelu z 2009 roku, lecz uderzająca jest zwiększona nieregularność oraz „chropowatość” zarówno zarysów przestrzennych, jak i powierzchni grzbietowych kilkudziesięciu form wypukłych – głównie rozległych wysp i łąch. Obszar tej charakterystycznej akumulacji poszerza się do około 1 km na odcinku ok. 1 km, obejmując głównie centralną część delty. Opisywane formy wypukłe mają postać bardzo małych, kilkudziesięciocentymetrowych pagórków lub nabrzeżeń o łagodnych stokach i średnicy do kilku metrów. Tylko nieliczne z nich osiągają 1 m wysokości. Porównanie modelu różnicowego ze zdjęciami lotniczymi ukazuje związek tej zwiększonej miąższości osadów z występowaniem roślinności wysokiej (akumulacja wokół pni drzew) i krzewów. Niektóre nabrzeżenia mogą być związane z karpami drzew, wyciętymi w czasie budowy zbiornika (fot. 6).



Fot. 6. Tądów Górny. Odślonięte dno zbiornika z licznymi karpami, częściowo zamulonymi (marzec 2022). Widok z miejscowości Jeziorsko w kierunku Brodni (fot. Z. Rdzany, 2022)

Exposed bottom of the reservoir with numerous carp, partially silted (March 2022). View from Jeziorsko village towards Brodnia village

We wschodniej oraz zachodniej części analizowanego obszaru odnotowano obniżenie się poziomu terenu po powodzi o przeważnie 0,2–0,5 m a lokalnie nawet 0,75–1,00 m (rys. 11; fot. 7). Na obszarze tym można również zaobserwować odrodzenie się zarośniętych w 2009 roku koryt drugorzędnych oraz niewielkich zbiorników wodnych funkcjonujących na obszarze delty zbiornika. W pojedynczych miejscach, przeważnie blisko wałów

przeciwpowodziowych, stwierdzono obniżenie terenu większe niż 1 m.



Fot. 7. Widok z wieży widokowej w Glinnie na wschodnią część delty Zbiornika Jeziorsko przy niskim stanie wód (11.03.2022). Widoczne płytkie koryto Niniwki (fot. Z. Rdzany, 11.03.2022)

View from the observation tower in Glinno on the eastern part of the delta of the Jeziorsko Reservoir at low water level (March 11, 2022). Visible shallow channel of the Niniwka

Skonstruowany model różnicowy umożliwił obliczenie bilansu osadów (rys. 11). Obliczeń dokonano według reguły trapezowej w programie Golden Software Surfer 16, co wykazało przyrost osadów o 667 986 m<sup>3</sup>. Jest to objętość nieco zbliżona do wielkości akumulacji (760 000 m<sup>3</sup>), którą podaje IMGW–PIB (*Badania...* 2010), należy jednak odnotować, że dane te dotyczą aż 30 lat istnienia zbiornika.

## Dyskusja

Przegląd dotychczasowych badań nad funkcjonowaniem Zbiornika Jeziorsko jako środowiska sedymentacji wskazuje na istnienie dwóch głównych problemów, trudnych do precyzyjnego rozwiązania. Pierwsze pytanie badawcze odnosi się do modelu morfogenetycznych przemian jego dna i strefy cofki, które to strefy ewoluują pod względem morfologicznym i sedymentologicznym od zmienionego antropogenicznie dawnego dna dolinnego do strefy deltowej i litoralnej. Drugie pytanie dotyczy tempa zapełniania się zbiornika i określenia jego żywotności.

Znaczenie morfogenetyczne i sedymentologiczne powodzi, która miała miejsce w 2010 roku w dolinie Warty w kontekście

zmian w rozkładzie osadów powyżej Zbiornika Jeziorsko zostało odnotowane przez Wicher-Dysarz i Dysarza (2016), jednakże tylko częściowo. Autorzy ci użyli danych z okresu powodzi do wyliczeń wskaźników akumulacji, lecz prawdopodobnie po 2004 roku nie prowadzili na tym obszarze regularnych pomiarów terenowych, stąd brak w cytowanej pracy szczegółowych danych o skutkach morfologicznych powodzi. Fakt ten był dodatkowym impulsem do zbadania roli morfogenetycznej i sedymentologicznej powodzi z 2010 roku.

Najlepsze warunki do depozycji rumowiska powodziowego w południowej części Zbiornika Jeziorsko zaznaczyły się w obrębie wyższych formacji roślinnych, tj. w zasięgu formacji leśnej (lasów łągowych) i zarośli nadrzecznych, co wynika z mapy Wojterskiej i Ratyńskiej (2019). Porównanie modelu różnicowego (rys. 11) i zdjęć lotniczych dokumentuje też związek zwiększonej akumulacji rumowiska z rzędami (szpalerami) drzew i krzewów, które przed powstaniem zbiornika rosły w dolinie wzdłuż dróg polnych na terasie zalewowej.

Należy zauważyć, że zalanie w obrębie delty całej powierzchni wysp pokrytych gęstą roślinnością, spowodowało odkładanie się rumowiska mułowo-piaszczystego nie tylko w postaci swoistego „otulenia” pni drzew, lecz niekiedy na poszczególnych roślinach i całych kępach. W ciągu kilku miesięcy po powodzi ta pokrywa osadowa utrzymała się w jakimś stopniu, mimo stopniowego zmywania w wyniku opadów. Można wysunąć przypuszczenie, że wiele z tych minipagórków około 1-metrowej wysokości to w rzeczywistości roślinne kępy, a więc w jakimś stopniu – artefakty. Osady na roślinach mogły powodować pierwsze odbicie promieni lasera odczytane później jako powierzchnia gruntu. To by tłumaczyło nieregularność zarysów i profili tych niewielkich form. Nie wyklucza to uformowania się takich pagórków osadowych zbudowanych jako swoiste formy „cieni” na niewielkich zaczepach roślinnych (m.in. Żelaziński, Wawrenty 2005; Szczepka, Szczepka 2014). Obecnie wyjaśnienie wszystkich wątpliwości dotyczących tych drobnych form rzeźby jest trudne, ponieważ nie ma dokumentacji skutków powodzi dokonanej w trakcie zanikania tego zjawiska.

Zachodnia i fragment wschodniej części analizowanego obszaru, gdzie odnotowano obniżenie powierzchni terenu po powodzi,

noszą ślady procesów erozyjnych. Zniwelowane zostały tu pewne niewielkie wzniesienia terenu występujące w 2009 roku. Również część odciętych i zarośniętych koryt została ponownie włączona do systemu rozprowadzającego wody na obszarze delty. Obszary objęte erozją generalnie pokrywają się z obszarami braku roślinności wyższej. Na tym terenie wody powodziowe mogły mieć swobodniejszy przepływ i nie dochodziło do przechwytywania materiału przez wyższą roślinność. Niewielkie obszary, gdzie obniżenie terenu przekraczało 1 m, zwłaszcza przy wałach powodziowych, związane są najprawdopodobniej z działalnością antropogeniczną.

Pierwszych wyliczeń akumulacji rumowiska w Zbiorniku Jeziorsko dokonano po 30-letniej jego eksploatacji. Dane te przedstawił IMGW (*Badania...* 2010) oraz Wicher-Dysarz i Dysarz (2016). Według danych z IMGW (*Badania...* 2010) wystąpiła nieznaczna utrata pojemności Zbiornika Jeziorsko od czasu jego powstania wynosząca 0,760 mln m<sup>3</sup> dla poziomu piętrzenia 121,5 m n.p.m. przy powierzchni lustra wody wynoszącej 36 km<sup>2</sup>. W przypadku powierzchni wody, został utracony obszar 5,65 km<sup>2</sup>, głównie w wyniku procesów akumulacji w jego górnej części.

Wicher-Dysarz i Dysarz (2016) zastosowali w swoich badaniach metodę oceny przyrostu osadów na podstawie pomiarów geodezyjnych z lat 1986–2004 za pomocą których uzyskali kilka dokładnych profili powierzchni i przekrojów osadów. Cytowani autorzy wyliczyli, że w ciągu 30 lat (1986–2004) dopłynęło do zbiornika 187 851 ton rumowiska, głównie piaszczystego o objętości 70 887 m<sup>3</sup>. Wielkość odkładu określono na 126 159 m<sup>3</sup>. Powierzchnia na której odkładał się materiał oszacowana została na 5,62 km<sup>2</sup>. Badania intensywności akumulacji osadów w zbiorniku przeprowadzone przez cytowanych autorów, pozwoliły oszacować średni roczny przyrost rzędnej dna na 1,42 cm, a w części wlotowej zbiornika na ok. 2,25 cm, a więc odpowiednio 142 cm oraz 225 cm w ciągu 100 lat. Porównanie wielkości odkładu, wyliczonej przez cytowanych autorów, z objętością całego zbiornika wykazuje ok. 0,6‰ przy maksymalnym poziomie piętrzenia (MPP), a 4,17‰ przy minimalnym poziomie piętrzenia (MPP). Wicher-Dysarz i Dysarz (2016) zastosowali także cztery wzory empiryczne do wyliczenia ilości rumowiska

zdeponowanego, lecz uzyskane wyniki wykazały znaczne różnice. Użyto wzorów: Samova (vide Wicher-Dysarz, Dysarz 2016) Meyer-Petera, Müllera (Müller 1948), Ackersa-White'a (1973) oraz van Rijn'a (1984). Obliczenia przeprowadzono dla różnych przekładów rzeźby dna części cofkowej zbiornika. Nieco zbliżone do wyników z pomiarów geodezyjnych Wicher-Dysarz i Dysarz (2016) okazały się wzory van Rijn'a oraz Meyera-Petera i Müllera. Wskazują one na przyrosty miąższości osadów od kilku do kilkudziesięciu centymetrów na 30 lat istnienia zbiornika (Wicher-Dysarz, Dysarz 2016).

Według metody zastosowanej przez autorów wielkość odkładu materiału w latach 2009–2011 wyniosła 667 986 m<sup>3</sup>. Jest prawdopodobne, że tak wyliczona objętość zawiera także roślinność „zamaskowaną” osadami powodziowymi, a także zawarte wewnątrz form powietrze. Niestety po 2011 roku nie prowadzono pomiarów lidarowych i trudno te przypuszczenia zweryfikować. Jednak obserwacja powierzchni delty na zdjęciach lotniczych z lat po powodzi ukazuje powrót form do regularnych kształtów i poprawę stanu odradzającej się roślinności. Znaczna część materiału pokrywająca roślinność po powodzi mogła zostać wypłukana i zakumulowana w korytach lub w podwodnej części delty zbiornika. Można więc wysunąć przypuszczenie, że trwały odkład posiada jednak mniejszą objętość niż stwierdzony w trakcie nalotu w 2011 roku.

Pięćdziesięcioprocentowe zasypanie oznaczające żywotność Zbiornika Jeziorsko przy tak intensywnej akumulacji w ciągu 2 lat, spowodowanej głównie powodzią, wynosi 45 lat przy pojemności minimalnej, a 302 lata – przy maksymalnej. Wartości te są wielokrotnie większe od wcześniej szacowanych w materiałach IMGW (*Badania...* 2010) (Tab. 1) oraz wyliczonych i cytowanych przez Wicher-Dysarz i Dysarza (2016). Zdaniem autorów, wyniki obliczeń objętości osadów powodziowych mogły zostać w pewnym stopniu zawyżone przez zakomunikowane wcześniej pokrycie roślinności osadami powodziowymi. Dane te odnoszą się do różnych powierzchni, jednakże uzmysławiają one, że pojedyncze zjawisko powodzi może być bardzo efektywne depozycyjnie, porównywalne do kilkudziesięcioletniej, sekularnej akumulacji. Należy ponadto zauważyć, że wyliczenia autorów dotyczą ob-

## Utrata pojemności Zbiornika Jeziorsko – porównanie wyników pomiarów

## Loss of the Jeziorsko Reservoir capacity – comparison of measurement results

Badania	Wielkość odkładu [mln m <sup>3</sup> ]	Okres pięćdziesięcioprocentowego wypełnienia do minimalnego poziomu piętrzenia (15,1 mln m <sup>3</sup> )	Okres pięćdziesięcioprocentowego wypełnienia do maksymalnego poziomu piętrzenia (101 mln m <sup>3</sup> )
		[lata]	[lata]
Po 30 latach istnienia Zbiornika Jeziorsko ( <i>Badania...</i> 2010)	0,760 (0,025·rok <sup>-1</sup> )	596	3987
Po 30 latach istnienia Zbiornika Jeziorsko (wg Wicher-Dysarz, Dysarz 2016)	0,126 (0,004·rok <sup>-1</sup> )	3775	25250
W wyniku powodzi 2010 roku (dane dla 2 lat)	0,668 (0,334·rok <sup>-1</sup> )	45	302

szaru ponad wodą (bez uwzględnienia znacznej części dna) o powierzchni ok. 4,4 km<sup>2</sup>, co oznacza średnie pokrycie warstwą osadów powodziowych o miąższości 15,2 cm. Wicher-Dysarz i Dysarz (2016) określili powierzchnię akumulacyjną na 5,62 km<sup>2</sup>. Dla porównania powierzchnia pierwotna zbiornika wynosiła 42,3 km<sup>2</sup>.

## Wnioski

- Stwierdzono, że powódź w 2010 roku spowodowała:
  - akumulację rumowiska o objętości 667 986 m<sup>3</sup>, co oznacza średnio 15-centymetrową warstwę aluwii na dominującym obszarze cofki Zbiornika Jeziorsko ponad poziomem wody;
  - podniesienie się powierzchni terenu na przeważającej części obszaru po powodzi o wartość 0,2–0,5 m, a lokalnie do 0,7–1,0 m;
  - wzmożoną depozycję osadów powodziowych wokół pni drzew i skupisk krzewów – głównie w środkowej części obszaru;
  - intensywną akumulację w północnej, nadwodnej części delty zbiornika;
  - obniżenie się powierzchni terenu (przekraczające niekiedy 0,5 m) będące skutkiem erozji w środkowo-zachodniej oraz

środkowo-wschodniej części delty, głównie na obszarach występowania roślinności niskiej.

- Prawdopodobne jest, że wyliczona objętość jest obciążona błędem trudnym do oszacowania w związku z „zamaskowaniem” roślinności osadami powodziowymi i mogła ulec przeszacowaniu.
- Stwierdzono, że pomimo przewagi dokładności danych LiDAR nad danymi pozyskanymi innymi metodami, należy liczyć się z wystąpieniem trudnych do oszacowania błędów. Odnosi się to głównie do skupień roślinności, np. krzewów i szuwarów, gdzie dochodziło do lokalnego zwiększenia agra-dacji osadów powodziowych na roślinności. Mogło to powodować powstanie miejscowych, trudnych do precyzyjnego wyliczenia zniekształceń (powiększeń) fragmentów modeli NMT w miejscach małych form pagórkowatych i nabrzeżnych, zawierających wewnątrz powietrze i materię roślinną.

Autorzy dziękują Waldemarowi Kociubie oraz Anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi i propozycje zmian.



## Literatura

- Ackers P., White W.R. 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulic Division* 99(11): 2041-2060.
- Badania zmian pojemności zbiornika Jeziorsko. 2010. Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Katowice.
- Banach M., Grobelska H. 2003. Stan dynamiki brzegów zbiornika Jeziorsko. *Śląskie Prace Geograficzne* 1: 91-106.
- Białek W. 2007. Zbiornik wodny Jeziorsko. *Biuletyn Wielkopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa* 2: 13-17.
- Bolesta W. 1966. Zamulanie zbiorników wodnych i sposoby przeciwdziałania. *Gospodarka Wodna* 7: 262-269.
- Borkowski A. 2015. Numeryczne modele wysokościowe i produkty pochodne. In: P. Wężyk (red.) *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Czarnecki L., Goździk J. 2008. Osuwiska w województwie łódzkim i ich szczególny charakter w wyrobisku KEB „Bełchatów”. *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica. Physica* 8: 165-183.
- Dams and Development. A New Framework for Decision-Making*. 2000. Report of the World Commission on Dams. Earthscan Publications, London: 1-17.
- Dysarz T., Wicher-Dysarz J. 2011. Application of Hydrodynamic Simulation and Frequency Analysis for Assessment of Sediment Deposition and Vegetation Impacts on Floodplain Inundation. *Polish Journal of Environmental Studies* 20(6): 1441-1451.
- Forysiak J. 2005. Rozwój doliny Warty między Burzeninem i Dobrowem po zlodowaczeniu warty. *Acta Geographica Lodzianis* 90: 1-116.
- Frydrych M. 2013. Wybrzeże klifowe zbiornika Jeziorsko i jego znaczenie w badaniach geomorfologicznych i paleogeograficznych. *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica. Physica* 12: 117-125.
- Frydrych M., Rdzany Z. 2018. Sedimentary record of a Late Saalian jökulhlaup: Case study in Siedlątków outcrop, Central Poland. *Sedimentary Geology* 374: 85-97.
- <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.07.007>
- Grobelska H. 2008. Funkcjonowanie sztucznego wodnego a rezerwat przyrody na przykładzie Zbiornika Jeziorsko. W: J. Partyka, J. Pociask-Karteczka (red.) *Wody na obszarach chronionych*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Ojcowski Park Narodowy, Komisja Hydrologiczna PTG, Kraków: 287-293.
- Hartung F. 1959. Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren. *Wasserwirtschaft* 1: 3-13.
- IMGW (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). 2022. Online: [https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane\\_pomiarowo\\_obserwacyjne/dane\\_hydrologiczne](https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_hydrologiczne) (data ostatniego dostępu: 30.11.2022).
- Kaczmarek H. 2010a. Analiza zdjęć lotniczych oraz wyników pomiarów geodezyjnych w badaniach dynamiki strefy brzegowej sztucznych zbiorników wodnych – zbiornik Jeziorsko, rzeka Warta. *Landform Analysis* 13: 19-26.
- Kaczmarek H. 2010b. Development of the shore zone of the Jeziorsko reservoir (the Warta river, central Poland). *Geomorphologia Slovaca et Bohemica* 1: 16-24.
- Kaczmarek H. 2018. Ewolucja strefy brzegowej nizinnych zbiorników zaporowych w warunkach dużych wahań poziomu wody na przykładzie Zbiornika Jeziorsko na Warcie. *Prace Geograficzne IGiZP PAN* 265.
- 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.
- Klatkova H., Załoba M. 1991. Kształtowanie budowy geologicznej i rzeźby południowego obrzeżenia Basenu Uniejowskiego In: W. Stankowski (red.). *Przemiany Środowiska geograficznego obszaru Konin-Turek*. Instytut Badań Czwartorzędu Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań: 33-44.
- Łajczak A. 1989. Zróżnicowanie transportu zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły. *Dokumentacja Geograficzna* 5, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania

- spodarowania Polska Akademia Nauk, Warszawa.
- Madeyski M., Michalec B., Tarnawski M. 2008. Zamulanie małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* 11: 1-77.
- Meyer-Peter E., Müller R. 1948. Formula for bed-load transport. Proceedings of the International Association for Hydraulic Research. IAHSR 2<sup>nd</sup> Meeting, Stockholm: 39-64.
- Michalec B. 2012. Określenie żywotności małych zbiorników wodnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3(4): 119-129.
- Pitt J.D., Thompson G. 1984. The impact of sedimentation on reservoir life. Proceedings of International of Hydrological Sciences Symposium 144, Harare: 541-548.
- Przedwojski B., Wicher J. 1999. Akumulacja rumowiska w zbiorniku wodnym Jezioro. Konferencja Naukowo-Techniczna „Eksploracja i oddziaływanie dużych zbiorników nizinnych (na przykładzie zbiornika wodnego Jezioro)”, Uniejów, Wyd. Akademii Rolniczej, Poznań: 105-118,
- Rzętała M.A. 2014. Wybrane przemiany geomorfologiczne mis zbiorników wodnych i ocena zanieczyszczeń osadów zbiornikowych w warunkach zróżnicowanej antropopresji (na przykładzie regionu górnośląsko-zagłębiowskiego). Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Szczepka M., Szczepka K. 2014. Związek między akumulacją osadów a zespołami roślinnymi równin zalewowych rzek. *Wszehświat* 115(10-12): 287-290.
- Twardy J. 2008. Transformacja rzeźby centralnej części Polski Środkowej w warunkach antropopresji. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Van Rijn L.C. 1984. Sediment transport, part I. Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(11): 1431-1456.
- Verstraeten G., Bazoffi P., Łajczak A., Radoane M., Rey F., Poesen J., de Vente J. 2006. Reservoir and Pond Sedimentation in Europe. In: J. Boardman, J. Poesen (red.) *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, Wielka Brytania: 759-774.
- Wheaton J.M. 2008. Uncertainty in Morphological Sediment Budgeting of Rivers (niepublikowana rozprawa doktorska). Uniwersytet Southampton. Southampton.
- Wicher-Dysarz J., Dysarz T. 2016. Analiza procesu akumulacji rumowiska w górnej części zbiornika Jezioro. *Gospodarka Wodna* 9: 292-298.
- Williams G.P., Wolman M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *Geological Survey Professional Paper* 1286: 1-84.
- Wojterska M., Ratyńska H. 2019. Zróżnicowanie przestrzenne roślinności obszarów zalewowych strefy ujścia rzeki Warty do zbiornika Jezioro. *Przegląd Geograficzny* 91(3): 385-404.
- Żelaziński J., Wawrenty R. (red.). 2005. Przyjazna środowisku ochrona przed powodzią. Wyd. Towarzystwo na rzecz Ziemi, Oświęcim.

## Summary

Issues related to the transport of fluvial debris and deposition of alluvia in reservoirs have been the subject of intense research in many centres around the world for about a century. Studies of the silting rate of dammed reservoirs and the sedimentological characteristics of the deposited material are important from the point of view of the service life of these reservoirs. A reduction in capacity of 80% or even, according to many scholars, of 50% re-

duces the capacity of reservoirs to fulfil various important functions for which they are designed. In the case of the Jezioro Reservoir (central Poland), the problem of sediment accumulation was investigated by Wicher-Dysarz and Dysarz (2016) after 30 years of its existence. The scholars applied several research procedures, adopting geodesic profiling as the main method. The data they obtained varied depending on the applied method, which indicates significant differences in their precision.

For this reason, new methods must be sought. This article attempts to determine geomorphological and sedimentological changes in the southern part of the Jeziorsko Reservoir that occurred in the years 2009–2011 mainly as a result of the flood in the Warta River valley in May and June 2010. The flood was one of the largest in this valley in the last century. The main source of data was LiDAR measurements carried out in the years 2009 and 2011, i.e. one year before and one year after the catastrophic flood. Certain spatial data were visualised, including the extent of depositional processes, volume and distribution of sediment thickness, altered shapes of relief forms in the upper part of the reservoir, as well as other related environmental changes. Aerial and satellite photography taken throughout the reservoir's existence and archival cartographic, geological, hydrological and botanical data were used for this purpose. It was found that the results of the flood included partial filling of channels within the delta, the disregulation of the outline of previously originated relief forms, and the formation of hundreds of fine hills of between several and twenty metres in diameter and rarely exceeding 1 metre in height. The thickness of the sediments deposited as a result of the flood in the vast majority of the area is 0.5–0.7 m, with the occurrence of small areas of slight depressions. The extent of flood-related debris accumulation was found to be linked with

the most elevated, middle and northern part of the delta, particularly in the zone of tall vegetation. The authors also conducted a discussion of the previous research results from other authors, mainly in the context of silting of the reservoir.

The effectiveness of sediment deposition as a result of the flood was primarily influenced by the following: existing depressions in the form of channels, existing narrowings or broadenings of the flood water flow zone (constrained flow, free flow), and concentrations of vegetation – especially tall (riparian and scrub) vegetation.

It was found that, although lidar data are more precise than those obtained using other methods, one must take into account the possibility of errors that are difficult to estimate. This applies mainly to water-covered areas and, to a lesser extent, to accumulations of small convex forms. Due to this, part of the area was excluded from further analyses.

Measurement using the trapezoidal rule in Golden Software Surfer 16 revealed 667 986 m<sup>3</sup> of deposited material. This means that the overall cubic capacity of debris deposited during the 2010 flood may exceed the entire accumulation to date. For this reason, siltation analyses should account for the possible occurrence of catastrophic events, especially floods.