

ZMIANY MORFOLOGICZNE W OBREBIE DOLINY PILICY POMIĘDZY SULEJOWEM A SMARDZEWICAMI W LATACH 1968–2016

**Morphological changes in the section of the Pilica valley
between Sulejów and Smardzewice in the years 1968–2016**

ALEKSANDER SZMIDT¹ , MARCIN JASKULSKI² , MACIEJ KOSSOWSKI³ 

Zarys treści. W artykule podjęto próbę określenia zmian geomorfologicznych dna doliny Pilicy pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami koło Tomaszowa Mazowieckiego w okresie od końca lat 60. XX wieku do roku 2016. Badania dzieliły się na trzy części. Pierwsza część obejmowała jak najwierniejsze odtworzenie ukształtowania powierzchni dna doliny nie tylko w oparciu o rysunek poziomicowy, ale także o dodatkową interpretację geomorfologiczną nieopisywaną klasycznymi metodami kartograficznymi. W drugim etapie prac dokonano próby odtworzenia rzeźby dna doliny będącej już dnem sztucznego zbiornika wodnego. W tym celu wykonano pomiary głębokości zbiornika za pomocą sonaru. Dane sonarowe zostały uzupełnione o wyniki interpretacji geomorfologicznej oraz fotointerpretacji w miejscach, w których nie było można dokonać bezpośrednich pomiarów. W trzecim etapie badań na podstawie sytuacji morfometrycznej z 1968 i 2016 roku dokonano próby określenia zmian w morfometrii dna doliny podczas procesu powstawania, jak i funkcjonowania Zbiornika Sulejowskiego.

Słowa kluczowe: Zbiornik Sulejowski, pomiary batymetryczne, analizy GIS, zamulanie zbiorników, antropopresja

Abstract. The article attempts to determine the geomorphological changes in the bottom of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice near Tomaszów Mazowiecki in the period from the late 1960s to 2016. The research was divided into three parts. The first part included the most faithful reconstruction of the topography of the valley bottom, not only based on a contour drawing, but also on an additional geomorphological interpretation not described using classic cartographic methods. In the second stage of work, an attempt was made to recreate the relief of the valley floor, which was already the bottom of an artificial water reservoir. For this purpose, measurements of the reservoir depth were made using sonar. The sonar data were supplemented with the results of geomorphological interpretation and photointerpretation in places where direct measurements could not be made. In the third stage of research, based on the morphometric situation from 1968 and 2016, an attempt was made to determine changes in the morphometry of the valley floor during the formation and functioning of the Sulejów Reservoir.

Key words: Sulejów Reservoir, bathymetric measurements, GIS analyses, silting of reservoirs, human impact

Wprowadzenie

Od początku cywilizacji doliny rzeczne stanowiły jednocześnie bariery w migracji, jak i drogi przemieszczania się ludzi. Człowiek zawsze w mniejszym czy większym stopniu próbował ingerować

w kształt oraz procesy zachodzące w dolinach rzecznych. Można stwierdzić, że w Europie w przypadku dolin, podobnie jak w przypadku lasów, nie można już mówić, poza niewielkimi fragmentami, o czysto pierwotnych formach. Poza zmianami form geomorfologicznych podlegającymi presji rozwoju obszarów miejskich doliny

¹ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: aleksander.szmidt@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-8269-6368

² Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Geografii Miast, Turystyki i Geoinformacji, ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź; e-mail: marcin.jaskulski@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-7741-2594

³ 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

rzeczne są jednym z elementów środowiska przyrodniczego poddanego najsilniejszym procesom antropopresji. Koryta rzek są regulowane, wznosi się różne budowle hydrotechniczne, które mają wpływ na naturalne procesy rzeźbotwórcze zachodzące w rzece oraz dolinie rzecznej. Powyższy stan rzeczy spowodował, iż na charakter zmian w obrębie dolin rzecznych wpływa coraz więcej elementów (Rosgen 1994). Współwystępowanie w obrębie badanego obszaru zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych czynników rzeźbotwórczych daje naukowcom szerokie pole do prowadzenia badań nad interpretacją kierunków ewolucji morfologii terenu.

Szczególnym obiektem antropogenicznym mającym bardzo duży wpływ na dolinę rzeczna są zapory wodne oraz towarzyszące im sztuczne zbiorniki wodne. Inwestycje takie zmieniają wszystkie elementy środowiska przyrodniczego, wymuszając powstanie dużych zmian w litosferze, atmosferze, hydrosferze, pedosferze i biosferze, a także zmian społeczno-gospodarczych. W bogatej literaturze znajduje się wiele opracowań naukowych poruszających wpływ tych konstrukcji na różne elementy środowiska przyrodniczego. Ze względu na wyrazistość procesów geomorfologicznych szczególnie duży nacisk kładzie się na badania zmian rzeźby doliny i morfologii koryta rzecznej w wyniku budowy zapór i sztucznych jezior dla rzek górskich (Florek i in. 2008; Witek, Białoobrzaska 2012; Liro 2014), mniej zaś uwagi poświęca się rzekom nizinnym. Drugim podejściem badawczym ujmowanym w literaturze są zmiany w obrębie samego zbiornika wodnego. Tu głównym nurtem badawczym ze względu na często ich aplikacyjny charakter są opracowania dotyczące zamulania zbiornika osadami niesionymi przez rzekę (Cyberski 1970; Gładki i in. 1979; Shumm 1985; Bąk 2012; Magnuszewski 2012; Michalec 2008; Pacina i in. 2020; Rdzany i in. 2022) łącznie z matematycznym modelowaniem prognozy zamulania (Łajczak 1995). Prowadzone także były prace badawcze nad procesami abrazyjnymi, stokowymi, eolicznymi zachodzącymi w strefach brzegowych (Kaczmarek 2010, 2018).

Rozwój techniki teledetekcyjnej oraz narzędzi GIS zaowocował nowymi możliwościami prowadzenia badań na obszarach dolin rzecznych (Crivellaro i in. 2024). Zdaniem autorów szczególnie interesujące wydaje się zastosowanie metodyki GIS pozwalającej na możliwości analizy, jak i wizualizacji kolejnych etapów zmian oraz porównań modeli opartych na danych z różnych okresów. Zastosowana metodyka pozwala ukazać kompleksowy obraz charakteru zmian dna zbior-

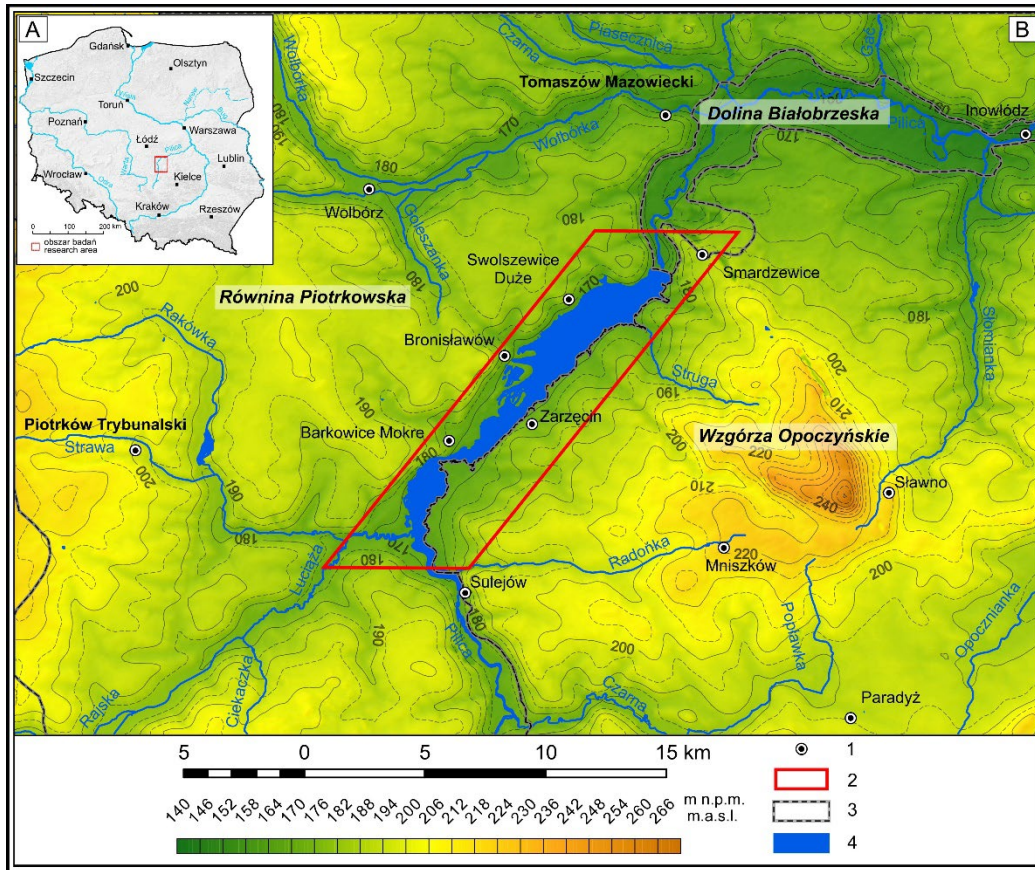
nika – przekształceń doliny rzecznej od jej naturalnej formy powierzchniowej po dno zbiornika wodnego i procesy w nim zachodzące, w tym przypadku na obszarze nizinnym.

W artykule podjęto próbę przedstawienia i oceny zmian w obrębie dna doliny Pilicy pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami koło Tomaszowa Mazowieckiego w wyniku powstania i funkcjonowania Zbiornika Sulejowskiego. Prace i badania można podzielić na trzy główne etapy. Pierwszy etap obejmował poszukiwanie i przetworzenie materiałów archiwalnych pozwalających w najwierniejszy sposób przedstawić morfometrię dna analizowanego odcinka doliny przed powstaniem zbiornika zaporowego. Drugi etap prac obejmował wykonanie pomiarów batymetrycznych Zbiornika Sulejowskiego celem uzyskania obrazu współczesnego ukształtowania dna. Dodatkowo uzyskane wyniki pomiarów zostały wzbogacone o analizę geomorfologiczną, pozwalającą lepiej zinterpretować i opisać wyniki pomiarów terenowych (Szubert 2008). Trzeci etap prac obejmował analizę zachodzących zmian morfometrii dna w okresie od roku 1968 do roku 2016.

Położenie obszaru badań

W niniejszym opracowaniu analizie poddana została dolina rzeki Pilicy na odcinku pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami (rys. 1A). Obszar ten położony jest w Centralnej Polsce około 50 km na południowy wschód od Łodzi. Według regionalizacji fizycznogeograficznej (Solon i in. 2018) teren ten zajmuje wschodnią część Równiny Piotrkowskiej (318.84) na granicy z Doliną Białoobrzaską (318.85) będącą częścią makroregionu Wzgórze Południowomazowieckie (318.8) oraz mezoregionu Wzgórze Opoczyńskie (342.12) będącymi częścią Wyżyny Przedborskiej (342.1) (rys. 1B).

Pod względem geologicznym omawiany obszar położony jest na terenie niecki tomaszowskiej (Zawadzki 1980), będącej częścią niecki mogileńsko-łódzkiej, zbudowanej głównie z osadów wieku mezozoicznego. Najstarsze osady przedczwartorzędowe z okresu jury górnej (oxford, kimeryd, portland) reprezentowane są głównie przez wapienie, wapienie margliste, margle i iłowce (Brzeziński 1992). Mają one wychodnie w okolicach Sulejowa, po obu stokach doliny. Ze względu na swoje właściwości były do niedawna pożądanym surowcem do wytwarzania wapna i produktów pochodnych, co stanowiło ważny aspekt w historii rozwoju Łodzi w wiekach XIX i XX. Efektem tych pro-



Rys. 1. Położenie obszaru badań

A – na tle Polski, B – na tle najbliższego otoczenia

1 – miejscowości, 2 – obszar badań, 3 – mezoregiony fizycznogeograficzne, 4 – wody powierzchniowe

Location of the research area

A – compared to Poland, B – compared to the immediate surroundings

1 – cities, 2 – research area, 3 – physical and geographical mesoregions, 4 – surface waters

cesów było powstanie i rozwój szeregu większych i mniejszych kamieniołomów, hałd i wapienników, stanowiących swoisty charakter krajobrazu widoczny do dzisiaj. Pod badanym odcinkiem doliny Pilicy oraz w jego otoczeniu w przypadku osadów przedczwartorzędowych dominują jednak osady wieku kredowego, zarówno kredy dolnej, jak i górnej (Brzeziński 1992). Są to najczęściej gezy margliste oraz mułowce marglisto-piaszczyste, które w okolicy Smardzewic stanowią wychodnie skał zwiężające dolinę Pilicy i będące miejscem posadowienia tamy. Na północny wschód od tamy w Smardzewicach ważne z punktu gospodarczego są piaskowce i piaski kredy dolnej. Są one wydobywane na dużą skalę w kilku kopalniach, co podobnie jak w przypadku Sulejowa i okolic stwarza swoisty krajobraz. Podczas prowadzonych badań (Brzeziński 1992) nie stwierdzono występowania osadów wieku paleogeńskiego i neogeńskiego.

Pozostały teren charakteryzuje się powierzchnią zbudowaną z głównie piaszczysto-żwirowych osadów czwartorzędowych. Ich miąższość maleje z zachodu na wschód. W Barkowicach Mokrych dochodzi ona do 40 m, w Swolszewicach Dużych do 25 m, natomiast w Zarzęcinie do 15 m, czego przyczyną są wzrastające rzędne stropu kredy (Brzeziński 1992). Lokalnie na piaskach i żwirach wodnolodowcowych w postaci niewielkich płatów zalegają słabo wysortowane gliny zwałowe z okresu zlodowacenia odry. Są one widoczne między innymi w okolicy miejscowości Karolinów. Ponadto na rozpatrywanym terenie występują piaski eoliczne, które tworzą wydmy oraz zalegają horyzontalnie głównie na piaskach rzecznych teras nadzalewowych, nie przybierając specyficznych form powierzchniowych (Brzeziński 1992).

W obrębie analizowanego odcinka doliny Pilicy (rys. 1B) zlokalizowano sztuczny zbiornik

wodny. Zbiornik ten został zbudowany w latach 1969–1973, początkowo jako źródło wody pitnej dla aglomeracji łódzkiej. Kluczowym elementem prac konstrukcyjnych było wybudowanie przegrrody na 139. kilometrze rzeki Pilicy. Sztuczna zaporę o konstrukcji betonowo-ziemnej posiada wysokość 16 m oraz rozciąga się na długości 1200 m. Zaporę ulokowano w miejscowości Smardzewice (Ambrożewski 1993). Zalew Sulejowski jest drugim co do wielkości zbiornikiem wodnym w województwie łódzkim. Jego powierzchnia wynosi 2380 ha, długość maksymalna 25 km, szerokość średnia 1,5 km, zaś średnia głębokość 3,3 m. Obecnie zbiornik pełni głównie funkcje rekreacyjne dla mieszkańców województwa łódzkiego (Ambrożewski 2013).

Metody i materiały

W celu określenia zmian zachodzących w dolinie rzecznej postanowiono wykonać cyfrowe modele doliny Pilicy w obszarze dzisiejszego zbiornika z okresu przed jego powstaniem oraz z okresu obecnego. Prace podzielono na trzy etapy, to jest: utworzenie numerycznego modelu terenu dla okresu sprzed powstania zbiornika, utworzenie numerycznego modelu terenu dna zbiornika (mapa batymetryczna) oraz wykonanie analiz uwidocznionych zmian w morfometrii.

Etap 1. Utworzenie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) w oparciu o materiały archiwalne

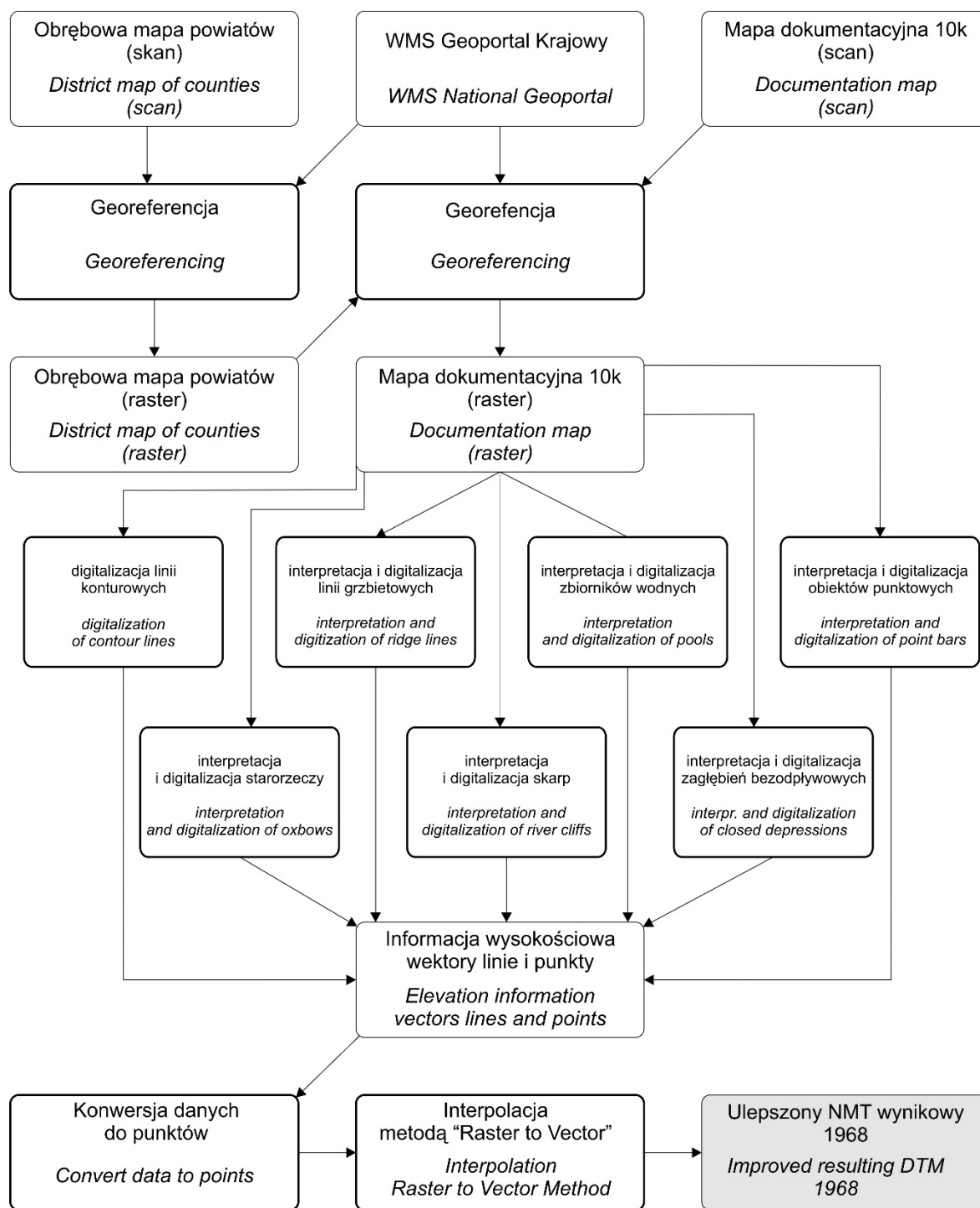
Dokonano próby stworzenia cyfrowego modelu terenu NMT nieistniejącego dziś fragmentu doliny rzecznej (obecnie jest to dno i brzegi zbiornika wodnego). Zdecydowano się na pozyskanie danych wysokościowych z rysunku poziomicowego, stanowiącego element map topograficznych (rys. 2). Rozpoczęto więc poszukiwania archiwalnych map i opracowań zawierających treść morfometryczną. Po zbadaniu archiwów Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (WODGiK), Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK), zbiorów kartograficznych Biblioteki Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego oraz Archiwum Państwowego w Łodzi wybrano Mapę Powiatów w skali 1:25 000 z roku 1961, następnie mapę dokumentacyjną dla Zbiornika Sulejowskiego z roku 1968 w skali 1:10 000 załączoną do opracowania IMGW (2008) „Zbiornik wodny Sulejów badania sedymentacji i aktualizacja pojemności”.

Zeskanowanym mapom nadano georeferencję w programie ArcGIS 10.4.1. Ze względu na jakość osnowy matematycznej w pierwszej kolejności georeferencję nadano Mapie Obrębowej Powiatów w skali 1:25 000, która następnie stała się podstawą dla nadania georeferencji mapie dokumentacyjnej (Jaskulski i in. 2013). Weryfikacji jakości procedury dokonano poprzez obliczenie średniego błędu RMS (*root mean square* – średni błąd kwadratowy) oraz zestawienie zrektyfikowanych rastrów ze współczesnymi mapami topograficznymi, biorąc pod uwagę tylko punkty charakterystyczne, położone poza strefą zalewową zbiornika (Jaskulski i in. 2013). Zeskanowane i poddane georektyfikacji mapy stały się podstawą do wykonania cyfrowego modelu terenu doliny z okresu przed powstaniem sztucznego jeziora.

Kolejnym krokiem była interpretacja i następnie digitalizacja rysunku poziomicowego z map w skali 1:25 000 i 1:10 000 w programie ArcGIS 10.4.1. Zdaniem autorów sam rysunek poziomicowy na mapach topograficznych nie daje jednak wystarczającej informacji wysokościowej, gdyż opisuje jedynie formy terenu o deniwelacjach większych niż cięcie warstwicowe – wynoszące w tym przypadku maksymalnie 1,25 m.

Zaistniała konieczność uzupełnienia danych o inne, dokładniejsze informacje geomorfologiczne, które są nieopisane przez rysunek poziomicowy. Na podstawie analizy geomorfologicznej treści mapy topograficznej odtworzono poszczególne elementy koryta rzecznego (bystrza, płosa, odsypy meandrowe), a także formy ukształtowania terenu w dolinie rzecznej (starorzecza, skarpy, zagłębienia bezodpływowe) (Jaskulski i in. 2016). Ze względu na złożoność oraz dużą przypadkowość wydarzeń i procesów fluwialnych oraz punkt na osi czasu, dla którego została opracowana mapa, zrezygnowano z matematycznego wyliczenia poszczególnych wartości parametrów koryta. Przyjęto zasadę subiektywnego wyznaczenia osi koryta rzecznego i form dennych w granicach ogólnych zasad funkcjonowania procesów fluwialnych.

Po wyrysowaniu osi koryta wprowadzono tą samą metodą wartości głębokości koryta oraz przebiegu i wysokości łańcuchów śródkorytowych i odsypów meandrowych. Wprowadzone rzędne powierzchni nie mogły jednak przekraczać przedziałów cięcia warstwicowego, czyli 1,25 m. Podobna procedura została wykorzystana podczas opisywania pozostałych form dna dolinnego. W przypadku linii nieciągłości jak skarpy informację tę wprowadzono zgodnie z powszechnie przyjętymi

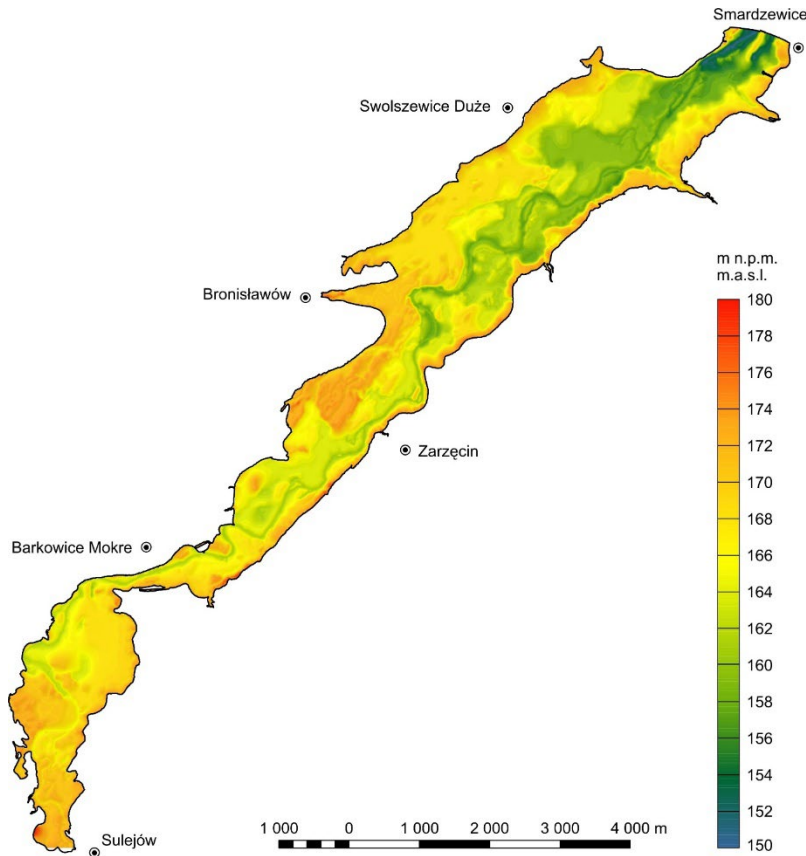


Rys. 2. Schemat zastosowanej procedury badawczej – etap 1

Research procedure diagram – stage 1

zasadami. Uzyskane w ten sposób informacje wyeksportowano do formy tabelarycznej, gdzie współrzędne X, Y wyliczone zostały z węzłów plików shp pozyskanych w poprzednich etapach. Kolejna faza pracy to wybranie optymalnej metody przekształcenia informacji morfometrycznej do formy GRID. Pierwotnie testowano różne me-

tody interpolacyjne, aby uzyskać jak najwierniejszy obraz wynikowy (Sibson 1981; Badura, Przybylski 2005). W przypadku programu Golden Software Surfer, jak i QGIS najbardziej optymalną okazała się metoda naturalnych sąsiadów. W późniejszym etapie prac, zakładając, że pozyskane, jak i wyinterpretowane łącznie dane jako całość



Rys. 3. Ukształtowanie powierzchni dna doliny Pilicy pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami w roku 1968 (opracowano na podstawie Szkiców Dokumentacyjnych do projektu lokalizacji Zbiornika Sulejowskiego)

Topography of bottom of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice in 1968 (prepared based on Documentary Sketches for the Sulejów Reservoir)

mają charakter zbliżony do rysunku poziomicowego, zdecydowano się wykorzystać metodę interpolacji „*Topo to Raster*” wchodzącą w skład narzędzi ESRI ArcGIS. Uzyskane wyniki zwizualizowano metodą barwną z cieniowaniem w programie Golden Software Surfer 16 (rys. 3).

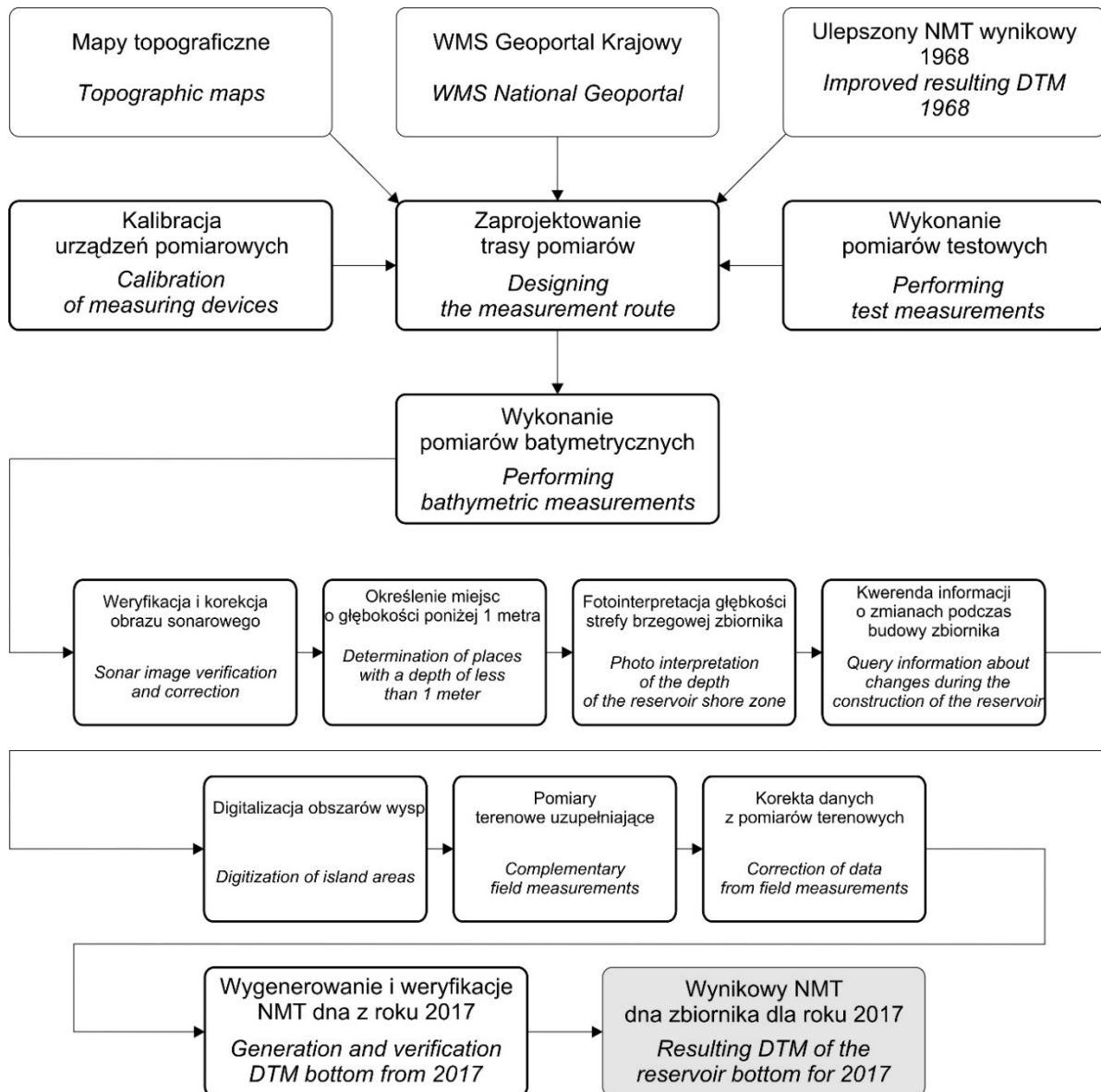
Etap 2. Utworzenie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) w oparciu o pomiary sonarem

Prace terenowe przeprowadzono w lipcu 2016 roku (rys. 4). Do badań wykorzystano zamontowany do łodzi motorowej Sonar Lowrance HDS generacji 3 z przetwornikami 50/200 kHz oraz sonarem bocznym 400/800 kHz. Urządzenie jest wyposażone w GPS 10 Hz. Badanie prowadzono początkowo na liniach profilowych poprzecznych do osi podłużnej zbiornika w odstępach około 50 metrów zgodnie ze „*Standards for Hydrographic Surveys*” (S-44). W miejscach, gdzie spodziewano się występowania skomplikowanego lub bardziej interesującego reliefu, przebieg linii profilowych (pomiary) został zmieniony w celu dokładniejszego poznania szczegółów ukształtowania

dna. Dzięki tak prowadzonym badaniom terenowym uzyskano bazę danych w postaci około 440 000 punktów z określoną głębokością oraz położeniem przestrzennym. Zebrane dane wymagały weryfikacji.

Postprocessing przeprowadzony został w programie ReefMaster 1,8. Polegał on na wizualnej ocenie obrazu (rys. 5) pochodzącego z przetwornika DownView (częstotliwość 400/800 kHz) z jednoczesną korektą wysokości punktów. Dodatkowo uszczegółowiono dane morfometryczne w płytkich, brzegowych częściach akwenu (Jaskulski i in. 2018).

Procedura ta konieczna była z uwagi na typ zbiornika wodnego, który charakteryzuje się niewielką głębokością oraz dużym stopniem eutrofizacji – zwłaszcza w miejscach płytszych (Popielarczyk, Templin 2014). Ręczna metoda korekty w przeciwieństwie do automatycznych algorytmów pozwala precyzyjniej ocenić, czy lokalne anomalie w ukształtowaniu dna są faktycznym obrazem, na przykład pni drzew, czy też odbicia sygnału od roślinności miękkiej (Jaskulski i in.



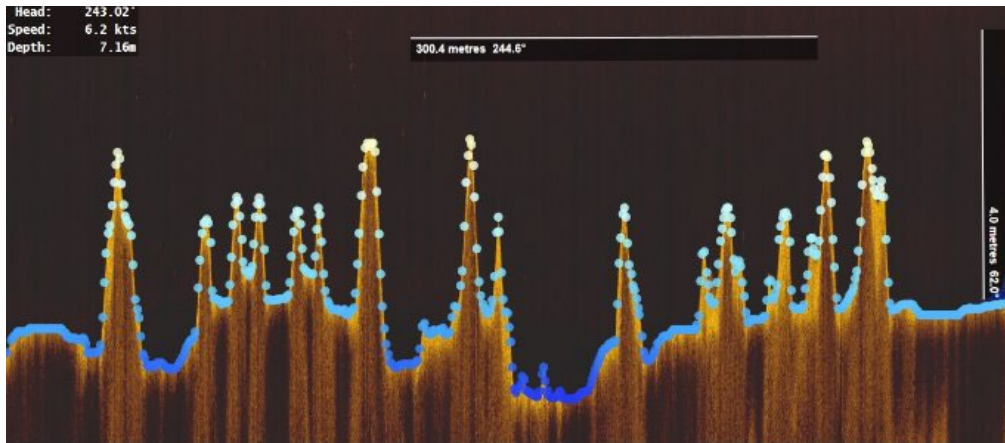
Rys. 4. Schemat zastosowanej procedury badawczej – etap 2

Research procedure diagram – stage 2

2018). Analiza ta pozwoliła wychwycić też anomalie ukształtowania dna związane z przebiegiem prac hydrotechnicznych podczas budowy zbiornika. Po korekcie danych zostały one wyeksportowane z programu ReefMaster 1,8 do formatu GRID.

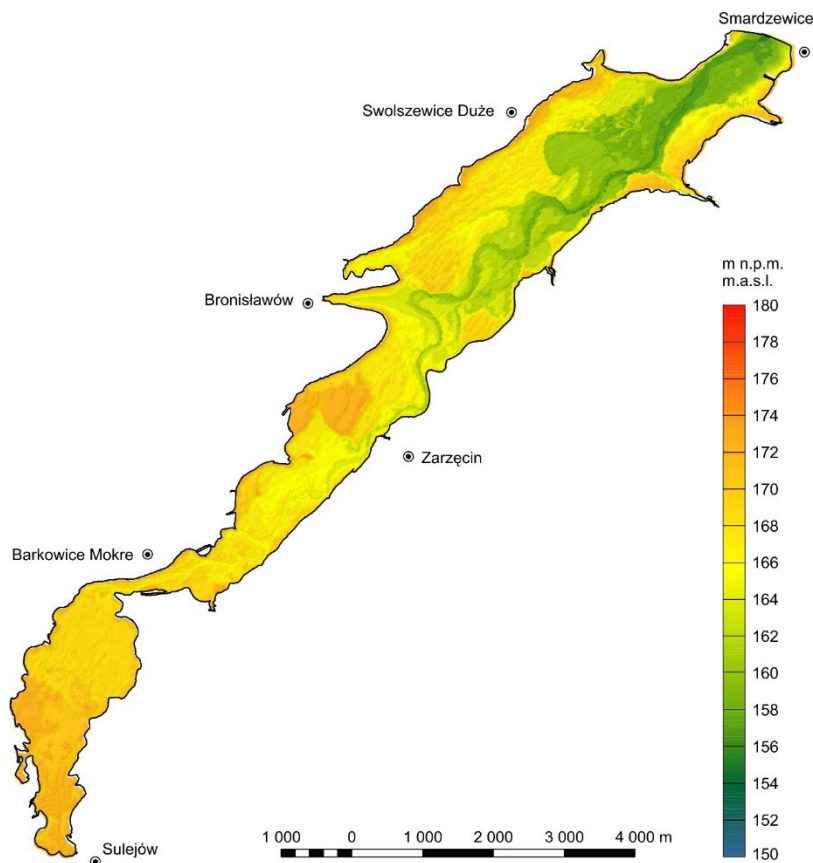
Numeryczny Model Terenu ukształtowania dna uzyskany na tym etapie prac nie był jeszcze satysfakcjonujący pod względem geomorfologicznym. Pierwszym problemem był brak danych ze strefy brzegowej o głębokościach poniżej 1 m, gdzie niemożliwe było dokonanie pomiarów za pomocą sonaru. W tym przypadku na podstawie dostępnych ortofotomap oraz map topograficznych najpierw ustalono przebieg linii brzegowej

wraz z zarysem wysp. Dla tworzonego modelu terenu była to izobata 0. Należy jednak pamiętać, że bezpośrednie łączenie linii brzegowej ze skrajnymi punktami pomiarowymi z sonaru może dać obraz zbyt uśredniony. Ważny jest tutaj fakt, że duże wahania poziomu wody oraz działające procesy brzegowe bardzo silnie modyfikują tę część zbiornika. Aby oszacować głębokość zbiornika w punktach pomiędzy strefą pomiarów (głębokość poniżej 1 m) a strefą brzegową, dokonano fotointerpretacji zdjęć lotniczych. Wyinterpretowano linie opisujące wartości głębokości na zdjęciu, a ich wartości sprawdzono w trakcie prac terenowych.



Rys. 5. Widok roboczy z programu ReefMaster 1,8. Przykład bardzo dużego urozmaicenia rzeźby dna w okolicy miejscowości Borki

Working view from ReefMaster 1.8. Example of a very large variety of bottom relief near the village of Borki

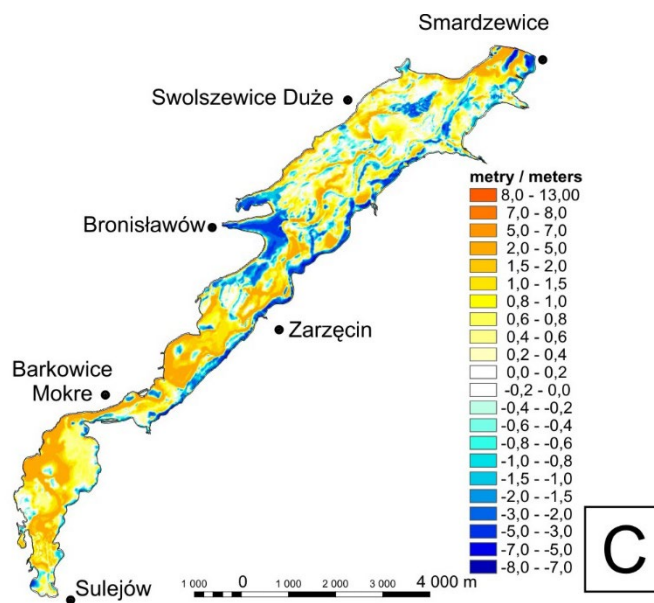
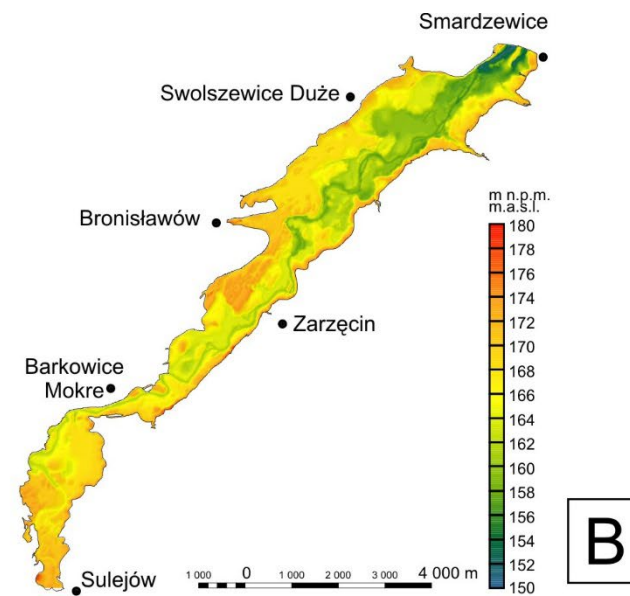
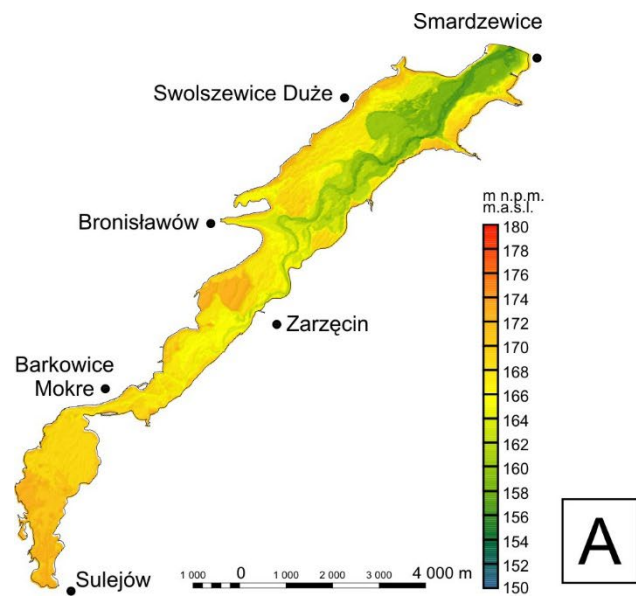


Rys. 6. Ukształtowanie powierzchni dna doliny Pilicy pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami w roku 2016 (opracowano na podstawie danych pomiarowych pozyskanych w ramach projektu MONSUL)

Topography of bottom of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice in 2016 (prepared based on measurement data carried out as part of the MONSUL project)

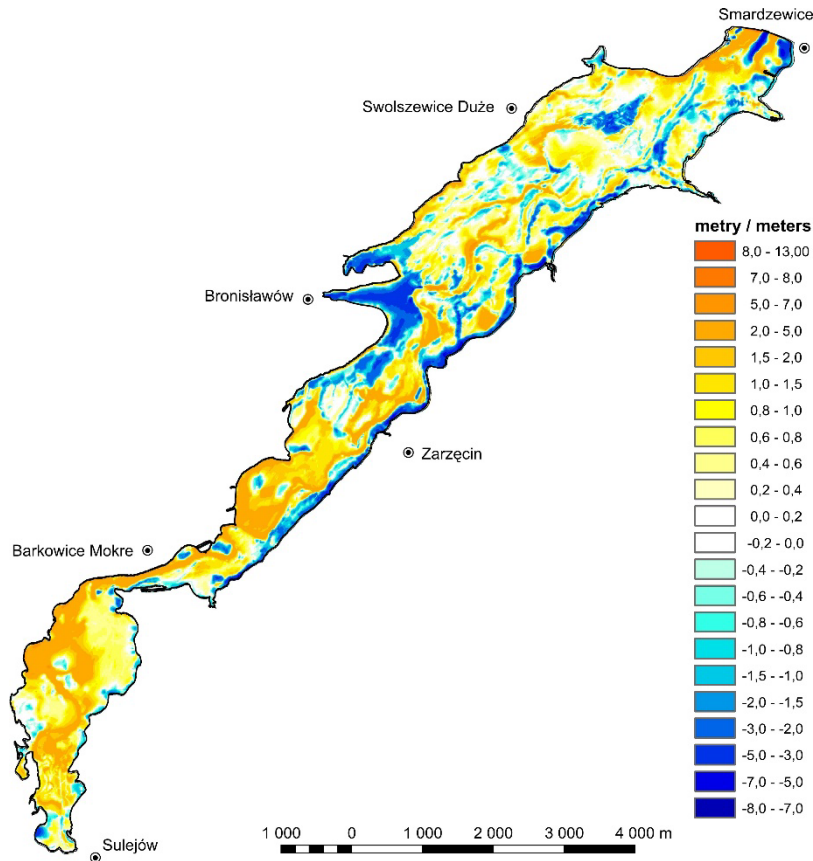
Zdaniem autorów zastosowanie tylko samych metod interpolacji w sytuacji danych o rozmieszczeniu przestrzennym w formie profili nie daje satysfakcjonujących wyników. Szczególnie jest to widoczne w przypadku form dna będących poz-

stałościami po dawnych starorzeczach, form z reguły krętych. Ze względu na kręty kształt istnieje problem z połączeniem informacji o tej samej formie na poszczególnych liniach profilowych. Rozwiązaniem problemu może być zagęszczenie linii



Rys. 7. Schemat zastosowanej procedury badawczej – etap 3
A – NMT 2016, B – NMT 1968, C – model różnicowy

Research procedure diagram – stage 3
A – DTM 2016, B – DTM 1968, C – difference model



Rys. 8. Zmiany ukształtowania powierzchni dna doliny Pilicy pomiędzy Sulejowem a Smardzewicami pomiędzy rokiem 2016 a 1968

Changes in topography of bottom of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice between 2016 and 1968

profilowych lub zastosowanie, o ile jest to możliwe, sondy wielowiązkowej. Należy jednak pamiętać, że starsze pomiary często nie były wykonywane tą technologią. W celu rozwiązania powyższego problemu, zastosowano ręczną interpretację pozostałości dawnej sieci rzecznej. W celu weryfikacji metody wytypowano dwa łatwo dostępne miejsca i przeprowadzono dodatkowe badania sonarem wzdłuż dawnego koryta rzecznej. Następnie przy pomocy oprogramowania Golden Software Surfer 14 i użyciu narzędzia edycji siatki wykonano korektę w obrazie GRID. Tak jak na poprzednim etapie prac, uzyskane wyniki zwizualizowano metodą barwną z cieniowaniem w programie Golden Software Surfer 16 (rys. 6).

Etap 3. Wygenerowanie mapy różnicowej

W kolejnym kroku uzyskane Numeryczne Modele Terenu dla lat 1968 oraz 2016 zostały sprowadzone do tych samych zakresów przestrzennych. W przypadku mapy batymetrycznej dokonano przeliczenia wartości głębokości na rzędną wysoko-

kości nad poziomem morza. Dalej obydwa modele były ponownie interpolowane, tym razem metodą naturalnych sąsiadów, do takiej samej rozpiętości przestrzennej i rozdzielczości poziomej 10 metrów. Dzięki tym zabiegom dokonano wyrównania przestrzennego obu modeli.

Celem obliczenia zmian w ukształtowaniu powierzchni terenu dokonano odjęcia rastra opisującego ukształtowanie dna zbiornika w 1968 roku od rastra dotyczącego ukształtowania w roku 2016 (rys. 7). W tym celu w programie ESRI ArcGIS 10.4. wykorzystano funkcję Spatial Analyst\Math\Minus. Uzyskany GRID wynikowy wyświetlono za pomocą przedziałów wysokościowych (rys. 8).

Wyniki badań i dyskusja

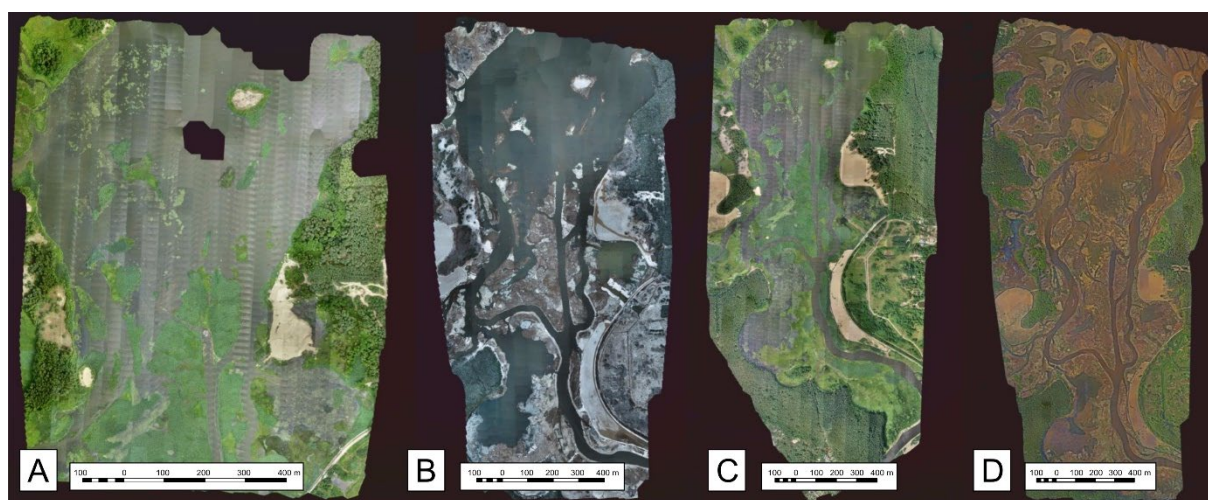
W wyniku funkcjonowania zbiornika zaporowego dno doliny zostało w różnym stopniu zasypane osadami. Zjawisko to należy rozpatrywać w kilku

aspektach, zarówno form powstałych w wyniku procesów naturalnych, ale inicjowanych działalnością człowieka, oraz przekształceń będących całkowicie dziełem ludzkim. W pierwszym przypadku należy rozpatrzeć procesy związane z akumulacją deltową wynikającą z podniesienia bazy erozyjnej poprzez budowę zalewu, dalej procesy brzegowe wynikające z podmywania brzegów zarówno przez falującą wodę, jak i nasilającą się erozję podczas częściowego opróżniania się zbiornika (obniżenie bazy erozyjnej) – procesu częstego, związanego z pełnieniem funkcji retencyjnej akwenu. Istotnym elementem z pewnością są utwory, z których zbudowane są stoki dawnej doliny, oraz kształt samego zbiornika czy dominujące kierunki wiatrów. W drugim aspekcie, czyli bezpośredniej działalności człowieka, należy spojrzeć na prace hydrotechniczne związane z budową sztucznego jeziora. Należy tu wymienić budowę samej zapory, do której należy pozyskać materiał na nasyp. Podczas takich operacji regulacyjnej i czasowym przemieszczeniach musi ulegać nurt rzeki. Dno doliny zbudowane zarówno z osadów mineralnych jak i organicznych na czas budowy musi być umacniane, aby umożliwić poruszanie się ciężkiego sprzętu budowlanego. Zbiornik Sulejowski oprócz funkcji retencyjnej i zaopatrzenia aglomeracji łódzkiej w wodę pełnił i pełni też funkcje rekreacyjne. Wiąże się to z powstaniem wielu portów jachtowych, budową ośrodków wypoczynkowych, jak i indywidualnych działek rekreacyjnych. Wszystko to wpływa na kształt strefy brzegowej obiektu.

Zaczynając od strefy deltowej zbiornika, należy zwrócić uwagę na jej charakterystyczny kształt. W przypadku tego zbiornika delta zlokalizowana jest pomiędzy dwoma przewężeniami (rys. 3, 6, 8). W miejscu tym wyraźnie widać zasypanie dawnego koryta rzecznej oraz rozrost licznych wysp i stożków napływowych (rys. 9; fot. 1). Mniejsze zasypanie natomiast występuje w strefie wschodniej tego obszaru, oddzielonej od głównych prądów wodnych tam przebiegających. Podobnie jak w przypadku Zbiornika Jeziorsko (Rdzany i in. 2022) istotną rolę w kształtowaniu tej strefy odgrywały zjawiska ekstremalne w postaci powodzi.

Poza deltą drugie zjawisko, które widać, to mocne podmywanie południowo-wschodnich brzegów zbiornika. Można zadać pytanie, czy wpływ na to nie mają dominujące kierunki wiatrów na tym obszarze. Być może ukierunkowane falowanie czy kształt linii brzegowej mogą nasilać ten proces, zarówno poprzez rozmywanie, jak i spychanie nurtu wodnego w zbiorniku. Kwestie te wymagają osobnych badań. Pod uwagę należy też wziąć ocenę materiałów źródłowych, szczególnie tych archiwalnych. W przypadku mapy dokumentacyjnej w skali 1:10 000 cięcie warstwowe wynosiło 1,25 m, co na małych odległościach mogło dać pewne błędy w pomiarach.

Podczas analizy zmian ukształtowania dna zbiornika warto rozpatrzeć powierzchnię budowę geologiczną badanego obszaru. W przypadku omawianego akwenu wśród osadów budujących strefę brzegową dominują osady piaszczys-



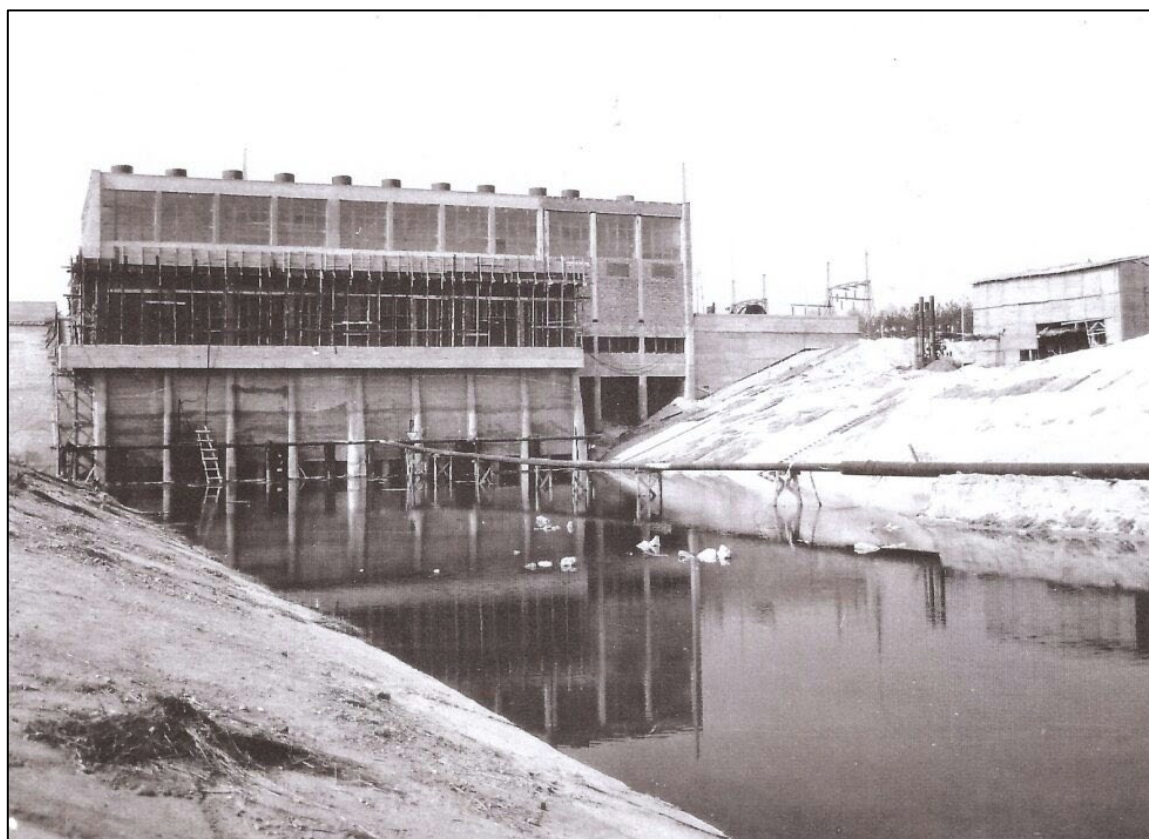
Rys. 9. Porównanie ortofotomapy z naltu fotogrametrycznego z lipca 2021 (A), grudnia 2021 (B), sierpnia 2022 (C) i kwietnia 2023 (D) (fot. M. Kossowski 2024)

Comparison of orthophotomap from photogrammetric flight in July 2021 (A), December 2021 (B), August 2022 (C) and April 2023 (D)



Fot. 1. Odślonięte dno Zbiornika Sulejowskiego w strefie delty (fot. M. Jaskulski 2023)

Exposed bottom of Sulejów Reservoir in the delta zone



Fot. 2. Ujęcie wody Bronisławów w trakcie budowy. Sztucznie wykopany „doprowadzalnik” umożliwiający pobór wody niezależnie od poziomu wody w zbiorniku (fot. archiwum A. Kobalczyka)

Bronisławów water intake under construction. Artificially dug “feeder” enabling water intake regardless of water level



Fot. 3. Odślonięte dno basenu portowego (Barkowice Mokre) (fot. M. Jaskulski 2023)

Exposed bottom a of the dock in one of the yacht ports

te (Brzeziński 1992). W przypadku siostrzanego Zbiornika Jeziorsko położonego kilkadziesiąt kilometrów na zachód od Łodzi w sąsiedztwie dominują osady gliniaste i mułowe, czyli bardziej zwięzłe (Klatkova, Załoba 1991). Analizując zdjęcia lotnicze obu zalewów, zwracają uwagę liczne ślady nawiewania i wymywania osadów piaszczystych tylko w północno-wschodniej części Zbiornika Sulejowskiego (Jaskulski i in. 2018; Rdzany i in. 2022).

Pomimo dużej akumulacji w dolinie, w obrazie ukształtowania dna Zbiornika Sulejowskiego nadal dobrze są widoczne elementy dawnej doliny Pilicy. Dzięki pomiarom batymetrycznym dodatkowo ujawniły się ślady licznych starorzeczy niewidocznych wcześniej na mapach topograficznych, a więc uzyskano obraz dokładniejszy niż mapy topograficzne z okresu przed powstaniem zalewu. Na modelu uwidacznia się też skomplikowana struktura dna w górnej części zbiornika (delta Pilicy), słabo widoczna również na starszych opracowaniach kartograficznych.

Wracając do bezpośredniego wpływu człowieka na morfometrię doliny, największe zmiany w ukształtowaniu dna zbiornika widoczne są w miejscach, gdzie prowadzono różne prace hydrotechniczne. Są to miejsca budowy ujęcia wo-



Fot. 4. Prace ziemne przy kształtowaniu dna zbiornika w okolicach dzisiejszego portu Maruś (fot. archiwum A. Kobalczyka)

Earthworks shaping bottom of the reservoir near today's Maruś port

dy w Bronisławowie oraz okolice tamy i portu w Smardzewicach. Budowa ujęcia wody wymagała wykonania głębokiego wykopu umożliwiającego pobór niezależnie od jej poziomu w zalewie (fot. 2). Podobne wykopy widzimy w miejscach lokalizacji mniejszych portów jachtowych (fot. 3). Dodatkowo, jeśli brzegi nie są umocnione, to podczas obniżenia wody w zalewie mogą się intensyfikować procesy erozyjne.

Drugim wspomnianym miejscem istotnych zmian jest strefa zapory czołowej. Oprócz oczywistego przyrostu osadów związanych z samą tamą w okolicach występowały liczne drobne obniżenia, jak i podwyższenia dna doliny (rys. 6). Interpretacja tego stanu rzeczy nie byłaby możliwa bez wywiadów ze świadkami z okresu budowy tamy. Piaszczysta terasa nadzalewowa ówczesnej doliny Pilicy była miejscem poboru materiału mineralnego potrzebnego do budów hydrotechnicznych tamy oraz umocnień nabrzeża (fot. 4). Niestety nie zachowała się żadna dokumentacja z tego wydobycia.

Wnioski

Budowa w 1973 roku Zalewu Sulejowskiego zasadniczo zmieniła dolinę rzeki Pilicy na badanym obszarze. Udokumentowane przekształcenia rzeźby mają charakter poligenetyczny. Część z nich związana jest z bezpośrednią działalnością człowieka – kształtowanie dna, budowa portów i doprowadzalnika wody, eksploatacja surowców. Budowa zbiornika uruchomiła także naturalne procesy rzeźbotwórcze – akumulację materiału niesionego przez rzekę, procesy stokowe zachodzące na zalanych wodą stokach doliny Pilicy.

Bezpowrotnie zniknęły elementy infrastruktury, takie jak zabudowania, drogi czy lasy gospodarcze. Dużym przemianom uległy same formy geomorfologiczne składające się na krajobraz doliny rzecznej. Istotnemu zasypaniu uległa górna część zbiornika w wyniku rozwoju delty, gdzie praktycznie zanikł obraz dawnego koryta rzecznej i starorzeczy, zaś w wyniku akumulacji osadów oraz rozwoju roślinności rozwinął się system wysp. W dalszej części dna akwenu także widoczna jest silna akumulacja, aczkolwiek w obrazie dna nadal można zaobserwować elementy form dolinnych. W wyniku działania naturalnych procesów brzegowych i jednocześnie działalności człowieka istotnym przemianom cały czas ulega strefa brzegowa zbiornika.

Prowadzone badania pozwoliły udoskonalić same metody pozyskiwania i przetwarzania do

analiz przestrzennych w Systemach Informacji Geograficznej (GIS) archiwalnych danych morfometrycznych, jak i korekty i udoskonalenia danych morfometrycznych pierwotnych uzyskanych bezpośrednio w terenie.

W wyniku prowadzonych badań autorom udało się odtworzyć i przekształcić do formy cyfrowej obraz pierwotnej rzeźby terenu na podstawie archiwalnych materiałów kartograficznych. Dzięki badaniom terenowym zebrano dane pozwalające opisać, jak ukształtowany jest ten teren w chwili obecnej, a następnie na modelu różnicowym przedstawić dokładne zmiany. Przy zbieraniu danych zarówno do modelu historycznego, jak i teraźniejszego trzeba zachować dużą rozwagę oraz opierać się na wiedzy i interpretacji procesów geomorfologicznych. W przypadku modelu historycznego po dokładnej kwerendzie archiwów należy ocenić przydatność tych materiałów do dalszych prac. Nie może być to mechaniczna wektoryzacja poziomic, tylko kompleksowe podejście i analiza geomorfologiczna wszystkich elementów dających się odczytać ze źródeł danych, które nie są opisane przez rysunek poziomicowy. Podobne założenia należy przyjąć przy zbieraniu danych w terenie, a następnie ich przetwarzaniu. Istniejącą normę „*Standards for Hydrographic Surveys*” (S-44) należy traktować jako pewną wytyczną. Na obszarach, gdzie dno zbiornika wodnego nie jest mocno zróżnicowane, proponowane rozwiązanie profilu badawczego co 50 metrów jest wystarczające. Jednak w miejscach, gdzie zalane są dawne strome skarpy meandrującej rzeki, jej starorzecza bądź miejsca o dużych deniwelacjach, należy zagęścić ilość danych tak, aby lepiej odzwierciedlały faktyczną rzeźbę dna (Jaskulski i in. 2018). Dodatkowo takie dane, jeśli jest to możliwe, należy uzupełnić o interpretację archiwalnych materiałów kartograficznych wraz z analizą treści topograficznej na dostępnych ortofotomapach.

Literatura

- Ambrożewski Z. 1993. Projektowanie i realizacja zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 267-273.
- Ambrożewski Z. 2013. Budowa zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna* 12: 457-464.
- Badura J., Przybylski B. 2005. Application of digital elevation models to geological and geomorphological studies – some examples. *Przegląd Geologiczny* 53 (10/2): 977-983.

- Bąk Ł., Dąbkowski Sz.L., Górski J. 2011. Metoda prognozowania zamulenia zbiornika wodnego na podstawie pomiaru pojemności. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 4(36): 19-29.
- Brzeziński H. 1992. Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, 1:50 000, arkusz Sulejów. Państwowy Instytut Geologiczny: 36.
- Crivellaro M., Vitti A., Zolezzi G., Bertoldi W. 2024. Characterization of Active Riverbed Spatiotemporal Dynamics through the Definition of a Framework for Remote Sensing Procedures. *Remote Sensing* 16(1): 184. <https://doi.org/10.3390/rs16010184>
- Cyberski J. 1970. Badania akumulacji rumowiska w zbiornikach retencyjnych w Polsce. *Gospodarka Wodna* 12: 43-46.
- Florek E., Florek W., Łęczyński L. 2008. Funkcjonowanie zbiorników zaporowych na Słupi jako czynnik rzeźbotwórczy. *Landform Analysis* 7: 12-22.
- Gładki H., Bednarczyk T., Myczka J. 1979. Prognoza zamulenia zbiornika wodnego w Rzeszowie na rzece Wisłok. ODGW Kraków.
- IMGW (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). 2008. Zbiornik wodny Sulejów – badania sedymentacji i aktualizacja pojemności.
- Jaskulski M., Łukasiewicz G., Nalej M. 2013. Porównanie metod transformacji map historycznych. *Roczniki Geomatyki* 11(4/61): 41-57.
- Jaskulski M., Szmidt A., Ziemińska-Stolarska A., Jaskulski M. 2016. Nowa metoda opracowania mapy ukształtowania dna sztucznego zbiornika wodnego na podstawie archiwalnych materiałów kartograficznych. *Roczniki Geomatyki* 14(4/74): 455-464.
- 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: 19-26.
- Kaczmarek H. 2018. Ewolucja strefy brzegowej nizinnych zbiorników zaporowych w warunkach dużych wahań poziomu wody na przykładzie Zbiornika Jeziorsko na Warcie. *Prace Geograficzne*: 265.
- Klatkova H., Załoba M. 1991. Kształtowanie budowy geologicznej i rzeźby południowego obrzeżenia Basenu Uniejowskiego W: W. Stankowski (red.). *Przemiany Środowiska geograficznego obszaru Konin–Turek*. Instytut Badań Czwartorzędu Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań: 33-44.
- Liro M. 2014. Conceptual model for assessing the channel changes upstream from dam reservoir. *Quaestiones Geographicae* 33(1): 61-74.
- Łajczak A. 1995. Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN* 8. PWN, Warszawa.
- Magnuszewski A. 2012. Analiza wpływu akumulacji rumowiska w strefie oddziaływania zbiorników na bezpieczeństwo powodziowe w regionie. *Program bezpieczeństwa powodziowego dorzecza Środkowej Wisły*. Załącznik 23: 41.
- Michalec B. 2008. Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie* 451, Seria Rozprawy 328.
- Pacina J., Lendáková Z., Štojdl J., Grygar T.M., Dolejš M. 2020. Dynamics of Sediments in Reservoir Inflows: A Case Study of the Skalka and Nechranice Reservoirs, Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9 (4): 258. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040258>
- Popielarczyk D., Templin T. 2014. Application of Integrated GNSS/Hydroacoustic Measurements and GIS Geodatabase Models for Bottom Analysis of Lake Hancza: the Deepest Inland Reservoir in Poland. *Pure and Applied Geophysics* 171: 997-1011. DOI: 10.1007/s00024-013-0683-9
- 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.
- Rosgen D.L. 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22: 169-199.
- Schumm S.A. 1985. Patterns of Alluvial Rivers. *Annual Review* 13: 5-27.
- Sibson R. 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. W: V. Barnett (red.) *Interpreting Multivariate Data*. Wyd. John Wiley & Sons, New York: 21-36.

- Solon J. 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91(2):143-170.
<https://doi.org/10.7163/GPol.0115>.
- Szubert M. 2008. Geomatyka w badaniach geomorfologicznych. *Dokumentacja Geograficzna* 37: 7-13.
- Witek M., Białobrzaska M. 2012. Oddziaływanie obiektów hydrotechnicznych na morfologię koryt rzek ziemi kłódzkiej w świetle analizy GIS – zarys problemu i zamierzenia badawcze. *Landform Analysis* 20: 103-116.
- Zawadzki A. 1980. Badania i dokumentacja geologiczno-inżynierska. W. Z. Ambrożewski (red.) *Monografia zbiornika wodnego Sulejów*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Summary

In this article, the authors analysed geomorphological changes in the bottom of the Pilica valley between Sulejów and Smardzewice near Tomaszów Mazowiecki in the period from the 1960s to 2016. This area is located in Central Poland, ~50 kilometres southeast of Łódź. An artificial water reservoir was located within the examined section of the Pilica valley. This reservoir was built in 1969–73, initially as a source of drinking water for the Łódź agglomeration. The key element of the construction works was the construction of a barrier on the 139th kilometre of the Pilica River. The artificial concrete and earthen structure dam is 16 m high and stretches for 1,200 meters. The reservoir is the second largest water reservoir in the Łódź Voivodeship. Its area is 2.380 ha, maximum length 25 km, average width 1.5 km and average depth 3.3 m. Currently, the reservoir serves mainly recreational functions for the inhabitants of the Łódź Voivodeship.

The research was divided into three parts. The first part included the most faithful reconstruction of the topography of the valley bottom, not only based on a contour drawing, but also on an additional geomorphological interpretation not described using classical cartographic methods. In the second stage of work, an attempt was made to recreate the relief of the valley floor, which was already the bottom of an artificial water reservoir. For this purpose, measurements of the reservoir depth were made using sonar. Sonar data was also supplemented with geomorphological interpre-

tation and photointerpretation in places where direct measurements could not be made. In the third stage of the research, based on the morphometric situation in 1968 and 2016, an attempt was made to determine the direction, dynamics and size of changes in the morphometry of the valley floor during the creation and operation of the Sulejów Reservoir. The construction of the Sulejów Reservoir in 1973 fundamentally changed the Pilica River valley in the study area.

As expected, the construction and operation of the dam reservoir fundamentally changed the Pilica River valley in the study area. The documented transformations of the sculpture are polygenetic. Some of them are related to direct human activity – shaping the seabed, construction of ports, water feeders, exploitation of raw materials. The construction of the reservoir also triggered natural sculpture processes – accumulation of material carried by the river, slope processes taking place on the flooded slopes of the Pilica valley.

Elements of anthropogenic infrastructure such as buildings, roads and commercial forests have disappeared forever. The geomorphological forms that make up the landscape of the river valley have undergone significant changes. The delta zone of the reservoir was significantly filled in, where the image of the former riverbed and oxbow lakes practically disappeared, and as a result of the accumulation of sediments and the development of vegetation, a system of islands developed. Further along the bottom of the reservoir, strong accumulation is still visible, although elements of valley forms can still be observed in the image of the bottom. As a result of natural coastal processes

and human activity, the shore zone of the reservoir is constantly undergoing significant changes.

The research also allowed us to improve the methods of obtaining and processing archived morphometric data for spatial analyses in Geographic Information Systems (GIS), as well as correcting and improving primary morphometric data obtained directly in the field.

As a result of their research, the authors managed to recreate and transform into a digital form the image of the original relief of the land based on archival cartographic materials. Thanks to field research, data was collected to describe how the area is currently shaped and then to present precise changes using a differential model. The collecting of data for both the historical and current models must be undertaken with great care and based on knowledge and interpretation of geomorphological processes. In the case of a historical model, after a thorough archival search, the suitability of these materials for further work

should be assessed. It cannot be a mechanical vectorisation of contour lines, but a comprehensive approach and geomorphological analysis of all elements that can be read from data sources that are not described by a contour drawing. Similarly, assumptions must be made when collecting data in the field and then processing it. The existing Standards for Hydrographic Surveys (S-44) should be treated as a guideline. In areas where the bottom of the water reservoir is not very diversified, the proposed solution of a research profile every 50 meters is sufficient. However, in places where the former steep slopes of a meandering river and its oxbow lake are flooded, or places with large elevation differences, the amount of data should be condensed to better reflect the actual relief of the bottom. Additionally, such data, if possible, should be supplemented with the interpretation of archival cartographic materials along with the analysis of topographic content on available orthophotomaps.