

Nowa metoda opracowania mapy uksztaltowania dna sztucznego zbiornika wodnego na podstawie archiwalnych materialow kartograficznych

New method of development
of the artificial water reservoir bottom map
on the basis of archival cartographic materials

**Marcin Jaskulski¹, Aleksander Szmidt¹, Aleksandra Ziemińska-Stolarska²,
Maciej Jaskulski³**

¹Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych

²Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

³Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Department of Thermal Process Engineering

Słowa kluczowe: batymetria jezior, cyfrowy model wysokościowy, interpretacja danych wysokościowych

Keywords: lake bathymetry, digital elevation model, elevation data interpretation

Wprowadzenie

Batymetria jest działem kartografii (Szaflarski, 1965) zajmującym się pomiarami głębokości cieków i zbiorników wodnych oraz ich prezentacją graficzną. Ukształtowanie dna przedstawia się w postaci map batymetrycznych, przekrojów oraz trójwymiarowych numerycznych modeli w sposób identyczny jak ukształtowanie powierzchni terenu.

Aby zobrazować batymetrię należy posiadać informację o wysokości punktu na powierzchni dna analizowanego zbiornika wodnego. Ze względu na techniki pomiarów nie jest możliwe uzyskanie prawie ciągłej reprezentacji punktów wysokościowych opisujących dno badanego obiektu. Oczywiście jest, że im większa liczba punktów pomiarowych, cyfrowy model wysokościowy lepiej określa morfometrię, a mapa, model przestrzenny lub profile topograficzne szczegółowiej obrazują ukształtowanie dna zbiornika.

W miarę rozwoju geodezji, kartografii i hydrografii, zmieniały się techniki pomiarowe ukształtowania den akwenów. Dawniej pomiarów zbiorników wodnych dokonywano metodami tradycyjnymi przy użyciu względnie prostych narzędzi. Przełom w tworzeniu map batymetrycznych stanowiło wprowadzenie sprzętu elektronicznego, w szczególności sonarów sprzężonych z odbiornikami GPS (*Global Positioning System*). Urządzenia te umożliwiają znacznie szybsze i dokładniejsze zebranie danych w terenie, zaś oprogramowanie

z rodziny GIS (*Geographic Information System*) pozwala na sprawne ich przetwarzanie oraz wizualizację (Popielarczyk, Olszak, 2000).

W Polsce nie ma przyjętych standardów przy wykonywaniu pomiarów i wizualizacji danych głębokościowych (http://www.bhmw.mw.mil.pl/zasoby/ph/pliki/PH_4_Grabiec.pdf). Hydrografowie pracujący na akwenach morskich umownie stosują się do procedur zawartych w opracowaniu Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej IHO o nazwie „IHO Standards for Hydrographic Surveys”, bardziej znane pod nazwą standardu S-44. Natomiast w przypadku wód śródlądowych nie istnieją żadne wytyczne dotyczące metodyki i dokładności wykonywania takich prac. W praktyce, większość podmiotów wykonujących prace batymetryczne stara się wzorować na standardach S-44.

Jako przykłady takich opracowań można przytoczyć Mapę batymetryczną Jeziora Śniardwy i Hańczy (Popielarczyk, 2011; Popielarczyk, Templin, 2013) lub Mapę batymetryczną Zatoki Gdańskiej (http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/index_mapa.htm).

Zgodnie z opisanymi w literaturze standardami, do tworzenia takich map wykorzystuje się istniejące mapy topograficzne w jak największej skali, aby przeprowadzić digitalizację linii brzegowej, a następnie wektoryzować ją i opracować w postaci cyfrowej. Na tak przygotowanym elektronicznym podkładzie mapowym, biorąc pod uwagę położenie geograficzne jeziora, projektuje się główne linie profili do pomiarów głębokościowych. W zależności od ukształtowania dna zbiornika oraz celu wykonywania pomiaru, profile mogą być oddalone od siebie od 5 do 50 m.

Przygotowanie projektu profili ma na celu systematyczne pokrycie sondowanego akwenu na całej jego powierzchni systemem linii w taki sposób, aby zebrane w czasie prac dane pomiarowe zapewniły zobrazowanie zmian ukształtowania dna zbiornika, wykrycie przeszkód podwodnych i miejsc niebezpiecznych. Efektem takiej pracy jest zbiór punktów X, Y, Z, gdzie poszczególne wartości oznaczają położenie geograficzne oraz głębokość, ewentualnie wysokość dna zbiornika nad poziomem morza. Na tej podstawie za pomocą oprogramowania na przykład SAGA GIS, Golden Software Surfer lub Esri ArcGIS interpoluje się mapę ukształtowania dna zbiornika wodnego. Opisana wyżej procedura jest sytuacją idealną, w momencie posiadania map w odpowiednio dużej skali oraz odpowiednio gęstego zbioru profili pomiarowych.

W przypadku Zbiornika Sulejowskiego do tej pory nie wykonano oficjalnych precyzyjnych pomiarów jego dna. Ponadto, brakuje kompletnych i właściwych jakościowo opracowań kartograficznych mogących w pełni spełniać opisane wcześniej warunki. Ze względów logistycznych nie było możliwe wykonanie pomiarów sonarem spełniającym przykładowo normę S-44. Podobna sytuacja może występować w przypadku innych zbiorników tego typu, w których pomiarów echosondą nie wykonano ze względu na ich wysoki koszt lub inne przeszkody formalne.

Na przykładzie Zbiornika Sulejowskiego, autorzy dokonali zatem próby wykonania jak najszczegółowszego Cyfrowego Modelu Wysokościowego (DEM) i bazującej na nim mapy ukształtowania dna z wykorzystaniem archiwalnych materiałów kartograficznych. Przedstawiona przez autorów metoda tworzenia DEM umożliwia zbudowanie wiernego modelu powierzchni – bardziej szczegółowego, niż by to wynikało z danych uzyskanych bezpośrednio z rysunku warstwicznego.

Położenie geograficzne i parametry techniczne Zbiornika Sulejowskiego

Według podziałów fizyczno-geograficznych Kondrackiego (1998) Jezioro Sulejowskie zlokalizowane jest w prowincji Wyżyn Polskich, podprowincji Wyżyny Małopolskiej, makroregionie Wyżyny Przedborskiej, w mezoregionie Doliny Sulejowskiej (rys. 3). Zbiornik i jego najbliższe otoczenie położony jest w północnej części mezoregionu, gdzie przebiega granica pomiędzy Wyżynami a Nizem Polskim. Ze względu na niskie położenie nad poziomem morza (poniżej 200 m n.p.m.), dominujące pokrycie obszaru badań i terenów sąsiadujących osadami czwartorzędowymi oraz małe urozmaicenie reliefu, obszar badań będzie traktowany jako nizinny.

Jezioro Sulejowskie powstało w 1973 roku w wyniku przegrodzenia rzeki Pilicy czołową zaporą ziemną o wysokości 16 m, zlokalizowaną na 137,5 km rzeki. Podczas budowy zbiornika (1969-1973) prognozowano, że jego pojemność wyniesie 77,4 mln m³, w tym pojemność użytkowa 61,7 mln m³ i martwa 15,7 mln m³. Założono również, że rezerwa powodziowa wyniesie 9 mln m³ (Ambrożewski i in., 2008).

Pierwsze badania wykonywano podczas napełniania zalewu tradycyjnymi metodami pomiarowymi (tyczki i łąty pomiarowe). Ustalono wtedy, że pojemność akwenu wynosi 75 mln m³. Przez wiele lat wynik ten praktycznie się nie zmieniał. Niewielkie różnice mogące być wynikiem błędów pomiarowych, nie były nawet nanoszone na tabele. Dopiero w latach 80. XX wieku, specjaliści nanieśli nowe dane uzyskane metodą radiową. Wyniki były zaskakujące. Okazało się, że w zalewie jest 3 mln m³ wody więcej niż zakładano, czyli 78 mln m³. W roku 2008 zbiornik został pomierzony nowoczesnymi metodami, jednak badania te nie miały wystarczającego stopnia szczegółowości. Wynik – 75 mln m³ stanowił zaskoczenie, wody było mniej niż wykazywały badania z lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Nie można jednak jednoznacznie stwierdzić, ile tak naprawdę ubyło wody w akwenu i na ile metoda radiowa, zastosowana ponad 20 lat temu, była dokładna (Ambrożewski i in., 2008).

Ocena i weryfikacja źródeł danych

W celu wykonania dokładniejszej mapy opisującej geometrię zbiornika przyjęto uproszczone założenie, że dzisiejsze dno jeziora jest współkształtne rzeźbie terenu doliny Pilicy z okresu przed powstaniem sztucznego jeziora. W tym przypadku można uznać, że zbiorniki zaporowe w strefie Nizu Polskiego ulegają znacznie mniejszemu zasypaniu materiałem niesionym przez rzeki, niż zbiorniki tego typu zlokalizowane w górach, na pogórzach i przedgórzach. Dokonano więc próby stworzenia cyfrowego modelu terenu DEM zalanego fragmentu doliny Pilicy. Należy tu mieć na uwadze, iż obraz ukształtowania dna zbiornika uzyskany tą metodą nie będzie idealny i może nie uwzględniać niektórych zmian w morfometrii podczas budowy i okresu istnienia danego zbiornika.

Pierwszym brany pod uwagę źródłem danych były informacje pozyskane za pomocą pomiarów sonarowych. W przypadku analizowanego obszaru dostępne były przekroje poprzeczne załączone do opracowania „Zbiornik wodny Sulejów badania sedymentacji i aktualizacja pojemności” (IMGW, 2008). Profile te wykonane zostały w dwóch okresach pomiarowych to jest dla lat 2002 i 2008. Głównym celem ich opracowania było uzyskanie informacji o tempie zamulania się zbiornika. Profile badawcze w liczbie 36 poprowadzone zostały co 500 metrów, jednakże na mapie dokumentacyjnej nie zaznaczono precyzyjnie ich lokalizacji

przestrzennej. Ze względu na odległość pomiędzy poszczególnymi profilami dane te nie nadają się bezpośrednio do wykreślenia poprawnej mapy ukształtowania dna zbiornika. Mogą natomiast stanowić punkt odniesienia dla weryfikacji innych danych dotyczących analizowanego obiektu.

Kolejnym analizowanym źródłem danych były informacje pochodzące z pomiarów metodą skaningu laserowego zbieraną w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju). W przypadku zbiorników wodnych, metoda ta jednak nie daje pożądanych efektów, z uwagi na zakłócenia podczas przechodzenia wiązki laserowej przez ośrodek wodny. Ponadto należy uwzględnić wpływ dużej ilości zawiesiny biologicznej w wodzie, co również warunkuje jakość pomiarów wykonanych tą metodą.

Wracając do tezy dotyczącej możliwości współkształtności dzisiejszego dna zbiornika z dawnym dnem doliny rzecznej, zdecydowano się na pozyskanie danych wysokościowych na podstawie rysunku warstwicowego, stanowiącego element map topograficznych. Rozpoczęto więc poszukiwania archiwalnych map i opracowań zawierających treść morfometryczną. W tym celu przeszukano archiwa Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Łodzi (WODGiK), Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK), Archiwum Państwowego w Łodzi oraz archiwum map Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego. W wyniku wykonanej kwerendy wybrano Mapę Obrębową Powiatów w skali 1:25 000 z roku 1961 (powiat piotrkowski) oraz mapę dokumentacyjną dla Zbiornika Sulejowskiego w skali 1:10 000 załączoną do opracowania IMGW „Zbiornik wodny Sulejów badania sedymentacji i aktualizacja pojemności” (2008). Materiały te stały się podstawą do wykonania DEM doliny z okresu przed powstaniem sztucznego jeziora.

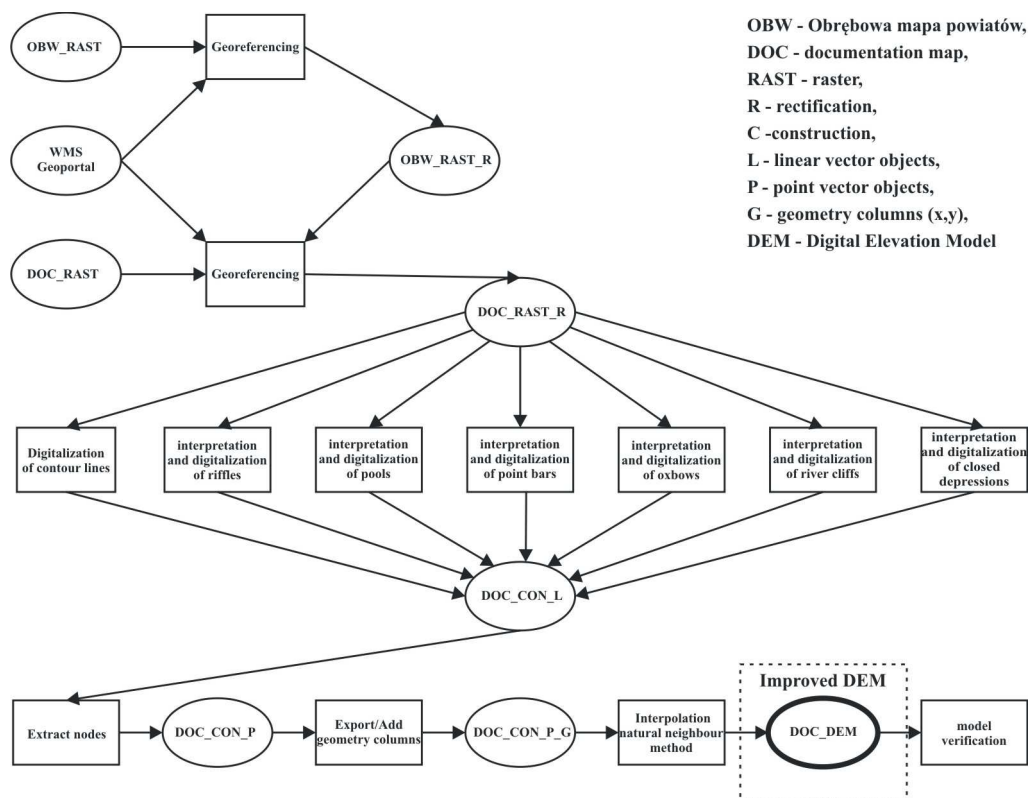
Metody i przebieg badań

W pierwszej kolejności zeskanowano mapy źródłowe w rozdzielczości 600×600 dpi, następnie przystąpiono do scalania i nadania odniesienia przestrzennego uzyskanym skanom (rys. 1).

W przypadku Obrębowych Map Powiatów w skali 1:25 000 istnieje powszechnie znany problem związany z lokalizacją przestrzenną, która była celowo zafałszowywana w wyniku ingerencji cenzury (Sokołowski i in., 2007). Osobny problem stanowiło przystosowanie do dalszego przetwarzania mapy dokumentacyjnej zbiornika. Poszukiwania wykazały, że nie zachował się oryginalny szkic topograficzny stanowiący podstawę dla mapy dokumentacyjnej – dostępne były tylko jego kopie wykonane na kserografie starej generacji. Ponadto mapa dokumentacyjna dostępna była we fragmentach, które wymagały scalenia. Oprogramowanie do tworzenia panoram okazało się w tym przypadku niewystarczające, ze względu na problem z prawidłowym rozpoznaniem przez nie punktów węzłowych.

Po próbach łączenia metodami automatycznymi, w miejscach łączeń mapa nie zachowywała kartometryczności, występowały nasunięcia lub nieprawidłowe rozciągnięcie położenia grupy pikseli. Zdecydowano się zatem na ręczne połączenie skanów mapy dokumentacyjnej w programie GIMP 2.8. Zastosowano w tym przypadku technikę pracy na warstwach z wykorzystaniem narzędzi przesuwania i obrotu (rys. 1). Tak przygotowany raster zapisano w formacie BMP w celu dalszego przetwarzania w systemach GIS.

Przygotowanym rastrom nadano georeferencję w programie ArcGIS 9.1. Ze względu na jakość osnowy matematycznej, w pierwszej kolejności georeferencję nadano obrębowej mapie



Rysunek 1. Schemat postępowania badawczego

powiatów w skali 1:25 000, która następnie stanowiła źródło pomocnicze przy nadawaniu georeferencji mapie dokumentacyjnej (rys. 1). Nadanie odniesienia przestrzennego wykonano stosując usługę WMS przeglądania map w geoportalu krajowym (www.geoportal.gov.pl). Weryfikacji jakości procedury dokonano przez obliczenie średniego błędu RMS oraz zestawienie zrektyfikowanych rastrow ze współczesnymi mapami topograficznymi badanego obszaru, biorąc pod uwagę tylko punkty charakterystyczne, położone poza strefą zalewową zbiornika (Jaskulski i in., 2013).

Kolejnym krokiem była interpretacja i następnie digitalizacja rysunku warstwicowego z map w skali 1:25 000 i 1:10 000 w programie ArcGIS 9.1 (Ewertowski, Tomczyk, 2007; Rzeszewski, Jasiewicz, 2008). Sam rysunek warstwicowy na mapach topograficznych, zdaniem autorów, nie daje wystarczającej informacji wysokościowej, gdyż opisuje jedynie formy terenu o deniwelacjach większych niż cięcie warstwicowe – wynoszące w tym przypadku minimum 1,25 m (Szubert, 2008). Zaistniała zatem konieczność uzupełnienia danych o inne, szczegółowsze informacje geomorfologiczne, nieopisane przez rysunek warstwicowy. Wyinterpretowano elementy koryta rzecznej (bystrza, płosa, odsypy meandrowe), a także formy ukształtowania terenu w dolinie rzecznej (starorzecza, skarpy, bezodpływowe zagłębienia terenu).

Analizując przebieg koryta meandrującej rzeki na podstawie mapy topograficznej, musimy przyjąć stan rzeki z okresu kartowania. Jest to sytuacja teoretyczna, gdyż przebieg tego typu form mógł ulec zmianie w wyniku zachodzących cały czas procesów fluwialnych. Przy danych pochodzących tylko z rysunku warstwicowego można przyjąć: symetryczny, v-kształtny, poprzeczny profil koryta, przy nieznannej jego głębokości. Uwzględniając interpretację geomorfologiczną można przypuszczać o istnieniu symetrycznego względnie płaskiego dna w strefie bystrzy oraz asymetrycznego z przegłębieniem w strefie plosa. Geomorfologia doświadczalna przedstawia wzajemne zależności pomiędzy szerokością i krętością koryta a jego głębokością i symetrią. Ze względu na złożoność oraz dużą przypadkowość wydarzeń i procesów fluwialnych oraz punkt na osi czasu, kiedy została opracowana mapa, zrezygnowano z matematycznego wyliczenia poszczególnych wartości parametrów koryta. Przyjęto zasadę subiektywnego wyznaczenia osi koryta rzeczno i form dennych, w granicach ogólnych zasad funkcjonowania procesów fluwialnych. Po wyrysowaniu osi koryta wprowadzono tę samą metodą wartości głębokości koryta oraz przebiegu i wysokości łańcuchów śródkorytowych i odsypów meandrowych (rys. 1).

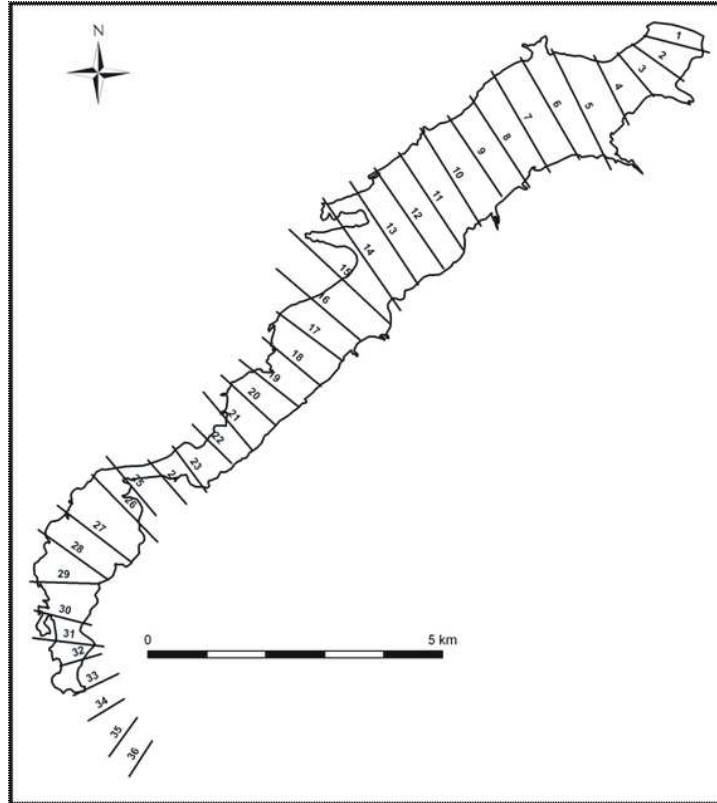
Podobna procedura została wykorzystana podczas opisywania pozostałych form dna dolinowego. Odtworzono na podstawie analizy terenów podmokłych kształt starorzeczy. W przypadku linii nieciągłości, takich jak skarpy, informację tę wprowadzono zgodnie z powszechnie przyjętymi zasadami. Wprowadzone rzędne interpretowanych powierzchni nie mogły jednak przekraczać przedziałów cięcia warstwicowego, czyli 1,25 m. Przyjęto zasadę wprowadzania danych w wielkości połowy cięcia warstwicowego czyli około 60 cm.

Uzyskane w ten sposób informacje wyeksportowano do formy tabelarycznej, w której współrzędne X,Y pozyskane zostały z utworzonych w poprzednich etapach węzłów plików shp. Dane te następnie interpolowano w programie Golden Software Surfer 12, gdzie jako najlepszy algorytm interpolacyjny dla tego typu danych wybrano metodę naturalnych sąsiadów (Sibson, 1981; Badura, Przybylski, 2004). Interpolowany raster importowano z powrotem do programu ArcGIS 9.1 w celu weryfikacji z istniejącym rysunkiem warstwicowym. W miejscach, gdzie wygenerowane warstwy nie przedstawiały zakładanego przebiegu, dokonano korekty i ponownie interpolowano dane.

Kolejnym krokiem było zestawienie uzyskanego w powyższy sposób rastra obrazującego dawne dno doliny Pilicy z profilami pochodzącymi z pomiarów echosondą (IMGW, 2008). W sumie dostępnych było 36 profili rozmieszczonych w odległości około 500 m od siebie. Mankamentem tych danych był brak dokładnego opisu lokalizacji przestrzennej. Na mapie dokumentacyjnej zaznaczone były tylko linie ich przebiegu, bez określenia ich długości oraz punktu początkowego (rys. 2). Informacje na wykresach (IMGW, 2008) zawierały natomiast dane o względnym położeniu początku i końca danego profilu.

Aby tego typu dane móc osadzić w kartograficznym układzie współrzędnych wraz z wpasowaniem skali, na mapie dokumentacyjnej pomierzono azymuty poszczególnych linii zaznaczających przebieg profilu (rys. 4). Następnie do arkusza kalkulacyjnego wprowadzono dane z kart profili, zawierające informacje o odległości od punktu początkowego i głębokości w odpowiadającym miejscu. Na podstawie przekształceń trygonometrycznych określono współrzędne X,Y na linii przebiegu każdego z profili. Dla obliczonych w ten sposób wartości utworzono w programie ArcGIS nową warstwę punktową, którą nałożono na rysunek rzeźby uzyskany z map archiwalnych. Dla każdego punktu we właściwościach warstwy ustawiono kolor, zgodny z metodą warstwicowo-barwną uplastyczniania rzeźby (rys. 4).

Rysunek 2.
Rozmieszczenie linii
profilu
na mapie dokumentacyjnej
względem linii brzegowej
zbiornika wodnego
„Sulejów”



W kolejnym kroku, za pomocą przesuwania dopasowano położenie punktów składających się na opis linii profilu z rysunkiem warstwicowym (rys. 5). Wpasowane przestrzennie dane z profili sonarowych stanowiły dodatkową informację podczas tworzenia mapy ukształtowania dna. Podczas tego etapu prac wykazano, że dawny przebieg koryta rzecznego nadal jest widoczny w ukształtowaniu dna sztucznego zbiornika.

Aby uzyskać mapę ukształtowania dna, od wartości rzędnej wysokości lustra wody w pełni napełnionego zbiornika 166,6 m n.p.m. odjęto wartości z punktów węzłowych linii opisujących rzeźbę terenu, pozyskanych wcześniej opisanymi metodami. Przygotowane w ten sposób dane ponownie interpolowano w programie Surfer 12. Dla celów wizualizacji ukształtowania dna Zbiornika Sulejowskiego wykorzystano metodę warstwicowo-barwną z cieniowaniem (rys. 6).

Wyniki badań

W celu uwzględnienia w ocenie numerycznego modelu terenu dna Zbiornika Sulejowskiego zmian, jakie zaszły w trakcie funkcjonowania obiektu, do danych pochodzących z interpretacji rysunku warstwicowego dodano uzupełnione dane z pomiarów sonarowych.

Założono, że mogą wystąpić różnice w obrazie powierzchni uzyskanej tylko z podkładów kartograficznych wraz z interpretacją geomorfologiczną, względem powierzchni zawierają-

cej dodatkowe dane z profili sonarowych. Różnice te mogą wynikać z: procesów sedymentacyjnych w zbiorniku, zmian spowodowanych pracami hydrotechnicznymi, rozdzielczości pionowej rysunku warstwicowego i pomiarów sonarowych.

W większości opracowań dowodzi się największych zmian sedymentacyjnych w górnej części zbiornika (Magnuszewski, 2012; IMGW, 2011). Wynika to z podniesienia bazy erozyjnej przez zbiornik dla wpadających do niego rzek. W Zbiorniku Sulejowskim czynnik ten jest potęgowany przez nakładanie się na siebie zarówno depozycji materiału z kilku cieków, jak i dużą izolacją morfometryczną górnej części zbiornika (rys. 6A). W części centralnej i dolnej zbiornika osadzanie materiału niesionego przez rzekę jest na tyle małe, że można praktycznie zupełnie je pominąć przy rysowaniu mapy dna. Istotne natomiast są różnice w obrazie ukształtowania powierzchni w miejscach, gdzie prowadzono różne prace hydrotechniczne. Pierwszym takim miejscem jest strefa czołowa zapory zbiornika. Obraz sonarowy wykazuje istnienie między innymi dużego wału ziemnego, związanego prawdopodobnie z przekierowywaniem rzeki podczas prac budowlanych (rys. 6A,B). W drugim przykładowym miejscu, gdzie obraz z profili sonarowych pokazuje większą głębokość niż na mapach topograficznych, jest strefa portu jachtowego oraz budowanego ujęcia wód powierzchniowych dla aglomeracji łódzkiej w Bronisławowie (rys. 6B,C). W tym przypadku sytuacja ta jest wynikiem pogłębiania terenu wyjścia z portu oraz zapewnienia dopływu wody do ujęcia nawet przy niskim stanie wód. Osobne zagadnienie stanowi strefa górna zbiornika, gdzie wpadają wody Pilicy i Luciaży (rys. 6D). Zgodnie z założeniami, współczesne dno zbiornika jest położone wyżej niż dno doliny sprzed istnienia jeziora. Oczywistą przyczyną tego stanu jest zasypywanie tej części jeziora osadami niesionymi przez rzeki Pilicę i Luciażę (Jaskulski, Szmidt, 2014).

Wnioski

Przeprowadzone prace miały na celu opracowanie i wdrożenie, na rzeczywistym obiekcie, metody tworzenia DEM dla potrzeb wykreślenia map ukształtowania dna sztucznego zbiornika wodnego. W przedstawionej metodzie zakłada się, że badacz nie dysponuje danymi z pomiarów echosondą oraz szczegółowymi mapami topograficznymi. Efektem końcowym prac jest Mapa ukształtowania dna Zbiornika Sulejowskiego (Jaskulski i in., 2013).

Przeprowadzone prace wskazują, że archiwalne dane kartograficzne mogą stanowić podstawę do generowania map ukształtowania dna sztucznych zbiorników wodnych położonych w obszarach nizinnych, po wprowadzeniu dodatkowej informacji morfometrycznej uzyskanej w wyniku analiz interpretacyjnych form geomorfologicznych, takich jak na przykład: bystrza, plosa, odsypy meandrowe. Skalibrowane dane pochodzące z pomiarów sonarowych stanowiły podstawę do weryfikacji jakości uzyskanego numerycznego modelu terenu. Zestawienie uzyskanego DEM z danymi z profili sonarowych wskazuje, że w przypadku Zbiornika Sulejowskiego najważniejsze elementy dna dolinnego nadal są dobrze widoczne w ukształtowaniu współczesnego dna. Główne zmiany można zaobserwować w miejscach, gdzie prowadzone były prace hydrotechniczne związane z budową zbiornika (strefa czołowa zbiornika) oraz jego późniejszą infrastrukturą (molo, przystanie jachtowe). Utworzona mapa nie może być wykorzystywana do celów wymagających dokładnego opracowania metrycznego, przykładowo mapy nawigacyjnej. Jej szczegółowość pozwala na opracowania prze-

gładowe, przeznaczone dla żeglarzy, wędkarzy i turystów. Mapa może być również wykorzystana do prac naukowych.

Należy podkreślić, że przedstawiony w tym opracowaniu sposób uzyskiwania modelu ukształtowania dna sztucznych zbiorników wodnych może mieć zastosowanie tylko dla miejsc, gdzie ciekі zasilające nie wnoszą dużo materiału do zbiornika (rzeki nizinne), zaś budowa geologiczna oraz rzeźba okalającego obszaru nie stanowi przyczyny wzmoczonego dostarczania sedymentu powstałego w wyniku procesów erozji i denudacji.

W przyszłości, w przypadku powstania znormalizowanego obrazu batygraficznego dna Zbiornika Sulejowskiego, otwartą zostaje kwestia szczegółowego określenia rozkładu przestrzennego sedimentacji zbiornikowej na podstawie danych z archiwalnych materiałów kartograficznych i danych pozyskanych współczesnymi technikami pomiarowymi.

Literatura

- Ambrożewski Z., Micha A., Zalewski M., Szamowski A., 2008: 35 lat eksploatacji zbiornika wodnego Sulejów. *Gospodarka Wodna* nr 12/08. Materiały na Sympozjum naukowo-techniczne w dniu 19 grudnia 2008 r. w Smardzewicach.
- Badura J., Przybylski B., 2005: Application of digital elevation models to geological and geomorphological studies – some examples. *Przegląd Geologiczny* 53, 10/2: 977-983.
- Ewertowski M., Tomczyk A., 2007: Numeryczny Model Terenu i jego pochodne dla recesyjnych form młodogłacjalnych na obszarze Wielkopolski. [W:] Smolska E., Gariat D. (red.), Rekonstrukcja dynamiki procesów geomorfologicznych – formy rzeźby i osady. Uniwersytet Warszawski. Warszawa: 141-150.
- IMGW, 2008: Zbiornik wodny Sulejów badania sedimentacji i aktualizacja pojemności.
- IMGW, 2011: Badania zamulenia koryta Pilicy w rejonie strefy cofkowej – Zbiornik Wodny Sulejów.
- Jaskulski M., Łukasiewicz G., Nalej M., 2013: Porównanie metod transformacji map historycznych. *Roczniki Geomatyki* t.11, z. 4(61): 41-57, PTIP, Warszawa.
- Jaskulski, M., Szmidt, A., 2014: Transformations in morphometry of valley bottom as a result of the creation of reservoir illustrated with the example of Sulejów Lake. *Landform Analysis* vol. 27: 27-33.
- Kondracki J., 1998: Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa, 440 s.
- Magnuszewski A., 2012: Program bezpieczeństwa powodziowego dorzecza Środkowej Wisły. Zał. 23, Analiza wpływu akumulacji rumowiska w strefie oddziaływania zbiorników na bezpieczeństwo powodziowe w regionie.
- Popielarczyk D., 2011: Application of Global Navigation Satellite System and Hydroacoustic Techniques to Safety of Inland Water Navigation. *Archives of Transport* vol. 23, issue 2: 191-207, (10.2478/v10174-011-0013-x), Polish Academy of Science, Committee of Transport, Warsaw.
- Popielarczyk D., Templin T., 2013: 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.
- Rzeszewski M., Jasiewicz J., 2008: Konstrukcja cyfrowych modeli rzeźby na obszarach problemowych w strefie wybrzeża. [W:] Rotnicki K., Jasiewicz J., Woszczyk M. (red.), Holocenijskie przemiany wybrzeży i wód południowego Bałtyku – przyczyny, uwarunkowania i skutki: 113-118, Poznań.
- Sibson R., 1981: A brief description of natural neighbor interpolation. [W:] Barnett V. (ed.) *Interpreting Multivariate Data*: 21-36, Wyd. John Wiley & Sons, Nowy Jork, USA.
- Sokołowski J., Jędrzychowski I., 2007: Mapy topograficzne. [W:] Atlas Kampusu 600-lecia odnowienia Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Szaflarski J., 1965: Zarys kartografii. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.
- Szubert M., 2008: Geomatyka w badaniach geomorfologicznych. *Dokumentacja Geograficzna* 37: 7-13.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę uzyskania cyfrowego modelu wysokościowego, będącego punktem wyjścia dla konstrukcji mapy obrazującej ukształtowanie dna sztucznego zbiornika wodnego na przykładzie Zbiornika Sulejowskiego w Polsce Centralnej. Dane wysokościowe dla konstrukcji tej mapy uzyskano głównie w wyniku interpretacji wszelkiej dostępnej informacji wysokościowej, zarówno bezpośredniej, jak i pośredniej, uzyskanej z archiwalnych opracowań kartograficznych. Dodatkową informację wysokościową uzyskano również z profili sonarowych załączonych do opracowań hydrologicznych zbiornika. W pierwszym przypadku dane wysokościowe skompilowano z rysunku warstwiczowego z map topograficznych w skali 1:10 000 (dokumentacja zbiornika) oraz dodatkowej informacji wyinterpretowanej z analizy rozmieszczenia i rodzaju form geomorfologicznych. Drugim problemem, który rozwiązano było ustalenie lokalizacji przestrzennej posiadanych danych sonarowych opierając się o uzyskany wcześniej cyfrowy model wysokościowy. Po procesie scalania oraz późniejszej interpolacji danych, efektem końcowym było wykreślenie mapy ukształtowania dna Zbiornika Sulejowskiego.

Abstract

This article presents a method of generation of the digital elevation model, which is the base for further development of a map that shows the shape of the bottom of the artificial water reservoir. The presented methodology was elaborated using the example of the Sulejów Reservoir in Central Poland. Elevation data for this map was mainly obtained as a result of interpolation of all available direct and indirect information derived from archive cartographic materials. Additional information was also obtained from sonar altitude profiles attached to the reservoir hydrological documentation. In the first case elevation data was compiled from contours on topographic maps at the scale of 1:10 000 (reservoir documentation) and from additional information resulting from the analysis of distribution and types of geomorphological forms. The second objective was to determine spatial locations of sonar data based on the previously obtained digital elevation model. As the final result of data merging and data interpretation the bathymetric map of the Sulejow Reservoir was created.

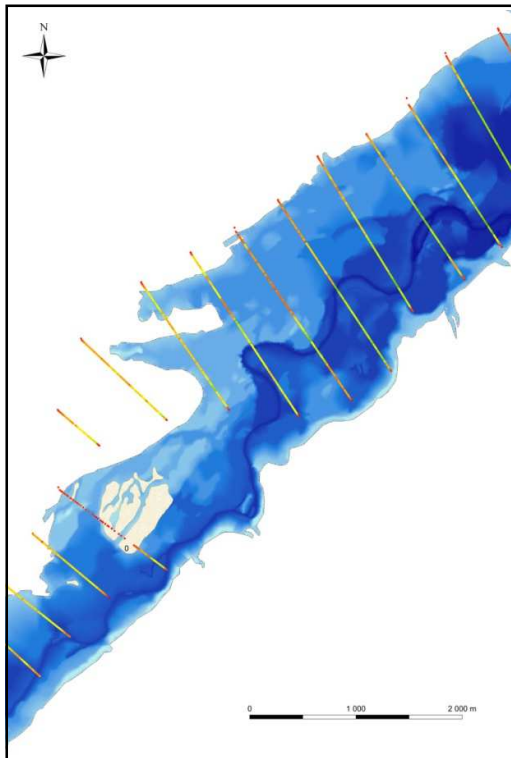
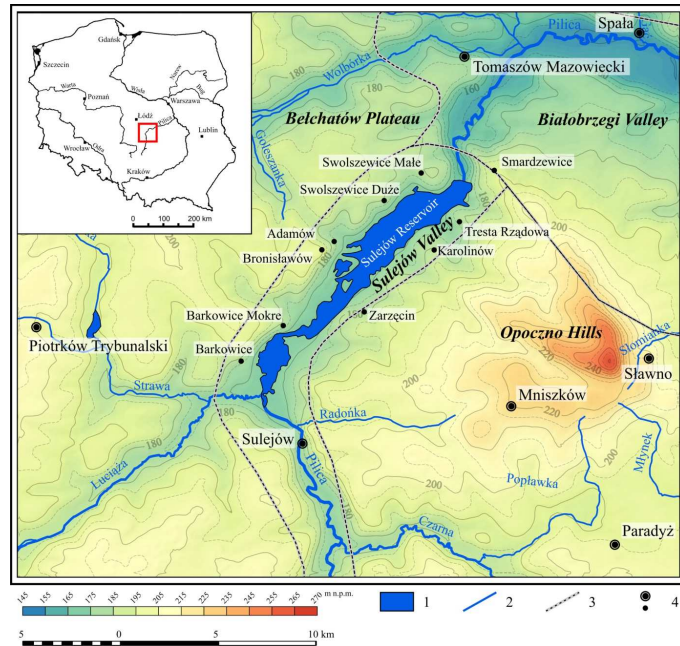
dr Marcin Jaskulski
marcin.jaskulski@geo.uni.lodz.pl

dr Aleksander Szmidt
aleksander.szmidt@geo.uni.lodz.pl

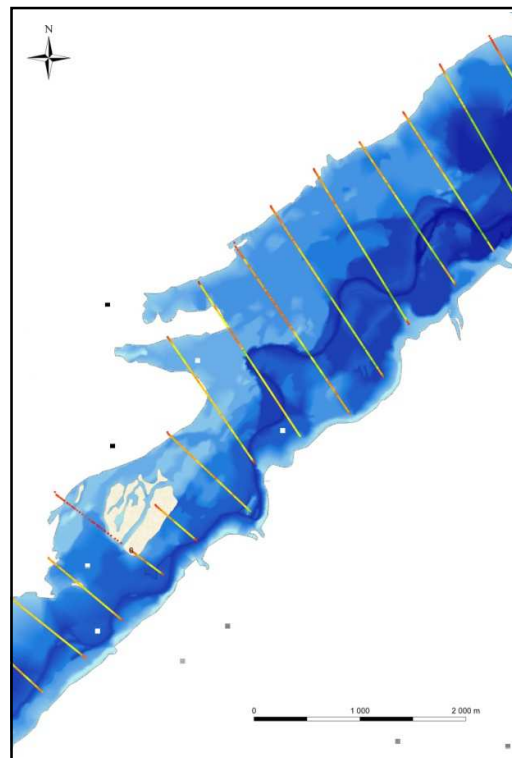
dr Aleksandra Ziemińska-Stolarska
aleksandra.ziemińska-stolarska@p.lodz.pl

dr inż. Maciej Jaskulski
maciej.jaskulski@ovgu.de

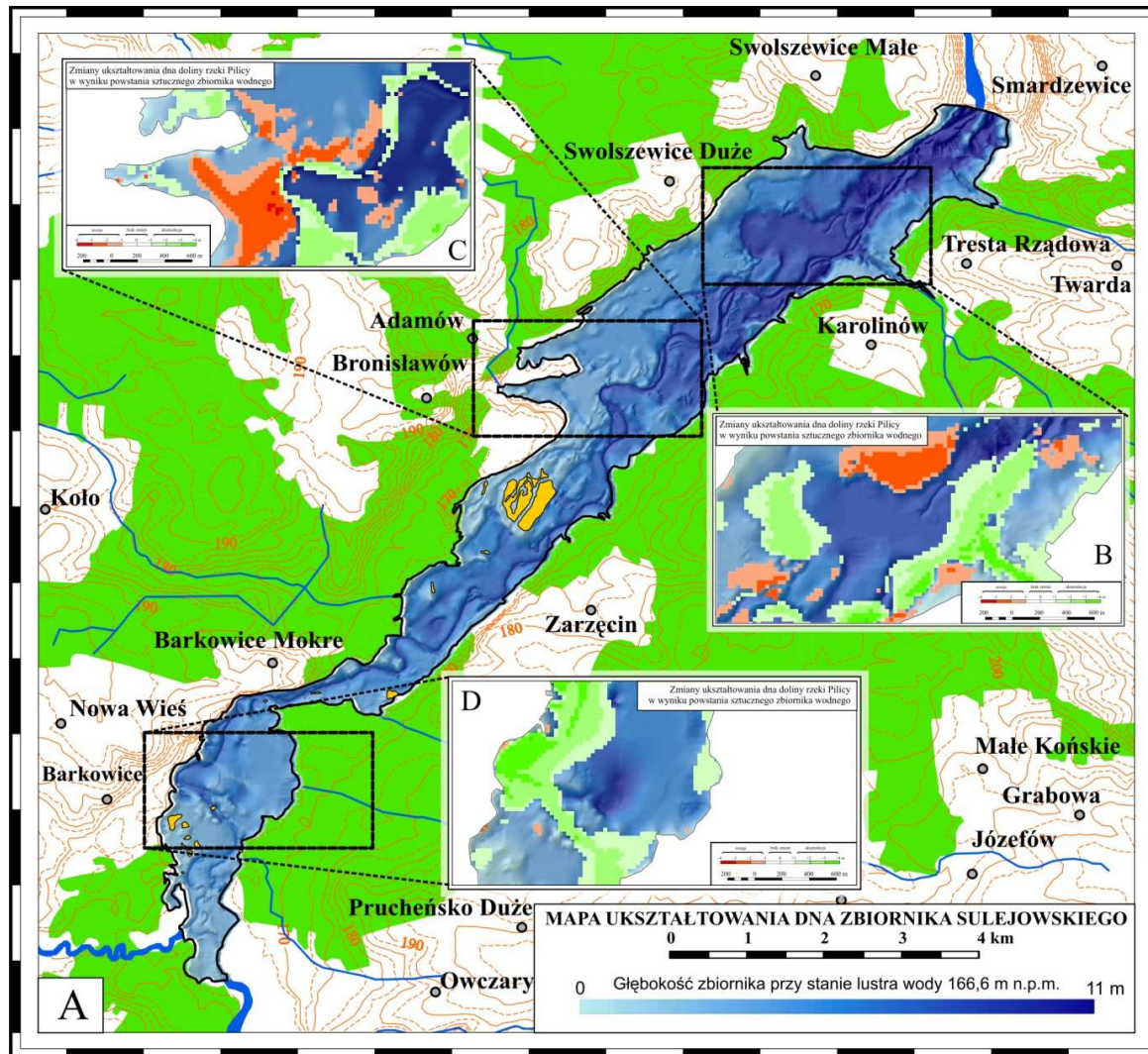
Rysunek 3. Położenie obszaru badań na tle ukształtowania powierzchni terenu:
 1 – zbiorniki wodne,
 2 – rzeki,
 3 – granice regionów fizyczno-geograficznych według Kondrackiego (1999),
 4 – miejscowości



Rysunek 4. Profile z pomiarów sonarowych z nieokreśloną lokalizacją nałożone na mapę ukształtowania dna



Rysunek 5. Profile z pomiarów sonarowych z naniesionymi poprawkami lokalizacji



Rysunek 6. Mapa ukształtowania dna Zbiornika Sulejowskiego (źródło: opracowanie własne na podstawie Jaskulski i in. (2013) oraz danych CODGiK udostępnianych bez opłat)