

## **TWORZENIE NUMERYCZNEGO MODELU DNA ZBIORNIKA WODNEGO W OPARCIU O JEDNOWIĄZKOWY SONDAŻ HYDROAKUSTYCZNY I SYSTEM DGPS**

Tomasz Templin, Dariusz Popielarczyk  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę wyników uzyskanych z pomiarów hydrograficznych fragmentu jeziora Śniardwy. Badania wykonano z wykorzystaniem technologii pomiarów batymetrycznych. Pomiarzy przeprowadzono dwukrotnie przy różnym poziomie szczegółowości zbierania surowych danych pomiarowych.

Dane wejściowe zostały pozyskane na podstawie sondażu hydroakustycznego z wykorzystaniem jednowiązkowej echosondy hydrograficznej oraz satelitarnego systemu pozycjonowania DGPS. Na podstawie pomiarów opartych na profilach pomiarowych odległych od siebie o 5 oraz 50 m opracowany został Numeryczny Model Terenu (NMT) wybranego fragmentu dna.

W pracy zaprezentowano technologię zintegrowanych pomiarów batymetrycznych, zasady opracowania pozyskanych danych i budowy numerycznego modelu terenu.

**Słowa kluczowe:** batymetria jezior, GPS, Numeryczny Model Terenu

### **WSTĘP**

„Jeżeli obraz wart jest tysiąca słów, to trójwymiarowa płaszczyzna, którą możesz dowolnie manipulować i kontrolować, musi być warta milion” (ESRI 2002). Ziemia nie jest płaska, stąd tradycyjne mapy nie są w stanie zaspokoić naszej potrzeby przestrzennej wizualizacji. Opracowany w Katedrze Geodezji Satelitarnej i Nawigacji – Zintegrowany System Batymetryczny pozwala na automatyzację procesu zbierania danych przestrzennych niezbędnych do tworzenia trójwymiarowych modeli dna zbiorników wodnych. Zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarowych opartych na satelitarnym systemie pozycjonowania GPS i jednoczesnościowej sondzie ultradźwiękowej pozwala w pełni wykorzystywać trzeci wymiar w pomiarach batymetrycznych.

Dokładność tworzonego modelu przestrzennego jest ściśle uzależniona od jakości pozyskiwanych danych źródłowych. Prawidłowe oddanie kształtu dna zbiornika mierzonego z wykorzystaniem sondy jednowiązkowej zależy w dużym stopniu od założeń

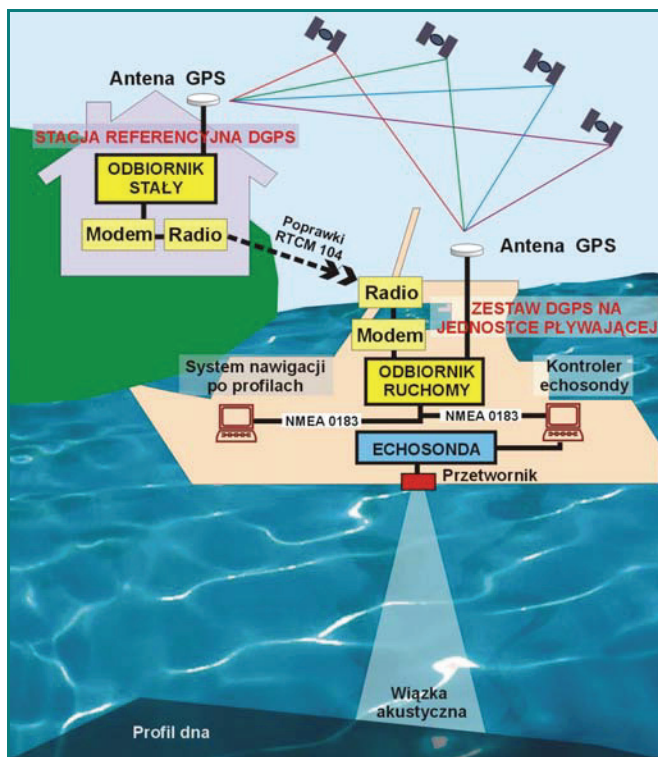
przyjętych na etapie planowania pomiaru. Wydaje się, że szczególnie istotne znaczenie ma rozkład projektowanych profili pomiarowych, po których poruszać się będzie jednostka wykonująca pomiar. W celu zbadania wpływu odległości między profilami na dokładność tworzonego modelu wykonano pomiary hydrograficzne fragmentu jeziora Śniardwy na podstawie profili pomiarowych oddalonych od siebie o 5 oraz 50 m. Na podstawie surowych danych batymetrycznych opracowano numeryczne modele terenu (NMT), a następnie przeanalizowano uzyskane wyniki.

W ramach prowadzonych badań na wybranym obszarze testowym wykonano precyzyjne pomiary DGPS z wykorzystaniem odbiorników firmy Ashtech Z-Xtreme oraz jednowiązkowej sondy ultradźwiękowej SIMRAD EA 501P. Do opracowania, analizy i wizualizacji danych wykorzystano autorską aplikację „Echokonwerter” oraz oprogramowanie ArcGIS firmy ESRI wraz z rozszerzeniami Spatial Analyst i 3D Analyst.

## ZINTEGROWANY SYSTEM BATYMETRYCZNY

W Katedrze Geodezji Satelitarnej i Nawigacji opracowano i uruchomiono technologię zintegrowanych pomiarów batymetrycznych, umożliwiającą nawigację jednostki pływającej po wcześniej zaprojektowanych profilach pomiarowych, badania kształtu dna zbiornika, zbieranie danych do obliczeń objętości mas wodnych, tworzenie map batymetrycznych naturalnych i sztucznych śródlądowych zbiorników wodnych [Popielarczyk 2002].

Technologia prac hydrograficznych prowadzonych na stosunkowo niewielkich akwenach śródlądowych wymaga zastosowania dwóch zintegrowanych ze sobą systemów pomiarowych: satelitarnego systemu pozycjonowania DGPS lub RTK oraz jednowiązkowej sondy ultradźwiękowej. W trakcie sondażu hydroakustycznego zbierane są następujące, podstawowe dane pomiarowe: pozycja pozioma jednostki pływającej i głębokość. Do opracowania cyfrowej mapy głębokościowej niezbędna jest precyzyjna korelacja obydwu danych w celu uniknięcia błędów wynikających z przesunięcia pomiaru obydwu danych w czasie. System satelitarnego pozycjonowania GPS wyznacza pozycję jednostki pływającej w czasie rzeczywistym z dokładnością do kilku centymetrów. Umożliwia to precyzyjną nawigację łodzi po wcześniej zaprojektowanych profilach pomiarowych (rys. 1).

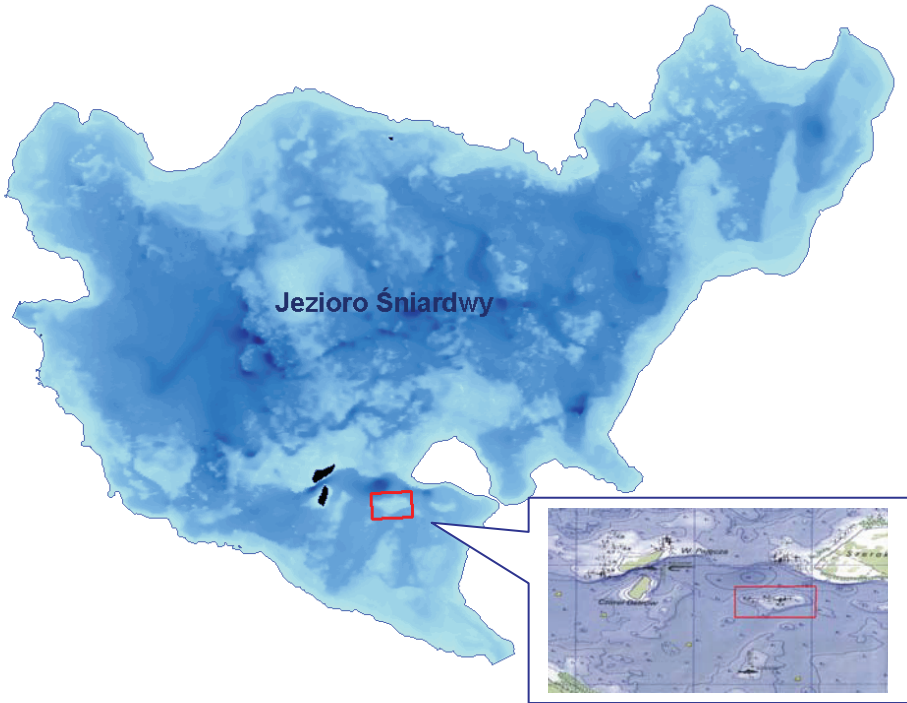


Rys. 1. Zintegrowany System Batymetryczny  
Fig. 1. Integrated Bathymetric System

## WYBÓR OBSZARU TESTOWEGO

W przypadku pomiarów batymetrycznych zbiorników śródlądowych obszar do pomiaru głębokościowego jest zazwyczaj określony poprzez linię brzegową danego zbiornika wodnego. Przed przeprowadzeniem pomiaru przygotowany został podkład mapowy zawierający przebieg linii brzegowej jeziora Śniardwy, na którym zaprojektowano w kierunkach północ-południe linie profili do pomiarów głębokości. Opracowany projekt profili umożliwił pokrycie całego obszaru testowego sondażem akustycznym, śledzenie drogi i nawigację jednostki pływającej podczas wykonywania pomiaru jeziora. Pomiaru wykonano w różnych terminach, przy wykorzystaniu tego samego sprzętu pomiarowego i oprogramowania dla profili oddalonych od siebie odpowiednio o 5 i 50 metrów.

Badania przeprowadzono na fragmencie jeziora Śniardwy zlokalizowanym pomiędzy wyspami Pajęczą, Czarczi Ostrów i półwyspem Szeroki Ostrów. Obszar został wybrany do „zagęszczenia” pomiarów wykonanych co 50 m, ze względu na urozmaiconą rzeźbę dna oraz występujące podwodne płycizny i kamienie stanowiące szczególne zagrożenie dla uprawiania turystyki wodnej, a także żeglugi śródlądowej. Powierzchnia mierzonego fragmentu wynosiła około 4 ha.



Rys. 2. Jezioro Śniardwy – wybrany obszar testowy  
 Fig. 2. Lake Sniardwy – test area location

## PRZYGOTOWANIE PROFILI POMIAROWYCH, WYKONANIE POMIARU

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.

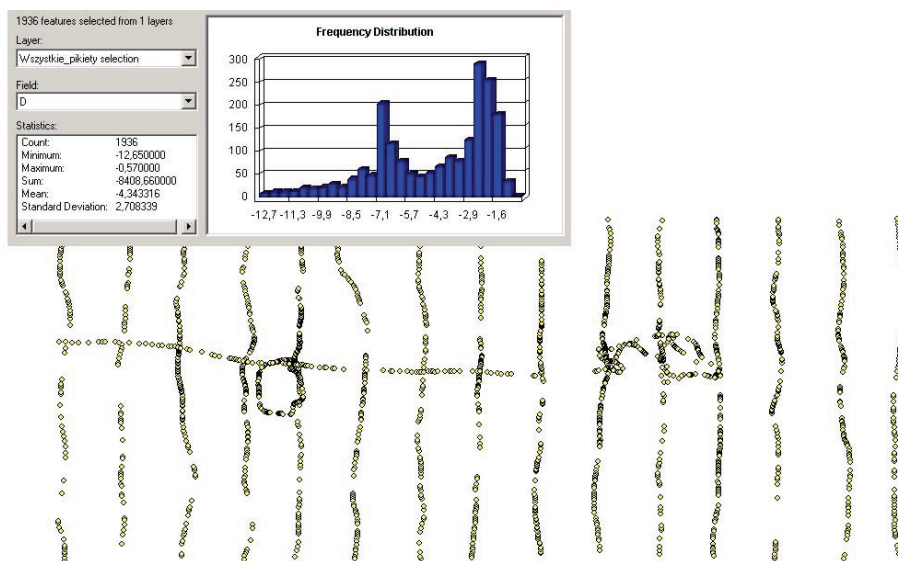
Pomiary terenowe dla profili oddalonych o 50 m przeprowadzono w 2005 roku, natomiast pomiary dla profili rozmieszczonych co 5 m – w roku 2006. Do wyznaczania pozycji łodzi w czasie rzeczywistym posłużono się satelitarnym systemem pozycjonowania pracującym w trybie DGPS. Jako stację referencyjną wykorzystano zlokalizowaną w Powiatowym Ośrodku Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Giżycku oraz lokalną stację referencyjną. Druga stacja została założona na punkcie o dokładnie wyznaczonych współrzędnych i służyła do zbierania danych w trybie *postprocessing*. Średnia prędkość łodzi podczas sondażu po profilach wynosiła 2.5 m/s.

Do nawigacji satelitarnej w czasie rzeczywistym oraz zbierania danych pozycyjnych wykorzystano odbiornik satelitarny Ashtech Z-Xtreme pracujący w trybie DGPS. Ruchomy odbiornik na łodzi odbierał poprawki korekcyjne z lokalnej stacji referencyjnej i określał pozycję w czasie rzeczywistym.

Wyznaczona pozycja łodzi, będąca jednocześnie pozycją przetwornika echosondy, była wysyłana w formacie NMEA do komputera służącego do nawigacji po zaprojek-

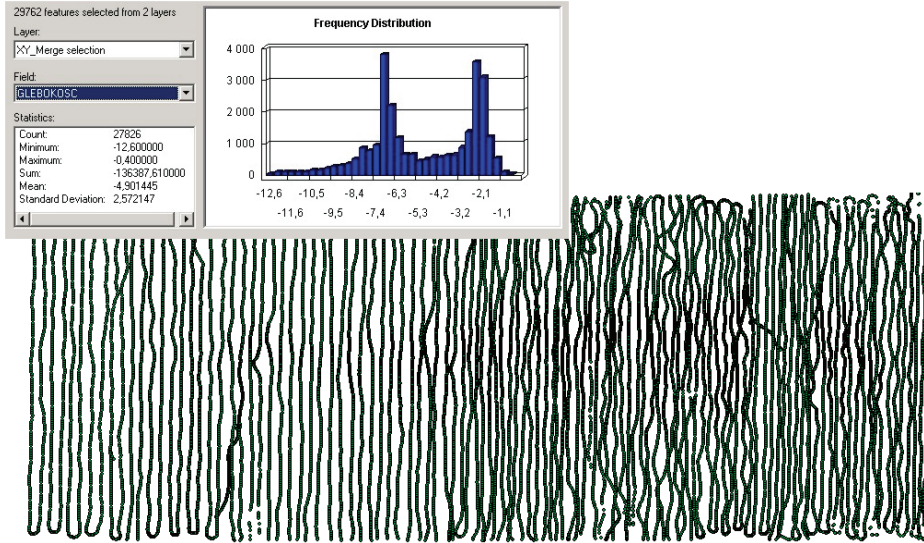
towanych profilach pomiarowych. Pozycja była także przesyłana do pamięci echosondy, korelowana w czasie z pomiarami głębokości i zapisywana w pamięci komputera echosondy.

W wyniku pomiaru przeprowadzonego na wybranym obszarze testowym, dla profili zaprojektowanych co 50 m, uzyskano 1936 pikiet wysokościowych. Minimalna pomierzona głębokość wynosiła  $-0,57$  m, natomiast maksymalna  $-12,65$  m. Średnia głębokość określona została na poziomie  $-4,34$ . Rozkład częstotliwości występowania głębokości w poszczególnych przedziałach wraz z przestrzenną lokalizacją pomierzonych pikiet przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Szkic pomiarów głębokości dla profili rozmieszczonych co 50 m  
Fig. 3. Bathymetric survey draft – the measurement profiles designed every 50 meters one after another

W wyniku pomiaru przeprowadzonego na wybranym obszarze testowym, dla profili zaprojektowanych co 5 m, uzyskano 27 826 pikiet wysokościowych. Minimalna pomierzona głębokość wynosiła  $-0,40$  m, natomiast maksymalna  $-12,60$  m. Średnia głębokość określona została na poziomie  $-4,90$  m. Rozkład częstotliwości występowania głębokości w poszczególnych przedziałach wraz z przestrzenną lokalizacją pomierzonych pikiet przedstawiono na rysunku 4.



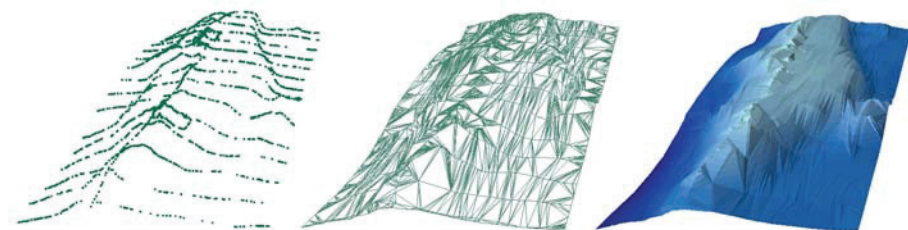
Rys. 4. Szkic pomiarów głębokości dla profili rozmieszczonych co 5 m  
 Fig. 4. Bathymetric survey draft – the measurement profiles designed every 5 meters one after another

## NUMERYCZNY MODEL TERENU

Efektywnym sposobem analizowania powierzchni są modele TIN (nieregularna sieć triangulacyjna). Wykorzystywane są najczęściej do wizualizacji niejednorodnych powierzchni, bardziej zróżnicowanych w wybranych częściach mierzonego terenu. Pozwalają na różnicowanie liczby punktów opisujących powierzchnię w zależności od urozmaicenia danego terenu. W modelu tym przestrzeń przedstawiana jest w postaci siatki przylegających do siebie trójkątów, powstałej wskutek połączenia nieregularnie rozmieszczonych punktów o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Wyznaczona przez odbiornik satelitarny DGPS pozycja wraz z pomiarami głębokości zapisana została w pliku tekstowym. Oprócz współrzędnych jednostki pływającej plik ten zawiera dodatkowo podstawowe parametry systemu oraz wyniki sondażu dna. W celu uniknięcia błędów dane poddano korelacji czasowej i filtracji z wykorzystaniem autorskiej aplikacji Echokonwerter. Na podstawie uzyskanych pikiet opracowane zostały dwa modele TIN zawierające przestrzenną, nieregularną siatkę trójkątów, charakteryzującą powierzchnię dna zbiornika wodnego.

Proces tworzenia numerycznego modelu dna wybranego fragmentu jeziora Śniardwy przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Do opracowania NMT wykorzystano pakiet oprogramowania ArcGIS firmy ESRI.



Rys. 5. Numeryczny Model Terenu (NMT): pikiety wysokościowe, nieregularna siatka trójkątów TIN – krawędzie oraz model wysokościowy (na podstawie pomiaru profili co 50 m)

Fig. 5. Digital Terrain Model (DTM): 3D points, Triangulated Irregular Network (TIN) – edges and face elevation (the measurement profiles designed every 50 meters one after another)



Rys. 6. Numeryczny Model Terenu (NMT): pikiety wysokościowe, nieregularna siatka trójkątów TIN – krawędzie oraz model wysokościowy (na podstawie pomiaru profili co 5 m)

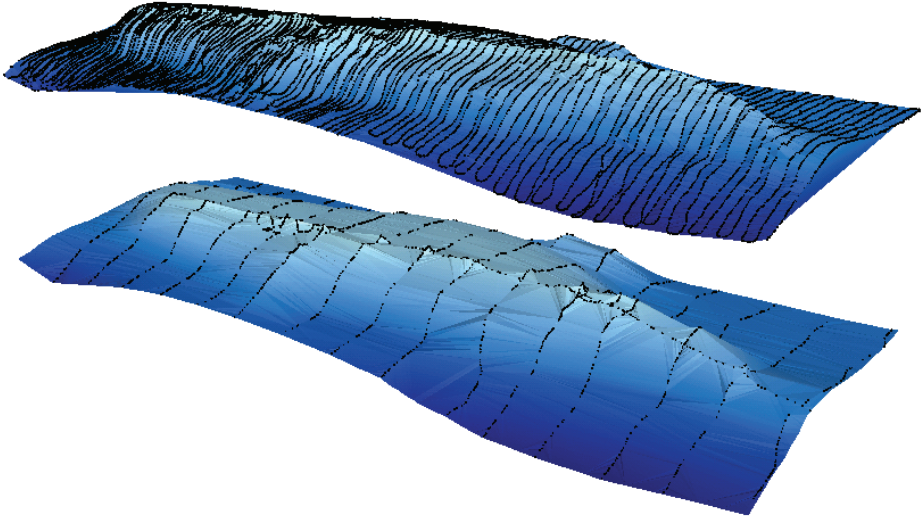
Fig. 6. Digital Terrain Model (DTM): 3D points, Triangulated Irregular Network (TIN) – edges and face elevation (the measurement profiles designed every 5 meters one after another)

Analizując częstotliwość występowania pomierzonych głębokości, można zauważyć wyraźne podobieństwo ich procentowego rozkładu w przyjętych przedziałach głębokości. Pomimo ponad dziesięciokrotnie większej liczby pikiet dla pomiarów wykonywanych przy profilach co 5 m (27 826 w stosunku do 1 936) udział poszczególnych wielkości został zachowany. Fakt ten świadczy o braku na danym obszarze niewielkich obiektów o zróżnicowanej w stosunku do pozostałego terenu wysokości. Występowanie takich obiektów nie zostałyby wykryte przy szerszym rozkładzie profili pomiarowych i wykazane dopiero dla gęstszej siatki profili. Zestawienie dwóch modeli zaprezentowano na rysunku 7.

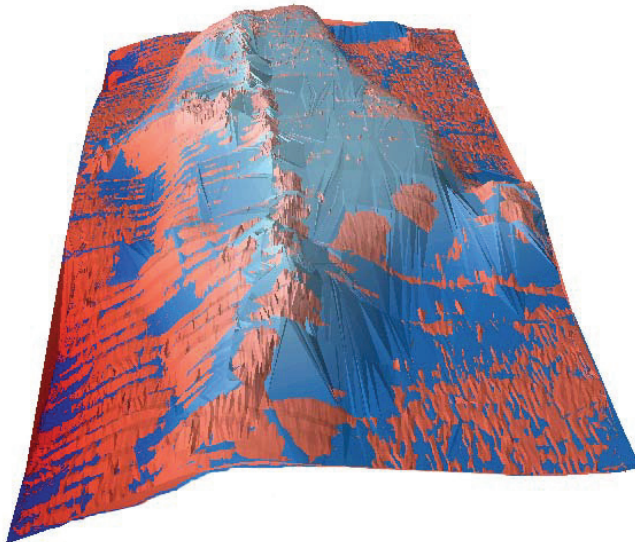
Zestawienie wygenerowanych numerycznych modeli dna wybranego obszaru jeziora Śniardwy pozwala na ich wstępne porównanie. Model wygenerowany przy wykorzystaniu większej liczby pikiet zdecydowanie bardziej precyzyjnie oddaje kształt mierzonoego dna. Jednak w analizowanym przypadku nie wnosi dodatkowych, istotnych z punktu widzenia np. bezpieczeństwa żeglugi na danym obszarze informacji dotyczących jego usytuowania lub występujących płycizn, kamieni albo innych zagrożeń.

Nakładając oba modele na siebie (rys. 8), możemy dokładniej przeanalizować różnice, jakie na nich występują. Wyraźnie widać, że wybrany obszar pozbawiony jest obiektów, których kształt i wysokość nie pozwalałaby na ich wykrycie przy wykorzystaniu pomiaru z profilami co 50 m. Można stwierdzić, że akurat w tym przypadku oba wyge-

nerowane modele wiernie oddają kształt mierzonego terenu i są wystarczające do większości zastosowań.

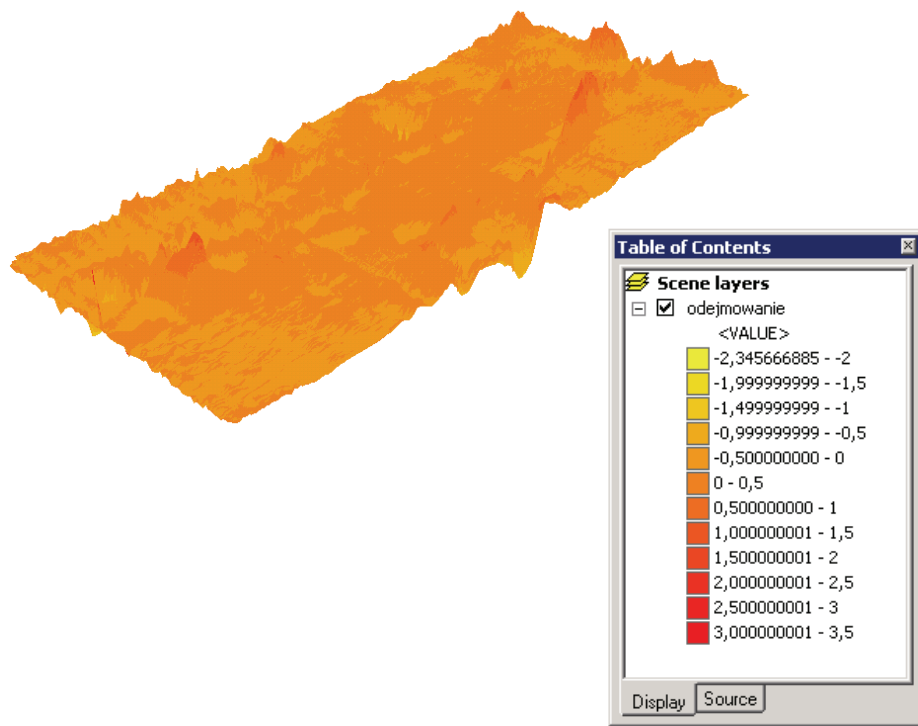


Rys. 7. NMT wygenerowany dla profili co 5 m (model górny) oraz co 50 m (model dolny)  
 Fig. 7. Digital Terrain Model (DTM) made for the measurement profiles designed every 50 meters one after another (upper model) and every 5 meters one after another (lower model)



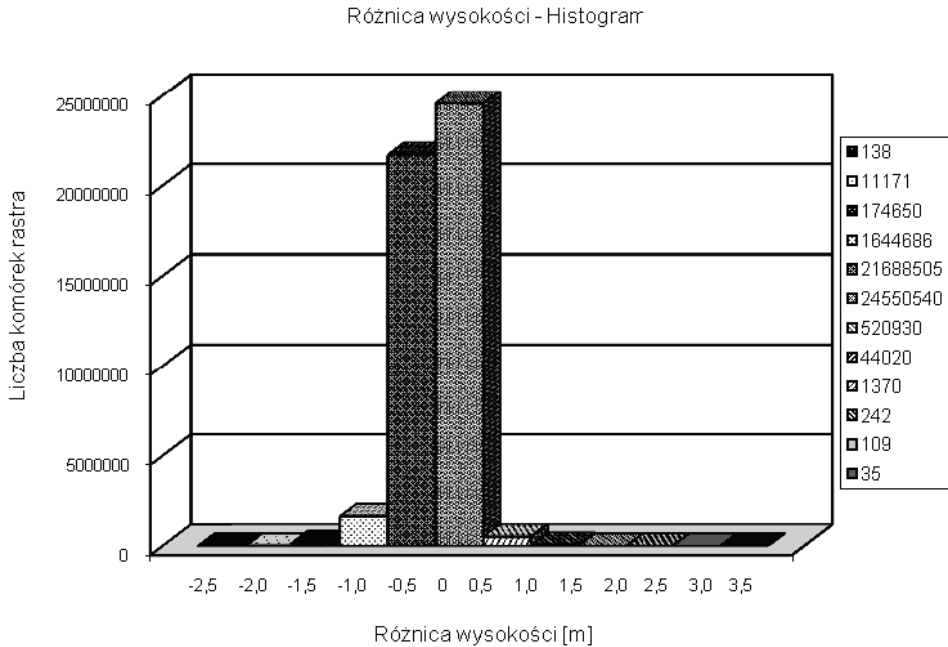
Rys. 8. NMT wygenerowany dla profili co 5 m (kolor czerwony) nałożony na model wygenerowany na podstawie profili zaprojektowanych co 50 m (niebieski)  
 Fig. 8. DTM overlay analysis of the models (measurement profiles designed every 50 meters one after another – blue color and every 5 meters one after another – red color)





Rys. 9. Rozkład różnic głębokości  
Fig. 9. Depth differences

W celu przeprowadzenia dokładnej analizy różnic pomiędzy obydwooma modelami dokonano porównania głębokości w poszczególnych punktach powierzchni wygenerowanych modeli dna jeziora. Określono maksymalne występujące różnice wyznaczonych głębokości, które wyniosły odpowiednio  $-2,34$  m (wynik ujemny oznacza większą głębokość dla modelu wyznaczonego z zastosowaniem profili odległych o 50 m) oraz  $3,14$  m. Średnia różnica wysokości dla całego modelu wyniosła  $0,015$  m, odchylenie standardowe  $0,21$  m. Niewielka wartość średnia świadczy o dobrym dopasowaniu obu modeli. Szczegółowy rozkład obliczonych różnic głębokości przedstawiony został na rysunkach 9 i 10.



Rys. 10. Histogram – obliczone różnice głębokości  
Fig. 10. Histogram – depth differences

## WNIOSKI

Znaczna część śródlądowych zbiorników wodnych w Polsce to stosunkowo płytkie jeziora ze średnią głębokością, która nie przekracza kilku metrów. Jednocześnie wiele z nich posiada bardzo zróżnicowany kształt dna, niejednokrotnie wręcz zaskakujący. Przykładem jest chociażby badany fragment jeziora Śniardwy.

Stworzenie dokładnego modelu fragmentu dna zbiornika wodnego z wykorzystaniem sondy jednowiązkowej wymaga odpowiedniego zaplanowania pomiarów. W celu zbadania różnic w dokładności numerycznego modelu dna zbiornika wykonanego na podstawie pomiarów o różnym stopniu szczegółowości przeanalizowano dwa modele wykonane dla fragmentu dna jeziora Śniardwy. W przypadku analizowanego obszaru fragmentu dna nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy modelami dna jeziora wykonanymi na podstawie pomiarów.

Należy jednak zauważyć, że na wybranym obszarze występują płycizny mogące stanowić istotne zagrożenie dla uprawiania turystyki wodnej oraz dla żeglugi śródlądowej. Dokładne pokazanie tych zagrożeń na mapie jest kluczowe dla zachowania bezpieczeństwa żeglugi i wymaga przeprowadzenia pomiarów w oparciu o gęstsze profile zapewniające odpowiednią wiarygodność uzyskanych wyników.

Badania terenowe, opracowanie danych pomiarowych oraz analizy numerycznego modelu terenu wykonano w ramach realizacji projektu badawczego własnego pt.: „Tworzenie Interaktywnej Bazy Śródlądowych Przeszkód Podwodnych w oparciu o dynamiczne pomiary DGPS/EGNOS/RTK/GPRS oraz bezpośredni sondaż hydroakustyczny”.

## PIŚMIENNICTWO

- Popielarczyk D., 2002. Rozprawa doktorska. Zastosowanie zintegrowanych technik pomiarowych GPS oraz echosondy cyfrowej do tworzenia map batymetrycznych cieków i śródlądowych zbiorników wodnych. Olsztyn.
- Longley P. A., Goodchild M., Maguire D. J., Rhin D. W., Przekład pod redakcją naukową A. Magnuszewskiego, 2006. GIS Teoria i praktyka. PWN, Warszawa.
- GIS Best Practices. Using GIS with GPS. ESRI 2007.
- Materiały firmy ESRI, [www.esri.com](http://www.esri.com).
- Osada E., 1998. Analiza, wyrównanie i modelowanie Geo-Danych. Wrocław.

## CREATION OF DIGITAL MODEL OF WATER RESERVOIR BOTTOM SURFACE USING SINGLE BEAM ECHOSOUNDER AND DGPS SYSTEM

**Abstract.** The paper presents results of the experiments carried out on the Lake Sniardwy using satellite integrated technology. Bathymetric survey at the Lake Sniardwy have been conducted with the measurement profiles designed every 50 meters and 5 meters one after another.

Raw-data have been collected using integrated Differential GPS, GIS and single frequency digital hydrographic echo sounder to construct a Digital Terrain Model and prepare three dimensional visualizations.

The paper presents Integrated Bathymetric System technology, principles of raw-data and Digital Terrain Model (DTM) elaboration.

**Key words:** bathymetric survey, GPS, Digital Terrain Model

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 25.09.2008

Do cytowania – For citation: Templin T., Popielarczyk D., 2008. Tworzenie numerycznego modelu dna zbiornika wodnego w oparciu o jednowiązkowy sondaż hydroakustyczny i system DGPS. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr. 7(3), 3–13.