

Izabela BODUS-OLKOWSKA<sup>1</sup>, Natalia WAWRZY尼亚K<sup>2</sup>, Grzegorz ZANIEWICZ<sup>3</sup>

## Pomiary batymetryczne na potrzeby produkcji śródlądowych elektronicznych map nawigacyjnych obszaru RIS Dolnej Odry

### 1. WPROWADZENIE

W 1996 r. w porozumieniu AGN (*European Agreement on Main Inland Waterways of International Importance*) ustalono sieć europejskiego systemu dróg wodnych w ramach transeuropejskiej sieci transportowej (TEN-T). Trzy drogi wodne o znaczeniu międzynarodowym znajdują się na terenie Polski, z czego jedna to droga E30 łącząca Morze Bałtyckie z Dunajem, która w Polsce przebiega Odrzańską Drogą Wodną od Świnoujścia poprzez Szczecin i Wrocław do granicy z Czechami [1],[7]. Jeszcze do niedawna Polska sieć dróg śródlądowych stanowiła białą plamę na mapie UE. Oprócz nieregulowanych rzek brak było kompleksowych badań batymetrycznych jak i map nawigacyjnych na polskie śródlądowe trasy żeglugowe.

Akademia Morska w Szczecinie w ramach projektu badawczo-rozwojowego „Technologia budowy systemu RIS Dolnej Odry” jako pierwsza w Polsce podjęła się próby produkcji nawigacyjnych map elektronicznych, wg standardu S-57 Inland ENC [9], na obszar od Szczecińskiego Węzła Wodnego do Ognicy. Finałem 2 lat realizacji projektu jest między innymi 8 komórek nawigacyjnych map elektronicznych zawierających pełną batymetrię, łącznie 96km drogi wodnej klasy Vb. Warto podkreślić, iż na wody śródlądowe nie został opracowany żaden standard dotyczący jakości i dokładności pomiarów hydrograficznych. Próbę zainteresowania pomiarami batymetrycznymi na wodach śródlądowych przeprowadzono w 2007 roku na XVII Konferencji IHO, powołując utworzenie Grupy

<sup>1</sup> Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, e-mail: [olkowska@am.szczecin.pl](mailto:olkowska@am.szczecin.pl)

<sup>2</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, e-mail: [nratuszniak@wi.zut.edu.pl](mailto:nratuszniak@wi.zut.edu.pl)

<sup>3</sup> Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, e-mail: [g.zaniewicz@am.szczecin.pl](mailto:g.zaniewicz@am.szczecin.pl)

Roboczej ds. Hydrografii i Kartografii na wodach śródlądowych (*Establishment of a Working Group on Hydrography and Cartography of Inland Waters*) [6]. Do tej pory nie opublikowano żadnych szczegółowych opracowań z prac tej grupy.

Zespół badawczy Akademii Morskiej w Szczecinie bazował na obowiązującym standardzie morskich pomiarów hydrograficznych IHO S-44, wg klasy specjalnej [8]. Wymagania dotyczące pomiarów wg tej klasy nie zawsze były adekwatne do napotkanych problemów hydrograficznych – to co nie zagraża statkom na obszarach morskich, może być bezpośrednim niebezpieczeństwem nawigacyjnym dla użytkowników dróg śródlądowych.

W związku z białą księgą Unii Europejskiej wspierającą rozwój rzecznych korytarzy transportowych zaistniała potrzeba opracowania standardu pomiarów hydrograficznych, adekwatnego do sytuacji spotykanych na odcinkach rzecznych.

## **2. PROBLEMATYKA POMIARÓW NA OBSZARACH ŚRÓDLĄDOWYCH I PRZYGRANICZNYCH**

Problematyka prowadzenia pomiarów na obszarach śródlądowych w dużej części bardzo różni się od problemów towarzyszących pomiarom morskich czy portowym. Zarazem w trakcie akwizycji jak i przy późniejszej obróbce danych batymetrycznych warunki środowiskowe jak i rozwiązania technologiczne znaczenie od siebie odbiegają.

Generalna słaba przezroczystość wód eliminuje w tym wypadku pomiary opierające się na falach świetlnych, ze względu na dużo gorsze rozchodzenie się ich od fali akustycznej. W takim środowisku akustyczne metody prowadzenia sondaży są tu nieuniknione. Płytkie wody obszarów śródlądowych wymagają wykorzystania technologii pozwalającej na uzyskiwanie stosunkowo szerokich pasów przeszukania względem małej głębokości akwenów. Wraz ze spadkiem głębokości i zwiększaniem się szerokości rzeki rośnie liczba wyznaczanych profili pomiarowych, co dodatkowo wydłuża i komplikuje prowadzenie rejestracji. Również zasięg wiązki nie jest przy tym tak daleki jak dla pomiarów morskich. Powodowane jest to utratą energii związanej z charakterem dna. Muliste lub torfowe dno, charakterystyczne dla obszarów śródlądowych, zmniejsza zasięg nawet o 30%, podczas gdy powierzchnie piaszczyste lub kamieniste dają dobre odbicie nawet na granicy zasięgu.

Częstotliwości wykorzystywanych do pomiarów fal akustycznych są zazwyczaj wyższe ze względu na mniejsze głębokości, co poprawia znacznie rozdzielczość uzyskanych danych, jednak musi uwzględniony zostać rodzaj dna i grubość warstw mułu i osadów.

Rzeczny charakter akwenów powoduje szybkie zmiany dna, co stanowi bezpośrednie zagrożenie dla aparatury pomiarowej i jednostki. Dodatkowo zmiany poziomów wód wymagają nanoszenia wielu korekt związanych ze stanem wody na badanych obszarach. Przy gwałtownych zjawiskach hydro-meteorologicznych dobową różnicą poziomów wody może wynosić kilkadziesiąt centymetrów. Liczba wodowskazów, oraz miejsca ich rozmieszczenia nie zawsze są odpowiednie dla potrzeb prowadzenia dokładnych pomiarów.

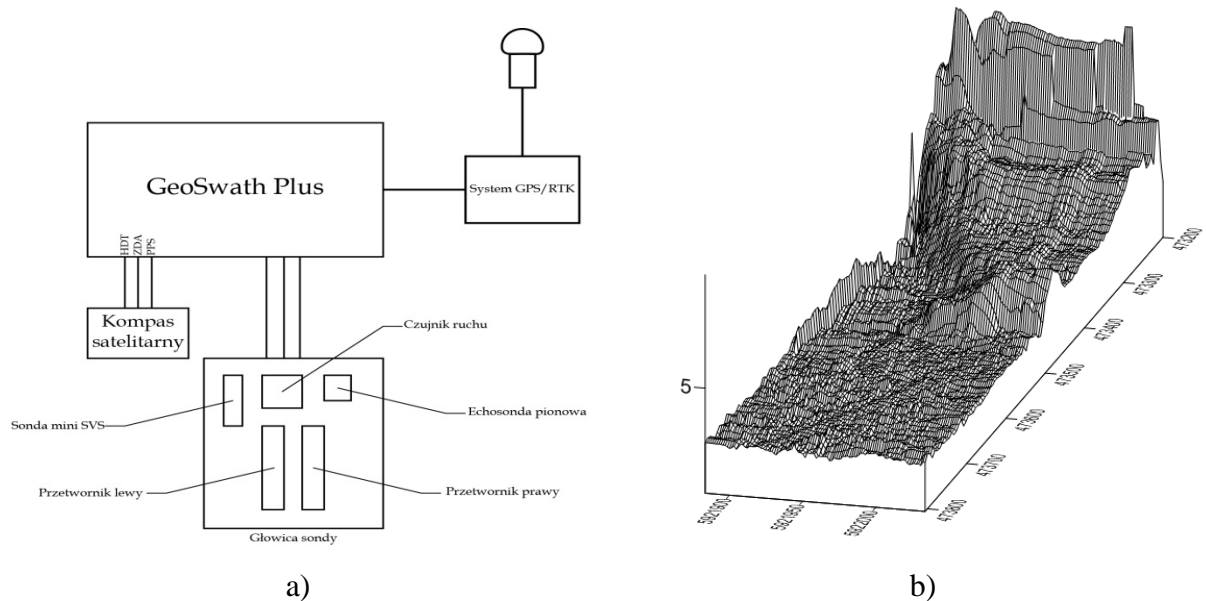
Kolejnym problemem niewystępującym na obszarach morskich i portowych jest niejednoznaczność wyznaczonego toru wodnego. Według przepisów Dyrektora Urzędu Żegluga Śródlądowej na odcinkach dróg wodnych, gdzie nie ustawiono oznakowania, szlak żeglowny przebiega całą szerokością koryta drogi wodnej – oznacza to, iż linia brzegowa stanowi o jego granicach [11]. Niestety w wielu przypadkach linia brzegowa nie jest wyznaczana dokładnie ze względu na trudność wykonania (występowaniem podmokłych terenów, okresowo wysuszanych i zalewanych, jej jednoznaczne wyznaczenie od strony lądu było w wielu miejscach niemożliwe) i koszt pomiaru lub nie jest wystarczająco często aktualizowana [5]. W konsekwencji trudno jest przygotować plan pomiarów batymetrycznych, gdy nie ma ostatecznie wyznaczonego obszaru, na którym mają one być przeprowadzone.

Ze względu na brak standardów i wytycznych dla prowadzenia badań hydrograficznych na śródlądowych drogach wodnych w Polsce, brak jest również całej oprawy legislacyjnej prowadzonych pomiarów związanych z autoryzacją i odpowiedzialnością za ich wyniki [10].

### **3. INTERFEROMETRYCZNY SYSTEM SONAROWY**

Metoda pozyskiwania danych batymetrycznych zależy od wielkości obszaru sondażowego i lokalnego charakteru środowiska. Dla pomiarów morskich wymagana dokładność pozyskiwanych danych jest ściśle określona wymogami IHO i zależna od kategorii badanego akwenu. Dla obszarów śródlądowych wymagań nie ma, aby jednak dane batymetryczne odzwierciedlały faktyczny stan dna akwenów, konieczne jest uzyskanie maksymalnej gęstości i dokładności takich danych.

Akustyczne pomiary głębokości akwenów są prowadzone w oparciu o systemy sond jednowiązkowych jedno- i wieloprzetwornikowych, sond wielowiązkowych, a także w oparciu o batymetryczne systemy sonarowe wykorzystujące interferometrię fazową [3]. Gęstość zebranych danych w przypadku użycia sondy jednowiązkowej jest niewystarczająca do odtworzenia wiernego cyfrowego modelu dna, który buduje się w tym interpolując wartości głębokości w pomierzonych punktach jednym z wybranych algorytmów interpolacji. Zbudowana w ten sposób mapa nie odzwierciedla dokładnej charakterystyki dna, a jedynie reprezentuje jego mocno przybliżony kształt. Sondy wielowiązkowe oraz sonarowe systemy interferometryczne pozwalają na uzyskanie rozdzielczości rzędu kilku (rozdzielczość poprzeczna) na kilkadziesiąt (rozdzielczość wzdłużna) centymetrów w zależności od częstotliwości przetworników i prędkości przeprowadzania pomiarów [3]. Sonarowe systemy interferometryczne mają jednak znaczącą przewagę nad sondami wielowiązkowymi w przypadku wykorzystywania ich do pomiarów płytkowodnych. Wynika to z budowy wysyłanej wiązki akustycznej z przetwornika. Sondy wielowiązkowe wysyłają snop wiązek o szerokości wachlarza nieprzekraczającej 120 stopni, co przy głębokościach kilku- i kilkunastu metrów pozwala osiągać jedynie bardzo wąski pas przeszukania, co z kolei w rezultacie przybliża je do efektywności sond jednowiązkowych przy jednocześnie niewspółmiernych kosztach zakupu sprzętu i oprogramowania.



**Rys. 1: Schemat interferometrycznego systemu GeoSwath Plus (a) oraz przykładowe wysokogęstościowe dane batymetryczne pochodzące z tego systemu (b).**

Interferometryczny system sonarowy GeoSwath Plus (rys.1) wykorzystany do przeprowadzenia pomiarów hydrograficznych na obszarze RIS Dolnej Odry stanowi kompleks urządzeń precyzyjnie sprzężonych w jeden układ. Oprócz dwóch przetworników o częstotliwości 250 kHz na głowicy zamocowano echosondę pionową, czujnik ruchu oraz czujnik pomiaru prędkości dźwięku w wodzie. Urządzeniami służącymi do rejestracji dokładnej pozycji oraz kierunku poruszania się jednostki w czasie pomiarów są odbiornik RTK-GPS oraz kompas satelitarny. Wszystko to podłączone jest do wysokowydajnej jednostki centralnej stanowiącej serce systemu.

Jeszcze kilka lat temu interferometryczne pomiary batymetryczne były wykonywane tylko na potrzeby dużych oceanicznych projektów badawczych i wysokobudżetowych działań związanych z wydobywaniem ropy i gazu. W związku ze spadkiem kosztów elektroniki i zwiększeniu możliwości obliczeniowych komputerów osobistych rozwój tej technologii nabrał tempa [4]. Obecnie systemy interferometryczne (ang. Swath Bathymetry Systems) pozwalają mapować dno z dokładnością przekraczającą standardy narzucone przez Międzynarodową Organizację Hydrograficzną (ang. IHO). Sygnał akustyczny generowany przez sonarowy system interferometryczny jest podobny do impulsu sonaru bocznego – azymutalnie wąskiego, za to dalekosiężnego prostopadle do kierunku ruchu jednostki. Rozpiętość wachlarza wiązki przekracza 240 stopni. Wraz z przesuwaniem się przetwornika tworzy się profil pojedynczych linii tworzących podłużne wstęgi (ang. swath) odpowiadające obrazowanej powierzchni dna. Różnicą pomiędzy takim sonarowym systemem batymetrycznym a sonarem bocznym jest sposób zapisu energii akustycznej. W tym wypadku do określenia głębokości wykorzystuje się różnicę w fazie odbitego sygnału, a mnogość sensorów znajdujących się od siebie w niewielkich odległościach zapewnia wysoką precyzję pomiaru [2].

Mierzenie różnicy fazy pomiędzy dwoma położonymi blisko odbiornikami jest powszechnie stosowaną metodą sonarową dla lokalizacji obiektów. Precyzyjnie uzyskana różnica odległości pozwala oszacować kątową odległość od celu. Przy małej odległości pomiędzy odbiornikami daje to doskonałą precyzję pomiaru. Rozdzielczość poprzeczna zarejestrowanej wiązki, podobnie jak dla sonaru, zmniejsza się wraz z odległością do przetwornika. Dla przetwornika o częstotliwości pracy bliskiej 250 kHz jest to 5 cm

dla rozdzielczości poprzecznej i ok. 80 cm dla wzdłużnej przy zasięgu 50m i już ponad 5 m przy zasięgu ok. 300 m.

**Tabela 1.** Rozdzielczość wzdłużna i poprzeczna.

Częstotliwość/szerokość wiązki	Rozdzielczość wzdłużna dla zasięgu		Rozdzielczość poprzeczna dla zasięgu	
	50m	300m	50m	300m
117kHz / 1,7 stopnia	1,5m	8,9m	0,07m	0,075m
234kHz / 1,1 stopnia	0,9m	5,8m	0,05m	0,05m

Źródło: bibliografia, poz. [2]

Dla rozdzielczości całego obrazu istotna jest również częstość generowania poszczególnych impulsów sygnału, co bezpośrednio związane jest z zakresem wiązki oraz prędkością poruszania się jednostki. Sondaże przeprowadzane z dużą prędkości będą charakteryzować się dużo gorszą jakością uzyskanych danych ze względu na ich wynikową, niską rozdzielczość wzdłużną.

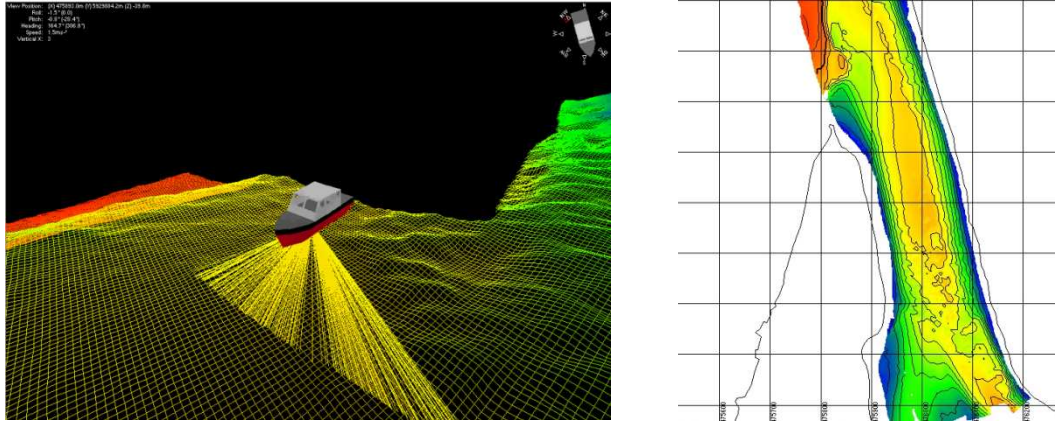
W przypadku płytkowodnych akwenów interferometryczny sonarowy pomiar batymetrii jest najefektywniejszą technologią. Niekorzystny jest natomiast fakt, że nagłe duże gradienty powierzchni dna powodują występowanie obszaru zacienionego, co w konsekwencji rzadko daje sondaż o stuprocentowym pokryciu.

#### 4. PLANOWANIE POMIARÓW DLA AKWIZYCJI DANYCH

Prace sondażowe na akwenu objętym przyszłym systemem RIS Dolnej Odry podzielono na odcinki kilometrowe. Do prowadzenia nawigacji na obszarach pomiarowych, wykorzystano podkłady mapowe wykonane przez zespół Akademii Morskiej w Szczecinie. Mapy te w postaci wektorowej, przygotowane zostały z pomiarów terenowych oraz z wektoryzacji lotniczych ortofotomap, wykonanych kamerą analogową lub cyfrową, bądź wektoryzacji obrazów satelitarnych z satelity IKONOS [5] (rys. 2).

Ilość profili sondowania została uzależniona od średnich głębokości na danym akwenu. W praktyce, odległość pomiędzy profilami wynosiła 7-8 x głębokość. Dla zapewnienia dokładności pokrycia sondowanego akwenu zastosowano pokrycie stuprocentowe, by wykryć wszelkie niebezpieczeństwa nawigacyjne.

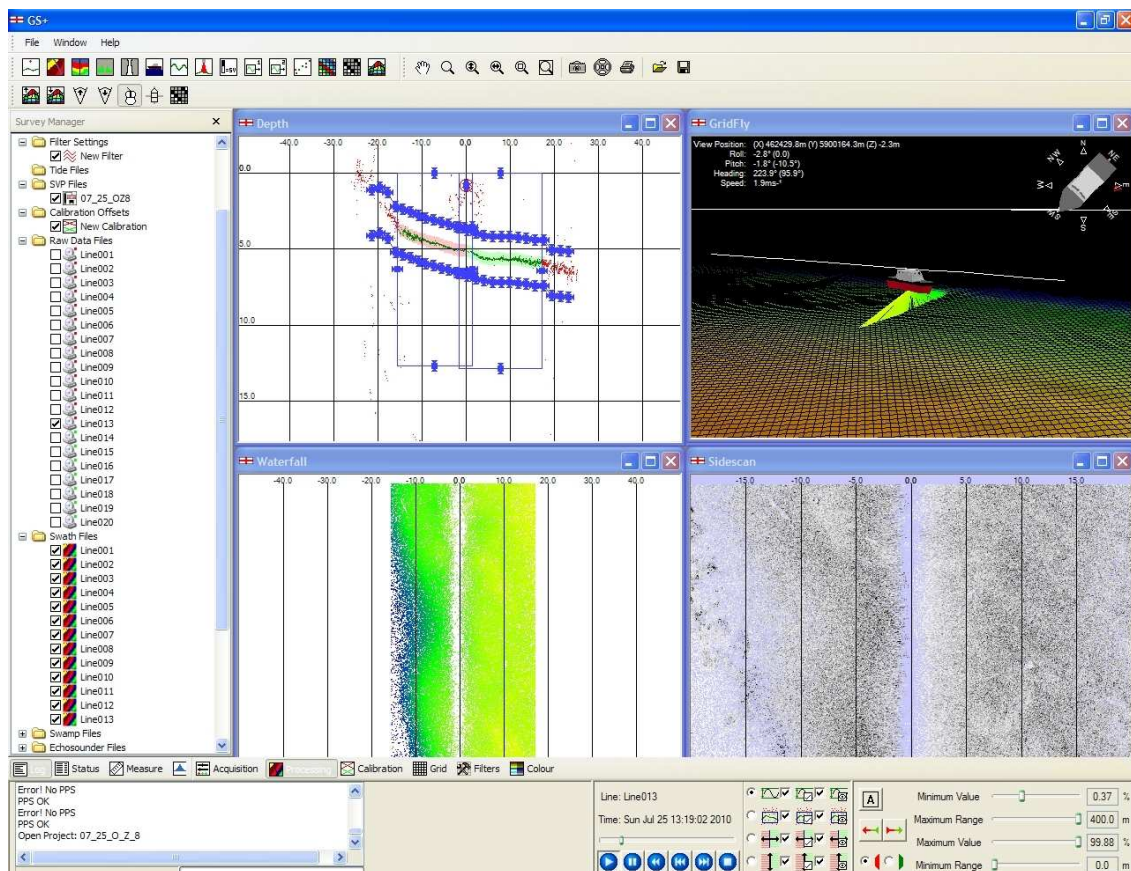




Rys. 2. Przykład rozpiętości działania systemu oraz podkład mapowy wykorzystywany podczas prowadzenia pomiarów.

## 5. TWORZENIE PRODUKTU DLA IENC

Po akwizycji danych batymetrycznych z określonego akwenu, przeprowadzono obróbkę danych tzw. processing. Całe zadanie polega na, niejako, odtworzeniu wszystkich danych z czujników systemu pomiarowego, a następnie oczyszczeniu z danych błędnych (rys. 3).

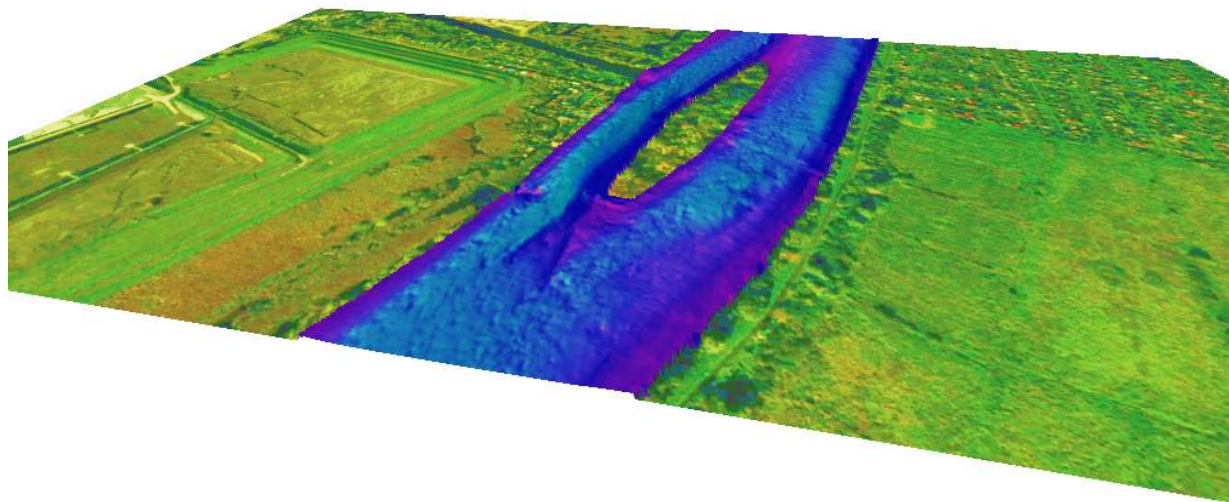


Rys. 3. Okno processingu danych systemu batymetrycznego GeoSwath Plus.

Czyszczenie danych pomiarowych zajęło więcej czasu niż pozyskiwanie. Jest to praca bardzo skrupulatna, aby jak najbardziej odzwierciedlić rzeczywisty kształt dna, który odpowiada za bezpieczeństwo nawigacyjne.

W kolejności processingu danych, pierwszym etapem było sprawdzanie danych z sensorów zewnętrznych systemu pomiarowego, czyli pozycji (GPS/RTK), czujnika ruchu (IMU) oraz czujnika prędkości dźwięku przypowierzchniowej. Drugim etapem było nałożenie filtrów na zapis danych batymetrycznych z systemu interferometrycznego, celem usunięcia zakłóceń powstających z propagacji fali akustycznej w wodzie oraz typowych dla systemów wielowiązkowych przekłamań na końcach wiązek w profilach.

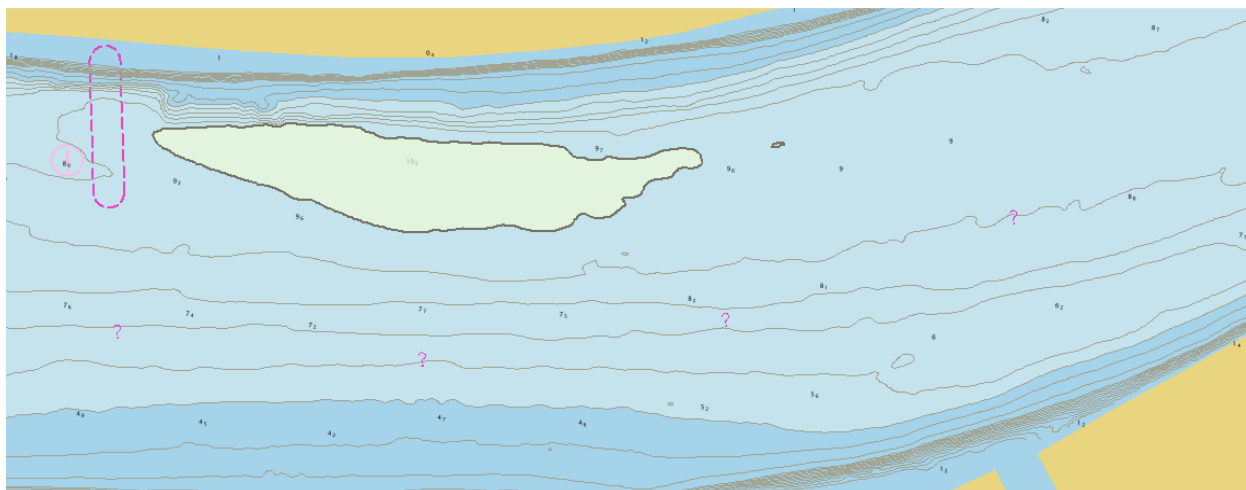
Oczyszczony i stworzony półprodukt w postaci numerycznego modelu terenu w rozdzielczości 1x1 m (rys. 4), poprawiono o występujący stan poziomu wody na akwencie pomierzonym, a następnie wyeksportowano dane w celu stworzenia izobat oraz punktów głębokości, które są nieodzownym elementem elektronicznych map nawigacyjnych iENC.



**Rys. 4. Wygenerowany grid o rozdzielczości 1x1 m, nałożony na fragment ortofotomapy. Odra Zachodnia, Wyspa Krainka.**

Kontury izobat wygenerowano z podziałem: od głębokości 1-2,5 m co 10 cm, od głębokości 2,5-4 co 50 cm, resztę izobat powyżej 4 m głębokości co 1m [10]. Izobaty zostały uzupełnione o punkty głębokości, które rozłożone zostały co 35 m przy wyborze naj płytszej wartości. Wszelkie wygenerowane dane zostały zakodowane, zgodnie z obowiązującymi standardami specyfikacji IHO S-57 [9] (rys. 5).





Rys. 5. Wycinek mapy iENC z elementami batymetrii dna: izobaty oraz punkty głębokości.

## 6. PODSUMOWANIE

Powstanie systemu RIS powinno skutkować opracowaniem standardów hydrograficznych odpowiadających warunkom panującym na odcinkach rzecznych – dotychczas obowiązuje standard IHO S-44 [8] adekwatny obszarom morskim i portowym. Uszczegółowienie standardu, opracowanie wymagań dokładnościowych i jakościowych w odniesieniu do danych hydrograficznych na obszarach systemu RIS, umożliwi prawidłowe i precyzyjne tworzenie map nawigacyjnych, zapewniających bezpieczną żeglugę. Ponadto, uregulowanie pod kątem prawnym cykliczności wykonywania planów batymetrycznych na system śródlądowych dróg wodnych pozwoli na zachowanie wysokiej klasy informacji, niezbędnych w prowadzeniu nawigacji rzecznej i morsko-rzecznej. Jest to najważniejszy element map elektronicznych dostarczający informacje o bezpiecznym szlaku żeglownym. Na obszarach morskich zakres ten reguluje rozdział 3 działu IV Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej z dnia 23 października 2006 w sprawie warunków technicznych użytkowania oraz szczegółowego zakresu kontroli morskich budowli hydrotechnicznych. Zapewnienie bezpieczeństwa nawigacyjnego akwenów rzecznych dodatkowo wymaga przeprowadzania inspekcji dna w okresie wczesnej wiosny. Wody zostają uwolnione z pokrywy lodowej, odkrywając naniesione w czasie zimy obiekty stwarzające zagrożenie tranzytowi rzecznemu.

**POMIARY BATYMETRYCZNE NA POTRZEBY PRODUKCJI ŚRÓDLĄDOWYCH  
ELEKTRONICZNYCH MAP NAWIGACYJNYCH OBSZARU RIS DOLNEJ ODRY**

**Streszczenie**

Dane batymetryczne stanowią niezbędną część informacji zawartych w komórkach śródlądowych map nawigacyjnych. Ze względu na brak standardu prowadzenia pomiarów jak i opracowywania danych hydrograficznych dla wód śródlądowych w Polsce oparto się o standardy i wytyczne Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej (ang. IHO). Problematyka pomiarów na akwenach śródlądowych znacznie różni się od problematyki pomiarów morskich, co stanowiło wyzwanie dla zespołu naukowo-badawczego Akademii Morskiej w Szczecinie. Do wykonania płytkowodnych pomiarów batymetrycznych użyto innowacyjnego rozwiązania, jakim jest sonarowy system interferometryczny. Wyniki badań zawarto w prototypowych komórkach śródlądowych map nawigacyjnych.

**BATHYMETRIC SURVEYS FOR INLAND ELECTRONIC  
NAVIGATION CHARTS PRODUCTION OF THE LOWER Odra RIS AREA**

**Abstract**

Bathymetric data represent a necessary part of the information contained in the cells of inland navigation charts. Due to the lack of standards for hydrographic measurements and data development of inland waters in Poland, the work was based on the guidelines of the International Hydrographic Organization (IHO). Problems in the hydrographic surveying of inland waters are significantly different from the problems of data acquisition at seas, which became a challenge for the research team of Maritime University in Szczecin. An innovative solution was used – a swath-bathymetry interferometric system to perform shallow bathymetric measurements. The results are included in the prototype cells of Polish inland electronic navigational charts.

**BIBLIOGRAFIA:**

- [1] Analiza potrzeb inwestycyjnych w zakresie żeglugi śródlądowej na rzece Odrze w latach 2007-2013. Akademia Morska w Szczecinie. Instytut Inżynierii Transportu. Zakład Żeglugi Śródlądowej i Gospodarki Wodnej. Szczecin 2006, <http://www.mi.gov.pl/files/0/105/Analizapotrzebinwestycyjnych1.pdf>
- [2] Bates, C. R., Byham Swath-sounding techniques for near shore surveying, *Hydrographic Journal*; vol.100, 2001
- [3] de Moustier C., Matusmoto H., Seafloor acoustic remote sensing with multibeam echosounders and bathymetric sidescan sonar systems. *Marine Geophysical Researches*, v. 15, pp. 27-42. , 1993.
- [4] Lurton X. Swath Bathymetry Using Phase Difference: Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision *IEEE Journal of Oceanic Engineering* vol. 25, nr 3, 2000
- [5] Łubczonek J., Włodarczyk M., Tworzenie i aktualizacja map elektronicznych dla żeglugi śródlądowej z wykorzystaniem cyfrowych obrazów teledetekcyjnych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 20, 2009
- [6] Nitner H., „Międzynarodowa działalność hydrograficzna w 2007 roku”, *Przegląd Hydrograficzny* nr 4, Gdynia 2008
- [7] Rozporządzenie RM z dnia 7 maja 2002 r. w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych. (Dz. U. z dnia 18 czerwca 2002 r.)
- [8] S-44 IHO Standard for hydrographic surveys, 5<sup>th</sup> edition, luty 2008, [http://www.iho-ohi.net/iho\\_pubs/standard/S-44\\_5E.pdf](http://www.iho-ohi.net/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf)
- [9] S-57 IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data, edition 3.1, listopad 2010, [http://www.iho-ohi.net/iho\\_pubs/standard/S-57Ed3.1/](http://www.iho-ohi.net/iho_pubs/standard/S-57Ed3.1/)
- [10] Stateczny A., Dylemat produkcji elektronicznych map nawigacyjnych dla żeglugi śródlądowej, *Annals of Geomatics* 2008, zeszyt 5, tom VI
- [11] Zarządzenia Dyrektora Urzędu Żeglugi Śródlądowej w Szczecinie z dnia 7 czerwca 2004r. w sprawie przepisów prawa miejscowego na śródlądowych drogach wodnych [http://www.uzs.gov.pl/bip/pliki/Zarzadzenie\\_przepisy\\_lokalne.doc](http://www.uzs.gov.pl/bip/pliki/Zarzadzenie_przepisy_lokalne.doc)