

**ANALIZA PORÓWNAWCZA I INTERPRETACYJNA
UOGÓLNIONEJ WIZUALIZACJI WIDOKU PODWODNEGO
UZYSKANEGO ZA POMOCĄ
ECHOSONDY JEDNO- I WIELOWIĄZKOWEJ**

**VISUALIZATION AND COMPARATIVE ANALYSIS
OF GENERALIZED UNDERWATER VIEW
OBTAINED WITH SINGLE AND MULTIBEAM ECHOSOUNDER**

Izabela Bodus-Olkowska, Marta Włodarczyk-Sielicka

Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, Katedra Geoinformatyki

Słowa kluczowe: hydrografia, geoinformatyka, wizualizacja, echosonda, numeryczny model dna
Keywords: hydrography, geoinformatics, visualization, echosounder, digital sea bottom model

Wprowadzenie

Współczesne technologie akwizycji danych batymetrycznych pozwalają na pozyskanie informacji o dużej gęstości na temat rozkładu głębokości na danym akwenu w krótszym niż dotychczas czasie. Numeryczny model dna zbudowany na podstawie takiej liczby danych stanowi dostatecznie wierne odzwierciedlenie rzeczywistego rozkładu głębokości. Hydrograficzne systemy echosond wielowiązkowych umożliwiają pozyskanie ogromnej liczby punktów przy jednoczesnym zapewnieniu pełnego pokrycia danymi badanego akwenu, znacznie przewyższając minimalne wymagania dokładności określone w standardzie prac hydrograficznych IHO S44 (IHO, 2008).

Skrócony czas prac w terenie nie przekłada się jednak na czas związany z przetwarzaniem tych danych oraz budową numerycznego modelu dna. Liczne błędy, zakłócenia i szumy rejestrowane w czasie akwizycji wyżej wymienionymi systemami powodują konieczność dodatkowej filtracji danych (Maleika, Pałczyński, Ferlichowski, 2012). Dodatkowo sam atut w postaci informacji o dużej gęstości staje się uciążliwy w trakcie budowy numerycznego modelu dna. Zbyt duża liczba danych powoduje znaczne obciążenie systemów komputerowych, w związku z czym konieczna jest ich redukcja. System jednowiązkowy, który wysyła pojedynczą, wąską kątowno wiązkę akustyczną, zapewnia akwizycję mniejszej liczby danych. W celu uzyskania interpretacyjnie porównywalnego modelu dna z modelem pozyskanym za pomocą echosondy wielowiązkowej, konieczne jest zagęszczenie siatki profili

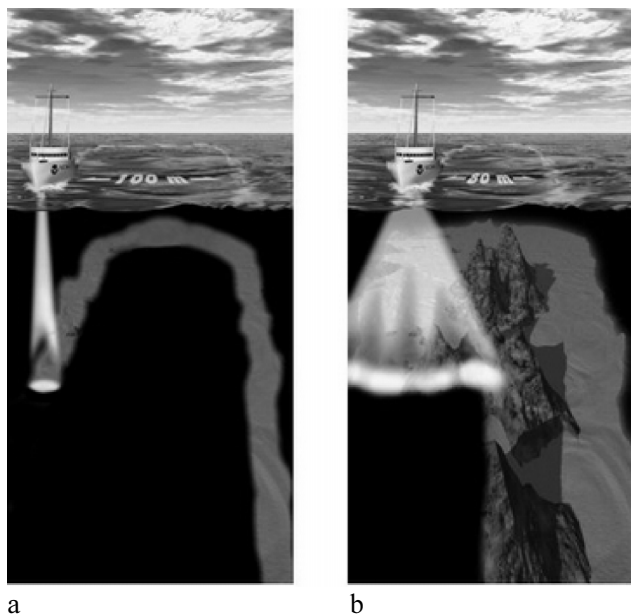
pomiarowych, na których odbywa się akwizycja. Dane pochodzące z echosondy jednowiązkowej obarczone są mniejszą liczbą zakłóceń i błędów. Zbędna jest również ich redukcja, co wpływa na skrócenie czasu potrzebnego na przetwarzanie i opracowanie końcowe danych.

Technologia akwizycji danych SBES/MBES

Echosonda wielowiązkowa (ang. *Multibeam echosounder*, MBES) wysyła wiele pojedynczych wąskich kątowno wiązek akustycznych, układających się w wachlarz o rozpiętości rzędu 210° szerokości kątownej. Przeciętnie głowica systemu wielowiązkowego emituje około 116 wiązek o szerokości kątownej $1,8^\circ$ (np. RESON SEBAT 7101, www.teledyne.com). Zastosowanie takiego układu pozwala na pokrycie dna pasem o szerokości równej około $8 \times$ głębokości akwenu. Technologia wielowiązkowa o częstotliwości pracy od 210-250 kHz pozwala na pozyskanie informacji batymetrycznej o dużej gęstości i wysokiej rozdzielczości. W związku z dużym pokryciem akwenu danymi, zmniejsza się również liczba profili pomiarowych, co przekłada się na krótszy czas potrzebny na akwizycję danych. Niestety przygotowanie echosondy wielowiązkowej do akwizycji jest procesem długotrwałym i wymaga kilku czasochłonnych procedur. Oprócz określenia podstawowych poprawek na prędkość dźwięku oraz stan wody, konieczna jest również kalibracja urządzenia, tzw. *patch test*. Kalibracja echosondy wielowiązkowej składa się z procesów rejestracji danych na ustalonych warunkach: kierunek i prędkość poruszania się jednostki oraz wymagania odnośnie kształtu dna – dla poprawki na opóźnienie czasowe oraz przechyły boczne, konieczne jest płaskie

dno. Natomiast dla poprawki na przegłębienie i na wskazania kursu potrzebny jest odpowiedni uskok. Po wyliczeniu poprawek kalibracyjnych należy wykonać, tzw. *cross check*, który pozwala sprawdzić poprawność działania echosondy (IHO, 2012). Jeśli system wielowiązkowy składa się z dwóch przetworników, konieczne jest przeprowadzenie kalibracji i wyliczenie poprawek dla obu urządzeń. Ponadto niezbędna jest również informacja o prędkości rozchodzenia się dźwięku horyzontalnie tuż pod przetwornikiem, co wynika z dużej horyzontalnej rozpiętości generowanego sygnału akustycznego.

System jednowiązkowy (ang. *Singlebeam echosounder*, SBES) generuje jedną wąską kątowno wiązkę około $7^\circ/21^\circ$ szerokości kątownej. Jest on dwuczęstotliwościowy, co oznacza jednoczesną



Rysunek 1. Obszar dna oświetlony różnymi systemami batymetrycznymi: a – SBES, b – MBES (źródło: www.nauticalcharts.noaa.gov)

rejestrację danych na dwóch częstotliwościach, zazwyczaj 210/33 kHz (np. echosonda jednowiązkowa Kongsberg EA400, www.km.kongsberg.com). Wąska kątowo wiązka pozwala na pokrycie akwenu rzędu 1,2-1,5 metra dla akwenu o średniej głębokości 10 metrów. Małe pokrycie danymi stwarza konieczność wykonania rejestracji punktów pomiarowych na znacznie większej liczbie profili. Przy zastosowaniu echosondy jednowiązkowej, międzynarodowe standardy hydrograficzne określają odległość między poszczególnymi profilami, rzędu 10 m. Duża liczba profili pomiarowych przekłada się na dłuższy czas potrzebny na akwizycję, ale opracowanie danych jest za to znacznie mniej pracochłonne. Wąski, pojedynczy sygnał akustyczny obciążony jest znacznie mniejszą liczbą zakłóceń i szumów. Procedura kalibracji jest również łatwiejsza – polega na określeniu średniej prędkości dźwięku w rozkładzie pionowym oraz na tarowaniu echosondy. Tarowanie polega na: obniżaniu deski kalibracyjnej pod przetwornik echosondy w określonych odstępach głębokości, np. co 1 metr, jednoczesnym zarejestrowaniu prędkości dźwięku w wodzie, a następnie podnoszeniu deski. Pomierzone prędkości dźwięku w wodzie składają się na wartość średnią pomiaru, stanowiącą wartość poprawki (IHO, 2012). Ponadto kalibracja nie jest wymagana na akwenach o głębokości mniejszej niż 20 metrów.

Porównanie pokrycia dna danymi obu systemów pomiarowych zaprezentowano na rysunku 1.

Metodyka budowy NMD

Do budowy numerycznego modelu dna (NMD) wykorzystano hydrograficzne systemy pomiarowe, dzięki którym zebrano dane o głębokości z dużej liczby punktów pomiarowych. Otrzymane w trakcie pomiarów batymetrycznych dane należy odpowiednio opracować. Etap ten opiera się na oczyszczeniu danych z błędów odbicia sygnału akustycznego oraz wskazań urządzeń peryferyjnych systemu, tj. kursu, pozycji, danych z czujnika ruchu (Łubczonek, Zaniewicz, 2012). Po odpowiednim opracowaniu danych batymetrycznych tworzony jest NMD, który jest najczęściej zapisywany w dwóch podstawowych strukturach wektorowych: GRID oraz TIN. GRID jest regularną strukturą w postaci prostokątnej siatki punktów, powstałych w wyniku interpolacji. Natomiast TIN jest nieregularną siatką trójkątów, których boki rozpięte są na punktach o znanych współrzędnych.

Model TIN najczęściej powstaje w wyniku triangulacji punktów głębokości spełniającej warunek Delaunay'a, mówiący o tym, że okrąg wyznaczony przez trzy wierzchołki trójkąta nie może zawierać innych punktów interpolacyjnych. Wierzchołki trójkątów stanowią punkty o znanych współrzędnych. Triangulacja Delaunay'a oparta jest na wielobokach Thiessena lub diagramach Voronoi posiadających tę własność, że każdy punkt położony wewnątrz wieloboku ma najbliżej do punktu węzłowego, który w kolejnym etapie przetwarzania stanowi wierzchołek trójkąta (Bielecka, 2006). Rysunek 2 przedstawia przykład numerycznego modelu dna utworzonego na podstawie nieregularnej siatki trójkątów.

Do budowy regularnej siatki prostokątów GRID również jest wykorzystywany odpowiedni algorytm interpolacyjny, który umożliwia obliczenie głębokości w węzłach siatki. Stopień uogólnienia modelu wynikowego jest definiowany przez jego rozdzielczość, zwaną także „rozmiarem oczka” oraz rodzaj zastosowanej metody interpolacji. Rysunek 3 przedstawia przykład numerycznego modelu dna opartego na regularnej siatce kwadratów.

W większości oprogramowań hydrograficznych, tworzących NMD istnieje możliwość konwersji modelu TIN do struktury GRID. Należy wspomnieć, że znane są również inne

metody tworzenia numerycznego modelu dna, do których można zaliczyć B-Splines oraz NURBS (Sassais, Makar, 2011).

W trakcie wykorzystania danych batymetrycznych z systemów wielowiązkowych mamy do czynienia z nadmiarową liczbą punktów pomiarowych. Natomiast przy zastosowaniu systemów jednowiązkowych istnieje problem związany ze zbyt małym pokryciem obszaru dna punktami pomiarowymi. W pierwszym przypadku należy zredukować liczbę punktów, czyli zmniejszyć wielkość zbioru danych w celu ich łatwiejszej oraz efektywniejszej analizy. Zmniejszenie liczebności danych pomiarowych w trakcie ich przetwarzania może być realizowane na kilka sposobów. Może ona polegać między innymi na wykorzystaniu zaawansowanych metod statystycznych, które umożliwiają zmniejszenie dużego zbioru danych do podstawowych czynników, wymiarów lub skupień, wyjaśniających najważniejsze zależności pomiędzy analizowanymi przypadkami i wartościami zmiennych. Inny sposób redukcji danych, to zmniejszenie dużego zbioru o określoną liczbę przypadków, ale w taki sposób, żeby zredukowany zbiór pozostał reprezentatywny dla badanej populacji. Jeszcze innym sposobem redukcji danych jest przekształcenie dużej liczby wartości zmiennych w taki sposób, żeby można je było przedstawić za pomocą jednej wartości, wspólnej dla grupy. W trakcie pracy z danymi hydrograficznymi redukuje się dane głównie przez utworzenie siatki GRID. Wraz ze zwiększeniem odległości między węzłami siatki wzrasta stopień zniekształcenia danych źródłowych. Przy pracy z danymi pozyskanymi systemami jednowiązkowymi należy wykorzystać proces generowania danych. Często spotykanym sposobem generowania danych jest tworzenie na badanym obszarze modelu GRID. Powstałe w wyniku modelowania węzły siatki są nowymi, interpolowanymi współrzędnymi, nie zaś oryginalnymi danymi pomiarowymi. Generowanie nowych danych związanych z głębokościami nie jest zalecane ze względu na bezpieczeństwo żeglugi na danym akwenu. Zaleca się zwiększenie liczby profili pomiarowych i zagęszczenie danych źródłowych, zamiast generowania nowych danych.

Do zalet modelu GRID można zaliczyć (Olszewski, 2009):

- prostotę zapisu danych pozwalającą na ich efektywne przetwarzanie oraz kompresję,
- większą łatwość modelowania powierzchni w stosunku do modelu TIN,
- łatwość archiwizacji,
- możliwość prowadzenia złożonych analiz.

W trakcie pracy z danymi batymetrycznymi, do obliczenia głębokości w węzłach siatki GRID stosuje się różne metody modelowania, na przykład: średnią arytmetyczną, średnią ważoną, wybór najmniejszej głębokości, wybór najmniejszej głębokości z pozycją rzeczywistą, metodę naturalnego sąsiada, metodę odwrotnych odległości, kriging, metodę minimalnej krzywizny, zmodyfikowaną metodę Sheparda. Należy pamiętać, że istotnym czynnikiem mającym wpływ na dokładność danych wynikowych jest prawidłowe ustalenie kryteriów przetwarzania oraz odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych danej struktury.

Porównanie numerycznych modeli dna

Dla celów niniejszego artykułu wykorzystano dane pozyskane systemem wielowiązkowym ResonSeaBat 7101 o częstotliwości sygnału akustycznego 240 kHz oraz systemem jednowiązkowym Atlas Deso25 o częstotliwościach pracy 210/33kHz, na akwenu nowobudowanego portu LNG w Świnoujściu, na obszarze pomiędzy nowym falochronem a obrotnicą. Dla celów porównawczych wykorzystano dane zarejestrowane echosondą jednowiąz-

kową z częstotliwością 210 kHz. Z uwagi na wysoką gęstość punktów głębokości pozyskanych systemem wielowiązkowym, zredukowano liczbę punktów pomiarowych przez wygenerowanie regularnej siatki kwadratów GRID o boku 1 metra. Pokrycie akwenu danymi prezentują rysunki 4 i 5.

W przypadku rejestracji echosondą Deso25 (SBES) wyodrębnić można profile, po których odbywała się akwizycja. Odległość między profilami pomiarowymi ustalona została na 10 metrów. Dane pochodzące z echosondy wielowiązkowej pokrywają w 100% badany akwen. Statystycznie, w przypadku pomiarów echosondą wielowiązkową, średnia głębokość na akwenu wyniosła 14,46 m, echosondą jednowiązkową była to wartość 14,77 m. Dane statystyczne nie odzwierciedlają jednak rzeczywistych różnic, głównie z powodu nieporównywalnej liczby danych wziętych do wyliczenia wartości średniej. W przypadku echosondy wielowiązkowej punktów pomiarowych było niewspółmiernie więcej niż w przypadku sondażu echosondą jednowiązkową.

Porównanie obu modeli dna wykonano w oprogramowaniu ArcGis Desktop ver. 10.1, wykorzystując funkcję *SurfaceDifference*, która tworzy odrębną powierzchnię prezentującą różnice głębokości. Od powierzchni zbudowanej z danych SBES odjęto powierzchnię uzyskaną z punktów głębokości zarejestrowanych MBES. W pierwszym etapie na podstawie opracowanych danych konieczne jest zbudowanie siatki trójkątów z obu zestawów danych. Następnie wykorzystano narzędzie do różnicowania powierzchni i uzyskano siatkę TIN zaprezentowaną na rysunku 6.

W kolejnym kroku z siatki różnicowej TIN zbudowano warstwę punktową, przedstawiającą wierzchołki trójkątów i na ich podstawie obliczono statystyki. Wartość średniej różnicy głębokości pomiędzy sondażem SBES a MBES wyniosła 0,26 m. Znak dodatni przed uzyskaną wartością oraz kolor niebieski w przeważającej części rysunku 6 oznacza, iż głębokości pomierzone systemem jednowiązkowym są większe średnio o około 26 cm od głębokości uzyskanych za pomocą systemu wielowiązkowego. Różnice we wskazaniach głębokości wynikają głównie z różnicy w częstotliwościach pracy obu echosond – im niższa częstotliwość tym głębsza penetracja dna na badanym akwenu. Echosonda jednowiązkowa pracująca na częstotliwości 210 kHz oraz prostopadły do dna kierunek wiązki akustycznej pozwalają na przejście wiązki przez materiał miękki hydroakustycznie – rzadki muł lub szlam i zarejestrowanie odbicia od materiału o wyższej gęstości, wskazując je jako dno właściwe. Wiązki akustyczne o wyższej częstotliwości pracy (240 kHz) echosondy wielowiązkowej zarejestrowały pierwsze odbicie od mułu, wskazując je jako głębokość właściwą akwenu.

Na rysunku 7 zaprezentowane zostały oba numeryczne modele dna. W aspekcie analizy porównawczej obu wizualizacji nie zaobserwowano znaczących różnic w rozkładzie głębokości. Wysnuć można wniosek, iż nawigator korzystający z funkcji 3D mapy elektronicznej, nie zauważy różnicy w prezentowanym modelu dna zbudowanym na podstawie danych pozyskanych za pomocą echosondy jedno- czy wielowiązkowej. Potencjał interpretacyjny mapy będzie dla niego taki sam. Innym aspektem jest analiza interpretacyjna. Informacja o głębokości – uzyskana wartość średniej różnicy w pomiarze głębokości rzędu 26 cm – może mieć duże znaczenie dla bezpieczeństwa nawigacji na danym akwenu, szczególnie w przypadku jednostek o maksymalnym dopuszczalnym zanurzeniu.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę porównawczą i interpretacyjną dwóch numerycznych modeli dna, zbudowanych na podstawie rejestracji głębokości dwoma systemami hydrograficznymi: wielowiązkowym i jednowiązkowym. Stosunkowo niska wartość średniej różnicy we wskazaniach głębokości pomierzonych obydwoma systemami oraz brak zaobserwowanych znaczących różnic w wizualizacjach obu modeli dna pozwala wysnuć wniosek, iż przy odpowiednio gęstej siatce profili pomiarowych, system jednowiązkowy jest wystarczający do pozyskania uogólnionego widoku podwodnego akwenu. System wielowiązkowy, z uwagi na wartość pokrycia dna danymi, znacznie skraca czas potrzebny na akwizycję, jednakże punkty pomiarowe obciążone są znaczną liczbą zakłóceń, szumów, błędów związanych z kalibracją i ruchem jednostki na fali oraz charakterystyką pracy samego urządzenia, co znacząco wydłuża czas potrzebny na opracowanie danych. Ponadto, zanim numeryczny model dna zostanie zbudowany, uzyskana liczba danych batymetrycznych musi zostać poddana odpowiedniej redukcji. System jednowiązkowy, choć o małym pokryciu dna danymi – około 1,5 m, przy odpowiednio gęstej siatce profili pomiarowych co 10 m, pozwala na pozyskanie danych w liczbie wystarczającej do budowy uogólnionego podwodnego widoku akwenu.

Literatura

- Bielecka E., 2006: Systemy informacji geograficznej. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo PJWSTK, Warszawa.
- IHO C13, 2012: Manual on Hydrography. First edition.
- IHO S44, 2008: IHO Standards for Hydrographic Survey.
- Lubczonek J., Zaniewicz G., 2012: Opracowanie i wizualizacja numerycznych modeli terenu oraz dna dla potrzeb geoinformacyjnego systemu ochrony portu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* vol. 24: 187-198.
- Maleika W., Pałczyński M., Frejlichowski D., 2012: Effect of Density of Measurement Points Collected from a Multibeam Echosounder on the Accuracy of a Digital Terrain Model. [In:] Pan J.-S., Chen S.-M., Nguyen N.T. (eds.): ACIIDS 2012, Part III, Lecture Notes in Artificial Intelligence vol. 7198: 456-465.
- Olszewski R., 2009: Kartograficzne modelowanie rzeźby terenu metodami inteligencji obliczeniowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Geodezja.
- Sassais R., Makar A., 2011: Methods to generate numerical models of terrain for spatial ENC presentation. *Annual of Navigation* 18: 1-13.

Źródła internetowe

- Mapy morskie NOAA. Data pozyskania 22.07.2013. www.nauticalcharts.noaa.gov
- Specyfikacja techniczna echosondy jednowiązkowej EA400. Data pozyskania 22.07.2013. www.km.kongberg.com
- Specyfikacja techniczna echosondy wielowiązkowej Reson SEABAT 7101. Data pozyskania 22.07.2013. www.teledyne.com

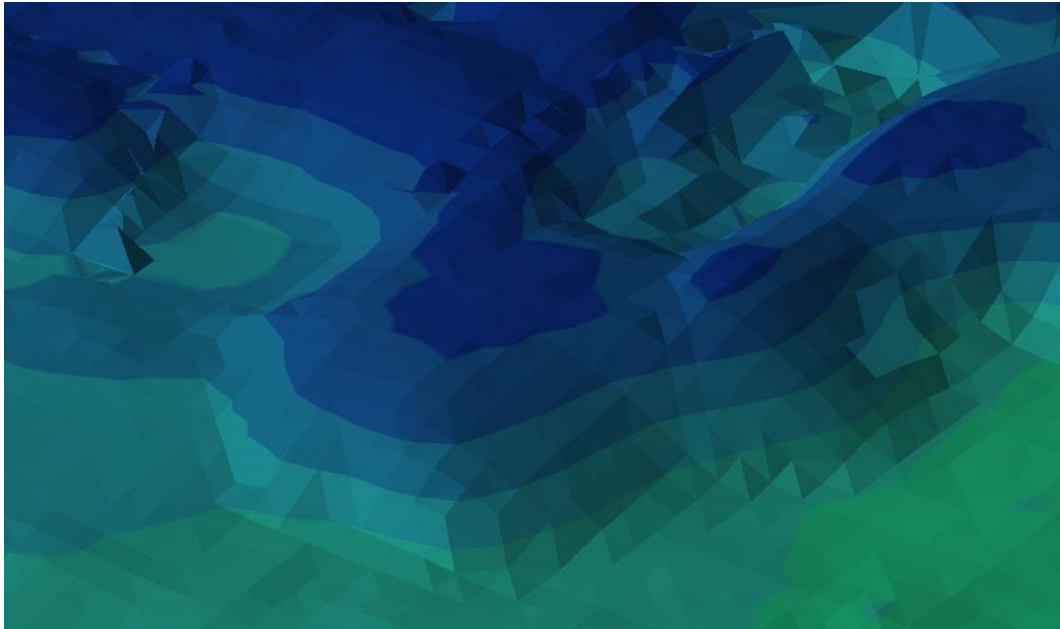
Abstract

Modern hydrographic measurement technologies enable to obtain high-resolution spatial data with the measurement error of a few centimeters. Multibeam echosounder or bathymetric interferometer systems, with a wide view angle of 240°, enable to get high density data of the depth distribution, ensuring 100% coverage of the water area. These parameters allow to produce high quality digital seabottom models. Such models consist of extremely large amount of data, what makes the process of their construction time- and labour-consuming and requires a lot of indirect procedures related to

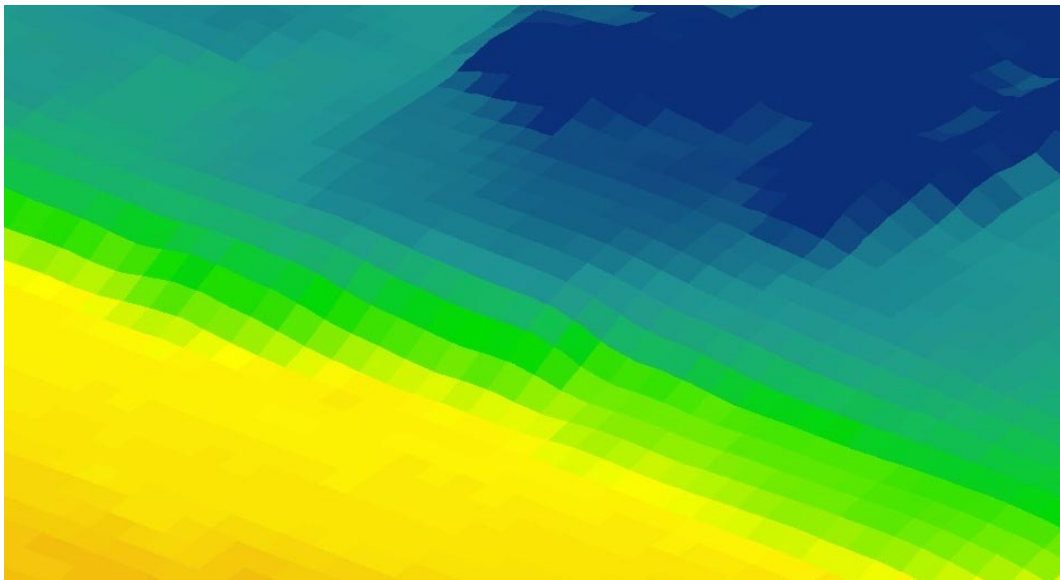
processing and data reduction. For the purpose of obtaining a generalized visualization of the seabottom, the view from the singlebeam echosounder is sufficient. Properly planned measuring profiles ensure sufficient data for building a surface that allows for a full, but generalized interpretation of the depth distribution of the studied water area. This paper presents a comparative analysis of two digital seabottom models constructed of the data recorded by two different hydrographic systems: multibeam and singlebeam echosounder. The subject of the analysis is the data coverage of the bottom and its impact on the entire model of the surface.

mgr inż. Izabela Bodus-Olkowska
i.olkowska@am.szczecin.pl

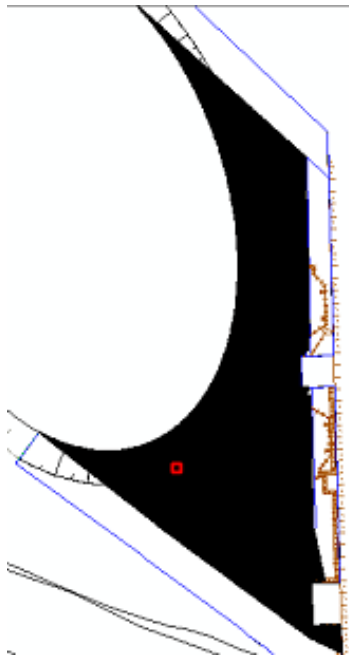
mgr inż. Marta Włodarczyk-Sielicka
m.wlodarczyk@am.szczecin.pl



Rys. 2. Przykład NMD opartego na TIN

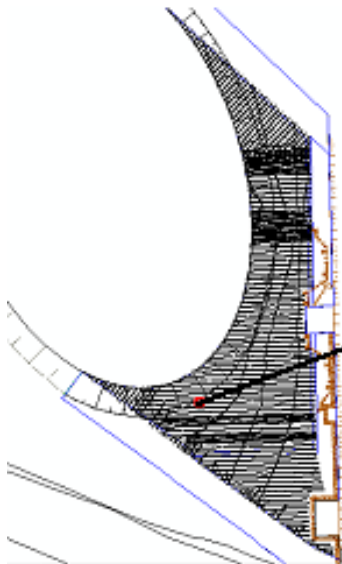


Rys. 3. Przykład NMD opartego na GRID



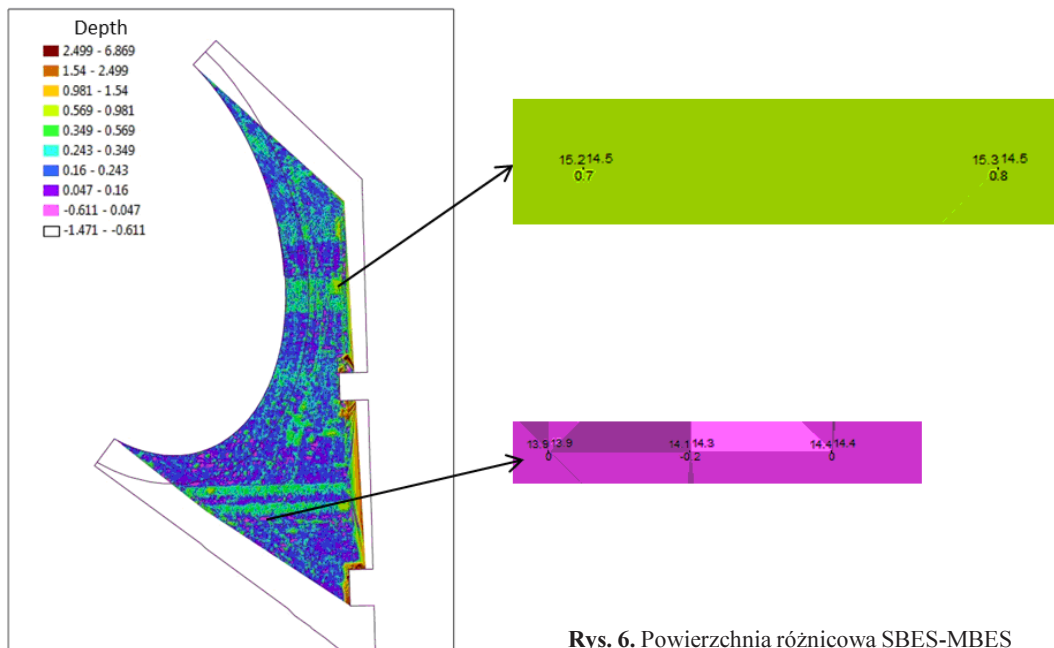
15.1	15.2	15.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
15.1	15.2	15.2	15.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
15.2	15.2	15.1	15.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15.1	15.1	15	15.1	15	15	15	15	15	15	15
15.2	15.2	15.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15
15.2	15.2	15.2	15.1	15	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15.1	15	15	15	15	15	14.9	14	14
15.2	15.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	14.9	14.9	14.9	14
15.2	15.1	15	15.1	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	14.9	14.9	15	15
15.2	15.1	15.1	15	15	15.1	15.1	15.1	15	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	14.9	15
15.1	15.1	15.1	15	14.9	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	15	14.9	15
15.1	15.1	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15.1	15	15	15	15	15	15	14.9	15	15	15
15	15	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
14.9	14.9	14.9	15	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
14.9	14.9	14.9	15	15	15	15.1	15	15	15	15	15	15.1	15.1	15	15.1	15.1	15.1	15	15
14.9	14.9	14.9	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15.1	15	15.1	15.1	15	15	15	15
14.9	14.8	14.9	14.9	15	15	15	15	15	15	15	15.1	15.1	15	15.1	15	15.1	15.1	15	15
14.7	14.8	14.8	14.9	14.9	14.9	15	15	15	15	15	15.1	15.1	15.1	15	15.1	15.1	15.1	15	15
14.7	14.7	14.9	14.9	14.9	15	14.9	15	15	15	15	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15

Rys. 4. Pokrycie akwenu danymi z systemu MBES

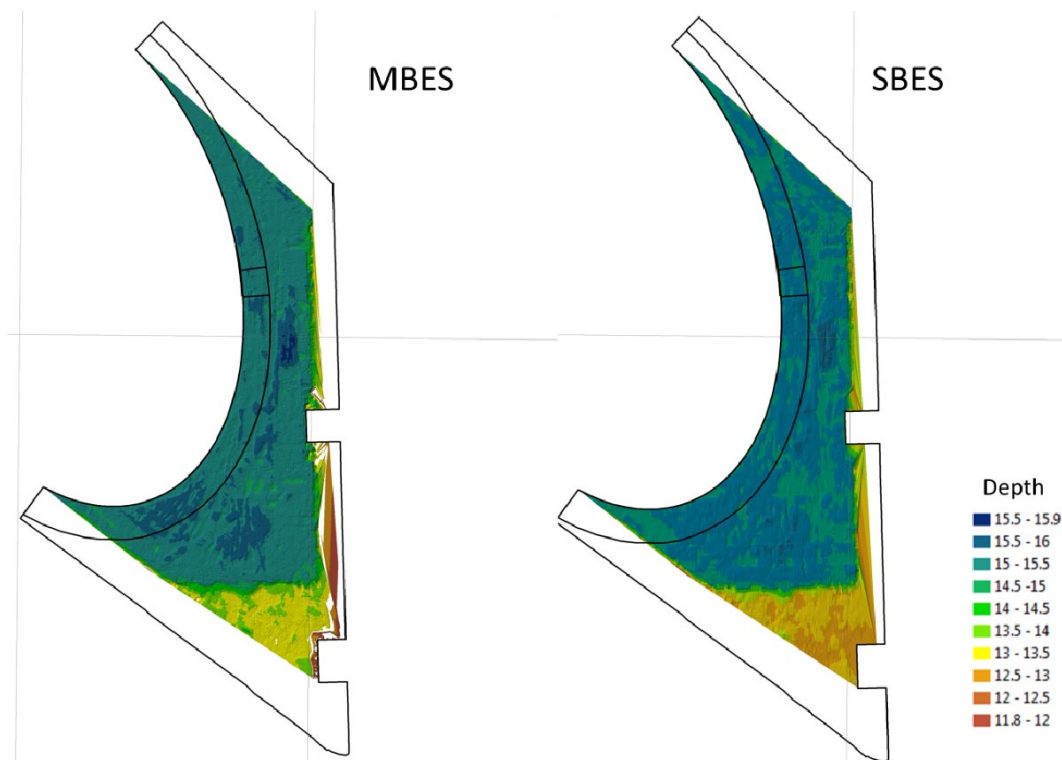


15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15					
15.3	15.3	15.3	15.3	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2			
15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15

Rys. 5. Pokrycie akwenu danymi z systemu SBES



Rys. 6. Powierzchnia różnicowa SBES-MBES



Rys. 7. Porównanie wizualizacji NMD zbudowanego na podstawie danych pozyskanych za pomocą systemu MBES i SBES