

Politechnika Gdańska
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa

Rozprawa doktorska
AKUSTYCZNE ZOBRAZOWANIE MORSKICH OSADÓW DENNYCH

mgr inż. Wojciech Szymczak

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Kozaczka



Spis treści

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | WPROWADZENIE | 8 |
| 2 | PRZEGLĄD METOD BADAŃ PODWODNYCH Z WYKORZYSTANIEM FAL AKUSTYCZNYCH | 11 |
| 3 | PARAMETRYCZNE ŹRÓDŁA FAL AKUSTYCZNYCH | 14 |
| 3.1 | RÓWNANIE HYDROAKUSTYKI NIELINIOWEJ | 15 |
| 3.2 | PRĘDKOŚĆ, TŁUMIENIE ORAZ ZMIANA KSZTAŁTU FALI O DUŻEJ AMPLITUDZIE | 17 |
| 3.3 | NIELINIOWE ODDZIAŁYWANIE FAL AKUSTYCZNYCH | 23 |
| 4 | MODEL TEORETYCZNY WNIKANIA WIĄZKI PARAMETRYCZNEJ W DNO MORSKIE | 27 |
| 4.1 | ODBICIE ORAZ TRANSMISJA FALI PŁASKIEJ DO OSADÓW – NA PODSTAWIE MODELU PŁYNÓW | 33 |
| 4.2 | ROZPRASZANIE DŹWIĘKU NA DNIE | 41 |
| 4.3 | RÓWNIE SONAROWE | 47 |
| 4.4 | STRUKTURA ECHA SYGNAŁU ODBIERANEGO PRZEZ ECHOSONDĘ JEDNOWIĄZKOWĄ | 50 |
| 4.4.1 | <i>Padanie impulsu sondującego wzdłuż normalnej do powierzchni dna – echosonda jednowiązkowa ...</i> | <i>50</i> |
| 4.4.2 | <i>Padanie impulsu sondującego pod kątem do powierzchni dna – echosonda wielowiązkowa.....</i> | <i>53</i> |
| 4.5 | GEOFIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI OSADÓW DENNYCH..... | 55 |
| 5 | METODYKA POMIARÓW W WARUNKACH LABORATORYJNYCH ORAZ RZECZYWISTYCH | 62 |
| 5.1 | CZYNNIKI DECYDUJĄCE O DOKŁADNOŚCI POMIARÓW W WARUNKACH RZECZYWISTYCH | 62 |
| 5.1.1 | <i>Echosonda parametryczna – procedury kalibracyjne.....</i> | <i>64</i> |
| 5.1.2 | <i>Echosonda wielowiązkowa – procedury kalibracyjne</i> | <i>67</i> |
| 5.1.3 | <i>Sonar boczny – procedury kalibracyjne</i> | <i>69</i> |
| 5.1.4 | <i>Refrakcja wiązki akustycznej.....</i> | <i>70</i> |
| 5.1.5 | <i>Czujnik ruchu</i> | <i>75</i> |
| 5.2 | BADANIA LABORATORYJNE..... | 79 |
| 5.2.1 | <i>Konfiguracja stanowiska pomiarowego.....</i> | <i>79</i> |
| 5.2.2 | <i>Pomiar charakterystyki kierunkowej.....</i> | <i>84</i> |
| 5.2.3 | <i>Zmiana ciśnienia oraz kształtu impulsu sondującego w zależności od odległości.....</i> | <i>91</i> |
| 5.2.4 | <i>Badanie właściwości akustycznych osadów.....</i> | <i>96</i> |
| 5.2.5 | <i>Pomiar rozdzielczości wgłębnej.....</i> | <i>104</i> |
| 5.3 | BADANIA W WARUNKACH NATURALNYCH NA JEDNOSTCE BADAWCZEJ S/Y WINDSPEEL I S/Y FREIJA | 116 |
| 5.3.1 | <i>Opis stanowiska pomiarowego</i> | <i>116</i> |
| 5.3.2 | <i>Podsystem nawigacyjny</i> | <i>119</i> |
| 5.3.3 | <i>Opis podsystemu zasilania</i> | <i>123</i> |
| 6 | PREZENTACJA WYNIKÓW BADAŃ – ANALIZA I INTERPRETACJA | 125 |
| 6.1 | ODWZOROWANIE GÓRNEJ WARSTWY OSADÓW DENNYCH | 126 |



| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2 | LOKALIZACJA ZJAWISKA NAGŁEJ ZMIANY PENETRACJI OSADÓW DENNYCH..... | 141 |
| 6.3 | WRAKI | 147 |
| 6.4 | ZOBRAZOWANIA DNA ZATOKI GDAŃSKIEJ PRZY WYKORZYSTANIU ECHOSONDY WIELOWIĄZKOWEJ..... | 149 |
| 6.5 | ZOBRAZOWANIA DNA ZATOKI GDAŃSKIEJ PRZY WYKORZYSTANIU SONARU BOCZNEGO | 153 |
| 6.6 | WYNIKI PREZENTUJĄCE MOŻLIWOŚCI LOKALIZACJI OBIEKTÓW ZAKOPANYCH POD DNEM..... | 155 |
| 7 | METODA KLASYFIKACJI OSADÓW DENNYCH NA PODSTAWIE ZAREJESTROWANYCH SYGNAŁÓW..... | 163 |
| 7.1 | AKWEN POMIAROWY UŻYWANY PODCZAS PROCESU AUTOMATYCZNEJ KLASYFIKACJI OSADÓW | 169 |
| 7.2 | OPIS METOD PARAMETRYZACJI WYNIKÓW DLA ECHOSONDY PARAMETRYCZNEJ..... | 171 |
| 7.3 | OPIS METOD PARAMETRYZACJI WYNIKÓW DLA SONARU BOCZNEGO | 181 |
| 7.4 | OPIS METOD PARAMETRYZACJI WYNIKÓW DLA ECHOSONDY WIELOWIĄZKOWEJ..... | 185 |
| 7.5 | WYNIKI KLASYFIKACJI..... | 188 |
| 8 | ZAKOŃCZENIE | 190 |

Wykaz ważniejszych oznaczeń

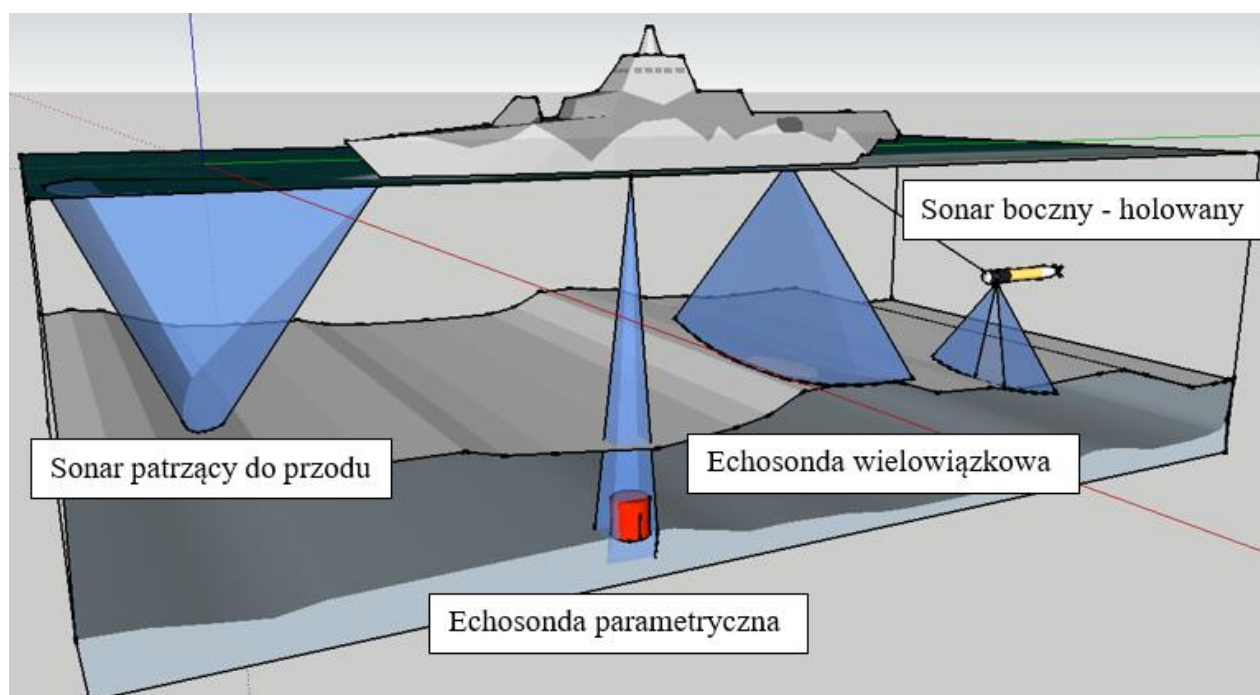
| Oznaczenie | Opis |
|------------|--|
| a | promień przetwornika kołowego |
| A | adiabatyczny moduł sprężystości objętościowej |
| b | współczynnik dyssypacyjności ośrodka |
| B | adiabatyczny nieliniowy moduł sprężystości objętościowej |
| B/A | nieliniowy parametr ośrodka |
| c | prędkość fazowa fali |
| c_0 | prędkość rozchodzenia się fali akustycznej o nieskończonej małej amplitudzie |
| c' | prędkość lokalna fali |
| c_l | prędkość fali podłużnej o małej amplitudzie w ciałach stałych |
| d | ogniskowa |
| f | częstotliwość |
| I | natężenie impulsu odbitego |
| I_i | natężenie impulsu rozproszonego na powierzchni dna |
| I_v | natężenie impulsu rozproszonego na w objętości |
| k | liczba falowa |
| M | akustyczna liczba Macha |
| M_z | średni rozmiar ziarna |
| p' | ciśnienie fali sprężystej |

| | |
|-----------------|--|
| p | chwilowa wartość ciśnienia |
| p_o | amplituda ciśnienia w pobliżu źródła fali |
| p_i | ciśnienie i-tej harmonicznej fali |
| p'_1 i p'_2 | amplitudy ciśnienia pierwszej i drugiej harmonicznej |
| q_1 i q_2 | zespolone amplitudy ciśnienia |
| r | współrzędna zgodna z kierunkiem rozchodzenia się fali |
| R_o | odległość Rayleigh'a dla fali pierwotnej |
| Re_a | akustyczna liczba Reynoldsa |
| R_{12} | współczynnik odbicia |
| S | zasolenia wody morskiej |
| t | czas |
| T | temperatura bezwzględna |
| T_{12} | współczynnik załamania |
| v_o | amplituda prędkości drgań źródła |
| x i y | kierunki prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali |
| z | kierunek rozchodzenia się fali |
| x_1, y_1, z_1 | współrzędne w układzie Lagrange'a |
| z_{kr} | odległość krytyczna |
| z_N | odległość utraty ciągłości fali |
| Z | impedancja akustyczna |
| α | współczynnik tłumienia fali o dużej amplitudzie |

| | |
|--------------------------|---|
| α_1 i α_2 | współczynnik tłumienia fali o nieskończenie małej amplitudzie i częstości kątovej |
| α_o | współczynnik tłumienia fali o nieskończenie małej amplitudzie |
| ε | współczynnik nieliniowości ośrodka |
| ρ | chwilowa gęstość ośrodka |
| ρ_0 | gęstość ośrodka niezaburzonego |
| ρ' | zaburzenie gęstości ośrodka |
| ρ_1 i ρ_2 | gęstość wody oraz osadów |
| u_i, u_r, u_t | składowe prędkości cząstek: fali padającej, odbitej i załamanej |
| u_{zi}, u_{zr}, u_{zt} | składowe prędkości cząstek: fali padającej, odbitej i załamanej wzdłuż normalnej |
| σ | bezwymiarowa odległość od źródła fali |
| σ_r | rozpraszanie na nierównościach |
| σ_v | rozpraszanie objętościowe |
| θ_1 i θ_2 | kąt odbicia i załamania |

1 Wprowadzenie

Zróznicowanie urządzeń echolokacyjnych umożliwia pozyskiwanie różnego rodzaju informacji o środowisku morskim. Podstawowe informacje batymetryczne dostarcza echosonda pracująca na częstotliwościach (50-200 kHz). Systemem pomiarowym do pozyskiwania informacji batymetrycznych dla celów wytwarzania map oraz precyzyjnego zobrazowania obiektów znajdujących się na dnie jest echosonda wielowiązkowa. W przypadku, gdy ważną cechą badań jest szybkie skanowanie dna w celu poszukiwania np. wraków należy zastosować sonar boczny.



Rysunek 1-1 Wizualizacja pracy różnych typów urządzeń echolokacyjnych.

Badania zalegających na dnie warstw geologicznych osadów dennych przy pomocy echosond, których anteny charakteryzowały się компактowymi wymiarami zapoczątkowane zostały z chwilą wprowadzenia do użycia echosond parametrycznych pracujących w oparciu o oddziaływanie nieliniowe równoległych wiązek akustycznych o dużym natężeniu fali. Miało to miejsce pod koniec dwudziestego wieku. Zastosowanie echosond parametrycznych oraz sonarów parametrycznych pozwala na bezinwazyjne badania górnej warstwy dna morskiego, czyli między innymi osadów dennych. Badania struktury geologicznej wymagają urządzeń echolokacyjnych umożliwiających nadźwiękawianie dna przy użyciu impulsów o małej częstotliwości (od 3 do 20 kHz), których właściwości pozwalają na penetrację warstw na głębokości do pięćdziesięciu metrów, w zależności od impedancji akustycznej, a co za tym idzie współczynnika odbicia materiału.

Autor rozprawy uczestniczył w kilku projektach badawczych związanych z badaniem osadów dennych metodami akustycznymi. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do sformułowania hipotezy badawczej, że metody akustyczne dają możliwość bezinwazyjnej klasyfikacji osadów dennych. Hipoteza zakłada ścisły związek pomiędzy wynikami symulacji górnej warstwy struktury osadów dennych w oparciu o informację geologiczną (zebrane próbki osadów dennych), wynikami pozyskanymi podczas badań laboratoryjnych oraz pomiarami w warunkach rzeczywistych.

Przedstawiana rozprawa doktorska *Akustyczne zobrazowanie morskich osadów dennych* zaprezentuje metody zobrazowania struktury osadów dennych oraz będzie ściśle związana z wynikami pozyskanymi z sondowania akwenu echosondą parametryczną SES-2000 Standard oraz echosondą wielowiązkową EM3002.

Prace prowadzone dla udokumentowania hipotezy badawczej składały się z kilku etapów, których celami było:

- wykonanie badań teoretycznych dotyczących propagacji fali sprężystej w wodzie morskiej, zwłaszcza na granicy woda – osady oraz wnikania wiązki akustycznej w dno;
- wykonanie badań doświadczalnych w warunkach laboratoryjnych dla opracowania metody oceny parametrów akustycznych różnych rodzajów osadów dennych;
- wykonanie badań dna w warunkach morskich przy użyciu różnego rodzaju urządzeń hydroakustycznych, echosondy wielowiązkowej, sonaru bocznego, a przede wszystkim echosondy parametrycznej;
- analiza wyników badań w warunkach naturalnych z wykorzystaniem własnego oryginalnego oprogramowania;
- próba klasyfikacji osadów dennych dna Zatoki Gdańskiej na podstawie wykonanych pomiarów z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania.

Pierwszym etapem pracy było skalibrowanie układu pomiarowego w warunkach laboratoryjnych, tzn. na basenie modelowym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Skierowanie głównej wiązki anteny równoległe do najdłuższego wymiaru basenu umożliwiło pomiar impulsów sondujących, charakterystyki kierunkowej fal o częstotliwości pierwotnej oraz różnicowej. Dodatkowo specjalnie przygotowane stelaże na osady zebrane podczas prób morskich umożliwiły ocenę rozdzielczości wglębnej oraz charakter pozyskiwanych echogramów w zależności od impedancji akustycznej materiału oraz odległości między kolejnymi warstwami osadów. Docelowym zadaniem było wykorzystanie urządzenia w warunkach naturalnych, dlatego przeprowadzone pomiary zostały umiejscowione na akwenu Zatoki Puckiej oraz innym wybranym fragmencie Zatoki Gdańskiej. Badania morskie zostały podzielone na dwa etapy: (1) rozpoznanie



działania układu w zależności od typu materiału zalegającego w osadach dennych, (2) analiza wyników, która umożliwiła scharakteryzowanie pięciu zróżnicowanych obszarów, gdzie sondowanie wносиło do bazy danych zróżnicowane ze względu na strukturę warstw oraz głębokość penetracji wyniki. Postawiono tezę, że metody akustyczne dają możliwość bezinwazyjnej klasyfikacji osadów dennych. Hipoteza zakłada ścisły związek pomiędzy wynikami symulacji echogramów w oparciu o informację geologiczną (zebrane próbki osadów dennych), wynikami pozyskanymi podczas badań laboratoryjnych oraz pomiarami w warunkach rzeczywistych. W pracy zaprezentowana została podstawowa teoria związana z nieliniowymi właściwościami ośrodka, opis oraz analiza wyników badań laboratoryjnych, pomiarów *in situ* (prezentacja charakterystycznych echogramów z wybranych rejonów Zatoki Gdańskiej, w tym Zatoki Puckiej) oraz oprogramowanie wraz z zaimplementowanymi metodami wizualizacji oraz klasyfikacji osadów dennych z wybranego akwenu pomiarowego.

2 Przegląd metod badań podwodnych z wykorzystaniem fal akustycznych

Badania dna morskiego metodami akustycznymi można prowadzić poprzez:

- stosowanie echosond wielowiązkowych;
- stosowanie sonarów bocznych;
- stosowanie echosond parametrycznych

Dwa pierwsze sposoby ze względu na swoje możliwości techniczne nie nadają się do badania struktury dna morskiego, a w szczególności uwarstwienia osadów dennych, z uwagi na duże tłumienie fal o wielkiej częstotliwości – powyżej 100 kHz. Fale te nie wnikają w struktury denne ponieważ ich tłumienie w osadach jest około kilka tysięcy razy większe niż dla fal tej samej częstotliwości w wodzie.

Z tego powodu zastosowanie fal o małej częstotliwości, np. poniżej 20 kHz, jest zdecydowanie bardziej efektywne w przypadku sondowania dna morza. Jednak jeśli obniżymy częstotliwość fali sondującej do bardzo małej wartości, np. 2,5 kHz, to możliwość penetracji dna morza z pewnością nie przekroczy głębokości 100 m. Drastyczne obniżenie częstotliwości fali sondującej zdecydowanie obniży rozdzielczość zgodną z kierunkiem wektora falowego, czyli tzw. rozdzielczość wgłębną. Nie bez znaczenia jest konstrukcja anteny promieniującej fale, której wymiary w przypadku sonaru klasycznego są ściśle związane z częstotliwością nośną impulsów sondujących.

Zatem jak znaleźć rozwiązanie, które łączyłoby dwa podstawowe wymagania stawiane urządzeniom do sondowania dna morskiego, mianowicie: zachowanie wystarczającej rozdzielczości przy dostatecznie dużej głębokości wnikania wiązki. Pierwsze wymaganie można zrealizować stosując krótkie impulsy o szerokim paśmie częstotliwości, co w przypadku wykorzystania klasycznych przetworników wiąże się z zastosowaniem źródeł o wielkiej częstotliwości tym samym o dużych stratach energetycznych w trakcie rozchodzenia się fal w osadach. Z kolei drugie wymaganie wiąże się z zastosowaniem źródeł o małej częstotliwości, aby osiągnąć małe tłumienie fali i możliwość głębokiej penetracji fali w głąb dna. Sondowanie dna wymaga przede wszystkim dużej rozdzielczości wertykalnej (wzdłuż osi wiązki), aby można było określić strukturę warstwową dna. Również rozdzielczość horyzontalna jest ważna, struktura dna morskiego jest bowiem formą przestrzenną i jej kątowe zmiany nie są bez znaczenia. Spełnienie tych wymagań oznacza powrót do warunku wykorzystania fal o wielkich częstotliwościach.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, nie jest możliwe na gruncie klasycznej teorii wytwarzania fal przez układy promieniujące spełnienie równocześnie warunków małego tłumienia

fali i dużej rozdzielczości przestrzennej. Optymalnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie rozwiązań bazujących na zjawiskach towarzyszących nieliniowej propagacji fal o dużym natężeniu. W przypadku zastosowania źródła wytwarzającego dwie kolinearne wiązki akustyczne, których osie się pokrywają w obszarze objętym ich działaniem, zachodzą opisane dalej zjawiska. Fale bezpośrednio promieniowane, zwane falami pierwotnymi, w wyniku dużej amplitudy powodują modulacje własności środowiska, w szczególności jego gęstości, dlatego równanie stanu termodynamicznego przestaje być liniowym związkiem łączącym ciśnienie z gęstością. Należy zastosować nowe, już nieliniowe równanie stanu, które reprezentowane jest przez dwa czynniki (stałe materiałowe), jakimi są liniowy (A) i nieliniowy (B) moduł sprężystości objętościowej ośrodka. Sprawia to, że druga fala również o dużym natężeniu porusza się w ośrodku o zmiennych czasowo i przestrzennie właściwościach fizycznych. W wyniku tego zjawiska powstają nowe fale – fale wtórne - o częstotliwościach równych wielokrotności, sumie oraz różnicy częstotliwości fal pierwotnych.

Wytwarzanie fali różnicy częstotliwości jest podstawą działania źródeł parametrycznych, ponieważ częstotliwość fali jest stosunkowo mała, zatem nadaje się do zastosowania w badaniach dna morskiego. Tłumienie fali w dnie jest znacznie mniejsze w odniesieniu do fal pierwotnych. Ponadto fala ta wytwarzana jest w elemencie objętości określonym obszarem oddziaływania fal pierwotnych o dużym natężeniu, tym samym posiada charakterystykę kierunkową, której rozwartość jest równa kątowej rozwartości charakterystyki promieniowania fal pierwotnych, tylko w tym obszarze zachodzi bowiem parametryczne oddziaływanie. Ponadto wiązka fali różnicy częstotliwości nie posiada listków bocznych, co wynika z faktu, że źródło tej fali ma charakter objętościowy, a nie powierzchniowy.

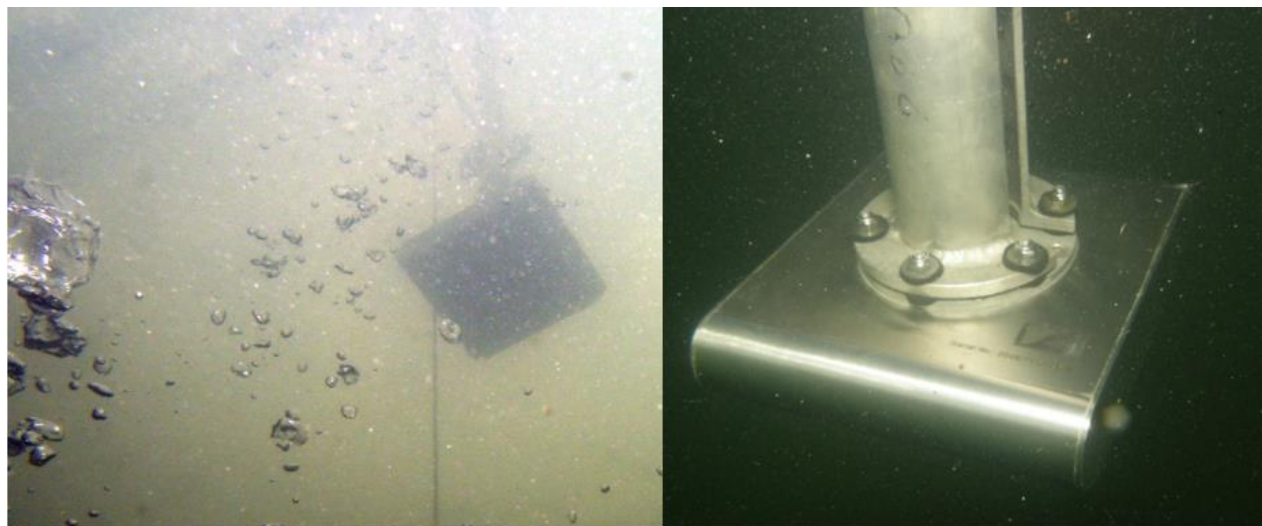
Drugim czynnikiem ważnym w badaniu dna morskiego, jak wcześniej podkreślono, jest rozdzielczość wglębna, która równa się połowie czasu trwania impulsu sondującego pomnożonej przez prędkość rozchodzenia się fali. Ta właściwość fali pierwotnej przechodzi na falę różnicy częstotliwości, a zatem rozdzielczość metryczna wzdłuż osi wiązki parametrycznej jest wielokrotnie większa niż by to wynikało z częstotliwości fali różnicowej [1,2].

Te dwie korzystne cechy stawiają źródła parametryczne (sonary parametryczne) w pierwszym rzędzie możliwych do zastosowania narzędzi do skutecznego sondowania dna morza. Dodatkową zaletą układu nadawczo-odbiorczego są stosunkowo małe wymiary, więc i masa, a także energia potrzebna do zasilania. Pozwala to zastosować sonar parametryczny na małych mobilnych jednostkach, co między innymi obniża koszty eksploatacji związane z obserwacją określonego akwenu.

Pewnym ograniczeniem zastosowania źródeł parametrycznych jest ich niska sprawność energetyczna wynikająca z faktu małych zmian własności materiałowych środowiska zawartych w stosunku wspomnianych wcześniej stałych B/A. Niemniej będąc świadomym tego ograniczenia, można rekomendować sonary parametryczne jako dobre jakościowo nowe urządzenie do badania struktury dna morza niezależnie od głębokości akwenu, w szczególności o dużej użyteczności w morzach płytkich.

3 Parametryczne źródła fal akustycznych

Zastosowanie nieliniowych zjawisk akustycznych w ośrodku wodnym łącznie się z wytworzeniem fali o dużej amplitudzie uznawano za uciążliwe ze względu na ograniczenia technologiczne utrudniające budowę anten nadawczych dużej mocy (zob. Rysunek 3-1) pracujących na wielkich częstotliwościach, wypromieniowujących energię akustyczną o gęstości mocy większej od kilku watów na centymetr kwadratowy.



Rysunek 3-1 Przetwornik echosondy parametrycznej SES-2000 standard

Badania nad wytwarzaniem przez interakcję między dwiema falami akustycznymi o skończonych amplitudach fal sumy i różnicy częstotliwości zaproponowane zostało przez Petera Westervelta [1, 2], który w 1963 roku opublikował w „The Journal of the Acoustical Society of America” artykuł pod tytułem *Parametric Acoustic Array*. W szczególności interesująca była fala kierunkowa o różnicy częstotliwości zaproponowana przez Westervelta, która została porównana do tzw. objętościowego źródła nadawczego i nazwana parametryczną matrycą akustyczną. Ze względu na korzystne właściwości charakterystyki kierunkowej źródła tego typu znalazły zastosowanie w akustyce podwodnej, w szczególności do badania dna morskiego. Wieloletnie badania związane z antenami parametrycznymi doprowadziły do ich zastosowania w komercyjnych systemach echolokacyjnych. Przykładem wczesnych urządzeń może być antena parametryczna opisana przez Bjørnø [3, 4], próby użycia anten parametrycznych w komunikacji podwodnej [5], natomiast aktualne rozwiązania zmierzające w kierunku szerokiego zastosowania wielowiązkowych systemów parametrycznych prezentowane są np. przez firmę Innomar [6, 7].

3.1 Równanie hydroakustyki nieliniowej

Rozchodzenie się zaburzeń o dużej amplitudzie w cieczech opisuje się za pomocą równania, które wyprowadza się, korzystając z równań: zachowania masy, pędy, entropii oraz termodynamicznego równania stanu [8, 9, 10]. Równanie hydroakustyki nieliniowej o postaci 3.1 opisuje rozchodzenie się fali w przestrzeni trójwymiarowej z uwzględnieniem zniekształceń nieliniowych i procesu rozpraszania energii podczas rozprzestrzeniania się w ośrodku.

$$\Delta p' - \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \frac{b}{\rho_o c_o^2} \frac{\partial}{\partial t} \Delta p' = \frac{1}{\rho_o c_o^4} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} \right)^2 - \frac{B}{2A \rho_o c_o^4} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial t^2} - \frac{\rho_o}{2} \Delta v^2 - p_o \bar{v} \Delta \bar{v} \quad (3.1)$$

gdzie:

p_o – amplituda ciśnienia w pobliżu źródła;

t – czas;

b – współczynnik dyssypatywności ośrodka;

p' - ciśnienie we współrzędnych związanych z czołem fali;

c_o – prędkość rozchodzenia się fali akustycznej o nieskończenie małej amplitudzie

B - adiabatyczny nieliniowy moduł sprężystości objętościowej;

A - bezwymiarowy parametr absorpcji;

\bar{v} - prędkość drgań;

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ – operator Laplace'a;}$$

Powszechnie w modelowaniu dla potrzeb hydroakustyki stosowane są równania będące uproszczeniem równania akustyki nieliniowej. Konieczność stosowania uproszczonych form wynika z faktu, że równanie w pełnej postaci nie znalazło dotąd rozwiązania analitycznego. Analogiczne równania do postaci nieliniowego równania falowego, jednak z pominięciem strat dyssypacyjnych wyprowadzone zostały przez C. Eckarta [107] oraz P.J. Westervelta [2]. Uproszczona postać równania akustyki nieliniowej znana jest w literaturze jako równanie Westervelta, do którego rozwiązania stosuje się metodę kolejnych przybliżeń:

$$\Delta p' - \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{b}{\rho_o c_o^2} \frac{\partial}{\partial t} \Delta p' = - \frac{\varepsilon}{\rho_o c_o^2} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

gdzie:

ε - współczynnik nieliniowości ośrodka; $\varepsilon = 1 + \frac{B}{2A}$

Najczęściej stosowanym równaniem do modelowania nieliniowego rozchodzenia się fal sprężystych jest równanie znane w literaturze jako KZK lub równanie Chochłowa-Zabołotskiej-Kuźniecowa [108, 109].

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial p'}{\partial z_1} - \frac{B/A+2}{2\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} \right] = \frac{c_0^2}{2} \left(\frac{\partial^2 p'}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y_1^2} \right) \quad (3.3)$$

gdzie:

x_1 i y_1 – współrzędne w układzie Lagrange'a

Równanie to pozwoliło na znaczny postęp w modelowaniu zjawiska wnikania fal o dużym natężeniu w ośrodek nieliniowy oraz jest niezwykle przydatne do analizy zjawiska, gdyż poszczególne człony powiązać można oddzielnie z wpływem czynników oddziałujących na przebieg zjawiska rozchodzenia się fali o dużym natężeniu, tj. nieliniowości, dyssypacji i dyfrakcji.

Nie znaleziono do tej pory analitycznej postaci rozwiązania tego równania, jednak dzięki opracowanemu przez norweskich naukowców rozwiązaniu numerycznemu znanemu pod nazwą Bergen Code [110] jest ono powszechnie stosowane w badaniach modelowych.

Najprostszym modelem, który opisuje łącznie wpływ nieliniowości i dyssypacji na rozchodzenie się fali płaskiej jest równanie Burgersa. Jednym ze sposobów na wyprowadzenie tego równania jest zastosowanie analogicznego zabiegu jak przy wyprowadzeniu równania KZK, tzn. przedstawienie równania Westervelta w układzie współrzędnych związanym z poruszającym się czołem fali i przyjęcie założenia, że zmiany kształtu fali na drodze równej jej długości są niewielkie. Jednowymiarowe równanie Burgersa ma następującą postać:

$$\frac{\partial p'}{\partial z_1} - \frac{B/A+2}{2\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3.4)$$

gdzie:

z_1 – współrzędna w układzie Lagrange'a

Równanie to opisuje zmiany ciśnienia fali płaskiej o dużym natężeniu rozchodzącej się w ośrodku dyssypatywnym i nieliniowym. Posiada rozwiązanie analityczne i jest bardzo użyteczne w analizie zjawisk nieliniowych zachodzących wzdłuż osi wiązki akustycznej. Jedną z jego zalet jest brak ograniczeń ze względu na wartość akustycznej liczby Reynoldsa $Re_a = \frac{\rho_0 c_0 v_0}{b\omega}$

gdzie: ρ_0 oznacza gęstość ośrodka niezaburzonego, v_0 – prędkość drgań źródła fali pierwotnej, ω – częstość kątowa drgań.

Równanie (3.4) można zastosować zarówno do oceny przebiegu zjawiska rozchodzenia się fali w ośrodku o dużej lepkości, kiedy dominującą rolę odgrywa proces dyssypacji energii (mała liczba Reynoldsa $Re_a < 1$), jak też w sytuacji, gdy dominują efekty nieliniowe, tzn. liczba Reynoldsa przyjmuje duże wartości ($Re_a \gg 1$). Równanie Burgersa można otrzymać również z równania KZK. W tym przypadku przyjęcie założenia, że rozpatrywany jest przypadek fal płaskich, jest równoznaczne z pominięciem prawej strony równania uwzględniającej zmiany dyfrakcji w wiązce. Zapewne łatwość szacunkowej oceny zjawiska, jaką daje analityczne rozwiązanie równania, sprawiła, że stosowana jest niekiedy również uogólniona postać równania Burgersa [111, 112] rozszerzona na przypadek fali sferycznej lub cylindrycznej:

$$\frac{\partial p'}{\partial z_1} + \frac{n}{2z} p' - \frac{b}{2\rho_o c_o^3} p' \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} - \frac{B/A+2}{2\rho_o c_o^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = 0 \quad 3.5$$

gdzie:

z – kierunek rozchodzenia się fali;

n – wykładnik izentropy;

Równanie to jest przestrzennie jednowymiarowe, opisuje zjawisko nieliniowego zniekształcenia fali z uwzględnieniem rozbieżności sferycznej, gdy $n = 2$ i cylindrycznej, gdy $n = 1$, a dla $n = 0$ upraszcza się do postaci opisującej falę płaską.

3.2 Prędkość, tłumienie oraz zmiana kształtu fali o dużej amplitudzie

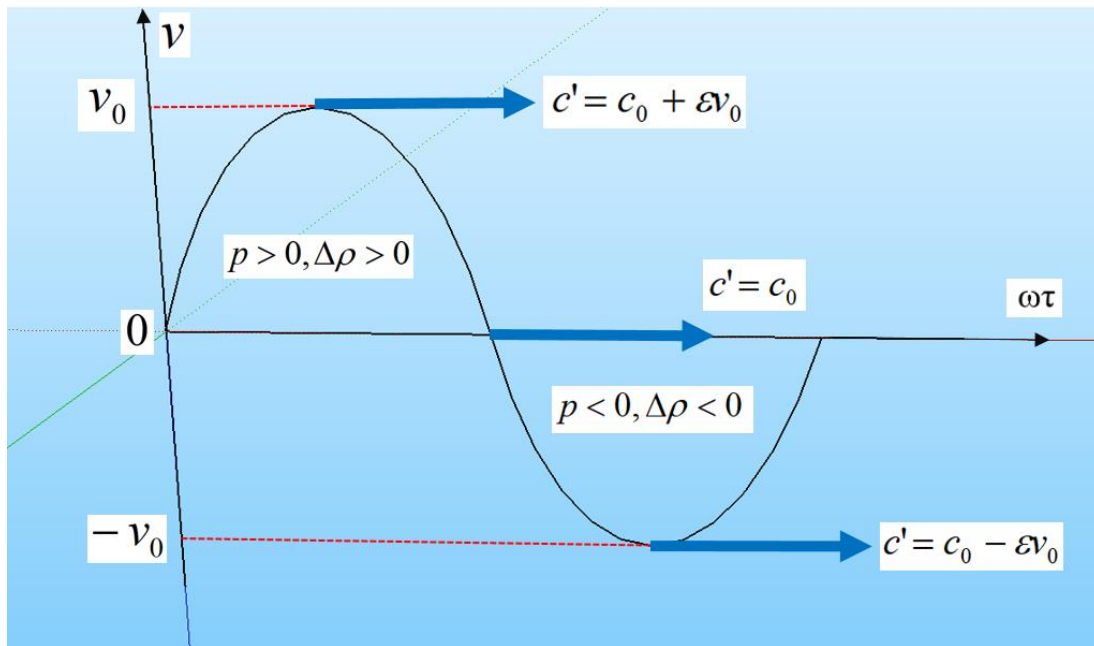
O charakterystykach przestrzennych źródeł fal o dużym natężeniu decydują parametry pracy źródła oraz właściwości ośrodka. Najistotniejsza jest amplituda fali promieniowanej, której poziom powinien zapewniać wytwarzanie wyższych harmonicznym oraz nie powodujący przekroczenia progu wywołującego zjawisko kawitacji przy przetworniku. Od niej głównie zależy wystąpienie efektu nieliniowego oddziaływania fali z ośrodkiem i jego intensywność. Natężenie fali, a nie wymiar źródła decyduje o właściwościach kierunkowych wyższych harmonicznym oraz o długości obszaru oddziaływań nieliniowych, które zachodzą tylko w obszarze o dużym natężeniu. O zasięgu rozchodzenia się fali o cechach nieliniowych obok tłumienia absorpcyjnego decyduje również tłumienie nieliniowe – straty energii fali pierwotnej związane z przekazywaniem energii do fal wtórnych. Powoduje to szybsze niż w przypadku fali o nieskończenie małej amplitudzie zanikanie fali pierwotnej, a jednocześnie wpływa na zmiany amplitudy fal wtórnych. W inicjującym



momencie w obszarze bezpośrednio przylegającym do powierzchni drgającej zwanym obszarem narastania zniekształcenia, kosztem energii fali pierwotnej powstają i rozwijają się fale harmoniczne (zob. Rysunek 3-2). W odległości większej niż odległość największego zniekształcenia fali w obszarze oddziaływań nieliniowych wyższe harmoniczne zanikają wolniej niż wynikałoby to z tłumienia absorpcyjnego. Jest to spowodowane dalszym (ale w znacznie mniejszym stopniu) przekazywaniem energii od fali pierwotnej.

Parametrem charakteryzującym nieliniowe właściwości ośrodka, do którego propagowana jest fala, warunkującym przebieg zjawiska rozchodzenia się fali o dużym natężeniu, określającym zniekształcenie nieliniowe, a więc skuteczność przekazywania energii fali pierwotnej do harmonicznych, jest nieliniowy parametr B/A [11]. Jedną z postaci definicji do wyznaczenia wartości parametru jest pomiar zmian prędkości fali spowodowany zmianą ciśnienia przy niezmienniej gęstości. Ciśnienie musi zmieniać się wystarczająco szybko, by spełnione były warunki przemiany izentropowej, co ma miejsce w przypadku rozchodzenia się fali sprężystej w wodzie.

Prędkość rozchodzenia się fali w dodatnim kierunku osi z w ośrodku bezstratnym o właściwościach nieliniowych jest prędkością lokalną, tzn. jej wartość zmienia się od punktu do punktu w obrębie każdego okresu i zależy od fazy. Dodatkowo na jej wartość mają wpływ stałe materiałowe środowiska decydujące o własnościach rozchodzenia się fal sprężystych, mianowicie: prędkość fali akustycznej o nieskończenie małej amplitudzie oraz nieliniowy parametr B/A . W obszarze sprężania fala rozchodzi się z prędkością większą od c_0 (większe ciśnienie wpływa na zwiększenie temperatury, a co za tym idzie – zwiększenie prędkości), natomiast w obszarze rozrzedzenia (sytuacja odwrotna) z prędkością mniejszą od c_0 . Zjawisko ma charakter kumulacyjny, powodując zmianę względnego położenia obszaru sprężania i rozrzedzania oraz ewolucję kształtu fali od sinusoidalnego do piłokształtnego (zob. Rysunek 3-3).



Rysunek 3-2 Prędkość rozchodzenia się fali sprężystej

Stopień zniekształcenia fali zależy od wielkości zawartych w iloczynie współczynnika nieliniowości ε i akustycznej liczby Reynoldsa Re_a :

$$\varepsilon Re_a = \left(\frac{B}{2A} + 1 \right) \frac{\rho_0 c_0 v_0}{b \omega} \quad (3.6)$$

Zatem oprócz właściwości nieliniowych wpływają na nią gęstość i właściwości dyssypatywne ośrodka oraz prędkość fali akustycznej. Ponadto o przebiegu decyduje druga grupa czynników określająca parametry pracy źródła fali, częstotliwość i prędkość drgań.

W pewnej odległości od źródła zmiana położenia wzajemnych współrzędnych największego i najmniejszego ciśnienia powoduje, że na czole fali pojawia się skok ciśnienia. Jest to odległość utraty ciągłości fali:

$$z_N = \frac{\rho_0 c_0^3}{\omega \varepsilon \rho_0} \quad (3.7)$$

Często w opisie zjawisk nieliniowych w celu określenia odległości od źródła stosuje się bezwymiarową współrzędną σ

$$\sigma = \frac{z}{z_N} = \frac{\varepsilon \omega \rho_0 z}{\rho_0 c_0^3} \quad (3.8)$$

Utrata ciągłości występuje jedynie w formalizmie matematycznym, gdy fala rozpatrywana jest w ośrodku bezstratnym. Pominięcie strat dyssypatywności w ośrodku rzeczywistym o małej

lepkości jest poprawne przy analizie fal o dużych amplitudach. Należy jednak brać pod uwagę fakt, że w miarę narastania zniekształcenia wzrasta pochodna ciśnienia na czole fali, rośnie więc tłumienie nieliniowe, umożliwiając powstanie nieciągłości. Wobec tego zniekształcenie narasta w dalszym ciągu aż do powstania fali piłokształtnej w odległości zwanej krytyczną. Odległość tę można znaleźć, obliczając czas potrzebny do tego, aby punkt czoła fali o fazie odpowiadającej największemu zagęszczeniu fali miał tę samą współrzędną, co punkt o fazie odpowiadającej najmniejszemu zagęszczeniu, więc przebył drogę równą połowie długości fali w układzie współrzędnych związanych z czołem fali. Względna prędkość przemieszczania się tych punktów wynosi $2\varepsilon\nu_0$. W tym samym czasie fala, której prędkość grupowa równa jest prędkości fazowej c_0 , przebywa drogę:

$$z_{kr} = c_0 t_{kr} = \frac{\lambda c_0}{4\varepsilon\nu_0} = \frac{\pi \rho_0 c_0^3}{2 \omega \varepsilon \rho_0} = \frac{\pi}{2} z_n \quad (3.9)$$

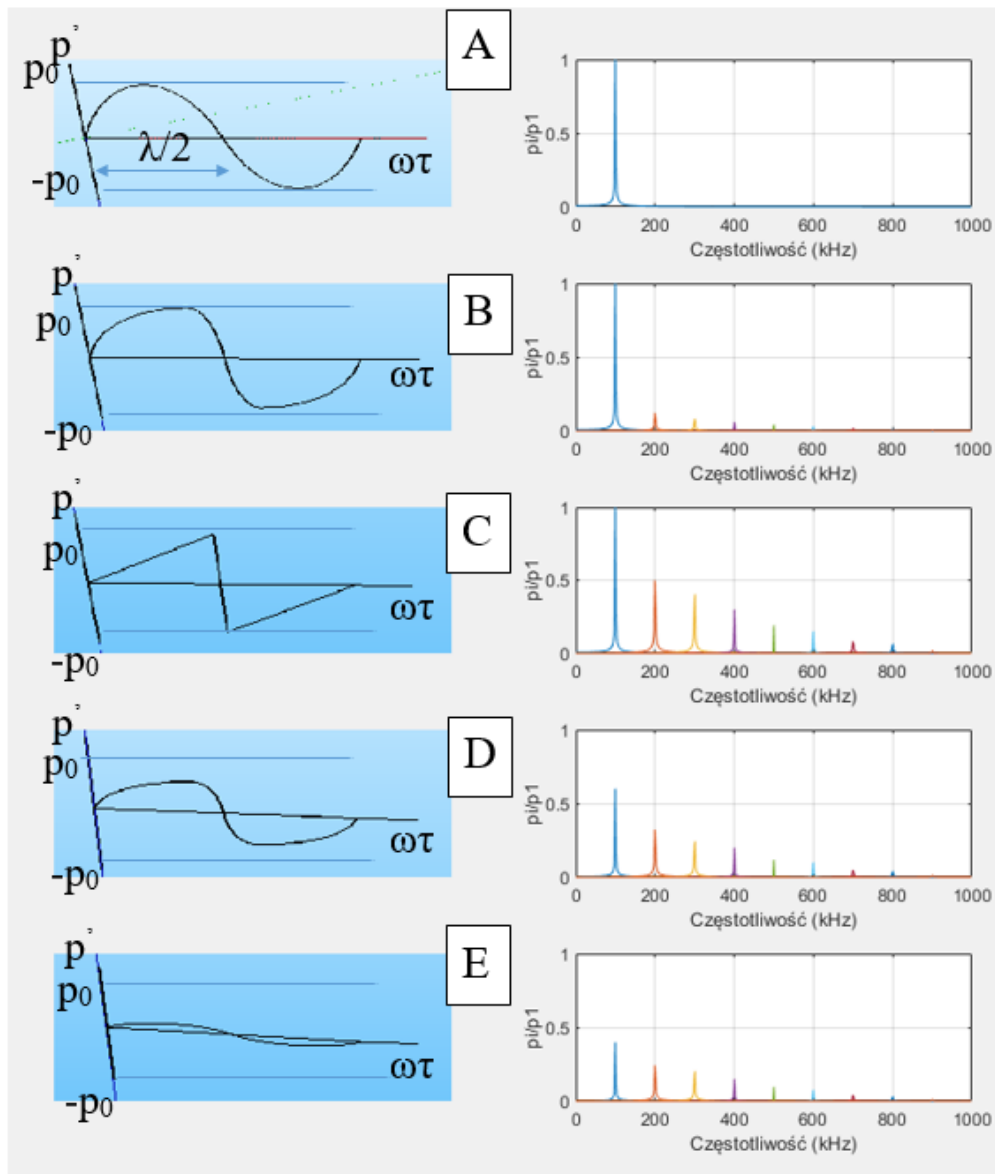
Odległość krytyczna jest funkcją długości fali. Czasami do oceny dynamiki zjawiska używana jest wielkość bezwymiarowej odległości krytycznej wyrażająca odległość krytyczną liczbą długości fali.

Jeżeli przyjmiemy, że zniekształcenie w odległości krytycznej jest największe i będziemy względem niego normować zniekształcenie w dowolnym punkcie, odwrotność bezwymiarowej odległości krytycznej będzie określała stopień zniekształcenia fali na przestrzeni długości fali:

$$\Delta = \frac{1}{N_{kr}} = \frac{4\varepsilon\nu_0}{c_0} = 4\varepsilon M \quad (3.10)$$

Stopień zniekształcenia fali zależy od nieliniowych właściwości ośrodka oraz od akustycznej liczby Macha (stosunek prędkości przepływu płynu w danym miejscu do prędkości dźwięku w tym płynie w tym samym miejscu). W cieczech nawet przy dużej liczbie Macha $\sim 10^{-3}$ zniekształcenie po przebyciu przez falę odległości równej długości fali nie przewyższa 1%. Stosunkowo słabe tłumienie fal sprężystych w cieczech o małej lepkości pozwala jednak na faktyczny wzrost zniekształcenia podczas rozchodzenia się i prowadzi do tworzenia fal zbliżonych do piłokształtnych.

W przypadku rozchodzenia się fali harmonicznej w wyniku nieliniowych oddziaływań widmo fali zmienia się w zależności od punktu, w którym fala jest obserwowana, a zawartość składowych harmonicznymi rośnie aż do punktu ustalenia się kształtu fali. Bogatsza struktura widma fali w porównaniu z podstawową falą wynika z przekazywania energii od fali pierwotnej do fali wtórnych będących wyższymi harmonicznymi (zob. Rysunek 3-4).



Rysunek 3-3 Zmiany kształtu i widma fali wraz ze zmianą odległości

Tabela 3-1 Opis zmian kształtu fali wraz ze zmianą odległości

| | |
|-----------------------------------|--|
| A , gdzie $\sigma = 0$ | Obszar przy przetworniku – fala jest wypromieniowywana do ośrodka |
| B , gdzie $0 < \sigma < 1$ | Efekty dyssypatywne (związane z lepkością i przewodnictwem cieplnym) są małe; dominuje tłumienie nieliniowe związane z przekazywaniem energii do harmonicznych |
| $\sigma = 1$ | Osiągnięcie punktu, w którym na czole fali pojawia się skok ciśnienia (fala nie jest trójkątna) |

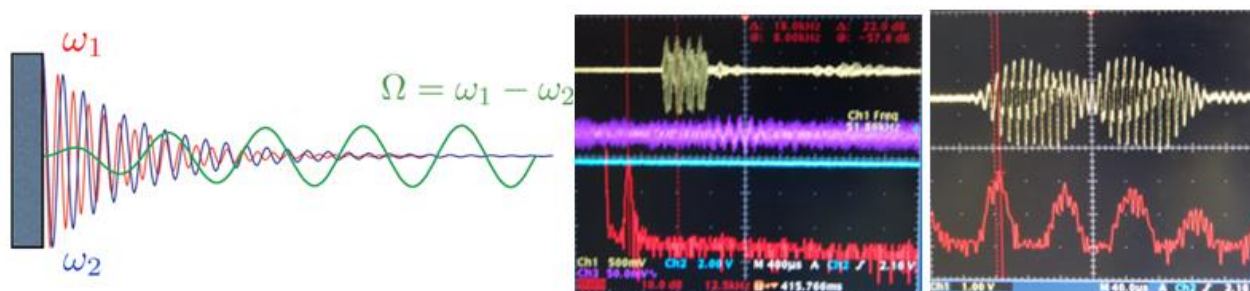
| | |
|--|--|
| C gdzie $\sigma \approx 4$ | Efekty związane z tłumieniem liniowym i dyssypatywnym, które wzajemnie się eliminują – w odległości zbliżonej do 4 od źródła powstaje fala piłokształtna |
| D gdzie $4 \ll \sigma < \sigma_3$ | Ze względu na rozpraszanie energii fala piłokształtna powoli traci swój kształt |
| E gdzie $\sigma \gg \sigma_3$ | Taki kształt fala przybiera na znacznie większej odległości od źródła, gdzie będzie rozchodzić się jak fala o nieskończenie małej amplitudzie i tłumienie będzie realizowane jak w przypadku akustyki liniowej |

Tłumienie fal o dużej amplitudzie jest spowodowane przez dwa różne zjawiska (tłumienie nieliniowe i starty dyssypatywne), które występują podczas jej rozchodzenia :

- a) W wyniku zmiany kształtu fali od harmoniczej do piłokształtnej zwiększa się liczba harmoniczných. W wyniku tworzenia się harmoniczných energia fali pierwotnej jest przekazywana falam wtórnym (wyższym harmonicznym). Proces przekazania energii zachodzi wzdłuż drogi rozchodzenia się fali pierwotnej. Natężenie fal wtórnych jest równe zeru przy powierzchni źródła, następnie rośnie i osiąga wartość maksymalną. W danym przedziale nazywanym obszarem ustalania się kształtu fali, dominują efekt tłumienia nieliniowego nad efektami tłumienia klasycznego – liczba Reynoldsa przyjmuje duże wartości ($Re_a \gg 1$);
- b) W punkcie krytycznym, gdzie następuje ustalenie się kształtu fali do postaci fali trójkątnej, przenoszenie energii do wyższych składowych harmoniczných jest w przybliżeniu tego samego rzędu co rozpraszanie energii spowodowane lepkością i przewodnictwem cieplnym (straty dyssypatywne);
- c) Przekroczenie punktu ustalania się fali powoduje przyjęcie wartości liczby Reynoldsa ($Re_a < 1$), co wskazuje na dominującą rolę procesu dyssypacji energii. Tłumienie jest jednak wolniejsze niż wynikałoby to z właściwości ośrodka liniowego ze względu na ciągłe oddziaływanie nieliniowe, jednak w minimalnym stopniu.

3.3 Nieliniowe oddziaływanie fal akustycznych

W niniejszym rozdziale rozpatrzone zostaną oddziaływania pomiędzy dwiema falami rozchodzącymi się w tym samym kierunku, których liczby falowe nieznacznie różnią się od siebie. Ten przypadek znajduje wykorzystanie w konstrukcji sonarów parametrycznych, które są nowym jakościowo narzędziem obserwacji stosowanym w badaniach podwodnych metodami akustycznymi. Nieliniowe właściwości środowiska sprawiają, że zasada superpozycji przestaje obowiązywać.



Rysunek 3-4 Wytwarzanie fali różnicy częstotliwości: schemat i poglądowe widmo z oscyloskopu

W procesie propagacji fal wzbogacania składowych harmonicznym zachodzą dla fal pierwotnych, jak opisano powyżej, a ponadto powstają dodatkowe fale o częstotliwości równej sumie i różnicy fal pierwotnych (zob. Rysunek 3-4). W celu analitycznego przebadania tego zjawiska prześledzimy rozwiązanie równania Burgersa w postaci:

$$\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3.11)$$

które rozwiążemy metodą kolejnych przybliżeń, zakładając, że interesować nas będzie co najwyżej drugie przybliżenie:

$$p' = p_1 + p_2 \quad (3.12)$$

Metoda ta może być z powodzeniem zastosowana dla $Re_a < 1$. Re_a oznacza akustyczną liczbę Reynoldsa 3.13:

$$Re_a = \frac{p}{b\omega} \quad (3.13)$$

Aby rozwiązać równanie (3.11) z uwzględnieniem (3.12), musimy sformułować warunki brzegowe dla procesu ustalonego. W tym celu zakładamy, że ciśnienie fali p_1 jest wyrażone następującym wzorem:

$$p_1(x, \tau) = p_{01}(x) \sin \omega_1 \tau + p_{02}(x) \sin \omega_2 \tau \quad (3.14)$$

dla $x = 0$.

Założenie małej liczby Reynolds'a oznaczające fakt, że promieniowana fala ma umiarkowane wartości ciśnienia, pozwala rozwiązać zagadnienie (3.11) przy warunku (3.14), z pominięciem członu nieliniowego równania Burgersa:

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p_1}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3.15)$$

Rozwiązanie powyższego równania ma następującą postać:

$$p_1(x, \tau) = p_{01} e^{-\frac{b\omega_1^2}{2\rho_0 c_0^3} x} \cos \omega_1 \tau + p_{02} e^{-\frac{b\omega_2^2}{2\rho_0 c_0^3} x} \cos \omega_2 \tau \quad (3.16)$$

Równanie opisujące drugie przybliżenie ma postać:

$$\frac{\partial p_2}{\partial x} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p_2}{\partial \tau^2} = \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^3} - p_1 \frac{\partial p_1}{\partial \tau} \quad (3.17)$$

oraz

$$p_2(0, \tau) = 0 \quad (3.18)$$

Rozwiązanie równania (3.17) przy warunku (3.18) składa się z czterech rozwiązań, które opisują ciśnienie $p_2(x, \tau)$

$$\begin{aligned} p_2(x, \tau) = & \frac{\varepsilon p_{01}^2}{b 2\omega_1} (e^{-2\alpha_{01}x} - e^{-4\alpha_{01}x}) \sin 2\omega_1 \tau + \\ & \frac{\varepsilon p_{02}^2}{b 2\omega_2} (e^{-2\alpha_{02}x} - e^{-4\alpha_{02}x}) \sin 2\omega_2 \tau + \\ & + \frac{\varepsilon p_{01} p_{02} (\omega_1 - \omega_2)}{b 2\omega_1 \omega_2} \left[e^{-\frac{b(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{2\rho_0 c_0^3} x} - e^{-\frac{b(\omega_1 - \omega_2)^2}{2\rho_0 c_0^3} x} \right] \sin(\omega_1 - \omega_2)\tau - \\ & \frac{\varepsilon p_{01} p_{02} (\omega_1 + \omega_2)}{b 2\omega_1 \omega_2} \left[e^{-\frac{b(\omega_1 + \omega_2)^2}{2\rho_0 c_0^3} x} - e^{-\frac{b(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{2\rho_0 c_0^3} x} \right] \sin(\omega_1 + \omega_2)\tau \end{aligned} \quad (3.19)$$

gdzie: $\omega_1 > \omega_2$.

Zależność (3.19) opisuje drugi człon przybliżenia ciśnienia akustycznego dla małych liczb Reynoldsa. Składa się on z czterech wyrazów, z których dwa pierwsze opisują fale drugich harmonicznych o częstotliwości $2\omega_1$ i $2\omega_2$, natomiast dwa następne opisują odpowiednio fale różnicy i sumy częstotliwości fal pierwotnych. Amplitudy tych fal informują nas o sprawności przekazywania energii fal pierwotnych do fal wtórnych. Można stwierdzić, że gdy $p_{01} \approx p_{02}$ i ω_1 jest



nieznacznie większa od ω_2 , to fala sumy częstotliwości „otrzymuje” najwięcej energii od fal pierwotnych, a fala różnicy częstotliwości najmniej.

Amplitudy fal wtórnych są funkcjami zmiennej x i dla $x = 0$, zgodnie z warunkiem (3.18), są równe zero. Począwszy od zera ich wartość wzrasta, osiągając wartość maksymalną w punkcie x_{\max}

$$x_{\max} = \frac{2c_0^3 p_0}{b(\pm 2\omega_1 \omega_2)} \ln \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{(\omega_1 \pm \omega_2)^2} \quad (3.20)$$

Wartości maksymalne amplitud fali o częstości kątowej $(\omega_1 + \omega_2)$ i fali o częstości kątowej $(\omega_1 - \omega_2) = \Omega$ dla $f_1 = 1,1$ MHz oraz $f_2 = 1$ MHz, dla wartości $b = 0,042$, obliczone dla wody $c_0 = 1500$ m/s, $\rho_0 = 998$ kg/m³, wynoszą odpowiednio $x_{\max}(\omega_1 + \omega_2) = 1,15$ m i $x_{\max}(\omega_1 - \omega_2) = 9,1$ m. Odległości te informują nas o położeniu punktów x_{\max} , począwszy od których przekazywanie wzajemnej energii jest mniejsze od rozpraszania energii w wyniku tłumienia fali oraz wtórnych oddziaływań wzajemnych.

W przypadku gdy warunek brzegowy (3.14) zadany jest w postaci fali modulowanej amplitudowo o głębokości modulacji m i częstości modulacji Ω

$$p_1 = p_0(1 + m \sin \Omega \tau) \sin \omega \tau \quad x = 0 \quad (3.21)$$

rozwiązanie równania Burgersa dla tej fali o częstości Ω przyjmuje postać

$$p_2(x, \tau) = \frac{\varepsilon m p_0^2 \Omega}{2b\omega^2} \left[e^{-\frac{b\Omega^2}{2\rho_0 c_0^3} x} - e^{-\frac{b\omega^2}{2\rho_0 c_0^3} x} \right] \cos \Omega \tau \quad (3.22)$$

Jakościowo zależność (3.22) jest podobna do członu rozwiązania (3.19), tzn. dla fali różnicy częstotliwości.

W przypadku dużych liczb Reynoldsa w równaniu Burgersa można opuścić człon związany z lepkością. Rozwiązanie dla fali różnicy częstotliwości z warunkiem brzegowym w postaci (3.14) ma następującą formę:

$$p_2(x, \tau) = -\frac{\varepsilon(\omega_1 - \omega_2) p_{01} p_{02}}{2\rho_0 c_0^3} x \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau \quad (3.23)$$

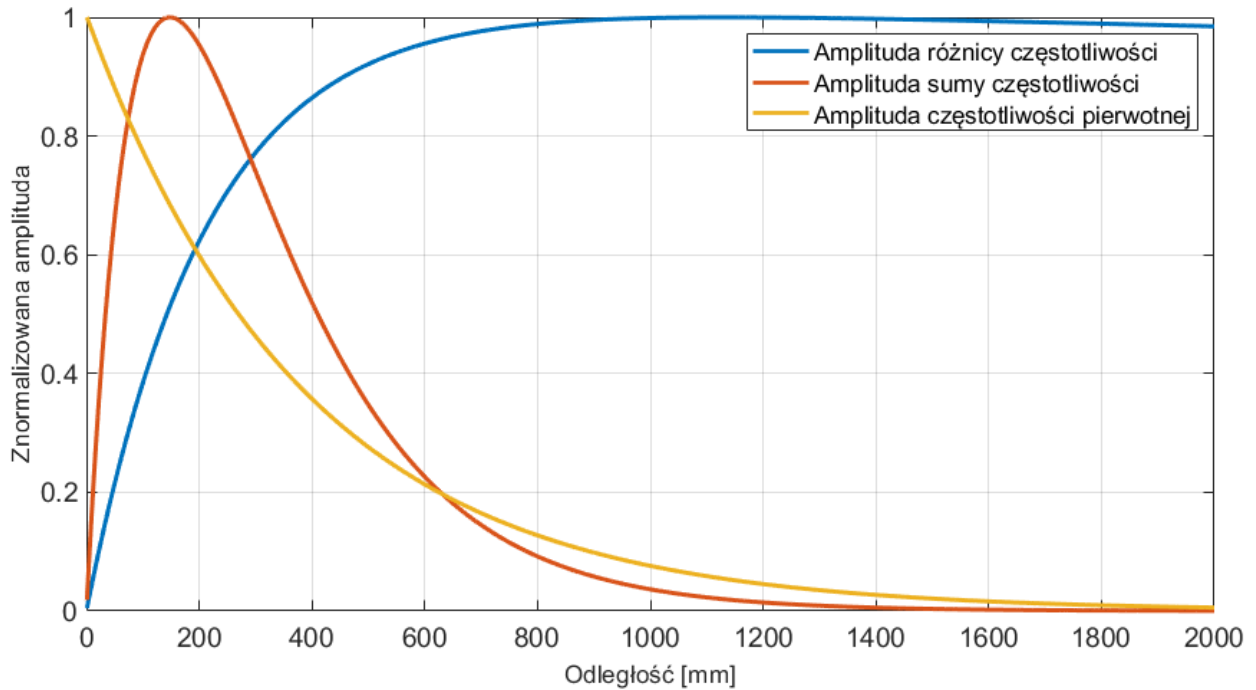
Natomiast przy warunku brzegowym (3.21) rozwiązanie jest następujące:

$$p_2(x, \tau) = \frac{\varepsilon m \Omega p_0^2}{2\rho_0 c_0^3} x \cos \Omega \tau \quad (3.24)$$

Równania te są spełnione dla $\sigma < 1$, gdzie:

$$\sigma = \frac{\varepsilon \omega x p_0}{\rho_0 c_0^3} \quad (3.25)$$

Jak widać – zależności (3.24) i (3.25) – amplituda fal ciśnienia wtórno rośnie liniowo w pobliżu źródła, oraz przy dużych odległościach od źródła maleje (Rysunek 3-5).

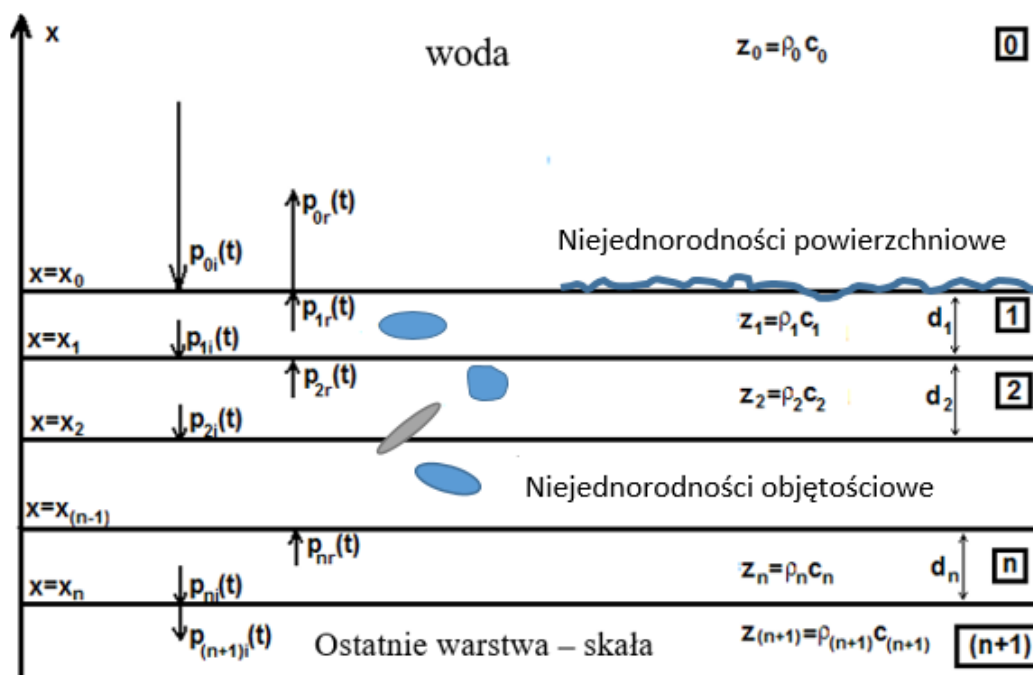


Rysunek 3-5 Zmiana amplitudy w funkcji odległości dla fal pierwotnej oraz fali sumy i różnicy częstotliwości fal pierwotnych.

Rozwiązania dotyczące oddziaływania dla $\sigma < 1$ [13] nie będą tu przytoczone ze względu na ich złożoność. Mogą być scharakteryzowane za pomocą zależności opisujących rozchodzenie się fal harmonicznym przy wielkich liczbach Reynoldsa

4 Model teoretyczny wnikania wiązki parametrycznej w dno morskie

Poznanie parametrów osadów dennych oraz procesów zachodzących podczas nadźwiękowania dna morskiego jest podstawą do rozwiązywania wielu problemów związanych z akustyką podwodną, w której oddziaływanie impulsów sondujących z dnem jest dominujące. Należy tutaj wymienić takie zjawiska, jak propagacja fali akustycznej zarówno w toni, jak i w dnie, odbicie, modele rozpraszania oraz parametry określające geoakustyczne właściwości osadów dennych. Znany jest szereg modeli [12] umożliwiających określenie siły odbicia od dna oraz metod charakteryzowania osadów dennych. W celu rozwiązania postawionego zadania, zaprezentowane zostanie użycie najprostszego modelu dna morskiego do scharakteryzowania osadu na podstawie określenia współczynnika odbicia dla różnych typów osadów dennych. W przedstawionym poniżej opisie skoncentrowano się na częstotliwościach akustycznych od kilku Hz do kilkuset kHz, z naciskiem na wyższe częstotliwości. Badania nad interakcją impulsów sondujących z osadami dennymi w tym zakresie częstotliwości są ważne dla naukowców skupionych na pomiarach oceanograficznych (np. podwodnej archeologii, akustycznej klasyfikacji osadów, pomiarach batymetrycznych – tworzeniu map morskich, badaniu środowiska morskiego i pozyskiwaniu informacji o transporcie osadów dennych związanym z prądami morskimi) i hydroakustyce (np. zwalczanie okrętów podwodnych, wojna przeciwminowa, poszukiwanie obiektów w celu detekcji oraz klasyfikacji niewybuchów, geoakustyka osadów, rozpraszanie dźwięków przez powierzchnię dna, określanie właściwości propagacyjnych – komunikacja akustyczna). Wymienione obszary hydroakustyki zarówno aktywnej, jak i pasywnej bazują na dwóch typach modeli: odwrotny (tzw. *revers model*) – gdzie wyniki pozyskane z pomiarów w warunkach rzeczywistych np. sondowania dna służą do określenia parametrów fizycznych osadów dennych oraz modelowanie klasyczne (tzw. *forward model*) gdzie używając danych wejściowych charakteryzujących właściwości geoakustyczne osadów możliwe jest określenie np. właściwości propagacyjnych fali akustycznej pomiędzy nadajnikiem/odbiornikiem a celem, poziomu echa od dna dla impulsu o zadanej częstotliwości oraz energii, jaka zostanie przeniesiona w głąb dna. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi osady są: gęstość, prędkość dźwięku i tłumienie fali podłużnej oraz poprzecznej w punkcie oddziaływania oraz informacja o nierównościach/chropowatości powierzchni dna i niejednorodnościach objętościowych (określeniu czy osad jest homogeniczny, czy nie występują w nim np. inne typy osadów w postaci warstw lub objekty np. głazy; zob. Rysunek 4-1).



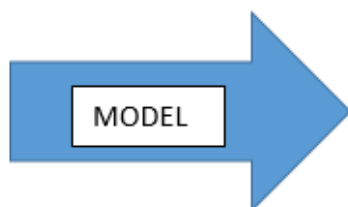
Rysunek 4-1 Model struktury geologicznej osadów dennych

W zależności od wybranego typu urządzenia do wykonania pomiarów, a co się z tym wiąże określonej częstotliwości impulsów sondujących, w obszarze zainteresowania będą parametry osadów znajdujących się od paru milimetrów do kilkudziesięciu metrów w głąb dna. Należy zwrócić uwagę że propagacja dźwięku w osadach dennych jest aktualnie cały czas rozwijanym obszarem nauki zwłaszcza z uwagi na możliwość bezinwazyjnej oceny typu osadów dennych znajdujących się na wierzchniej warstwie dna. Potrzebny jest model, który jako danych wejściowych może użyć geofizycznych parametrów dna morskiego i na wyjściu udostępnić dane geoakustyczne, takie jak: współczynnik odbicia, prędkość dźwięku, tłumienie osadów (zob. Rysunek 4-2).

Parametry wejściowe:

(właściwości fizyczne)

- średnica ziaren osadu;
- gęstość;
- porowatość;
- nierówność;
- itp.



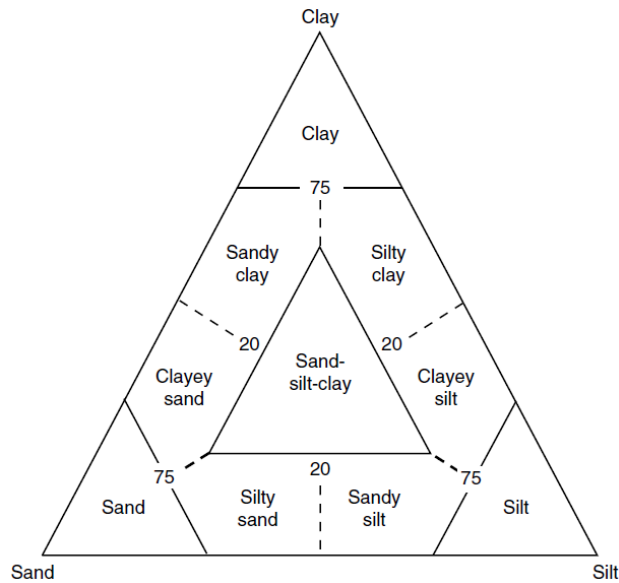
Parametry wyjściowe:

(geoakustyczne właściwości)

- współczynnik odbicia;
- siła rozpraszania;
- absorpcja;
- prędkość fali;
- przenikalność;
- itp.

Rysunek 4-2 Schemat ideowy modelu dna morskiego

Klasyfikacja osadów dennych w oparciu o średnicę cząstek materiału zalegającego na dnie została przedstawiona przez Wentwortha w 1922 roku [19]. Podgrupy osadów zostały uszeregowane ze względu na wymiar - zmieniały się z kwadratem średnicy cząstki, tworząc klasyfikację bazującą na trzech głównych kategoriach (żwir, piasek, ły), która następnie została rozwinięta przez Folka [20] oraz innych naukowców. Wynikiem ich pracy było udoskonalenie systemu klasyfikacji poprzez mieszanie kategorii. Opracowany w ten sposób podział jest aktualnie cały czas w użyciu (zob. Rysunek 4-3).



Rysunek 4-3 Model charakteryzujący osad na podstawie średnicy ziaren

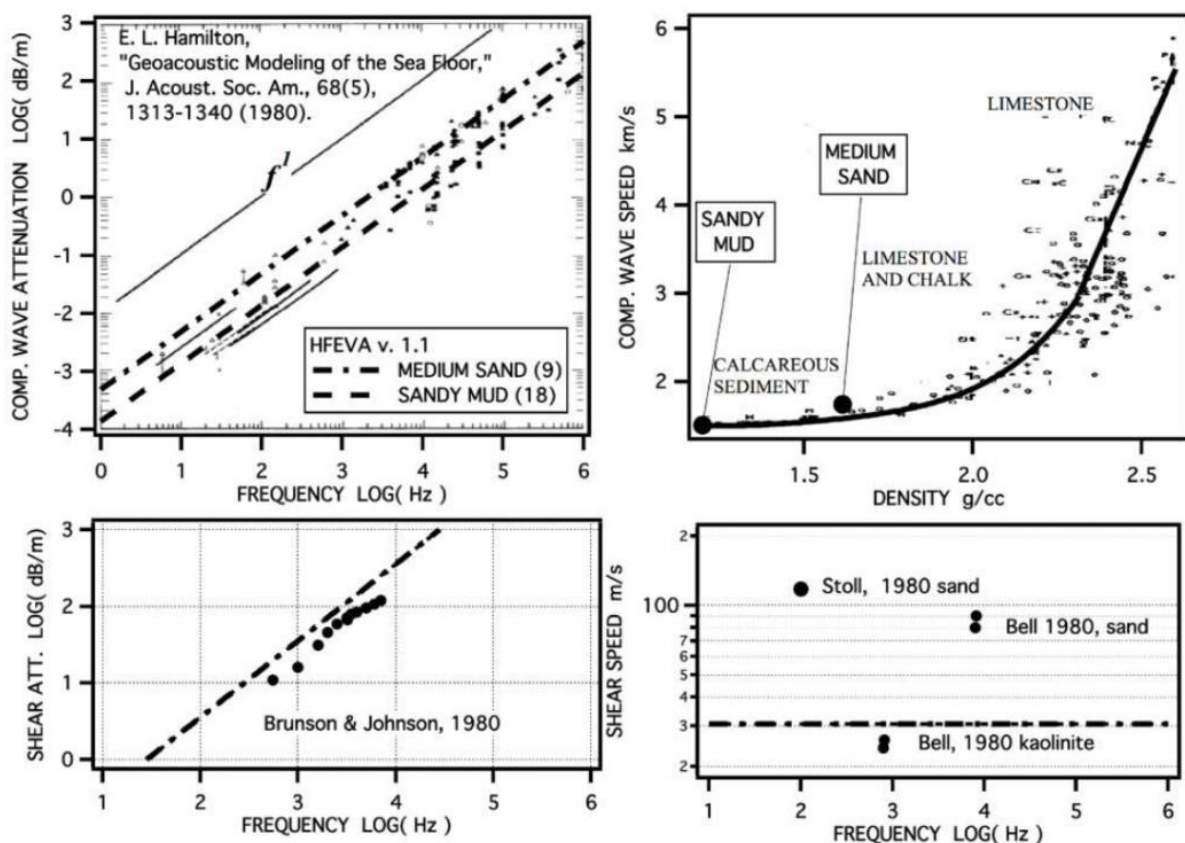
W rzeczywistości oprócz parametru definiującego średnicę ziaren osadu istnieją jeszcze trzy dodatkowe grupy parametrów fizycznych wpływających na akustykę podwodną: gęstość, porowatość oraz właściwości mechaniczne.

Pierwszym modelem osadów dennych był model płynów (tzw. *fluid model*). Założono, że w wyniku nadźwiękawiania powstaje fala odbita oraz transmitowana do osadu (w danym modelu używane są trzy parametry determinujące osad: gęstość, prędkość dźwięku i kąt krytyczny). Rozwinięciem zagadnienia było opracowanie modelu posiadającego pięć parametrów wejściowych: trzy z modelu płynów oraz dodatkowo prędkość fali poprzecznej oraz jej kąt krytyczny nadźwiękawiania osadów. Po przeprowadzeniu serii badań w warunkach rzeczywistych oraz laboratoryjnych wykonanych przez Hamiltona [17] opracowano model lepko-sprężysty (tzw. *visco-elastic*), który został zaadaptowany i wprowadzony oficjalnie do użytku. Założono w nim, że w wyniku padania impulsu sondującego na powierzchnię dna wytworzone są dwie fale penetrujące osad (podłużna oraz poprzeczna) oraz jedna fala (podłużna) zostaje odbita z powrotem w kierunku przetwornika. Model ten w kolejnych latach był rozwijany w Applied Physics Laboratory



University w Waszyngtonie pod nazwą High Frequency Environmental Acoustics (HFEVA) [4]. Model płynów nazwany modelem w wersji 1.0 w 1994 r. został zmieniony na postać w wersji 1.1 i nazwany lepko-sprężystym modelem ze stałymi parametrami. Zakładano, że prędkość fal poprzecznej i podłużnej nie są zależne od częstotliwości, natomiast ma na nie wpływ gęstość osadu, co jest zgodne z wynikami badań Hamiltona oraz innych naukowców z lat osiemdziesiątych XX wieku zaprezentowanych na Rysunku 4-4. Zakładano, że tłumienie zarówno fali poprzecznej, jak i podłużnej wzrasta liniowo z częstotliwością, o czym świadczyły wyniki pomiarów pozyskiwane za pomocą dostępnych w tamtym czasie aparatów badawczych.

Obszerniejsze badania wykonano po 1980 r., kiedy to organizacja ONR – Office of Naval Research zleciła wykonanie projektów o kryptonimach SAX99, ASIAEX, SAX04 i SW06. Na podstawie pomiarów osadów piaszczystych stwierdzono, że prędkość dźwięku w osadzie jest zależna od częstotliwości, szczególnie w paśmie 1–10 kHz.



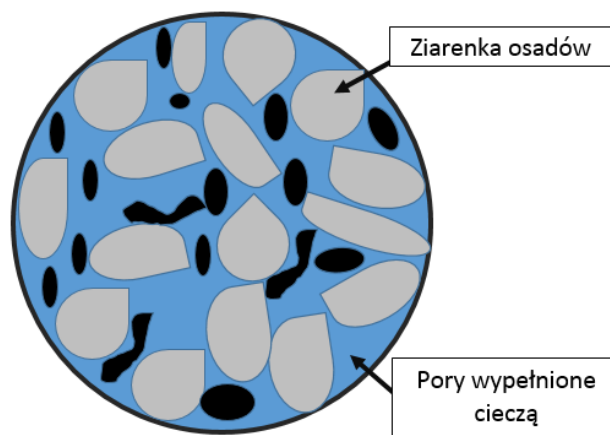
Rysunek 4-4 Dane opublikowane przez Hamiltona w 1980 r. oraz przykład HFEAV

Dodatkowo na podstawie badań [21, 22, 23] określono, że tłumienie wzrasta z drugą potęgą częstotliwości dla częstotliwości poniżej kilku kHz. Dla wyższych częstotliwości współczynnik wzrasta w mniejszym stopniu. W przypadku pomiarów laboratoryjnych piaszczystych osadów jest

to $\frac{1}{2}$ potęgi częstotliwości, ale w piaskach naturalnych często jest bliżej pierwszej potęgi częstotliwości.

Wraz z postępem technologii i możliwości pozyskiwania dokładniejszych wyników okazało się, że model lepko-sprężysty ze stałymi parametrami nie jest zgodny z pomiarami prowadzonymi w warunkach naturalnych. Wynikiem określonych na podstawie pomiarów parametrów było wprowadzenie modelu Biota–Stolla – poro-sprężystego (tzw. *poro-elastic*) [24, 25, 26], który zbliżył się do wyników otrzymywanych podczas pomiarów (w danym przypadku trzy fale są transmitowane do osadów – dwie podłużne oraz jedna poprzeczna), jednak nie rozwiązał problemu z dopasowaniem wartości prędkości dźwięku oraz dla wyższych częstotliwości trendu tłumienia.

Model poro-elastyczny z modyfikacjami uwzględniającymi osobliwe cechy osadu, jakim jest piasek, umożliwia pozyskanie wyników bliższych badaniom w warunkach rzeczywistych. Opracowany został model bazujący na równaniu Biota z modyfikacjami, które uwzględniają przepływ płynów pomiędzy ziarnami osadów patrz Rysunek 4-5 (opracowane przez Kimura [27]), prędkość grupową dla fal małej częstotliwości [28] oraz dla fal wielkiej częstotliwości, tłumienie oraz rozpraszanie związane z oddziaływaniem wzajemnym cząsteczek osadu [29].

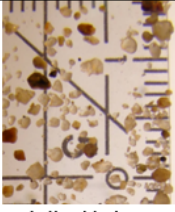
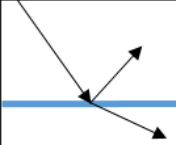

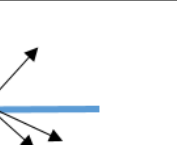


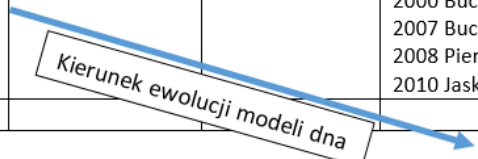
Rysunek 4-5 Struktura osadu dennego wypełnionego cieczą

Teoria poro-elastyczna jest podejściem ambitnym, ponieważ wymaga szczegółowego opisu struktury osadów i przewiduje zależność prędkości dźwięku i tłumienia od częstotliwości. Wydaje się, że może ona dostarczyć rozsądnego obrazu akustycznego zachowania osadów. Różnice między modelem i danymi otrzymanymi z badań nakłoniły naukowców do wysiłków mających na celu zmodyfikowanie teorii poro-elastycznej lub włączenie efektów porowatości w innych modelach [30–34]. Do dnia dzisiejszego nie udało się osiągnąć optymalnego rozwiązania problemu. Pomimo tych trudności prawdopodobne jest, że przyszłe modele akustyczne dla piasku będą związane z

równoległym rozwojem lepko-sprężystego modelu z parametrami uzależnionymi od częstotliwości oraz modelu poro-elastycznego.

Rozwój modelowania osadów dennych jest zaprezentowany na Rysunku 4-6

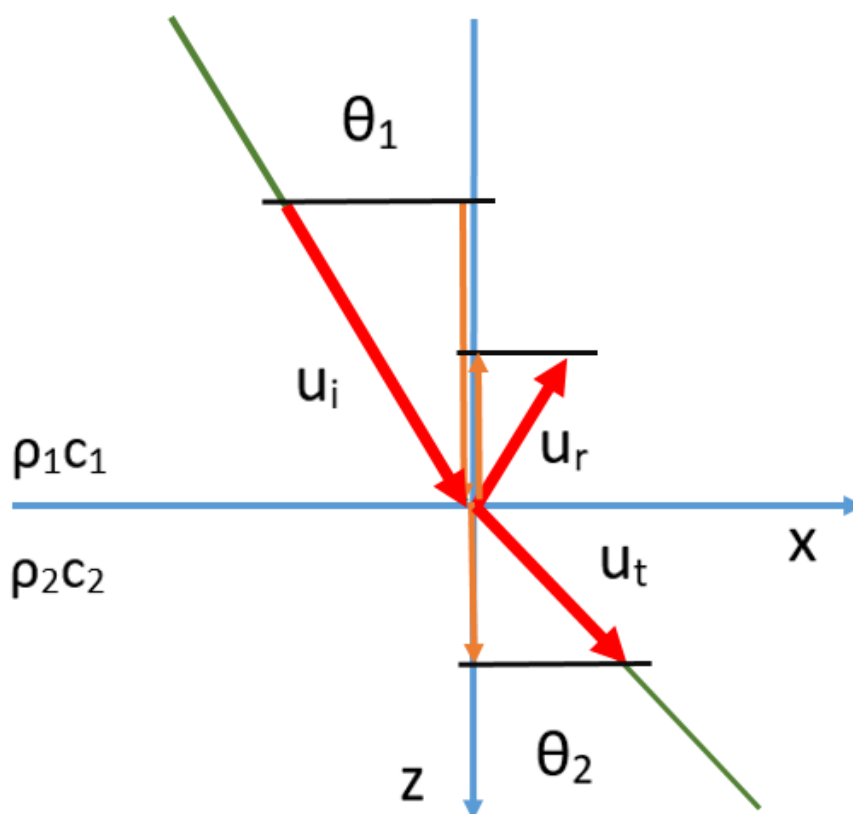
| |  Wielkość ziaren osadu |  FLUID Model płynów |  VISCO-ELASTIC Model lepko-elastyczny Stałe parametry Zmienne parametry |  PORO-ELASTIC Model poro-elastyczny |
|------|--|--|---|---|
| 1980 | 1922 Wentworth 1954 Folk | | 1980 Hamilton | 1956 Biot |
| 1990 | | | | 1989 Stoll |
| 2000 | | 1994 HFEVA 1.0 | | 1993 BISQ, Dvorik, Nur |
| 2010 | | | 2000 Buckingham 2007 Buckingham 2008 Pieree, Carey 2010 Jaskson | 2004 BICSQS, Chotiros, Isakons 2006 BIMGS, Kimura |


 Kierunek ewolucji modeli dna

Rysunek 4-6 Rozwój metod klasyfikacji osadów dennych

4.1 Odbicie oraz transmisja fali płaskiej do osadów – na podstawie modelu płynów

W niniejszym rozdziale zostanie zaprezentowane wyprowadzenie zależności określających współczynnik odbicia i transmisji pomiędzy dwoma ośrodkami na podstawie modelu płynów. Jest to podstawowa forma analizy problemu, która umożliwi zobrazowanie zachowania fali padającej na granicę ośrodków.



Rysunek 4-7 Geometria odbicia i załamania dla składowych wektorów prędkości cząstek (strzałki czerwone)

Na Rysunku 4-7 przedstawiono kierunki promieni rozchodzenia się dźwięku oraz składowe prędkości cząstek: fali padającej, odbitej i załamanej na powierzchni styku dwóch ośrodków (u_i , u_r oraz u_t).

Pierwszym warunkiem założonym na granicy ośrodków jest jednakowe ciśnienie po obu stronach granicy dla $z = 0$

$$[p_i(t - z / c_1) + p_r(t + z / c_1)] = p(t - z / c_2) \quad (4.1)$$

Indeksy przy ciśnieniu określającym dla czasu t oznaczają odpowiednio falę padającą, odbitą i transmitowaną. Przypisy liczbowe dotyczą ośrodka 1 oraz 2.

Drugim warunkiem na granicy ośrodków jest równość pomiędzy składowymi normalnymi prędkości cząstek dla $z = 0$:

$$[u_{zi}(t - z / c_1) + u_{zr}(t + z / c_1)] = u_{zt}(t - z/c_2) \quad (4.2)$$

Zakładając, że kąt padania na granicę ośrodków wynosi θ_1 , oraz że kąt załamania wynosi θ_2 , zgodnie z prawem Snella:

$$O_2 = \arcsin[(c_2/c_1)(\sin O_1)] \text{ dla } (c_2 / c_1) \sin \theta_1 < 1 \quad (4.3)$$

Trzy pionowe składowe prędkości cząstek cieczy na granicy ośrodków $z = 0$ można przedstawić jako:

$$\begin{aligned} u_{zi}(t) &= u_i(t) \cos \theta_1 \\ u_{zr}(t) &= u_r(t) \cos \theta_1 \\ u_{zt}(t) &= u_t(t) \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

gdzie u_i , u_r oraz u_t to odpowiednio wektory padającej, odbitej i załamanej fali. Korzystając z zależności pomiędzy prędkością cząstek a ciśnieniem dla fali płaskiej zależności otrzymują następującą postać:

$$\begin{aligned} u_{zi}(t) &= \frac{p_i(t)}{\rho_1 c_1} \cos \theta_1 \\ u_{zr}(t) &= -\frac{p_r(t)}{\rho_1 c_1} \cos \theta_1 \\ u_{zt}(t) &= -\frac{p_t(t)}{\rho_2 c_2} \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Na płaskiej, jednorodnej powierzchni (będącej cieczą) zależności czasowe pomiędzy falą padającą, odbitą oraz załamaną są takie same. Współczynniki odbicia R_{12} i załamania T_{12} dla fali przemieszczającej się z ośrodka 1 do ośrodka 2 dla $z = 0$ są zdefiniowane następującymi zależnościami:

$$R_{12} \equiv \frac{p_r(t+z/c_1)}{p_i(t-z/c_1)} \quad T_{12} \equiv \frac{p_t(t-z/c_2)}{p_i(t-z/c_1)} \quad (4.6)$$

Korzystając z właściwości współczynników, można zapisać, że:

$$1 + R_{12} = T_{12} \quad (4.7)$$

oraz uwzględniając właściwości prędkości z zależności 4.2:

$$(\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 R_{12}) \cos \theta_1 = \rho_1 c_1 T_{12} \cos \theta_2 \quad (4.8)$$

Z zależności 4.7 oraz 4.8 można wyznaczyć współczynniki odbicia i transmisji o następującej postaci:

$$R_{12} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 - \rho_1 c_1 \cos \theta_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + \rho_1 c_1 \cos \theta_2} \quad (4.8a)$$

$$T_{12} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_1}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + \rho_1 c_1 \cos \theta_2} \quad (4.8b)$$

Dla podanej teorii odbicia i załamania fali pomiędzy dwoma ośrodkami będącymi cieczami istnieją dwa główne zastosowania: odbicie od powierzchni oceanu oraz odbicie od dna. Rozważając odbicie od powierzchni morza przy bardzo mocno uproszczonych założeniach: powierzchnia jest płaską płaszczyzną pomiędzy wodą morską (gęstość 1000 kg/m^3 , prędkość dźwięku 1500 m/s) a powietrzem (gęstość $1,03 \text{ kg/m}^3$ oraz prędkość dźwięku 300 m/s). Zakładając padanie promienia fali pod kątem prostym do powierzchni ($\cos \theta_1 = 1$ oraz $\cos \theta_2 \approx 1$), dla $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$ współczynniki wyznaczone na podstawie zależności 4.8a i 4.8b przyjmują odpowiednio wartości $T_{12} = 4,5 \cdot 10^{-4}$ oraz $R_{12} \approx 1$. Z zależności 4.1 wynika, że $p_r \approx -p_i$ (ciśnienie z odwróconą fazą) przy powierzchni tworzy się ciśnienie całkowite zbliżone do zera (tzw. *near zero total pressure*). Z równania 4.2 $u_r \approx u_i$ wynika, że przy powierzchni dochodzi do zjawiska podwojenia prędkości cząstek. Analizując granicę pomiędzy wodą a powietrzem od strony cieczy, będzie ona akustycznie „miękką” dla podwodnych dźwięków. W przypadku gdy dźwięk propagowany jest z ośrodka o mniejszej gęstości do ośrodka o większej gęstości, np. z powietrza do wody, można zaobserwować zjawisko podwojenia wartości ciśnienia przy wyzerowaniu prędkości cząsteczek – w danym przypadku granicę należy rozpatrywać jako „twardą”. Powracając do konfiguracji, jaka jest przedmiotem zainteresowania, impuls sondujący rozprzestrzenia się w toni wodnej w kierunku dna morza, gdzie w przypadku $c_2 > c_1$ jest możliwe, aby doszło do całkowitego odbicia, co może mieć miejsce tylko dla $\theta_i \geq \theta_c$, gdzie θ_c jest kątem krytycznym zdefiniowanym wzorem:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1} \sin \theta_1\right) \quad (4.9)$$

Kiedy kąt padania jest większy od kąta krytycznego, prawo Snella można zapisać jako:

$$\cos \theta_2 = \left[1 - \left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2 \sin^2 \theta\right]^{1/2} \equiv \pm i g_2 \quad (4.10)$$

gdzie część urojoną można zapisać:

$$g_2 = \left[\left(\frac{c_2}{c_1}\right)^2 \sin^2 \theta - 1\right]^{1/2} \quad (4.11)$$

Wybierając rozwiązanie $(-ig_2)$, otrzymujemy zależność opisującą zmniejszenie ciśnienia akustycznego fali wraz z głębokością penetracji drugiego ośrodka (w kierunku z), kiedy w rzeczywistości fala jest propagowana w kierunku x. Niewłaściwe przyjęcie rozwiązania będzie prowadziło do fizycznego absurdu, jakim jest informacja, że fala podczas propagacji do drugiego medium będzie zwiększała swoje natężenie wraz z odległością. Z zależności 4.8a otrzymujemy:

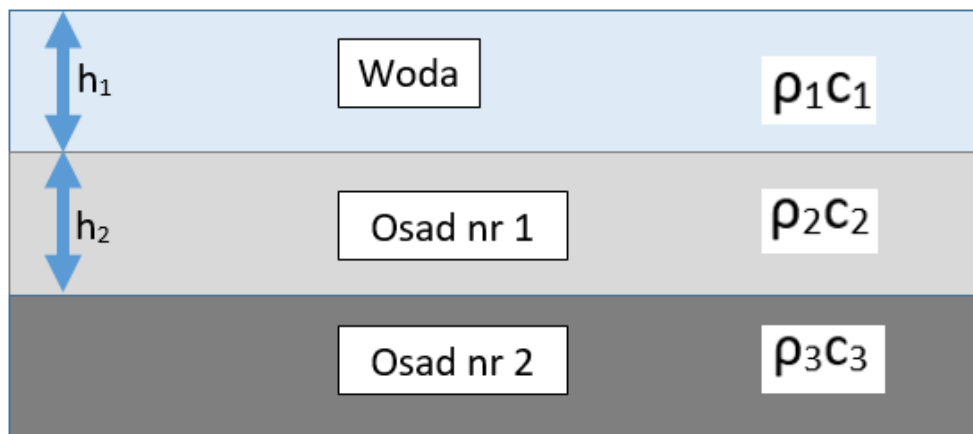
$$R_{12} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 - i\rho_1 c_1 g_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + i\rho_1 c_1 g_2} \quad \theta > \theta_c \quad (4.12)$$

Wyrażenie opisujące licznik równania 4.12 jest sprzężone z wyrażeniem opisującym mianownik, dlatego można przyjąć, że wielkość stosunku wynosi $|R_{12}| = 1$. Dla kątów większych niż kąt krytyczny można zapisać:

$$R_{12} = e^{+2i\phi} \quad (4.13)$$

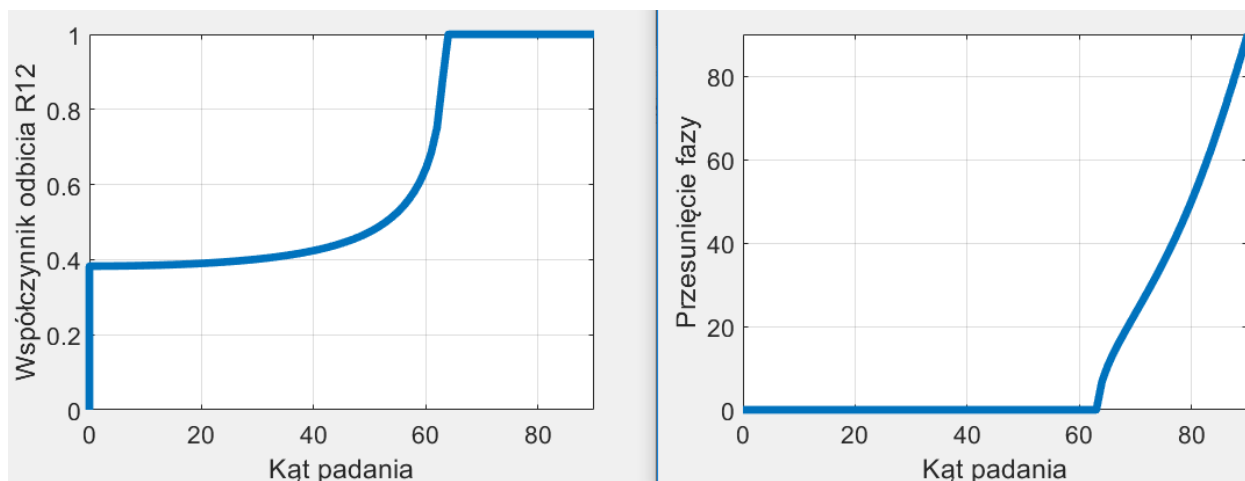
gdzie: $\phi = \arctan \frac{\rho_1 c_1 g_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1}$

Na Rysunku 4-8 przedstawiono przykładowe uwarstwienia dna (przy założonych parametrach : $\rho_1=1033 \text{ kg/m}^3$, $c_1=1508 \text{ m/s}$, $h_1=20 \text{ m}$, $\rho_2=2\rho_1$, $c_2=1,12c_1$, $h_2=0.9h_1$) dla którego wyznaczono na podstawie wyprowadzonych wzorów współczynnik odbicia oraz przesunięcie fazy w zależności od kąta padania impulsu sondującego Rysunek 4-9.



Rysunek 4-8 Przykład uwarstwienia dna

Częściowe odbicie fali padającej, R_{12} , jest również nazywane tłumieniem dennym (tzw. „*bottom loss*”), $BL = -20 \log_{10} (R_{12})$.



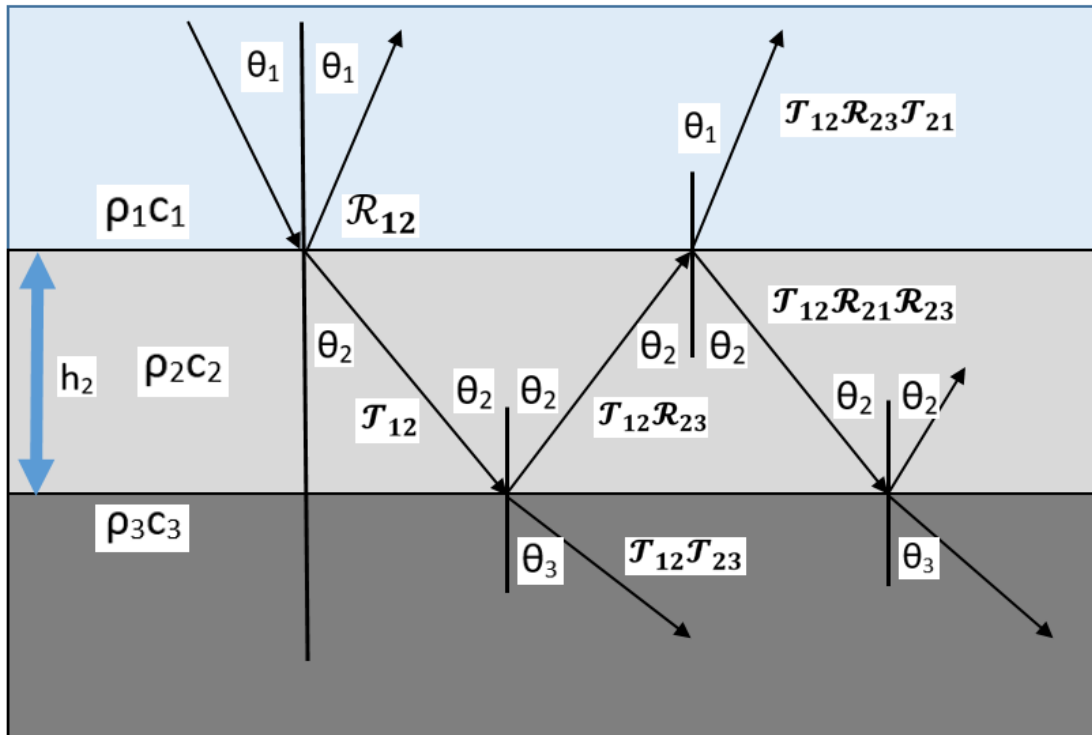
Rysunek 4-9 Współczynnik odbicia i przesunięcia fazowego dla podanych parametrów osadu dennego – kąt krytyczny występuje na 65°

W omawianym przypadku dno morskie pokryte jest „cienką” warstwą osadów dennych, zatem współczynnik odbicia od zróżnicowanej struktury geologicznej można zastąpić współczynnikiem odbicia od połączonej warstwy. Założenie propagacji lokalnej fali płaskiej jest używane, kiedy grubość warstwy jest relatywnie dużo mniejsza od odległości pomiędzy anteną nadawczo-odbiorczą a dnem.

Relatywnie cienkie warstwy osadów dennych mogą również, w niektórych przypadkach być transparentne dla impulsu sondującego (tzw. „sonar window” – podobnie jak w przypadku projektowania cienkiej warstwy ochronnej kształtek piezoceramicznych w antenie, np. echosondy, gdzie dobierając odpowiednią grubość warstwy oraz parametry fizyczne materiału, uzyskuje się możliwie maksymalny współczynnik transmisji impulsu sondującego).

Zaprezentowana na Rysunku 4-11 struktura osadów dennych posłuży do opisu propagacji impulsu sondującego w cienkiej warstwie zachowującej właściwości cieczy o grubości h_2 . Współczynniki odbicia i wnikania dla powierzchni 1–2 opisane są zależnościami 4.8a i 4.8b, natomiast dla granicy 2–3 stosowana zostanie analogiczna zależność. Na podstawie analizy rysunku można wywnioskować, że całkowity odbity sygnał jest sumą wszystkich (dążących do nieskończoności) odbić i załamań (transmisji). Każda droga przebyta w warstwie środkowej powoduje również opóźnienie fazowe zależne od kąta padania, równe $\phi_2 = k_2 h_2 \cos \theta_2$. Sumaryczny współczynnik odbicia R_{13} można opisać wzorem:

$$R_{13} = R_{12} + T_{12}T_{21}R_{23}\exp(-2i\phi_2) + T_{12}T_{21}R_{23}^2R_{12}\exp(-i4\phi_2) + \dots \quad (4.14)$$



Rysunek 4-10 Schemat odbicia i wnikania impulsów sondujących

Pomijając pierwszy współczynnik odbicia z równania 4.14, oraz używając matematyczną zależność sumy nieskończonych geometrycznych szeregów,

$$S = \sum_0^{\infty} r^n = \frac{1}{1-r} \quad \text{dla } r < 1 \quad (4.15)$$

zależność (4.14) przyjmuje postać:

$$R_{13} = R_{12} + T_{12}T_{21}R_{23}\exp(-2i\phi_2) \sum_0^{\infty} [R_{23}R_{12}\exp(-i2\phi_2)]^n \quad (4.16)$$

Współczynniki odbicia i wnikania związane są następującymi zależnościami

$$R_{12} = -R_{21} \quad T_{12}T_{21} = 1 - R_{12}^2 \quad (4.17)$$

Przy użyciu których można otrzymać następujący wynik:

$$R_{13} = \frac{R_{12} + R_{23}\exp(-i2\phi_2)}{1 + R_{12}R_{23}\exp(-i2\phi_2)} \quad (4.18)$$

W analogiczny sposób obliczony jest współczynnik wnikania sygnału:

$$T_{13} = T_{12}T_{23}\exp(-i\phi_2) + T_{12}T_{23}R_{23}R_{21}\exp(-i3\phi_2) + \dots \quad (4.19)$$

gdzie po zastosowaniu uproszczeń:

$$T_{13} = \frac{T_{12}T_{23}\exp(-i\phi_2)}{1 + R_{12}R_{23}\exp(-i2\phi_2)} \quad (4.20)$$

Obydwa współczynniki (4.19 i 4.20) są funkcjami oscylacyjnymi $\phi_2 = 2\pi(h_2\lambda_2)\sin\theta_2$ zależnymi zarówno od kąta padania impulsu sondującego jak i częstotliwości. Podstawiając zależność 4.8a do zależności 4.18 możliwe jest obliczenie współczynnika tłumienia dla analizowanej struktury geologicznej dwóch warstw osadów.

Trudność związana z wyznaczeniem współczynnika odbicia w przypadku uwarstwionej struktury oraz jej interpretacja przy użyciu bezinwazyjnych metod związana jest ze zwielokrotnionymi odbiciami pomiędzy warstwami kolejnych warstw struktury geologicznej.

Kiedy grubość warstwy osadu jest wielokrotnością $\lambda/4$, czyli $h_2 = (2m - 1) * (\lambda_2/4)$, gdzie $m = 1, 2, 3, \dots$ to $\tan \phi_2 = \infty$. Zakładając, że impedancja akustyczna wierzchniej warstwy osadów równa jest średniej wartości impedancji akustycznej ośrodka 1 oraz 3, współczynnik odbicia może zostać całkowicie pominięty – współczynnik odbicia będzie przyjmował wartości tak jakby odbicie było bezpośrednio na granicy warstw 1 i 3.

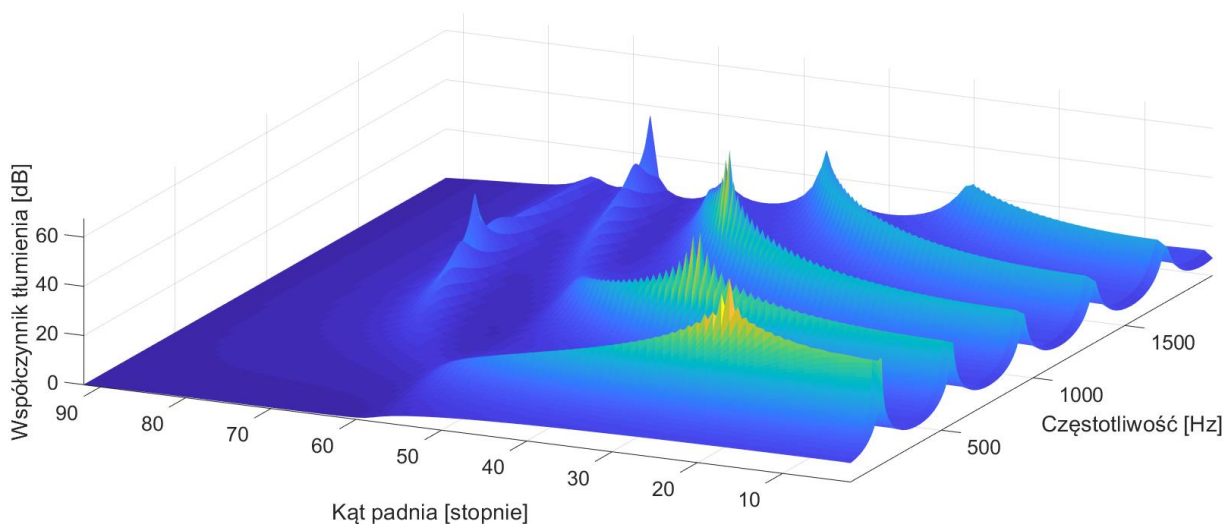
Kiedy grubość warstwy osadu jest wielokrotnością $\lambda/2$, czyli $h_2 = m * (\lambda_2/2)$, gdzie $m = 1, 2, 3, \dots$, to $\tan \phi_2 = 0$, z czego wynika, że współczynnik odbicia jest niezależny od Z_2 . Wypromieniowanie impulsu do warstwy osadu o grubości będącej wielokrotnością połowy długości fali powoduje brak oddziaływania danego osadu na współczynnik odbicia, który należy traktować jako odbicie pomiędzy warstwą 1 oraz 3 – tak jakby były one przyległe. Taki przypadek może mieć również miejsce, kiedy warstwa 1 osadu jest dużo mniejsza od długości fali: $\lambda_2 \gg h_2$. Wtedy współczynnik odbicia nie zależy od impedancji Z_2 oraz od kąta padania impulsu sondującego – warstwa akustycznie transparentna.

Złożoną zależność współczynnika odbicia w przypadku uwarstwionego dna od dwóch parametrów: częstotliwości fali oraz kąta padania dla określonego zestawu parametrów osadów pokazano na rysunku 4-11. Obliczenia wykonano korzystając z zależności (4.18) oraz parametrów wejściowych zawartych w tabeli 4-1.

Tabela 4-1 Parametry użyte podczas wyznaczania współczynnika odbicia dla różnych częstotliwości i kątów padania

| Warstwa | Grubość [m] | Prędkość dźwięku [m/s] | Tłumienie [dB/ λ] | Gęstość [kg/m^3] |
|-------------------|-------------|------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| woda | ∞ | 1500 | 0.0 | 1000 |
| warstwa osadów | 2.0 | 1550 | 0.2 | 1500 |
| podłoże pierwotne | ∞ | 1800 | 0.5 | 2000 |





Rysunek 4–11 Wykres współczynnika tłumienia dla ośrodka trójwarstwowego w zależności od kąta padania i częstotliwości

Na Rysunku 4-11 przedstawiony został współczynnik tłumienia w funkcji kąta padania oraz częstotliwości. Wyraźnie widać, że kąt krytyczny zmienia się wraz z częstotliwością od około 65° dla małych częstotliwości do 86° dla wyższych częstotliwości. Zależnie od kąta padania rezonans jest również wyraźnie widoczny dla przypadków kiedy grubość warstwy wierzchniej jest wielokrotnością $\lambda/4$ oraz $\lambda/2$ – szczególnie widoczne jest to w przypadku padania impulsu pod kątem prostym na dno.

4.2 Rozpraszanie dźwięku na dnie

Przedstawione w podrozdziale 4.1 przykłady odbicia impulsu sondującego wyznaczone zostały przy założeniu, że dno jest idealnie płaskie, a warstwy są homogeniczne. W rzeczywistych warunkach na proces rozpraszania impulsu sondującego od dna ma wpływ złożona struktura osadów dennych, której określenie wymaga wiedzy o parametrach i własnościach strefy przydennej, powierzchni rozdzielającej wodę od dna oraz parametrach objętościowych osadów. Własności dna determinujące obraz pola rozproszonego to:

- morfologia i topografia jego powierzchni oraz warstw poddennych,
- parametry fizyczne osadów oraz parametry płynu wypełniającego osad,
- własności wody przydennej,
- parametry opisujące rozkład rozpraszaczy umieszczonych na niejednorodnej powierzchni i w objętości osadów,
- organizmy i procesy biologiczne związane z dnem morskim.

Parametry wpływające na rozpraszanie:

Impedancja akustycznej

- woda – osad denny

Nierówności powierzchni

- zróżnicowana skala

Niejednorodność objętościowa

- warstwy, pęcherzyki, inkluzja

Rozpraszanie dyskretne

- zwierzęta/minerały/itp.



Rysunek 4-12 Właściwości dna wpływające na rozpraszanie fali akustycznej na dnie morskim

Duża część parametrów opisujących wymienione własności dna jest zależna od siebie. Inne mają niewielki wpływ na proces rozpraszania dźwięku. Stąd do opisu pola akustycznego rozproszonego na dnie morskim wystarczy tylko kilkanaście parametrów mających istotny wpływ na cechy sygnału echa. Szczególnie należy tu wyróżnić [35] parametry opisujące nierówną powierzchnię oraz te opisujące objętość osadu

Parametry opisujące nierówną powierzchnię:

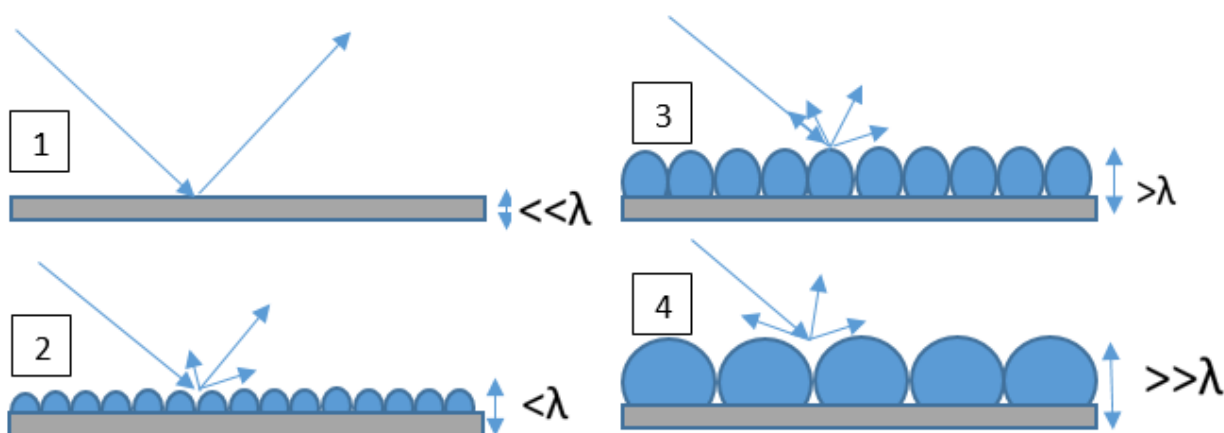
- a) siła spektralna wysokości nierównej powierzchni dna (*spectra strength*) w cm^4 ,

- b) wykładnik widma wysokości nierównej powierzchni dna (*spectral exponent*),
- c) odchylenie standardowe wysokości powierzchni w cm,
- d) odchylenie standardowe nachylenia powierzchni w stopniach,
- e) odchylenie standardowe promienia krzywizny powierzchni w cm,

W zależności od częstotliwości impulsu sondującego, a co się z tym wiąże długości fali, nierówności na dnie mogą w różny sposób oddziaływać na wynik (zobrazowanie w postaci echogramu). Na Rysunku 4-13 pokazano wpływ niejednorodności dna na rozproszenie impulsu sondującego, porównując długość fali do nierówności powierzchniowych.

Kolejne przypadki:

1. gdy fala jest znacznie dłuższa w porównaniu z nierównościami, nie występują dodatkowe odbicia,
2. gdy fala jest dłuższa, występuje nieznaczne rozpraszanie,
3. gdy fala jest krótsza od nierówności, występuje umiarkowane rozpraszanie,
4. gdy nierówności znacznie przewyższają długość fali, rozpraszanie jest dominujące.

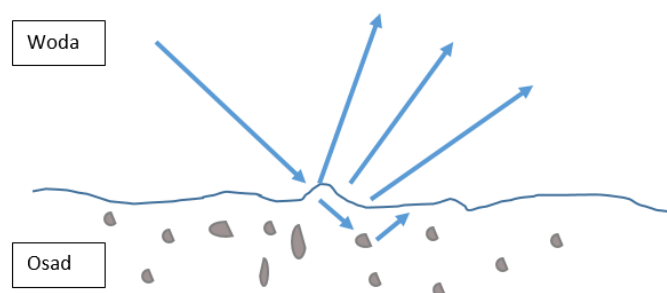


Rysunek 4-13 Rozpraszanie w zależności od nierówności dna

Parametry opisujące objętość osadu: średnia średnica cząstek w mm lub jednostkach ϕ (zob. Rysunek 4-14),

- a) gęstość osadu w kg m^{-3} ,
- b) porowatość (procentowa objętość wody w osadzie),
- c) względna prędkość fali podłużnej w osadzie (w odniesieniu do prędkości w wodzie przydennej),
- d) bezwzględna prędkość fali podłużnej w osadzie, w m s^{-1} ,
- e) współczynnik odbicia dla fali padającej pionowo,

- f) współczynnik tłumienia fali podłużnej w dB m^{-1} ,
- g) prędkość fali poprzecznej w m s^{-1} .



Rysunek 4-14 Rozpraszanie na nierównościach dna i różnych niejednorodnościach w strukturze dna

Wpływ każdego z wymienionych parametrów na rozpraszanie dźwięku często zależy od szczególnych właściwości lokalnego ekosystemu, jego historii, struktury i aktywności życia biologicznego. Dla sygnałów niskoczęstotliwościowych, jakimi są impulsy emitowane przez echosondę parametryczną, głównymi geoakustycznymi parametrami dna implikującymi głębokość penetracji sygnałów jest jego impedancja akustyczna oraz tłumienie fali podłużnej w osadzie.

Istnieje szereg różnych modeli matematycznych opisujących zjawisko rozpraszania wstecznego fali akustycznej łączących w sobie informacje związane z propagacją dźwięku w osadach na podstawie modeli odbicia/transmisji oraz modeli określających rozpraszanie z uwzględnieniem nierówności dna (od pojedynczych drobin osadów, poprzez denne falowe ukształtowanie piasków, aż do kanionów itp.) oraz niejednorodności objętościowej osadów.

Jedną z trudności sprawdzania wyników modeli dla wysokich częstotliwości do 300 kHz była ograniczona możliwość określenia nierówności dna z dokładnością do cm. Rozwój dwuwymiarowej cyfrowej fotogrametrii oraz trójwymiarowej tomografii na bazie fal rentgenowskich umożliwił walidację wyników symulacji z pomiarami realizowanymi w warunkach rzeczywistych.

Jednym z rozwiązań jest model opracowany przez Jacksona [113,114,115], uwzględniający rozpraszanie zarówno od osadów charakteryzujących się małą, jak i dużą gęstością. Jego kolejna ewolucja [18] uwzględnia również rozpraszanie objętościowe w niejednorodnych warstwach osadów, co może być zapisane w następującej postaci:

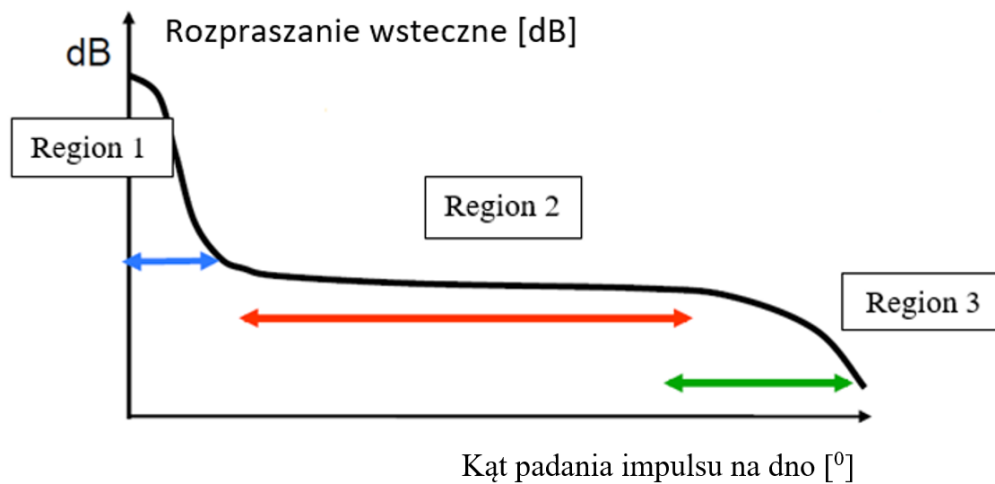
$$BS=10\log_{10}(\sigma_r + \sigma_v) \text{ [dB]} \quad (4.21)$$

gdzie:



σ_r – przekrój czynny na rozpraszanie powierzchniowe,
 σ_v – przekrój czynny na rozpraszanie objętościowe,
 BS – siła rozpraszania wstecznego.

Jednym z parametrów, który można wyznaczyć korzystając z tego modelu jest zależność kątowa od siły rozpraszania wstecznego, która została potwierdzona na podstawie eksperymentów w warunkach naturalnych. W przypadku pionowego padania fali na dno, sygnał odbity rozchodzi się pionowo w górę - efekt może być przyrównany do odbicia lustrzanego (region 1 na Rysunku 4-15). Sygnał ten charakteryzuje się największym natężeniem. Osady składające się z małych cząstek/ziaren (ił/muł) zazwyczaj charakteryzują się małymi nierównościami, co dodatkowo wzmacnia efekt szybkiego zmniejszenia intensywności odbitego impulsu wraz ze wzrostem kąta padania. Im powierzchnia dna jest bardziej płaska, tym wyraźniejsze jest zmniejszenie wartości natężenia impulsu odbitego bezpośredniego przy przechodzeniu do regionu 2. Podczas ukośnego padania fali akustycznej na dno – region 2 – dominuje efekt rozpraszania, natomiast bezpośrednie odbicia od odpowiednio ukształtowanych nierówności zdarzają się sporadycznie. W całym rejonie 2 zależność natężenia impulsu odbitego od kąta padania jest niewielka. Na efekt rozpraszania mają głównie wpływ: impedancja osadu oraz nierówności. Dla osadów o małym stosunku impedancji akustycznych wody oraz osadu jest to obszar, gdzie największy wpływ na echo mają niejednorodności objętościowe.

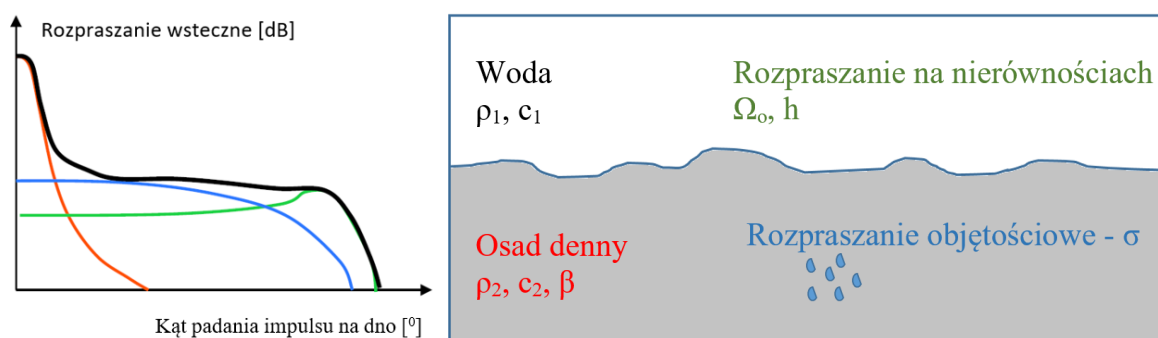


Rysunek 4-15 Współczynnik rozpraszania w zależności od kąta

Region 2 cechuje się prawie płaską charakterystyką w zakresie kątów $10^0/20^0$ – $50^0/60^0$ oraz wyraźnym zróżnicowaniem natężenia odbitego sygnału dla różnych typów osadów. Ta właściwość

wykorzystywana jest podczas klasyfikacji osadów dennych przy użyciu np. echosondy wielowiązkowej. Dla dużych kątów padania impulsu sondującego na dno, przewyższających wartość 60° stopni, dochodzi do silnego zmniejszenia się natężenia dźwięku odbitego. Osady denne przyjmują niewielki procent energii transmitowanej, wpływ nierówności na natężenie echa maleje oraz pojawiają się strefy z cieniem akustycznym.

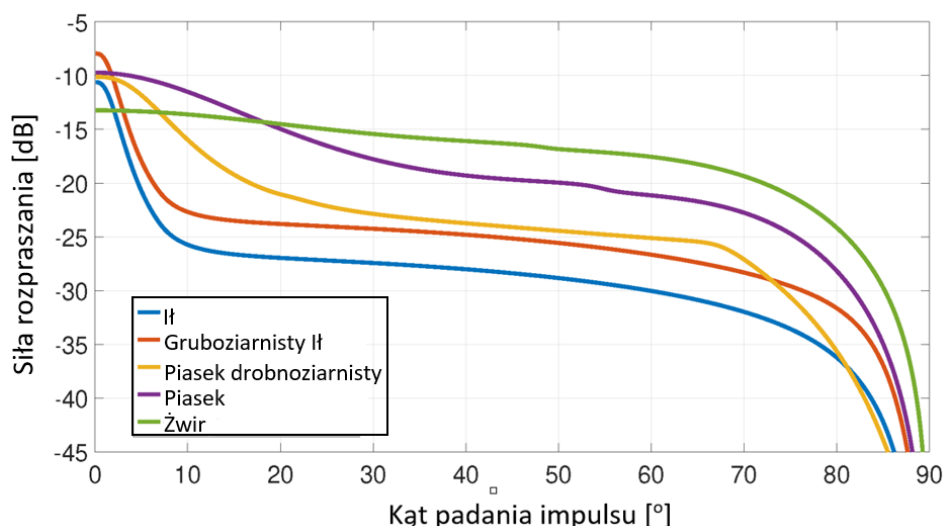
Na Rysunku 4-16 zaprezentowano wpływ trzech czynników na kształtowanie zależności rozpraszania wstecznego od kąta padania. Kolorem czerwonym zaznaczony został obszar odbić lustrzanych – bezpośrednio echa odbite w stronę nadajnika/odbiornika. Kolorem niebieskim zaznaczono wpływ oddziaływań związanych z rozpraszaniem objętościowym, natomiast rozpraszanie związane z nierównościami prezentuje wykres zielony. Czarnym kolorem przedstawiony jest wynik średni dla danych trzech grup oddziaływań.



Rysunek 4-16 Czynniki decydujące o współczynniku rozpraszania.

Na Rysunku 4-17 zaprezentowano zestawienie wyników zależności siły rozpraszania od kąta padania dla różnych typów osadów. Wykresy są wykonane dla częstotliwości 100 kHz przy użyciu modelu APL-UW [Applied Physics Laboratory, University of Washington. APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook; Technical Report APL-UW TR9407; Applied Physics Laboratory, University of Washington: Seattle, WA, USA, 1994.]. Największa różnica pomiędzy poziomami echa dla średnioziarnistego i drobnego piasku wynosi pomiędzy 5 a 10 dB w obszarze pomiędzy 15° a 60° – 70° stopni. Zakładając możliwość klasyfikacji np. 10 typów osadów, których współczynnik rozpraszania zawiera się w przedziale pomiędzy 20 dB a 30 dB, uzyskana zostanie średnia różnica poziomów pomiędzy 2 a 3 dB, co umożliwi przeprowadzenie procesu klasyfikacji osadów. W celu zminimalizowania błędów i zoptymalizowania uzyskiwanych wyników należy zrezygnować z analizy strefy, gdzie wiązka pada wzdłuż normalnej do powierzchni oraz dużych kątów powyżej 70° .

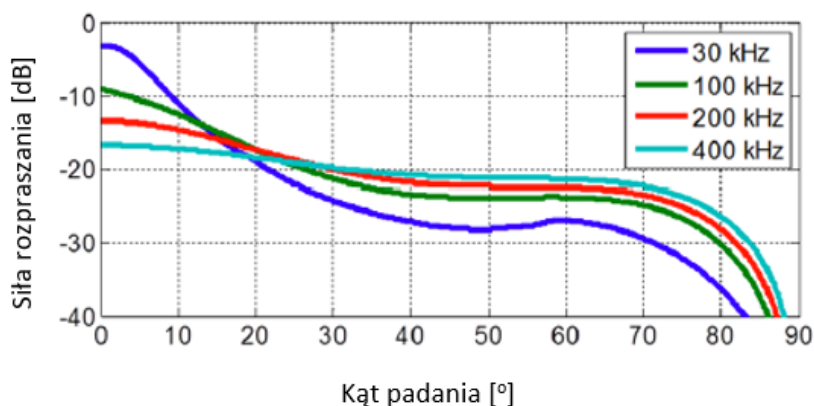




Rysunek 4-17 Siła rozpraszania w zależności od kąta padania i typu osadu na podstawie c High-frequency Ocean Acoustic Models Handbook, APL-UW TR9407, 1994.

Dokładność rozróżniania typów osadów można zwiększyć stosując sondowanie tego samego obszaru impulsami o różnych częstotliwościach.

W zależności od częstotliwości impulsu sondującego dno może być traktowane jako nierównomierne dla impulsów wielkiej częstotliwości, natomiast dla fali małej częstotliwości, np. fali różnicy częstotliwości, jak w przypadku echosondy parametrycznej, to samo dno nie będzie zawierało znaczących nierówności. Na podstawie np. modelu APL-UW można oceniać wpływ częstotliwości impulsów na wartość siły rozpraszania dla tego samego typu osadu dennego. Na Rysunku 4-18 zaprezentowano wyniki sondowania czterema impulsami o różnych częstotliwościach osadu złożonego ze średnioziarnistego piasku.



Rysunek 4-18 Siła rozpraszania w zależności od kąta na podstawie modelu APL-UW High-frequency Ocean Acoustic Models Handbook, APL-UW TR9407 1994.

Analizując powyższy wykres, można stwierdzić, że ta sama powierzchnia będzie gładka dla 30 kHz, z silnym echem dla kąta padania 0° – 10° oraz mocno rozproszonym echem dla kątów padania w zakresie $10^{\circ}/20^{\circ}$ – 60° stopni (dominujące w danym przypadku jest rozpraszanie objętościowe). Impuls o częstotliwości 400 kHz, jest rozpraszany podobnie niezależnie od kąta padania. Biorąc pod uwagę wszystkie krzywe, w okolicach kąta padania równego 0° różnice wartości siły rozpraszania wstecznego są w przedziale 14 dB, natomiast dla 45° zmiany wynoszą 7dB. W przypadku analizy powyższych dwóch wykresów zamieszczonych na Rysunkach 4-17 oraz 4-18 należy zwrócić uwagę na interpretacje danych, jakie są pozyskiwane przy użyciu echosondy wielowiązkowej. Aktualnie dostępne urządzenia mogą przeprowadzić sondowanie dna w zakresie 0° – 65° w przypadku pojedynczej głowicy. Możliwość zmiany częstotliwości w szerokim paśmie powoduje zmianę geometrii wykresów definiujących siłę rozpraszania dźwięku, a co się z tym wiąże, może doprowadzić do niepoprawnej interpretacji otrzymanych wyników. Dlatego bardzo ważne jest wykonywanie pomiarów mających na celu klasyfikację/kalibrację z ustawionymi na stałe parametrami urządzenia (między innymi częstotliwością impulsu).

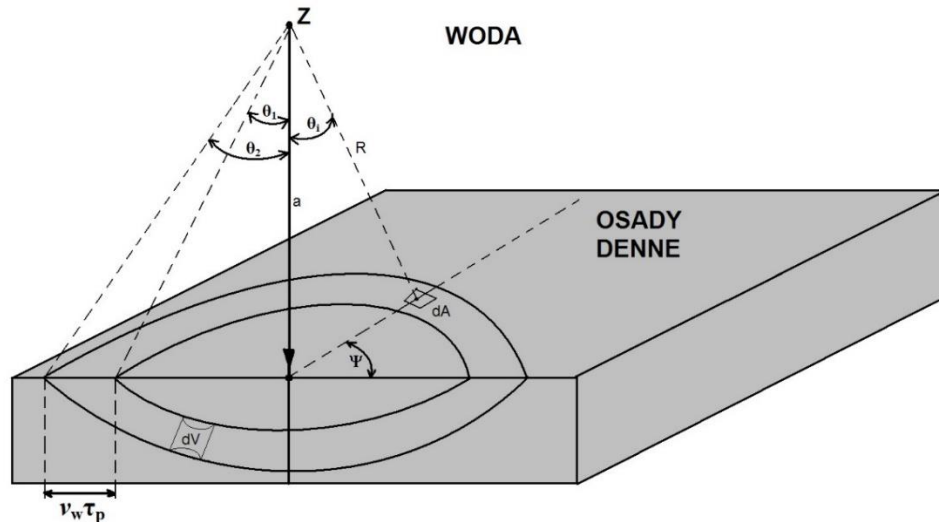
4.3 Równie sonarowe

Wpływ czynników zewnętrznych, a zwłaszcza tłumienia absorpcyjnego na wskazania przyrządów pomiarowych, można ocenić korzystając z równania sonarowego odnoszącego się do przypadku sondowania dna morskiego. Rozpatrywany jest wąskopasmowy, monostatyczny system echosondy usytuowanej w punkcie Z, będący źródłem fali akustycznej, padającej na dno pod kątem θ_i , znajdujący się w wodzie w odległości R od dna morskiego złożonego z warstw osadów dennych. Charakterystyka kierunkowa promieniowania $b(\varphi, \varphi)$ i odbioru $b'(\varphi, \varphi)$, gdzie φ i φ określają szerokość wiązki głównej. Źródło emituje krótki impuls akustyczny o czasie trwania τ_p . Prędkość propagacji fal akustycznych w wodzie wynosi c . W odległości R impuls pada na dno morskie o powierzchni A, ulega częściowemu rozproszeniu na wierzchniej warstwie dna $S_s(\theta_i)$, częściowo zaś wnika w głąb osadów dennych, gdzie ulega rozpraszaniu na niejednorodnościach ośrodka. Pomijając rozpraszanie objętościowe w dnie morskim, część sygnału jest wstecznie rozproszona w kierunku źródła jako suma losowych elementów rozpraszających pochodzących z dużej liczby elementarnych obszarów dA w obrębie obszaru A. Opisaną sytuację ilustruje Rysunek 4-19. Natężenie powracającego sygnału echa może zostać zapisane jako suma dwóch składowych [36]:

$$I(t) = I_i(t) + I_v(t) \quad (4.22)$$

gdzie:

- $I_i(t)$ określa natężenie sygnału rozproszonego na powierzchni dna,
- $I_v(t)$ opisuje natężenie sygnału rozproszonego na niejednorodnościach osadów dennych, która w dalszych rozważaniach zostanie pominięta.



Rysunek 4-19 Geometria propagacji impulsu akustycznego

Przy odbiorniku natężenie sygnału $I_r(\theta_i)$ może być określone jako suma odbić od grupy obszarów dA [np. Urick (1983)]:

$$I_r(\theta_i) = \frac{I_s}{R^4 10^{\frac{2\alpha_w R}{10}}} \int s_s(\theta_i) b(\varphi, \phi) b'(\varphi, \phi) dA \quad (4.23)$$

Często to równanie wyraża się w formie logarytmicznej jako równanie sonarowe opisujące działanie systemów akustycznych (np. [36]):

$$EL(\theta_i) = SL(\theta_i) - 2TL(\theta_i) + TS_b(\theta_i) \cdot \quad (4.24)$$

gdzie:

$SL(\theta_i)$ – poziom sygnału nadawanego,

$TL(\theta_i)$ – tłumienie wynikające z drogi,

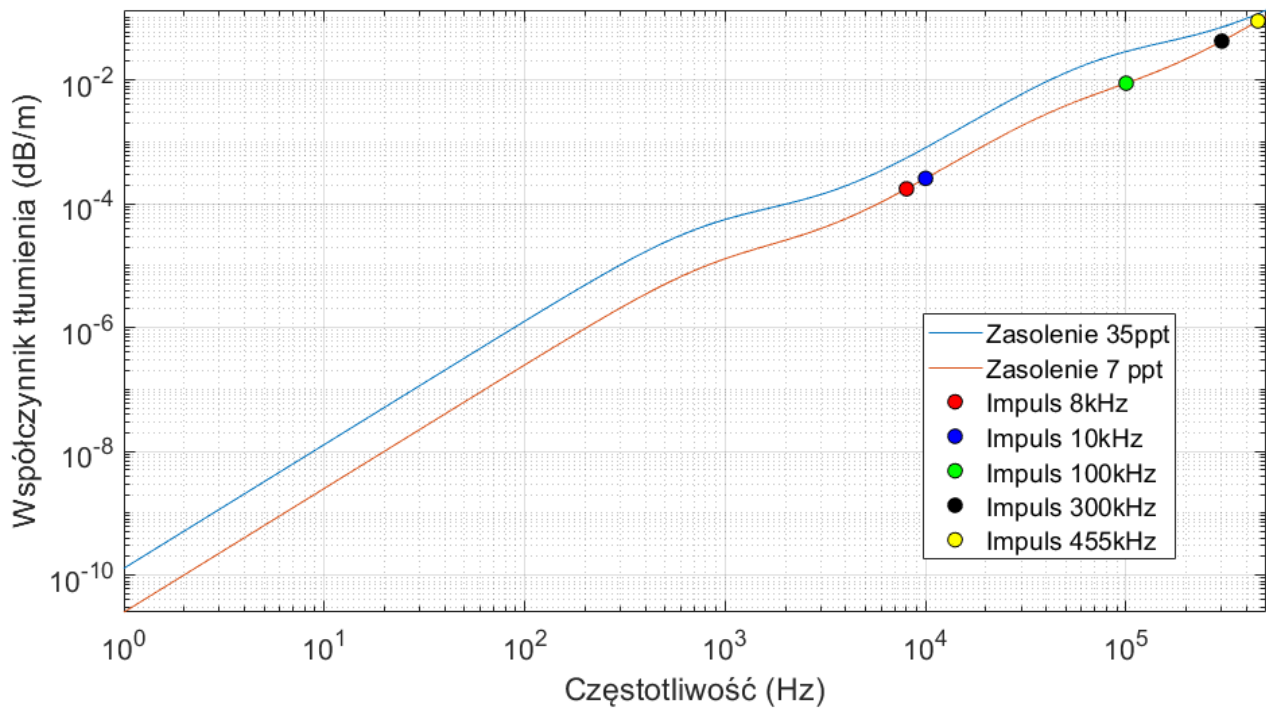
$TS_b(\theta_i)$ – siła celu,

Poziom echa jest zazwyczaj wyrażony w dB względem ciśnienia 1uPa w odległości 1m od przetwornika. Poziom źródła opisany jest jako $SL(\theta_i) = 10\log(I_s(\theta_i))$ względem natężenia referencyjnego I_{ref} w odległości 1m od przetwornika. Poziom odbieranego echa wynosi $EL(\theta_i) = 10\log(I_R(\theta_i))$ przy przetworniku i jest odniesiony do natężenia referencyjnego I_{ref} .

Straty transmisyjne wynikające z drogi, którą przebywa impuls sondujący, w przypadku propagacji sferycznej opisane są następującym wzorem:

$$2TL = 2\alpha_w R + 40 \log R \quad (4.25)$$

R jest odległością do dna, natomiast α_w to tłumienie dźwięku w wodzie dB m^{-1} [42–43]. Zależność współczynnika tłumienia od częstotliwości przedstawiona jest na wykresie dla częstotliwości systemów używanych podczas badań prezentowanych w niniejszej rozprawie doktorskiej (zob. Rysunek 4-20).



Rysunek 4-20 Współczynnik tłumienia w zależności od częstotliwości wyznaczony na podstawie zależności Francois-Garrisona [42, 43]

Siła celu, energia rozproszona od dna/objektu znajdującego się na dnie - TS_b , zdefiniowana jest jako logarytm proporcji natężenia echa impulsu w odległości 1m od celu względem natężenia fali padającej:

$$TS_b = 10 \log \left(\frac{I_{echo_1m_target}}{I_{at_target}} \right) \quad (4.26)$$

W danym przypadku może być ona określona jako:

$$TS_b = 10 \log \int_A s_s(\theta_i) b(\varphi, \phi) b'(\varphi, \phi) dA \quad (4.27)$$

Przyjmując, że współczynnik rozproszenia wstecznego dna morskiego $S_s(\theta_i)$ jest niezależny od kąta padania wewnątrz nadźwiękawianego obszaru, równanie sonarowe można uprościć do następującej postaci:

$$\overline{S_i(\theta_i)} = EL(\theta_i) - SL(\theta_i) + 2TL(\theta_i) - 10 \log \overline{A(\theta_i)} \quad (4.28)$$

Hellenquin z zespołem w 2003 roku podał, że dla echosondy wielowiązkowej SIMRAD EM1000 (jedna z pierwszych echosond wielowiązkowych wyprodukowana w 1990 roku) występuje błąd w interpretacji natężenia echa impulsu, który zależy zarówno od typu materiału znajdującego się na dnie oraz od algorytmów określających siłę rozpraszania zaimplementowanych w oprogramowaniu do echosondy.

Zakładając, że to uproszczenie jest prawidłowe dla różnych typów osadów dennych, można opisać poniższą zależnością powierzchnię nadźwiękawianą:

$$\overline{A(\theta_i)} = \int_A b(\varphi, \phi) b'(\varphi, \phi) dA \quad (4.29)$$

Dla echosond wielowiązkowych, gdy nadźwiękawiana w czasie $ct/2$ powierzchnia odpowiada $A(\theta_i)$, na płaskim dnie można wyróżnić na dwa przypadki:

1. Okrągła lub eliptyczna powierzchnia tworzy się w przypadku sondowania wzdłuż normalnej do dna od momentu dotarcia impulsu do dna do czasu t_2 (zob. Rysunek 4-24);
2. Cienki prostokąt (wynika to z charakterystyk nadawczo-odbiorczych echosondy wielowiązkowej typu Mils-Cross) z maksimum natężenia w punkcie t_4 (zob. Rysunek 4-24). [37].

Dokładny opis nadźwiękawianych powierzchni akwenu zostanie przedstawiony w podrozdziale 4.4.2.

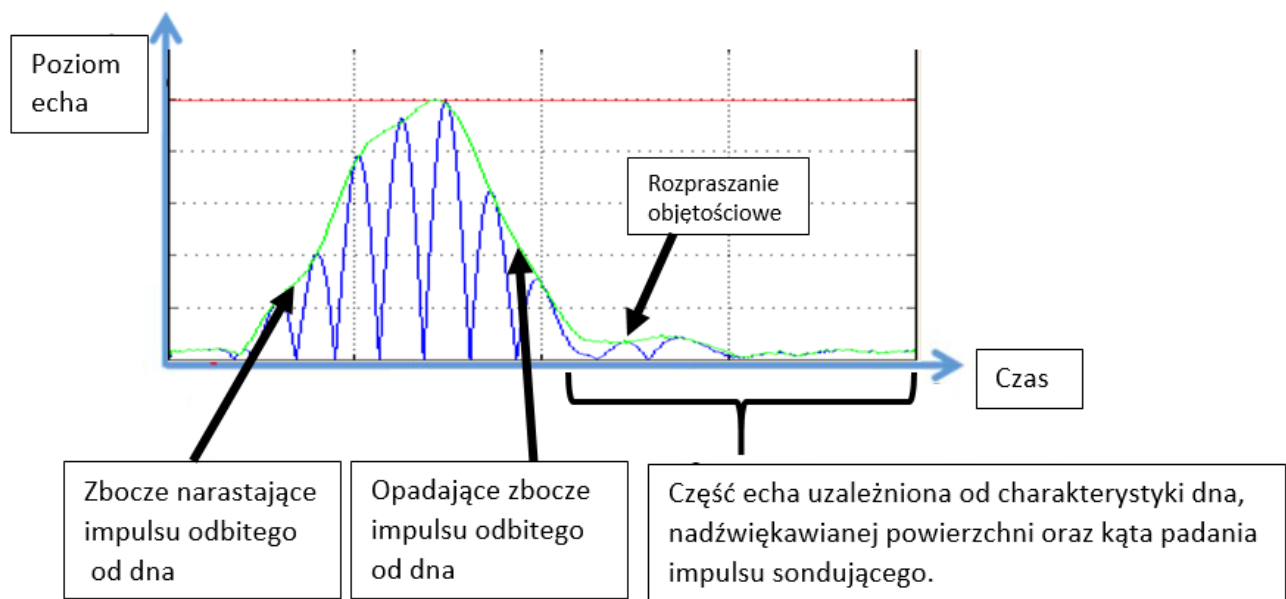
4.4 Struktura echa sygnału odbieranego przez echosondę jednowiązkową

Dla zaprezentowanych modeli opisujących siłę rozpraszania wstecznego od dna morskiego przyjęto założenia dotyczące padania fali pod stałym kątem i ze stałą częstotliwością sygnału, a także nie w pełni uwzględniając oddziaływanie wiązki z dnem morskim. Interpretacja wyników pomiarów na podstawie sygnałów czasowych jest skomplikowanym zadaniem.

4.4.1 Padanie impulsu sondującego wzdłuż normalnej do powierzchni dna – echosonda jednowiązkowa

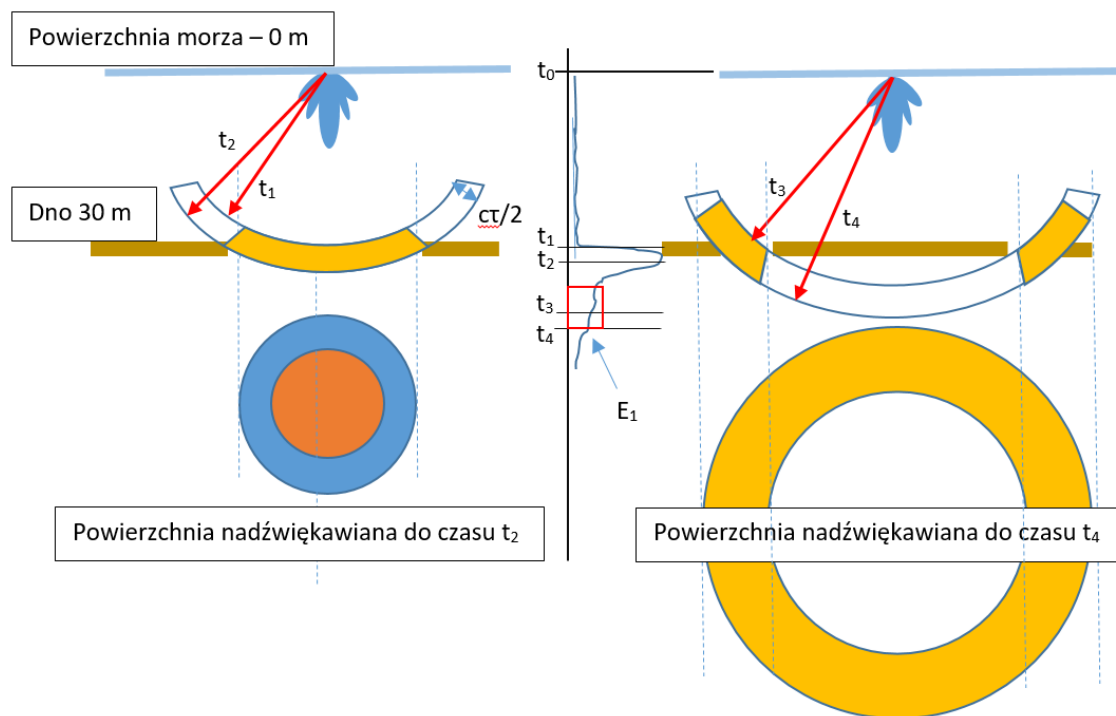
Przykładowy kształt impulsu echa przy sondowaniu wiązką skierowaną prostopadłe na dno pokazano na Rysunku 4-23. W pierwszej fazie widać szybko narastającą obwiednię, co jest wynikiem docierania czoła fali do dna, a następnie przez pewien czas następuje ustabilizowanie poziomu obwiedni przy założeniu, że echo od powierzchni jest ograniczone obszarem równym

powierzchni nadźwiękawianej. Kiedy koniec impulsu sondującego dotrze do powierzchni, amplituda obwiedni szybko zmniejsza się a na jej poziom wpływ mają charakterystyki nadawcze, odbiorcze oraz rozwartości wiązki. Poziom echa jest mniejszy niż można by przewidywać w przypadku współczynnika odbicia od gładkiej powierzchni. Jest to spowodowane rozpraszaniem, które redystrybuuje część energii pod innym kątem aniżeli 0° . Ilość energii redystrybuowanej w ten sposób zależy będzie od chropowatości – dla bardzo gładkich powierzchni współczynnik odbicia może być zbliżony współczynnik odbicia lustrzanego (czerwona linia), natomiast w przypadku powierzchni chropowatych amplituda może być silnie stłumiona. Jeżeli dodatkowo występują niejednorodności objętościowe, amplituda może być wyższa od przewidywanej obwiedni uzyskanej od płaskiego homogenicznego dna. Specyficzny kształt obwiedni powracającego echa jest potencjalnie dobrym charakterizatorem dna morskiego. Pierwsze próby przy użyciu tych właściwości echa impulsu zostały przeprowadzone przez Pouliquena i Lurtona w 1992 [44, 45].



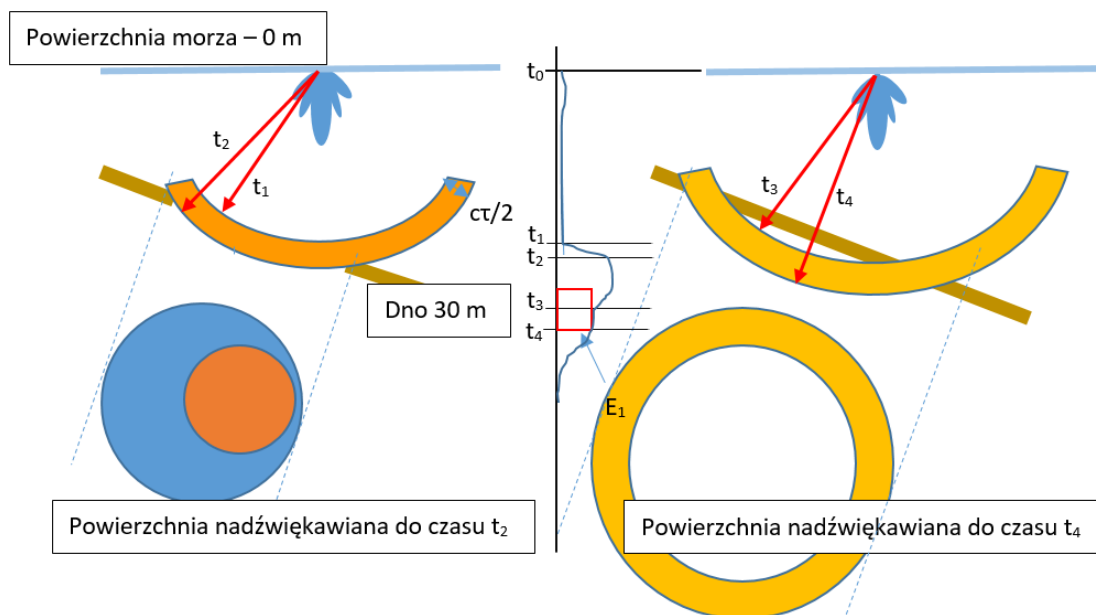
Rysunek 4-21 Kształtowanie obwiedni echa impulsu sondującego

Dodatkowo zależny od czasu obszar nadźwiękawiany przez echosondę jednowiązkową, w przypadku pionowego padania impulsu sondującego na płaskie dno, może być podzielony na dwa podobszary. Pierwszy o postaci koła o środku wyznaczonym przez punkt odpowiadający czasowi dotarcia czoła fali do dna t_1 ograniczonego okręgiem złożonym z punktów, do których dociera czoło fali w momencie t_2 , gdy do środka koła dociera koniec impulsu sondującego. Po tym czasie nadźwiękawiane dno może być określone jako rozszerzający się pierścień o promieniu $ct/2$ (druga część impulsu sondującego $t_3 - t_4$) [46, 47].



Rysunek 4-22 Impuls padający pod kątem prostym względem dna morskiego

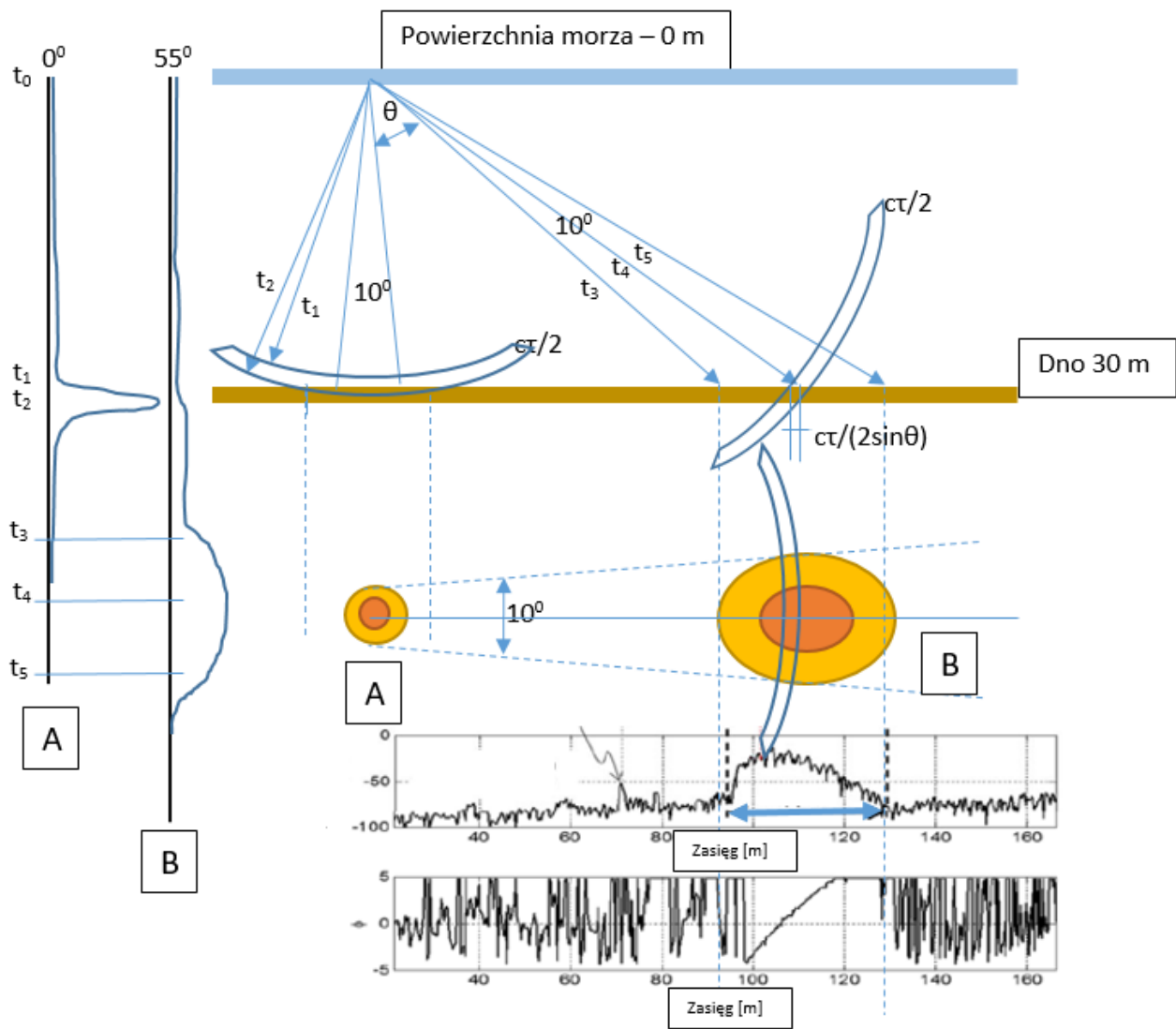
W przypadku przechyleń (podłużnych, poprzecznych) jednostki pomiarowej zmienia się kąt padania wiązki na dno θ_i oraz nadświetlany obszar $A(\theta_i)$. Bez ciągłego monitorowania zmian związanych z nachyleniem dna oraz charakterystyki ruchów jednostki badawczej, a także metod ich kompensacji uzyskiwane przez echosondę wyniki echa będą różne dla tego samego typu osadu dennego, co obrazuje Rysunek 4-23 (zmiana obwiedni echa dla tego samego typu osadu co na Rysunku 4-22 dla dna pochylonego pod kątem 14°).



Rysunek 4-23 Padanie impulsu sondującego na pochyle dno

4.4.2 Padanie impulsu sondującego pod kątem do powierzchni dna – echosonda wielowiązkowa

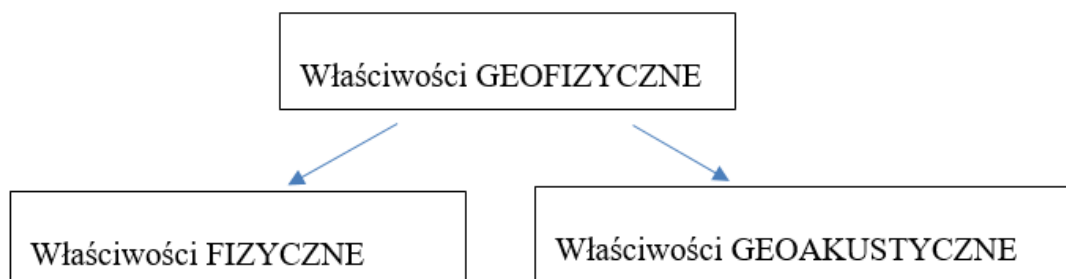
Przy ukośnym padaniu impulsu sondującego amplituda obwiedni echa narasta powoli do momentu, w którym centralna część czoła fali dotrze do dna. Następnie amplituda powoli maleje, a obszar objęty nadźwiękawianiem tworzy kształt owalny. Odebrany sygnał jest znacznie dłuższy i ma łagodniejszy kształt aniżeli w opisanym przypadku, kiedy impuls pada prostopadle do dna. Amplituda również charakteryzuje się niższym poziomem, na co mają wpływ właściwości dna (rozpraszanie objętościowe oraz związane z nierównościami) i charakterystyka odbiorcza anteny. Echosondy wielowiązkowe powyżej założonego kąta padania używają techniki określające środek przesunięcia fazowego w rejonie odebranego echa w celu precyzyjnego spozycjonowania punktu batymetrycznego (użycie w tym przypadku maksymalnej wartości obwiedni nie dałoby precyzyjnego wyniku). Rozdzielczość wglębna impulsu sondującego dla echosondy wielowiązkowej jest podzielona na dwie grupy: pierwszy przypadek dla impulsów propagowanych równoległe lub z nieznacznym odchyleniem od normalnej względem dna (obszar A1), kiedy nadźwiękawiany obszar jest okrągły lub eliptyczny z maksimum w czasie t_2 oraz dla większych kątów padania impulsu sondującego (obszar A2), nadźwiękawiany obszar ma charakter wąskiego prostokąta z maksymalnym punktem natężenia impulsu w t_4 . Na Rysunku 4-24 zaprezentowany został wyidealizowany przykład nadźwiękawianych obszarów.



Rysunek 4-24 Kształtowanie obwiedni impulsu sondującego dla echosondy wielowiązkowej

4.5 Geofizyczne właściwości osadów dennych

Właściwości osadów dennych nazywane geofizycznymi można podzielić na dwie grupy (zob. Rysunek 4-25).



Rysunek 4-25 Schemat składowych właściwości geofizycznych osadów dennych

Niektóre właściwości fizyczne osadów, takie jak gęstość masy, są stosowane jako bezpośrednie parametry wejściowe zarówno w teorii, jak i w modelach akustycznych osadów. Inne, takie jak rodzaj osadu lub średnia wielkość ziarna, są używane pośrednio jako empiryczne wyznaczniki właściwości akustycznych. Przykładem może być praca McKinney'a i Andersona [48], którzy odnieśli siłę rozpraszania w funkcji kąta padania do typu dna, a klasyfikację wyrazili w terminach opisowych, takich jak „piasek” i „błoto”. W wielu modelach wartość średniej wielkości ziarna jest wystarczającym parametrem umożliwiającym sklasyfikowanie typu osadów. Jest ona również jedną z najczęściej mierzonych właściwości osadów i jest zwykle podawana jako średnica cząstek w milimetrach lub w jednostkach logarytmicznych. Jeśli średnica ziarna d podana jest w mm, wielkość ziarna wyrażana jest jako logarytm przy podstawie 2 ze średnicy:

$$\varphi = -\log_2 d \quad 4.30$$

Dla omawianej metody klasyfikacji cząstki gliny mają wymiar ziarna mniejszy niż 0,0039 mm (8 φ), cząstki mułu mają średnicę ziarna od 0,0039 mm do 0,0625 mm (8 φ do 4 φ), a cząstki piasku mają średnicę ziarna od 0,0625 mm do 2,0 mm (4 φ do -1 φ). Cząstki większe niż ziarna piasku są często określane jako żwir. Zastosowano kilka miar logarytmicznej statystyki wielkości ziarna. Najbardziej powszechny jest średni rozmiar ziarna oznaczony symbolem M_z , równy co do wartości φ

$$M_z = -\log_2 \frac{D}{D_0} = -3,32 \log_{10} \frac{D}{D_0} \quad 4.31$$

Gęstość ρ , jest zdefiniowana jako stosunek masy M pewnej ilości substancji do zajmowanej przez nią objętości V :

$$\rho = M/V \quad 4.32$$

Gęstość jest niejednoznacznie przypisana do właściwości fizycznych, np. przez wielu uważana jest za właściwość geoakustyczną (np. [15])

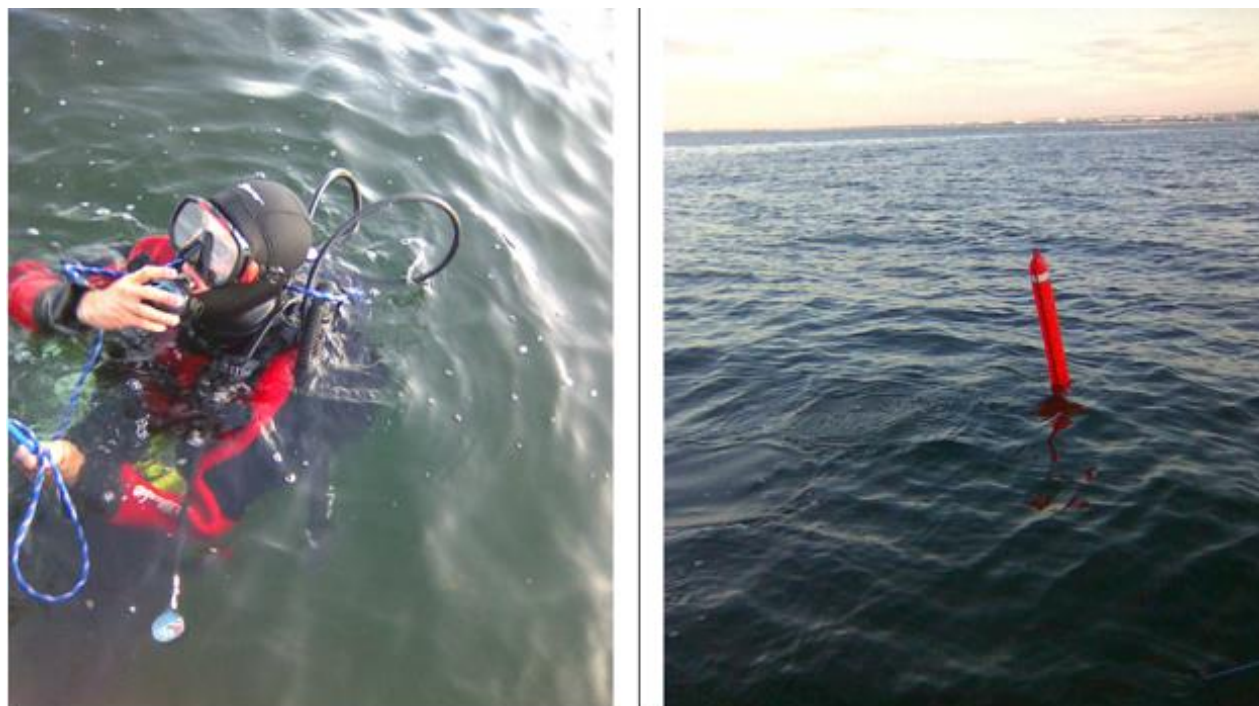
Jednym z wyznaczników definicji porowatości osadów jest właściwość ciał stałych określająca wielkość i ilość pustych przestrzeni wewnątrz materiału. Puste przestrzenie są obszarami, w których nie ma materiału stałego, ewentualnie tylko płyn – najczęściej woda lub powietrze. Porowatość określa się liczbowo jako stosunek sumarycznej objętości tych pustych przestrzeni V_i (porów) do objętości całego ciała V :

$$p = \frac{\sum_i V_i}{V} = \frac{V_p}{V} \quad 4.33$$

Dla wody i osadów morskich będzie to stosunek objętości wody do całej objętości badanego osadu (zakładając, że nie ma w nim cząsteczek gazu). Porowatość jest często wyrażana w procentach, $\eta = 100\beta$.

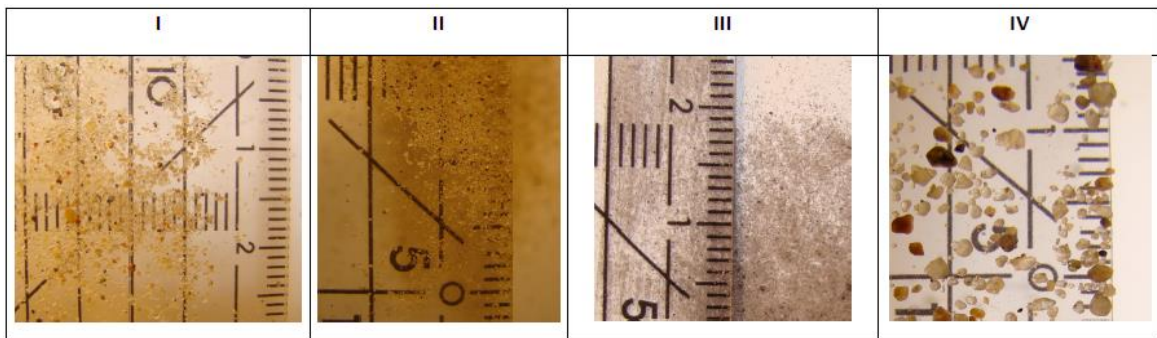
$$\beta = V_p/V \quad 4.34$$

Jest wiele innych parametrów stosunkowo trudnych do zmierzenia, jak np. stosunek objętości gazów do zawartości wody (określenie stopnia nasycenia), przepuszczalność, a także kształt, gęstość i objętość ziarna, gęstość porów, lepkość oraz moduł sprężystości objętości. Wiele z tych właściwości fizycznych nie zostało w modelach zdefiniowanych lub w ogóle nie zostało zmierzonych w warunkach naturalnych.



Rysunek 4-26 Pobieranie osadów dennych podczas pomiarów na Zatoce Gdańskiej

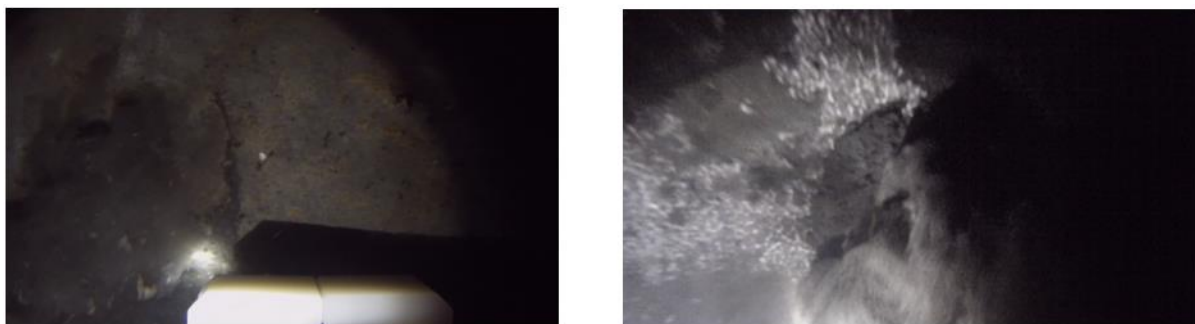
Postęp techniki umożliwia coraz dokładniejsze wykonywanie pomiarów parametrów fizycznych osadów dennych. W ramach prowadzonych badań w obrębie południowego Bałtyku pobrane zostały próbki osadów wierzchniej warstwy (Rysunek 4-26) oraz wykonane zostały zdjęcia dna w wybranych punktach pomiarowych (Rysunek 4-27,28,29). Dane posłużyły do badań w warunkach laboratoryjnych mających na celu skalibrowanie układów pomiarowych oraz ocenę parametrów akustycznych osadów. Dodatkowo osady poddano pomiarom średnicy ziaren w celu porównania z ogólnodostępnymi mapami osadów południowego Bałtyku. Zdjęcia wykonane podczas badań dodatkowo umożliwiają lokalizację dna piaszczystego z charakterystycznymi zafalowaniami, które widoczne są niekiedy na obrazach z sonaru bocznego czy echosondy wielowiązkowej.



Rysunek 4-27 Średnice ziaren osadów dennych badanych w warunkach laboratoryjnych



Rysunek 4-28 Zdjęcia osadów dennych w okolicach moła w Sopocie



Rysunek 4-29 Mulisty osad zarejestrowany w pobliżu Helu na głębokości 50 m

Parametry geoakustyczne, takie jak prędkość i tłumienie fal w osadach, są niezbędnymi wielkościami używanymi w teorii, definiują propagację fal w wierzchniej warstwie dna morskiego, ale również są potrzebne jako dane wejściowe do modeli akustycznych dna. Akustyczna impedancja jest innym często spotykanym parametrem geoakustycznym, którego użyteczność wynika z wysokiego stopnia korelacji z innymi parametrami. Podczas gdy naukowcy mieli wolny wybór zestawu parametrów geoakustycznych definiowanych jako dane wejściowe, użytkownicy modeli stają wobec problemu uzyskania wartości parametrów geoakustycznych. W kilku przypadkach (np. model Biota) niektóre parametry geoakustyczne można wyznaczyć metodą pośrednią, takie jak gęstości i moduły sprężystości składników, jak również właściwości masy/objętości osadu, takie jak porowatość i przepuszczalność. Zasadniczo jednak nie ma wystarczającego zestawu zmierzonych parametrów fizycznych ani wystarczającej kompletnej i dokładnej teorii, żeby można było stosować takie podejście w przypadku wszystkich parametrów. Dlatego bezpośredni pomiar gęstości objętościowej i pomiary właściwości fal w warunkach rzeczywistych są preferowaną metodą wyznaczania parametrów geoakustycznych. Prędkość fali jest zależna od częstotliwości, dlatego zalecane jest, aby częstotliwość impulsów używanych do pomiaru była zbliżona do częstotliwości sygnałów sondujących stosowania w urządzeniach echolokacyjnych. Niestety takie szczegółowe pomiary geoakustyczne są rzadko wykonywane, wymagają oprzyrządowania, specjalistycznej wiedzy oraz bardzo dokładnego planu. W praktyce najczęściej realizowane są pomiary kilku właściwości fizycznych, takich jak średnia wielkość ziarna i porowatość. W takim przypadku możliwe jest zastosowanie empirycznej regresji do estymacji wartości parametrów geoakustycznych. Nie należy tego mylić z inwersją modelu akustycznego, który określa inne podejście do tego problemu.

Teoria płynów wymaga opisanie osadu w kategoriach trzech parametrów, zwykle są to gęstość objętościowa, prędkość fali podłużnej i tłumienie fali podłużnej. Dodatkowe parametry geoakustyczne są potrzebne, jeśli dno morskie jest modelowane jako izotropowy, sprężysty ośrodek stały, w którym mogą rozprzestrzeniać się fale poprzeczne. W tym przypadku gęstość osadu i zestaw czterech właściwości sprężystych musi być znany (prędkość fali podłużnej i poprzecznej oraz ich tłumienie).

Osady, w szczególności piaski, można traktować jako media poro-sprężyste pozwalające na niezależny ruch płynu wypełniającego puste przestrzenie pomiędzy cząsteczkami. Modelowanie rozproszenia dźwięku od poro-sprężystego dna morskiego wymaga kilku parametrów fizycznych, z których wiele można określić na podstawie parametrów geoakustycznych. Sytuacja jest odwrotna w porównaniu do modelu opartego na teorii płynów, gdzie parametry geoakustyczne są danymi



wejsciowymi modelu i są często wnioskowane na podstawie parametrów fizycznych. Parametry fizyczne wymagane przez model bazujący na poro-sprężystej teorii mogą być podzielone na cztery grupy:

- (1) Płyn – gęstość, lepkość i objętość właściwa;
- (2) Pory – porowatość, wielkość i przepuszczalność;
- (3) Ziarno – gęstości i koncentracja objętościowa;
- (4) Parametry strukturalne – moduł odkształcenia objętościowego i moduł ścinający.

Uzyskanie praktycznych wartości dla kilku parametrów poro-sprężystych jest aktualnie nierozwiązanym problemem, do którego rozwiązania zbliża się połączenie wyników badań doświadczalnych i teoretycznych przybliżeń.

Teoretyczne modele dna morskiego opisane powyżej zakładają, że osad morski jest jednofazowy (płynny lub stały) lub dwufazowy (płyn-woda). W rzeczywistości osady są dość złożonymi zbiorami różnych typów cząstek, płynu porowatego, materii organicznych, a czasami wolnych cząstek gazu. Nawet niewielka ilość cząstek gazu pomiędzy ziarnami osadu może znacznie zmienić prędkość fali podłużnej w osadach, jej tłumienie i rozpraszanie w objętości osadu. Parametry takie jak gęstość, prędkość oraz tłumienie fali poprzecznej nie są tak bardzo wrażliwe na występowanie niewielkich pokładów gazu w osadach. Przykład sondowania obszaru, w którym występują osady zawierające pęcherzyki gazu zostanie zaprezentowany w wynikach badań w warunkach naturalnych. W Tabeli 4-2 zaprezentowano wartości parametrów geoakustycznych dla wybranych typów osadów.

Tabela 4-1 Wartości parametrów geoakustycznych dla wybranych typów osadów

| Nazwa osadu | Wielkość ziaren osadu $M_z (\varphi)$ | Współczynnik gęstości | Współczynnik prędkości dźwięku | Współczynnik tłumienia | Prędkość dźwięku |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------|------------------|
| Piasek żwirowy | -1,0 | 2,492 | 1,3370 | 0,01705 | 2005,5 |
| Bardzo gruboziarnisty piasek | -0,5 | 2,401 | 1,3067 | 0,01667 | 1960,5 |
| Błotnisty żwir | 0 | 2,314 | 1,2778 | 0,01630 | 1916,7 |
| Piasek gruboziarnisty/Piasek żwirowy | 0,5 | 2,231 | 1,2503 | 0,01638 | 1875,45 |
| Żwir błotnisty piasek | 1,0 | 2,151 | 1,2241 | 0,01645 | 1836,15 |
| Średni piasek | 1,5 | 1,845 | 1,1782 | 0,01624 | 1767,3 |

| | | | | | |
|--|-----|-------|--------|---------|---------|
| Błotnisty żwir | 2,0 | 1,615 | 1,1396 | 0,01610 | 1709,4 |
| Drobny piasek/Mulisty piasek | 2,5 | 1,451 | 1,1073 | 0,01602 | 1660,95 |
| Błotnisty piasek | 3,0 | 1,339 | 1,0800 | 0,01728 | 1620 |
| Bardzo drobny piasek | 3,5 | 1,268 | 1,0568 | 0,01875 | 1585,2 |
| Piasek gliniasty | 4,0 | 1,224 | 1,0364 | 0,02019 | 1554,6 |
| Gruboziarnisty muł | 4,5 | 1,195 | 1,0179 | 0,02158 | 1526,85 |
| Piaszczysty muł/błoto żwirowe | 5,0 | 1,169 | 0,9999 | 0,01261 | 1499,85 |
| Średnioziarnisty muł glina z piasku mułowego | 5,5 | 1,149 | 0,9885 | 0,00676 | 1482,75 |
| Piaszczyste błoto | 6,0 | 1,149 | 0,9873 | 0,00386 | 1480,95 |
| Drobny muł/gliniasty muł | 6,5 | 1,148 | 0,9861 | 0,00306 | 1479,15 |
| Glina piaszczysta | 7,0 | 1,147 | 0,9849 | 0,00242 | 1477,35 |
| Bardzo drobny muł | 7,5 | 1,147 | 0,9837 | 0,00194 | 1475,55 |
| Mulista glina | 8,0 | 1,146 | 0,9824 | 0,00163 | 1473,6 |
| Glina | 9,0 | 1,145 | 0,9800 | 0,00148 | 1470 |

Podsumowując, należy stwierdzić, że zazwyczaj rozpraszanie zależy od impedancji akustycznej („twardość” lub „miętkość” osadu), chropowatości dna morskiego i obecności niejednorodności występujących na dnie lub górnej warstwie osadów, w tym pęcherzyków gazu, fragmentów muszli i żywych organizmów. Wiele z tych czynników wpływa na amplitudę echa od dna morskiego i jest przedmiotem zainteresowania naukowców, którzy chcą w jak najdokładniejszym stopniu scharakteryzować dno morskie na podstawie pomiarów akustycznych. Należy jednak zauważyć, że niektóre sytuacje mogą całkowicie zmienić sposób, w jaki powinno się zinterpretować osady na danym akwenie. Jako przykład można przedstawić dno muliste, które będzie dawało odbicie o dużej amplitudzie dla kąta bliskiego 0° i będzie słabe podczas sondowania pod większym kątem, gdyż przeważającym procesem będzie rozpraszanie wsteczne. W przypadku, gdy w osadach będą występowały pęcherzyki gazu o odpowiedniej średnicy, odpowiedź kątowa będzie sugerowała występowanie osadu o wyższym stopniu niejednorodności. Cały czas trwa postęp w opracowywaniu coraz dokładniejszych modeli, co jest bardzo trudnym zadaniem ze względu na skomplikowane warunki środowiskowe, różnego rodzaju urządzenia pomiarowe, które nie zawsze posiadają charakterystyki eksploatacyjne lub zaimplementowane systemy do kalibracji urządzenia. Modele i opisy prezentowane w danej pracy służą jako przewodnik podczas analizy dna morskiego

na podstawie rozproszenia wstecznego, jednak należy zachować ostrożność, aby uniknąć błędów w interpretacji.

5 Metodyka pomiarów w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych

W niniejszym rozdziale opisane zostaną kalibracja układów pomiarowych oraz wpływ błędów na pozyskiwane wyniki. Uwzględnienie opisywanych procedur podczas przygotowywania systemu pomiarowego do pracy zwiększy prawdopodobieństwo pozyskania wyników niezawierających błędów grubych, których nie będzie można usunąć podczas procedury analizy danych w warunkach laboratoryjnych.

5.1 Czynniki decydujące o dokładności pomiarów w warunkach rzeczywistych

Przed przystąpieniem do badań niezbędne jest wykonanie procedur kalibracyjnych systemów pomiarowych oraz ocena wpływu czynników zewnętrznych, związanych z systemem pomiarowym, które mogą mieć wpływ na dokładność pozyskiwanych wyników. Poniżej przedstawione aspekty mają wpływ na pozyskiwanie sygnałów sondujących z możliwie dużą dokładnością w odniesieniu do pozycjonowania na dnie oraz określania siły rozpraszania:

- Pozycjonowanie sondowanego punktu dna oraz synchronizacja czasowa rejestrowanych danych przy użyciu systemu georeferencyjnego;
- Kąt padania wiązki akustycznej na dno;
- Szum akustyczny, np. pochodzący od jednostki pomiarowej (silnik, śruba, szum opływu kadłuba kadłuba) oraz szumy tła;
- Szum elektryczny (urządzenia elektryczne, tj. agregaty, alternatory, przetwornice);
- Charakterystyka słupa wody – zmiany prędkości dźwięku z głębokością, absorbcja dźwięku dla danych warunków środowiskowych, prędkość dźwięku przy przetworniku w przypadku echosondy wielowiązkowej;
- Napowietrzenie strefy przy przetworniku – spowodowane np. nieprawidłowo zainstalowanym przetwornikiem;
- Wibracje przetwornika;
- Wzajemny wpływ innych urządzeń akustycznych na wyniki (równoległe sondowanie przy użyciu echosondy wielowiązkowej oraz parametrycznej wymusza zastosowanie systemu wyzwalającego momenty nadawania).

W celu eliminacji potencjalnych błędów pomiarowych należy przeprowadzić kalibrację wszystkich urządzeń w szczególności zwracając uwagę na:

- Określenie charakterystyk kierunkowych zarówno nadawczych, jak i odbiorczych,
- Stabilizację układów (czujnik przechyłów),
- Oszacowanie pola powierzchni nadźwiękowanego obszaru, współczynnika absorpcji, dobór wzmocnienia sygnału przez układy typu TVG wzmacniające impulsy z zasięgiem,
- Integracja wszystkich pomocniczych instrumentów pomiarowych, synchronizacja czasowa,
- Synchronizacja czasowa układów echolokacyjnych,
- Określenie położenia poszczególnych przetworników względem czujnika ruchu ,
- Określenie położenia poszczególnych przetworników względem czujnika GPS ,
- Kalibracja echosondy wielowiązkowej na podstawie jednoznaczności wskazań wzdłuż oraz w poprzek transektów pomiarowych,
- Weryfikacja poszczególnych kanałów pracy echosondy wielowiązkowej (Kongsberg – w oprogramowaniu SIS można zweryfikować pracę poszczególnych przetworników odbiorczych);

Przed przystąpieniem do pomiarów należy zebrać dodatkowe informacje o urządzeniach:

- Zakres częstotliwości dla impulsów sondujących
- Długość, kształt, amplituda impulsu sondującego,
- Parametry przetwornika – natężenie impulsu nadawczego, czułość odbiorcza,
- Głębokość zanurzenia przetwornika,
- Przechyły wzdłużne, poprzeczne, skrętne, przewyższenia wskazywane przez czujnik ruchu powinny mieć wartości zerowe,
- Wersje oprogramowania, na jakich przeprowadzane są badania,
- Nastawy oprogramowania – należy zapisać wszystkie parametry pracy algorytmów odpowiedzialnych za określanie punktów na dnie, filtrację, wzmocnienie, np. TVG;

Wiele z wymienionych parametrów można zapisywać w pliku razem z innymi parametrami.

W przypadku echosondy wielowiązkowej dodatkowo należy zwrócić szczególną uwagę na synchronizację systemów georeferencyjnych, synchronizację czasu oraz czujnika ruchu w celu dokładnego określenia kąta padania wiązki na dno i prawidłowego działania algorytmu beamformingu, co umożliwi poprawną lokalizację punktów sondażowych na dnie.

Wysokiej jakości dane akustyczne są pozyskiwane za pomocą urządzeń echolokacyjnych, w których jako pierwszy punkt przygotowania do wykonania pomiarów poprawnie zminimalizowano



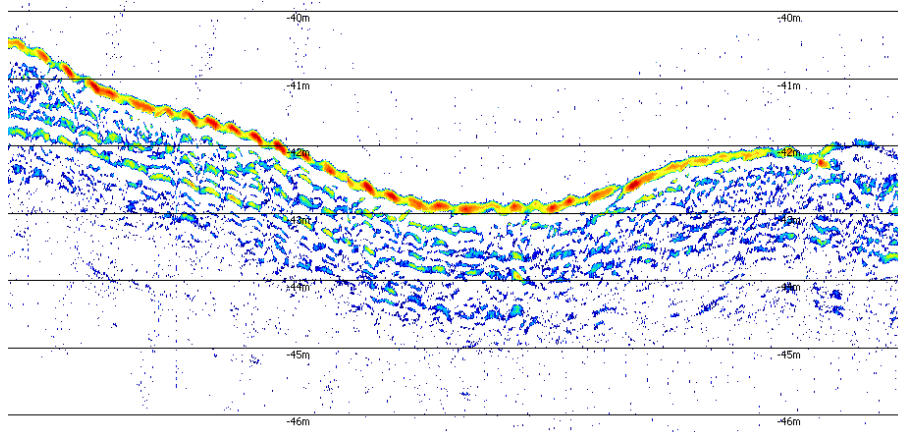
wpływ szumów (elektrycznych/akustycznych), wpływ przewyższeń i przechyłów oraz wgrano aktualne rozkłady prędkości dźwięku do oprogramowania przetwarzającego sygnały.

Dokładność rejestrowanych danych oraz ich zobrazowanie są inne dla każdego z używanych systemów akustycznych (SBP, MBES i SSS). Sposób rozpoznawania i minimalizowania powstających w trakcie pomiarów artefaktów jest niezwykle istotną cechą umożliwiającą np. zmianę nastaw urządzenia w celu poprawy jakości pozyskiwanych danych [49]. Alternatywną metodą jest oznaczanie i usuwanie niespójnych danych oparte na przeglądaniu nieprzetworzonych danych i ich korekcji, co jest procesem długotrwałym i mało efektywnym [50, 51].

5.1.1 Echosonda parametryczna – procedury kalibracyjne

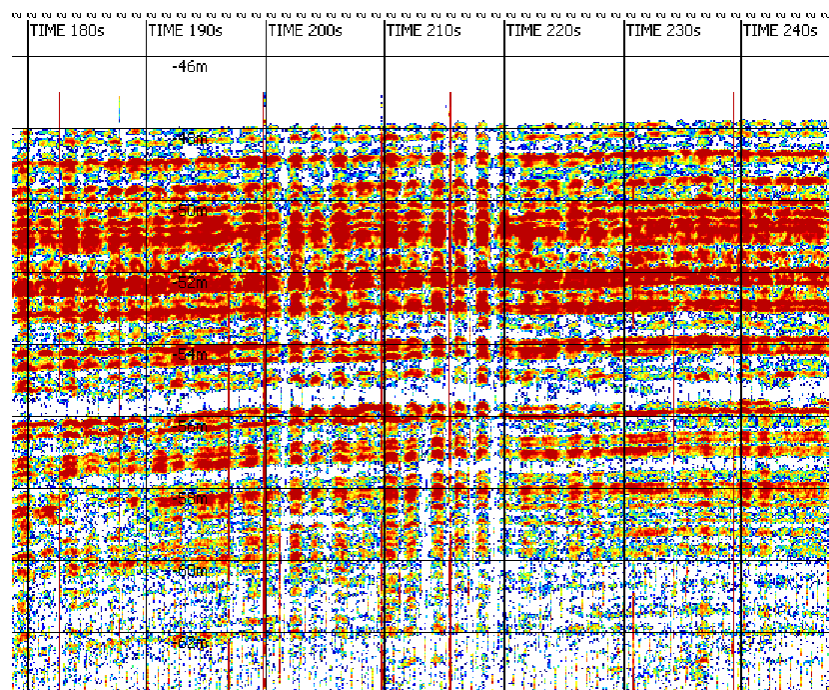
Podstawowym parametrem determinującym jakość pozyskanych danych jest określenie częstotliwości oraz charakterystyki kierunkowej urządzenia, które ma zostać użyte w pomiarach. Przykładowo urządzenie o wąskiej charakterystyce kierunkowej, listkach bocznych o małym poziomie, promieniujące wiązkę wzdłuż normalnej do powierzchni dna nie będzie w zastosowaniu jakim jest tworzenie batymetrii tak skuteczne jak urządzenie o szerszej charakterystyce ze względu na duże zróżnicowanie poziomu rozpraszania przy niewielkich odchyleniach od normalnej. Po wybraniu konfiguracji systemu należy zweryfikować charakterystyki szumów, jakie wpływają na pozyskiwane wyniki. Jedną z metod może być określenie optymalnej prędkości jednostki, zapewniającej szybkie wykonanie pomiarów, ale również niepowodujące zaburzeń opływu (zapewniające niski poziom szumów związanych z opływem wody wzdłuż przetwornika) w stopniu niepozwalającym na wytwarzanie pęcherza powietrznego. Problemy z odbiorem echa mogą być związane z:

- Ruchami platform pomiarowych i napowietrzeniem; dwa poniższe echogramy naświetlają problem związany z odchylaniem wąskiej wiązki od kąta prostego, co w przypadku systemu o wąskiej charakterystyce kierunkowej istotnie wpływa na natężenie odbieranego sygnału (zob. Rysunek 5-1)



Rysunek 5-1 Zróżnicowana siła rozpraszanie wstecznej związanej z przechyłami anteny nadawczo-odbiorczej

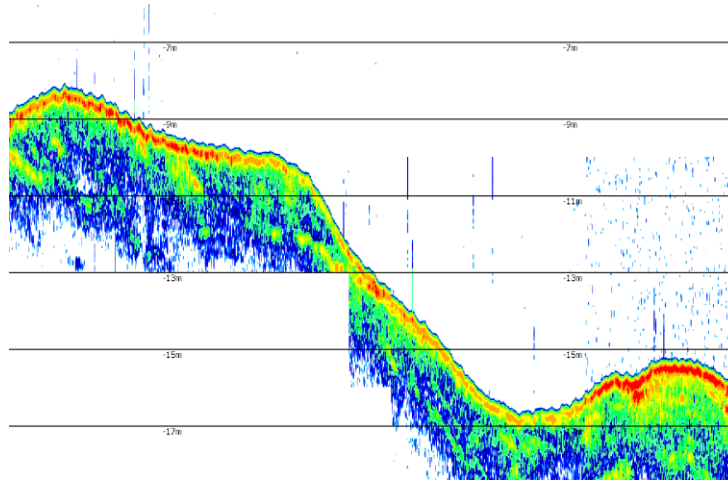
W przypadku pojawienia się pęcherza/pęcherzyków powietrza pod anteną może dochodzić do znacznego zmniejszenia natężenia impulsu odbitego lub okazjonalnie całkowitego zaniku odbieranego sygnału, co wyraźnie widać na Rysunku 5-2.



Rysunek 5-2 Błędy wynikające z napowietrzenia przestrzeni przy przetworniku

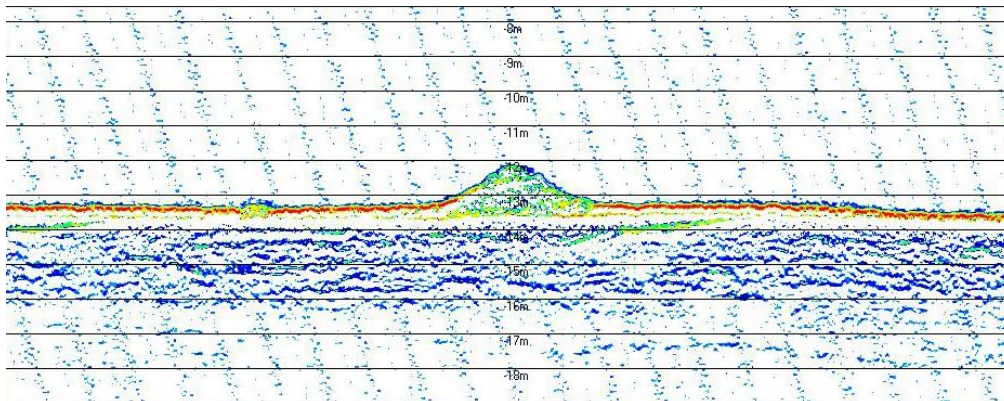
- Nachyleniem dna morskiego; Na rysunku 5-3 widzimy, że natężenie echa może być związane z nachyleniem dna. Nachylenie pomiędzy 3° a 8° nie wpływa znacząco na wyniki, natomiast większy kat nachylenia może prowadzić do zmiany natężenia impulsu odbitego przy zachowaniu tego samego typu osadu dennego. Nachylenie dna wpływa na

nadźwiękawiany obszar analogicznie jak odchylenie przetwornika. Zmiany echa podczas sondowania średnioziarnistego piaszczystego osadu przy różnych nachyleniach dna zaprezentowano na Rysunku 5-3, gdzie wyraźnie widać wpływ kąta nachylenia dna.



Rysunek 5-3 Zmiana natężenia echa w zależności od kąta nachylenia dna dla tego samego typu osadu

- Szumami elektrycznymi, zakłócającymi główne echo. Przykład znajduje się na Rysunku 5-4.

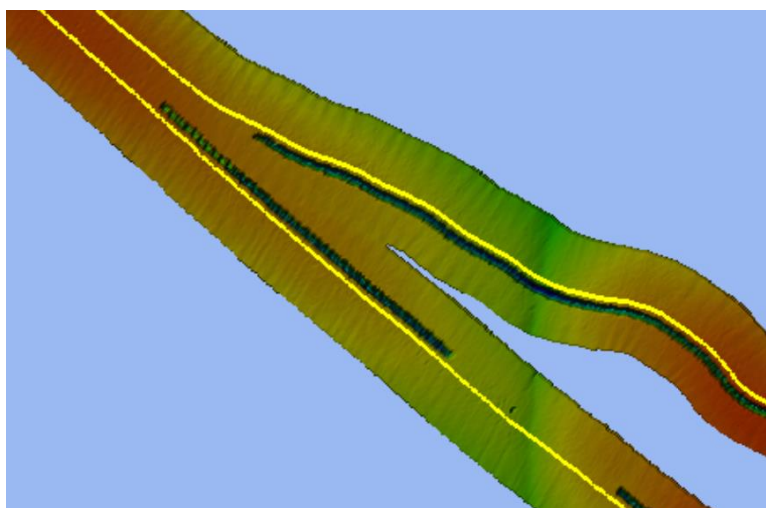


Rysunek 5-4 Zakłócenia elektryczne

- Prędkością jednostki pomiarowej; może ona znacznie wpłynąć na natężenie oraz kształt odbieranych impulsów.
- Echami od ławic rybnych, które mogą powodować znaczne tłumienie echa odbitego od dna, ponieważ układ pomiarowy w zależności od wybranego typu algorytm detekcji dna może uznać echo od ławicy za dno lub z wielokrotnie odbicia ławica/dno mogą wpłynąć na kształt echa charakteryzującego dany typ osadów dennych.

5.1.2 Echosodna wielowiązkowa – procedury kalibracyjne

Standardową procedurą kalibracji echosondy wielowiązkowej stosowaną w celu pozyskania wiarygodnych odczytów związanych z głębokością jest przeprowadzenie szeregu testów mających na celu weryfikację poprawnego skalibrowania systemu pomiarowego. Zapewnia to potwierdzenie, że systemy peryferyjne, np. DGPS, czujnik ruchu, nastawy programowe echosondy wielowiązkowej dadzą w wyniku sondowania dna rzeczywiste i powtarzalne wyniki dla wszystkich kątów impulsów sondujących. Procedury umożliwiają wyeliminowanie większości błędów oprócz tych wynikających np. z przechyłów poprzecznych oraz wzdłużnych (zmian dynamicznych w trakcie badań). Niezbędne jest weryfikowanie i poprawianie otrzymanych wyników przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, jak np. QIMERA firmy QPS, Echoview itp. Istotne jest uzupełnianie w systemie informacji związanej z profilem prędkości dźwięku oraz w zależności od typu przetwornika dostarczanie informacji o prędkości dźwięku przy antenie. Dokładność pozyskiwanych danych od echosondy wielowiązkowej jest największa przy kącie 0° , a najmniejsza przy maksymalnym odchyleniu. Jest to związane z kształtem impulsu echa. W aktualnie dostępnych urządzeniach detekcja amplitudy jest wspierana przez funkcję określania opóźnienia fazowego, co zwiększa dokładność pozycjonowania punktów na dnie. Ewentualnie korekty pozyskanych danych wymagają zarejestrowania wszystkich danych związanych z przewyższeniami i przechyłami jednostki. Na echogramie zaprezentowano obraz z poprawnie skalibrowanego systemu – dwa pasy nakładają się na siebie bez odchyłek (Rysunek 5-5).

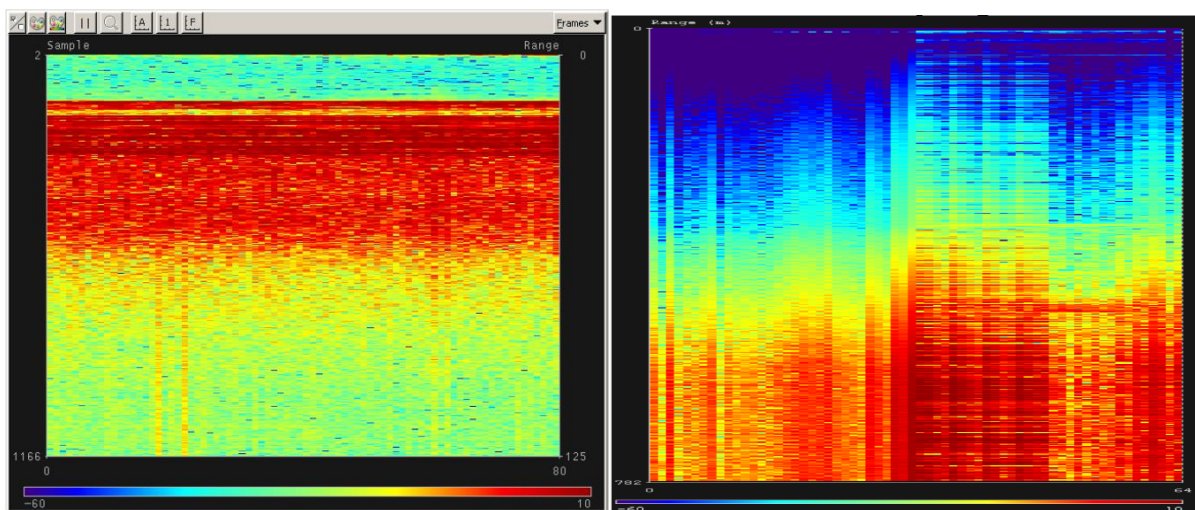


Rysunek 5-5 Poprawnie skalibrowany system echosondy wielowiązkowej – nakładanie się pasów sondazowych bez błędów związanych z przechyłem



Aktualnie nie ma ogólnoświatowych procedur czy norm związanych z kalibracją echosondy wielowiązkowej pod kątem określania natężenia impulsu odbitego od różnego typu osadów dennych, aczkolwiek aktualnie cały czas proponowane są rozwiązania mające na celu wypełnienie tej luki (np. Kongsberg Maritime Backscatter Calibration Service). Producenci sprzętu dostarczają w różnym stopniu szerokich informacji związanych zarówno z elementem nadawczym, jak i odbiorczym. Analiza danych pozyskiwanych podczas testów kalibracyjnych oraz wyznaczenie akwenu będącego punktem odniesienia (charakteryzującego się np. płaskim, jednorodnym, piaszczystym dnem) może zapewnić, że przy różnych kątach padania rozproszenie wsteczne ma charakterystykę zależną od rodzaju osadu [52]. Dane pozyskiwane wewnątrz poszczególnej wiązki mają największe natężenie przy padaniu prostopadłym na dno, a następnie natężenie maleje wraz z kątem zawartym pomiędzy dnem a promieniem padania impulsu.

W trakcie wykonywania pomiarów przy użyciu echosondy firmy Kongsberg i oprogramowania SIS operator ma możliwość kontroli szumów oraz jakości odbioru sygnałów akustycznych przez wszystkie elementy anteny po ich zarejestrowaniu przed rozpoczęciem procesu beamformingu.

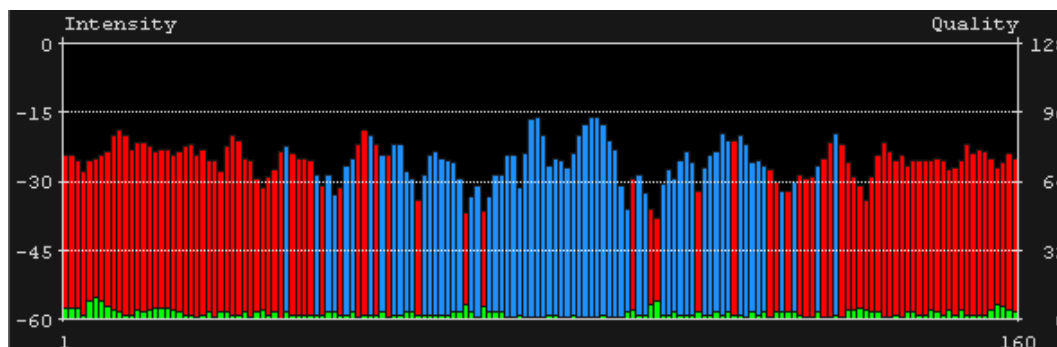


Rysunek 5-6 Zobrazowanie testu przetworników głowicy: po lewej stronie sprawna głowica ze zbliżonymi odczytami, po prawej stronie widać uszkodzone sekcje odbierające zaszumiony sygnał

Na rysunku 5-6 pokazano sygnał odbierany przez wszystkie elementy anteny pod czas kalibracji. Jednakowy poziom ciśnienia (obraz po lewej stronie) świadczy o poprawnej pracy anteny. Natomiast różna wartość poziomu natężenia odbieranego przez poszczególne elementy anteny (obraz po prawej stronie) świadczy o niepoprawnej pracy anteny, co może być związane z

uszkodzonymi sekcjami odbiorczymi wieloelementowej głowicy, szumami elektrycznymi lub akustycznymi.

Podczas pomiarów można również monitorować natężenie odbieranych sygnałów (rysunek 5-7) łącząc wysokość prążków ze skalą po lewej stronie. Dodatkowo na wykresie kolorem czerwonym zaznaczono wiązki dla których czas pomiędzy wypromieniowaniem impulsu z przetwornika a nadźwiękowieniem dna wyznaczony był na podstawie amplitudy i opóźnienia fazowego natomiast kolorem niebieskim tylko amplitudy obwiedni echa.



Rysunek 5-7 Natężenie sygnałów odbieranych przez poszczególne wiązki echosondy wielowiązkowej

5.1.3 Sonar boczny – procedury kalibracyjne

System pomiarowy nazywany sonarem bocznym może występować w dwóch konfiguracjach: mocowany na kadłubie jednostki lub holowany. Druga konfiguracja zapewnia mniejszą odległość od obserwowanych obiektów, gdyż fale stosowane w sonarach bocznych o częstotliwościach 400–800 kHz są silnie tłumione. Informacje o dnie i znajdujących się na nim obiektach uzyskiwane są często na podstawie cieni akustycznych. W celu ich weryfikacji niezbędne są informacje związane z przechyłami przetworników. Również pozycjonowanie we współrzędnych geograficznych czujnika jest wymagane w celu prawidłowego wyznaczenia miejsca echa na dnie. W przypadku kiedy dno charakteryzuje się nierównościami oraz gwałtownymi uskokami, poprawna geolokalizacja punktów pomiarowych może być utrudniona ze względu na to, iż dany system pomiarowy nie ma możliwości określenia rozdzielczości kątowej (tak jak np. sonar boczny działający w oparciu o interferometrię). Również w przypadku tego typu akwenu trudno jednoznacznie powiązać natężenie echa z poszczególnymi kątami. Główną zaletą sonaru bocznego jest możliwość wykonywania szybkich pomiarów np. w celu poszukiwania wraków. Echogramy od sonarów bocznych używane są do klasyfikacji opartej o analizę obrazów.

Podobnie jak w przypadku opisywanych powyżej urządzeń, przed przystąpieniem do badań należy:

- zweryfikować działanie czujnika przechyłów,
- sprawdzić jakość odbieranych sygnałów, oraz brak wpływu innych urządzeń hydroakustycznych działających równolegle,

- ustalić głębokość na jakiej układ ma być holowany i skorelować ją z prędkością jednostki pomiarowej,
- zapisać ustawienia oprogramowania w celu poprawnej analizy danych,

5.1.4 Refrakcja wiązki akustycznej

Błędny pomiar prędkości dźwięku lub jego zmiany w słupie wody skutkują błędami związanymi z pomiarem głębokości, a co się z tym wiąże, z pozycjonowaniem punktów na dnie. Określenie drogi propagacji impulsu dźwiękowego bazuje na teorii związanej z prawem Snella, która określa zależność pomiędzy kierunkiem promieni a prędkością fali akustycznej.

$$\frac{\sin\theta_0}{c_0} = \dots = \frac{\sin\theta_i}{c_i} = \kappa \quad (5.1)$$

gdzie:

c_i - prędkość dźwięku,

θ_i – kąt padania odniesiony do pionu na głębokości z_i ,

κ - jest parametrem promienia lub stałą Snella.

Zakładając, że profil prędkości dźwięku jest dyskretny, można założyć, że gradient prędkości dźwięku jest w warstwie pomiędzy dwoma pomiarami stały. W związku z tym prędkość dźwięku jest reprezentowana w następujący sposób:

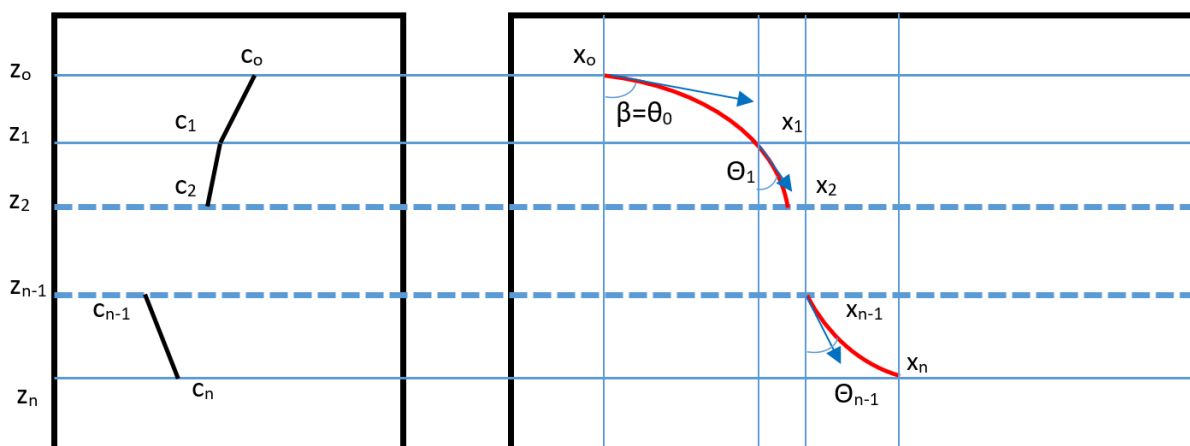
$$c_i(z) = c_{i-1} + g_i(z - z_{i-1}) \quad \text{dla} \quad z_{i-1} \leq z \leq z_i \quad (5.2)$$

gdzie g jest stałym gradientem w warstwie i opisanym jako:

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (5.3)$$

W każdej warstwie impuls akustyczny porusza się po drodze o stałym promieniu krzywizny, ρ_i podanej przez:

$$\rho_i = -\frac{1}{\kappa g_i} \quad (5.4)$$



Rysunek 5-8 Droga impulsu sondującego w kierunku dna z uwzględnieniem zmian prędkości dźwięku

Rozpatrując kąt wypromieniowania impulsu θ_0 (lub β) na głębokości z prędkością dźwięku c_0 , stwierdza się, że pozioma odległość przebyta przez impuls akustyczny do momentu przekroczenia warstwy i wynosi:

$$\Delta x_i = \rho_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{i-1}) = \frac{\cos \theta_{i-1} - \cos \theta_i}{\kappa g_i} \quad (5.5)$$

Zastępując $\cos(\theta_i)$ przez $\sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}$, otrzymujemy:

$$\Delta x_i = \frac{\sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2} - \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}}{\kappa g_i} \quad (5.6)$$

Czas potrzebny na pokonanie drogi w warstwie i:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \int_{c_{i-1}}^{c_i} \frac{dc}{c \cdot \cos(\theta)} \quad (5.7)$$

Można to zapisać:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (5.8)$$

W celu uzyskania całkowitej drogi, jaką przebywa impuls sondujący w czasie t należy zsumować odległości Δx_i oraz czas Δt_i pomiędzy przetwornikiem a dnem:

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{[1 - (\kappa c_{i-1})^2]^{1/2} - [1 - (\kappa c_i)^2]^{1/2}}{\kappa g_i} \quad t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (5.9)$$

Określanie głębokości akwenu oraz pozycjonowanie impulsu sondującego na dnie wymaga integracji echa wzdłuż każdego kierunku ustalonego dla określonego kąta załamania przy użyciu zaktualizowanego profilu prędkości dźwięku między nadawaniem a czasem odpowiadającym drodze pokonanej pomiędzy dnem a przetwornikiem ($\Delta t / 2$).

Biorąc pod uwagę jeden profil prędkości dźwięku ze stałym gradientem g , głębokość zostanie określona na podstawie:

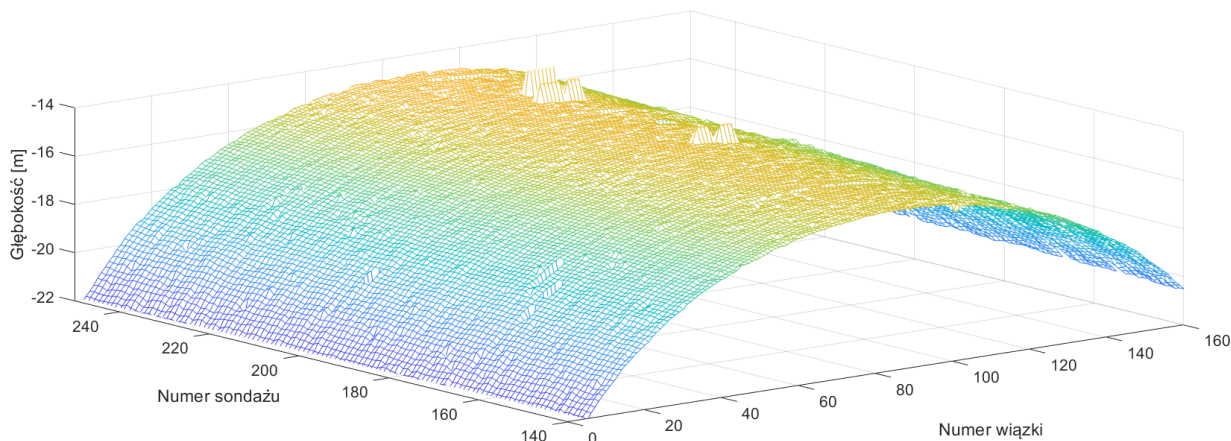
$$z = \int_0^{\Delta t / 2} (c_0 + g \cdot z) \cdot \cos(\theta) dt \quad (5.10)$$

Błąd głębokości dz_c ze względu na zmienność gradientu, dg i zmienność prędkości dźwięku przy powierzchni dc_0 poprzez różniczkowanie równania (5.10) może być przybliżone przez:

$$dz_c = \frac{z^2}{2c_0} (1 - \tan^2(\beta)) dg + \frac{z}{c_0} dc_0 \quad (5.11)$$

gdzie β i c_0 to odpowiednio kąt wypromieniowania impulsu oraz prędkość dźwięku przy przetworniku. W zależności 5.11 pierwszy składnik odpowiada zarówno za zasięg oraz ugięcie promienia drogi impulsu wynikające ze zmian prędkości dźwięku z głębokością, natomiast drugi składnik odpowiada błędowi głębokości wynikającemu z korekcji profilu prędkości dźwięku na głębokości przetwornika.

Na Rysunku 5-9 zaprezentowano wynik błędnie pozyskanego echogramu od echosondy wielowiązkowej, w której nie został wprowadzony profil prędkości dźwięku. Dany sondaż wykonywany był na płaskim dnie. Głębokość pod przetwornikiem wynosiła 15 m natomiast w skrajnych punktach sondażowych została ona skalkulowana na 22 m. Uwzględnianie w echosondzie aktualnych profili prędkości dźwięku, wymaga dodatkowej weryfikacji i korekty w celu zapewnianie precyzyjnego wyniku. Niepoprawnie skalibrowany układ doprowadzi do uzyskania wyników trudnych do korekcji podczas przetwarzania danych. Jedną z możliwości na minimalizowanie błędu po wykonaniu wszystkich priorytetowych procedur jest zawężanie nadźwiękowanego sektora.



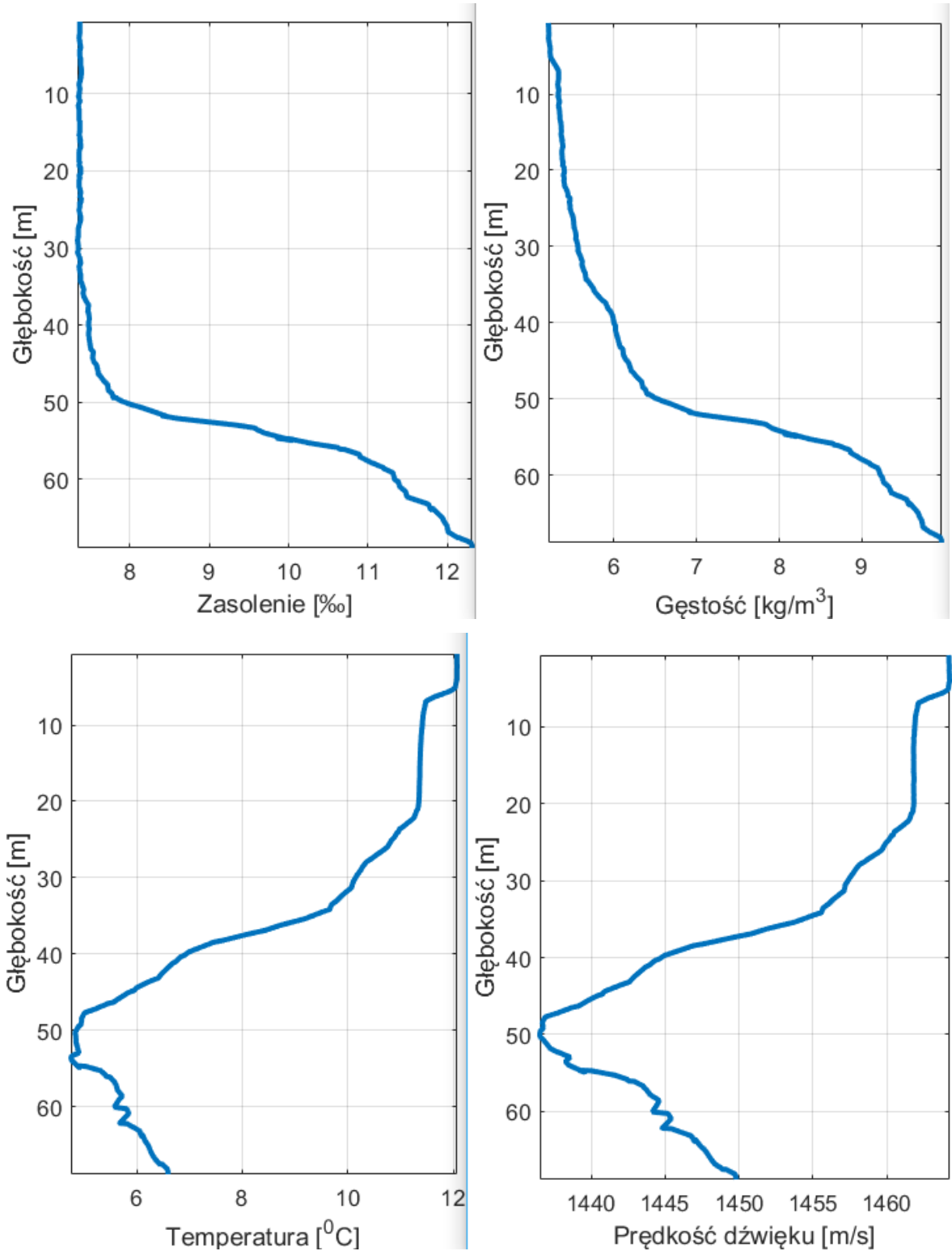
Rysunek 5-9 Błędne zobrazowanie obszaru płaskiego dna przy użyciu echosondy wielowiązkowej bez aktualnego profilu prędkości dźwięku wgranego do oprogramowania

Na Rysunku 5-10 zaprezentowano sondę SD204 podczas badań na Zatoce Gdańskiej opuszczaną na 100 m linie wraz z 10 kg ciężarkiem umożliwiającym najbardziej zbliżone do pionu opuszczanie urządzenia. Ze względu na ogólne standardy za prawidłowy pomiar uważa się dane zbierane podczas opuszczania przetwornika, kiedy sensory równomiernie opływa woda oraz jest pewność, że nie są one pokryte warstwą osadu dennego. Po prawej stronie zaprezentowano sondę typu MIDAS SXV2 z zamocowaną kamerą umożliwiającą nagranie struktury osadu przy dnie.



Rysunek 5-10 Operator podczas wykonywania pomiarów (po lewej stronie), sonda z kamerą (po prawej stronie)

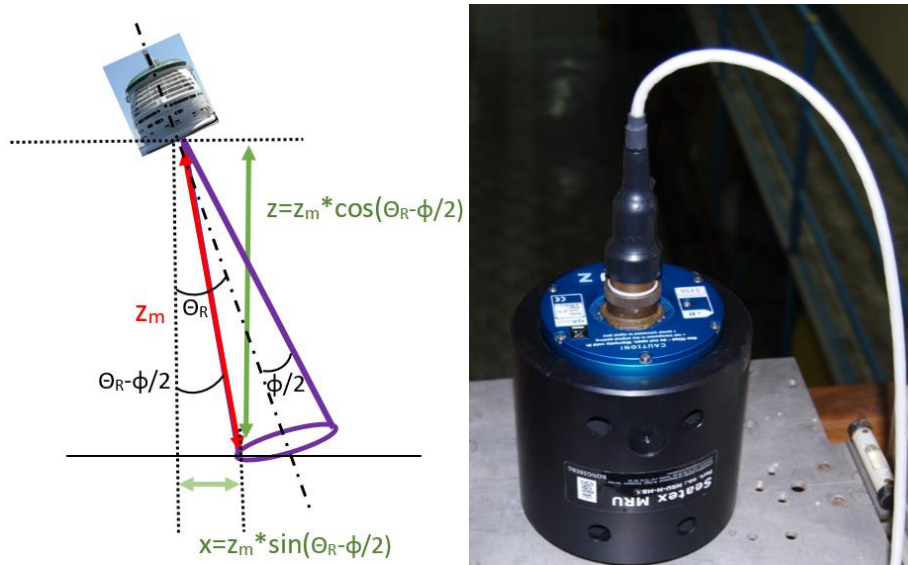
Rysunek 5-11 prezentuje przykładowy zestaw danych uzyskanych podczas pomiaru na południowym Bałtyku dla głębokości 70 m. Widać tutaj wyraźne podobieństwo kształtu krzywych w przebiegu zmian temperatury oraz prędkości dźwięku.



Rysunek 5-11 Zestaw danych pomierzonych na Zatoce Gdańskiej sondą STD204

5.1.5 Czujnik ruchu

Przechyły wzdłużne oraz poprzeczne jednostki pomiarowej wpływają na wynik określenia głębokości, jeżeli wielkość kątów odchylenia jest większa od połowy kąta określającego szerokość charakterystyki kierunkowej. Na Rysunku 5-12 zaprezentowano błąd wynikający z przechyłu poprzecznego θ_R . Konfiguracja może być również zaadaptowana do obliczenia odchylenia dla przechyłów wzdłużnych θ_P .



Rysunek 5-12 Wpływ przechyłu jednostki na kierunek głównej wiązki anteny, czujnik ruchu

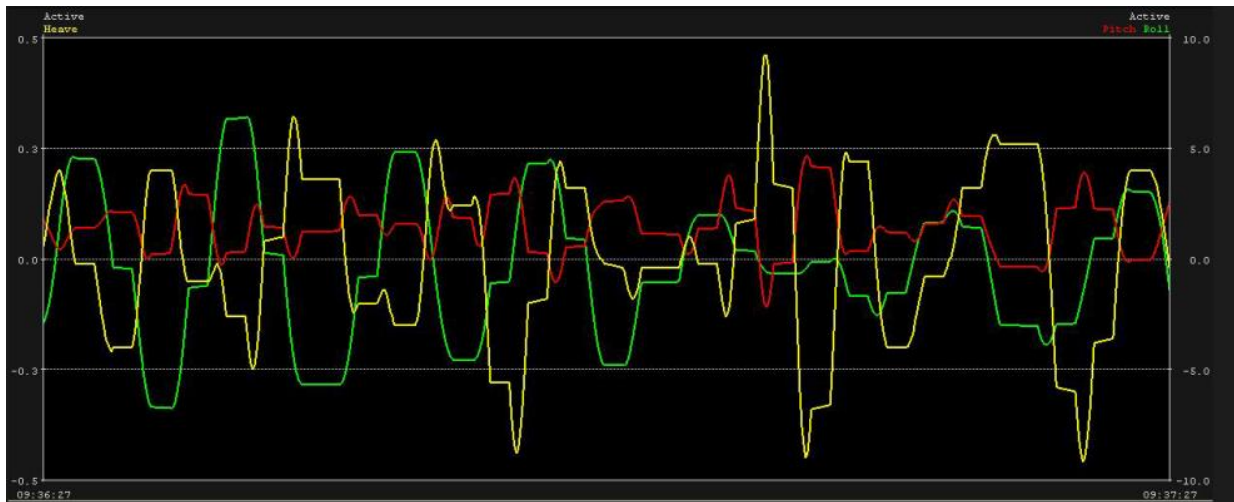
Echosondy cechujące się szeroką charakterystyką kierunkową będą odporne na wpływ omawianych zakłóceń. Dla echosond o wąskiej charakterystyce kierunkowej (jak np. echosonda parametryczna czy wielowiązkowa) niezbędne będzie użycie urządzenia kompensującego przechyły, np. ciągłe monitorowanie kątów i używanie ich do stabilizacji wiązki poprzez beamforming, gwarantując prostopadłe do dna propagowanie impulsu sondującego albo korekty głębokości w sposób programowy, używając następujących zależności:

$$dz_{\text{roll}} = \begin{cases} z_m \left(1 - \cos \left(\theta_R - \frac{\varphi}{2} \right) \right) & \theta_R > \frac{\varphi}{2} \\ 0 & \theta_R < \frac{\varphi}{2} \end{cases} \quad \text{dla} \quad (5.13)$$

Efekt przewyższenia (h) jest spowodowany zafalowaniem powierzchni morza oraz zagłębieniem jednostki pomiarowej. Umieszczenie czujnika ruchu przy przetworniku jest rozwiązaniem minimalizującym błędy związane z określaniem położenia anteny względem czujnika ruchu zainstalowanego wewnątrz jednostki (w tym przypadku najlepszym rozwiązaniem

jest skorzystanie z usług firmy geodezyjnej w celu precyzyjnego określenia położenia czujnika ruchu względem przetwornika nadawczo-odbiorczego. Pomierzone przewyższenie przy czujniku h_m należy przetransformować na pozycje przetwornika h_i poprzez dodanie obliczonego przesunięcia h_i

$$h_t = h_m + h_i \quad (5.14)$$



Rysunek 5-13 Przebieg czasowy zmian przechyłów wzdłużnych i poprzecznych oraz przewyższeń zarejestrowanych przez czujnik ruchu MRU-Z.

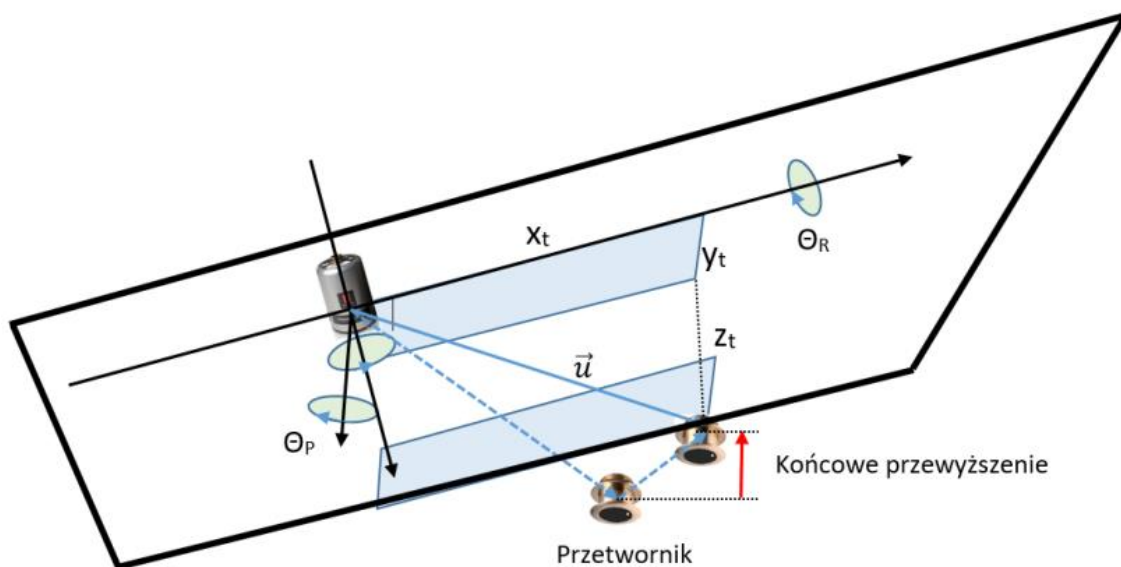
Aby obliczyć wywołane przechyłami przewyższenie przetwornika, należy wziąć pod uwagę, że statek jest ciałem sztywnym, które może obracać się swobodnie wokół trzech osi (x , y , z). Obrót wokół środka ciężkości (przechyły poprzeczne oraz podłużne), w pobliżu którego zazwyczaj mierzy się przewyższenia, odpowiada zmianie głębokości przetwornika z punktu odniesienia statku (V) do lokalnego układu współrzędnych (L). Różnicę tę nazywa się przewyższeniem indukowanym [Hare, 1955]:

$$h_i = z_t^L - z_t^V = -x_t^V \sin(\theta_p) + y_t^V \cos(\theta_p) \sin(\theta_R) + z_t^V (\cos(\theta_p) \cos(\theta_R) - 1) \quad (5.15)$$

gdzie θ_R jest kątem przechylenia, θ_p jest kątem nachylenia, a (x_t , y_t i z_t) są współrzędnymi przetwornika. Całkowity błąd na pomiarze głębokości spowodowany zmianą przewyższeń:

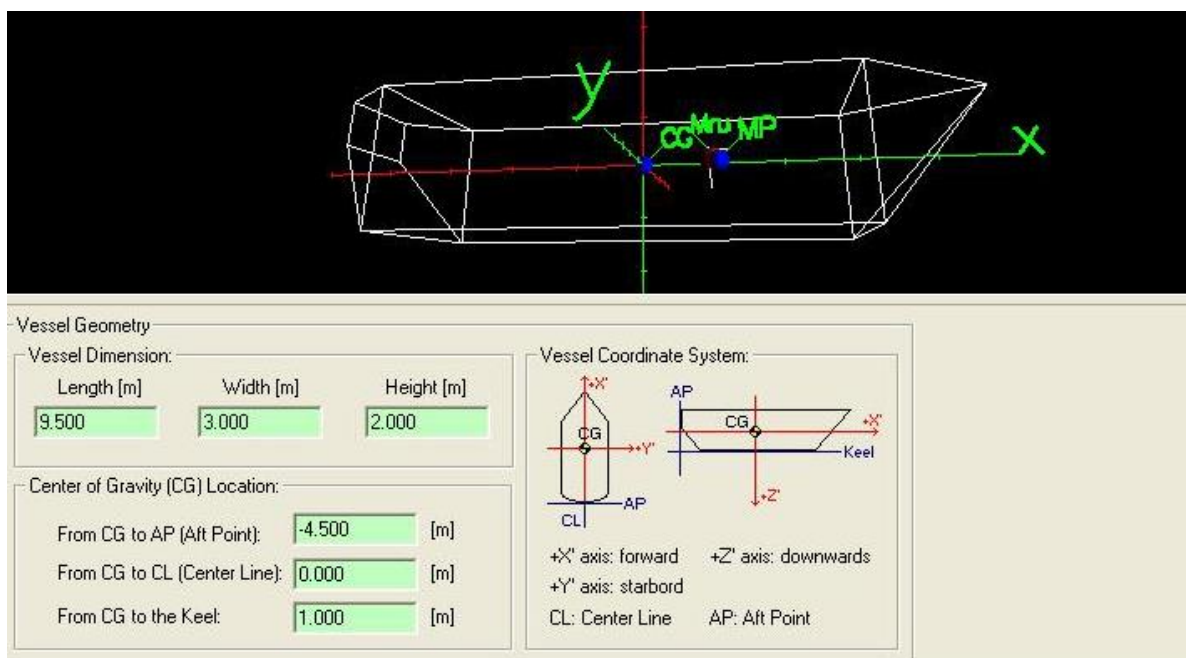
$$dh = dh_m + dh_i \quad (5.16)$$

gdzie dh_m jest błędem w pomiarze przewyższeń, a dh_i jest błędem związanym z przewyższeniem indukowanym (Rysunek 5-14).



Rysunek 5-14 Schemat zmiany wysokości przetwornika w wyniku przechyłów

Należy zauważyć, że indukowana zmiana przewyższeń zależy od dokładności pozycjonowania przetwornika, czujnika ruchu, tzn. dokładności wskazań kątów przechyłu i pochylenia [53], dlatego istotne jest poprawne skalibrowanie czujnika odpowiedzialnego za odczyt przechyłów poprzecznych, podłużnych, przewyższeń i myszgowania Rysunek 5-15.

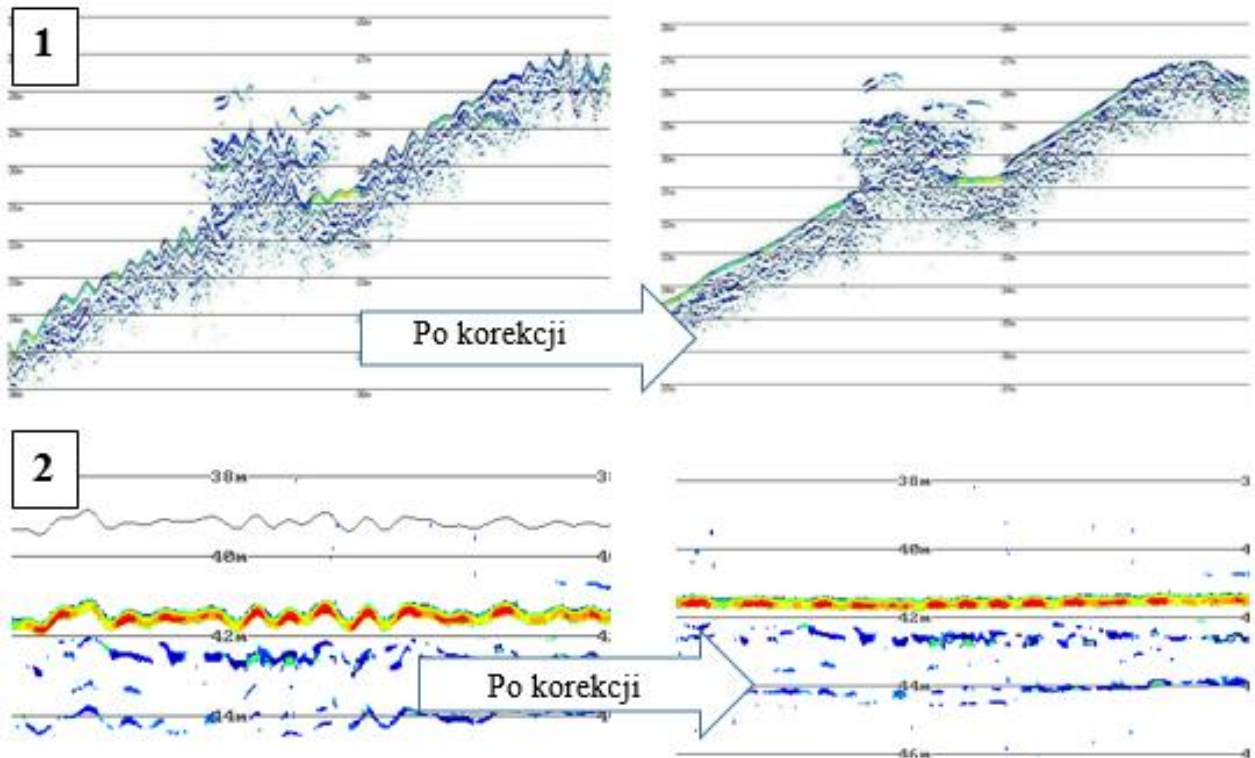


Rysunek 5-15 Okno konfiguratora czujnika ruchu, w którym należy sprecyzować położenie czujnika względem anteny.

Całkowita wariancja przechyłu odpowiada wariancji głębokości, σ_h :

$$\sigma_h^2 = \sigma_{h_m}^2 + \sigma_{h_i}^2 \quad (5.17)$$

gdzie h_m jest wariancją błędu pomiaru przewyższenia, a h_i wariancją indukowanego przewyższenia przetwornika (jest on zazwyczaj pomijany ze względu na bardziej istotny błąd od czujnika). Na Rysunku 5-16 przedstawiono wyniki pozyskane przy wyłączonej oraz włączonej kompensacji przewyższeń w echosondzie parametrycznej SES-2000 standard.



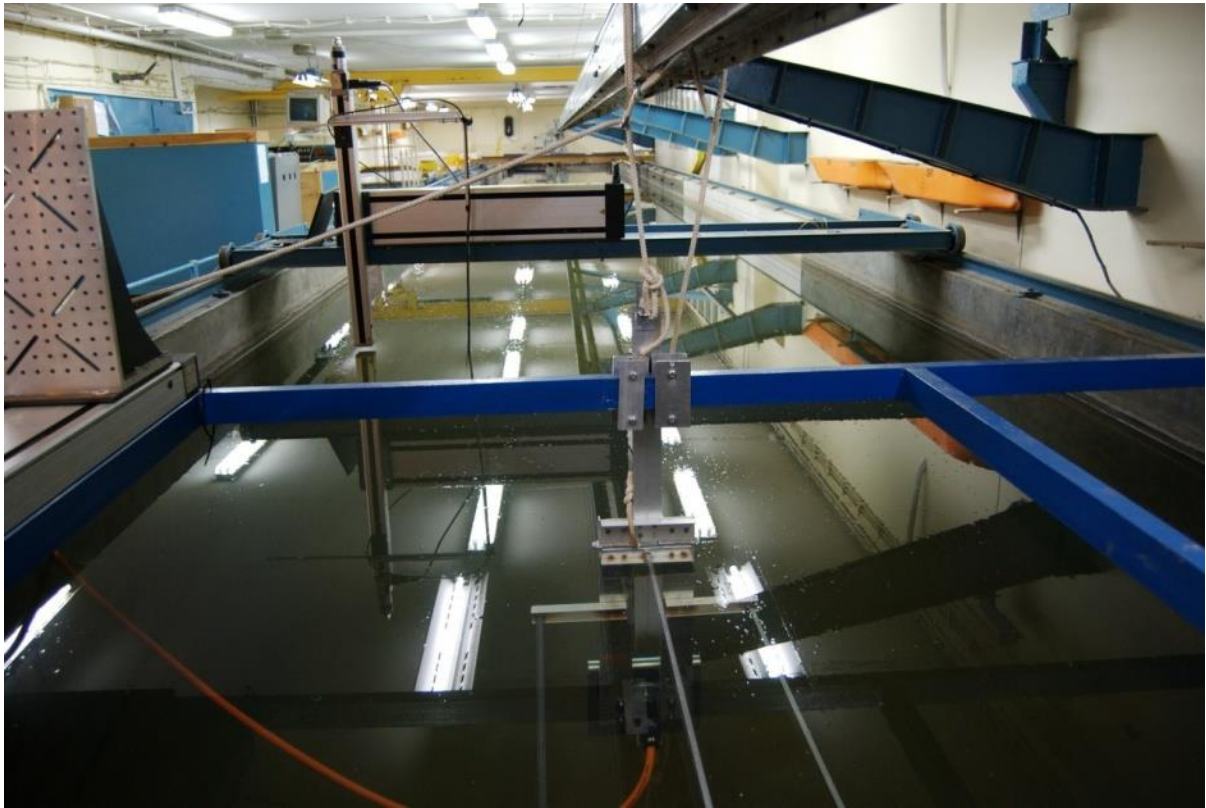
Rysunek 5-16 Wpływ zafalowania na wynik zobrazowania danych na echogramie

5.2 *Badania laboratoryjne*

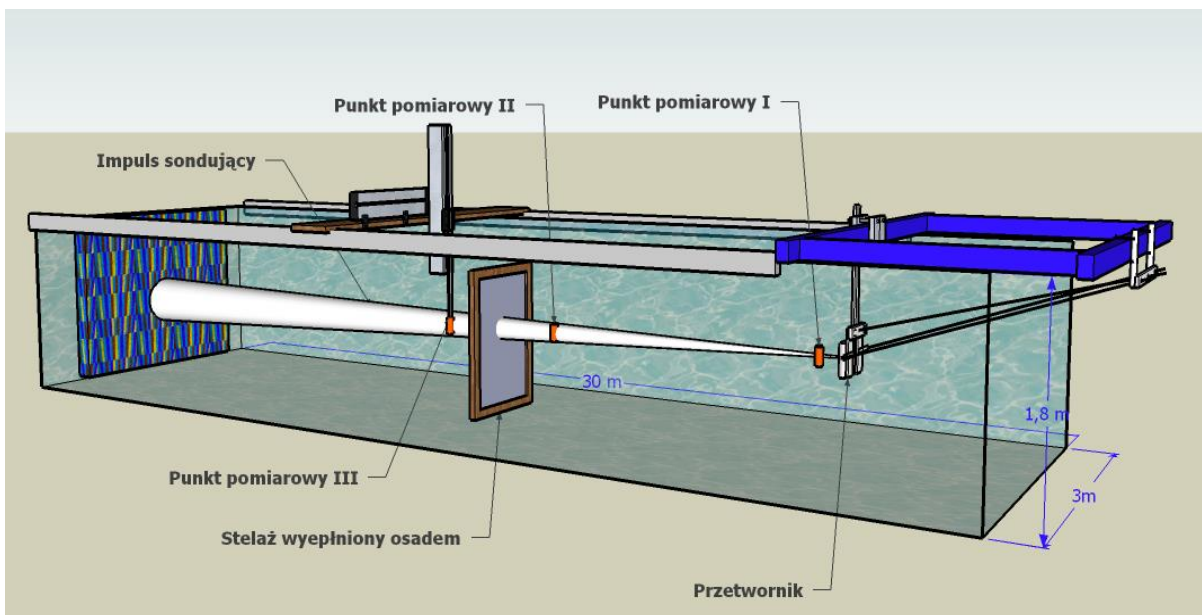
Nowe urządzenia pomiarowe nie zawsze wyposażone są w niezbędny komplet charakterystyk eksploatacyjnych. Dotyczy to również echosondy parametrycznej SES–2000, która była używana w opisywanych w niniejszej pracy badaniach. Głównie z tego powodu postanowiono wykonać dokładne pomiary laboratoryjne parametrów echosondy. Ze względu na wąską wiązkę możliwe było wykorzystanie wąskiego basenu modelowego do przeprowadzenia serii pomiarów.

5.2.1 Konfiguracja stanowiska pomiarowego

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe na basenie wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej o wymiarach 30 x 3 x 1,8 m Rysunek 5-17-18. Echosonda promieniowała fale poziomo wzdłuż największego wymiaru basenu. Podstawowym celem badań było wyznaczenie charakterystyk nadawczych zarówno dla fal pierwotnych, jak i dla fali różnicy częstotliwości. Ponieważ głębokość i szerokość basenu była ograniczona, pierwszym ważnym punktem było właściwe ukierunkowanie osi wiązek głównych układu promieniującego fale. Przyjęto zasadę, że antena znajdowała się w położeniu ustalonym, natomiast ruchowi podlegał hydrofon pomiarowy. Użyto do skanowania obszaru pomiarowego precyzyjnego pozycjonera 3D firmy ISEL pozwalającego na próbkowanie przestrzeni z dokładnością do 20 μm . Zastosowano napisany na potrzeby badań program komputerowy do sterowania ruchem hydrofonu, co umożliwiło otrzymanie dokładnych charakterystyk kierunkowych. Dalszym celem pracy był pomiar natężenia impulsu sondującego fali pierwotnej o częstotliwości 100 kHz oraz fali o różnicy częstotliwości 6 kHz, określenie rozdzielczości wgłębnej, weryfikacja funkcji umożliwiającej odchylenie wiązki w celu minimalizacji wpływu przechyłów poprzecznych oraz wyznaczenie impedancji akustycznych materiałów odpowiadających typowym osadom dennym znajdującym się na dnie akwenu, na którym wykonywane będą pomiary w warunkach rzeczywistych.



Rysunek 5-17 Stanowisko do badań laboratoryjnych



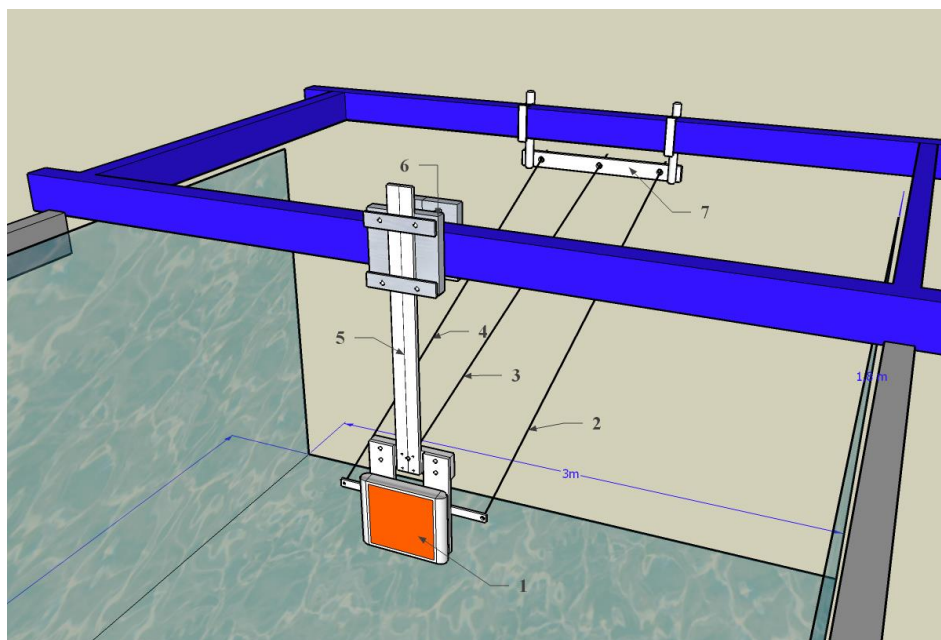
Rysunek 5-18 Wizualizacja basenu pomiarowego

Zainstalowanie przetwornika nadawczo-odbiorczego echosondy parametrycznej musiało zapewnić możliwość:

- Zmiany głębokości zamocowanego przetwornika,

- Zmiany położenia płaszczyzny promieniującej względem szerokości basenu (pozycjonowanie anteny na środku basenu),
- Rotacji anteny na uchwycie,
- Szybkiego, prostego oraz bezpiecznego demontażu.

Stelaż, na którym zainstalowano antenę, wykonany został z płaskowników, kątowników, ceowników aluminiowych oraz śrub nierdzewnych. Rysunek 5-19 przedstawia wizualizację uchwytu anteny echosondy parametrycznej. Element suwany (oznaczony numerami 6 oraz 7) blokowany jest poprzez dokręcenie śrub dociągających płaskowniki mające z nim bezpośredni styk. Po ustawieniu stelaża w połowie szerokości basenu umieszczono środek powierzchni promieniującej anteny na połowie głębokości zbiornika – w danym przypadku 90 cm pod powierzchnią. Do precyzyjnego ukierunkowania głównej wiązki równoległe do powierzchni dna basenu służą trzy sztywne odciąży (zaznaczone numerami 2, 3 i 4) wykonane z metalowych prętów usztywnionych prostokątnym, aluminiowym profilem. Dwa skrajnie zewnętrzne odciąży służą do regulacji skreślenia anteny w poziomie. Środkowy odciąż umożliwia stabilizację wiązki w pionie. Dodatkowo stelaż zabezpieczony został poprzez linę podłączoną do suwnicy, co również znacznie ułatwiło regulację zanurzenia oraz demontaż.



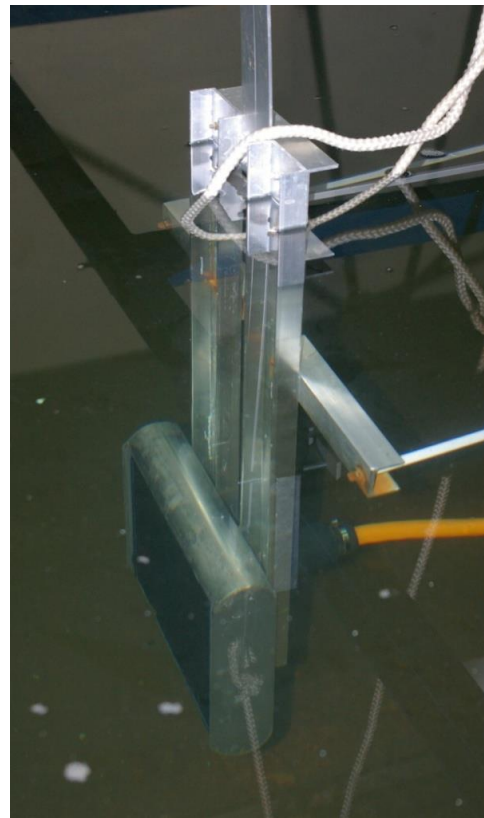
Rysunek 5-19 Wizualizacja uchwytu anteny parametrycznej

Opis:

1. Antena nadawczo-odbiorcza echosondy SES–2000;
2. Ramię do ustawienia odchylenia anteny w poziomie;

3. Ramię do ustawienia odchylenia anteny w pionie;
4. Ramię do ustawienia odchylenia anteny w poziomie;
5. Element podtrzymujący antenę oraz umożliwiający jej odchylanie ze względu na niską sztywność, dodatkowo jest to element ruchomy służący do ustawienia głębokości zanurzenia anteny;
6. Uchwyt blokujący element nr 5 oraz mocujący cały uchwyt do głównego, stalowego ceownika;
7. Uchwyt mocujący podstawę utrzymującą ramiona kalibracyjne.

Rysunek 5-20 prezentuje zdjęcia przedstawiające wykonany uchwyt zainstalowany na basenie. Konstrukcja musiała być na tyle sztywna, aby przewód łączący antenę z układem nadawczo-odbiorczym nie wpływał na ustawienie przetwornika (waga przetwornika w powietrzu wraz z przewodem wynosi 30 kg).

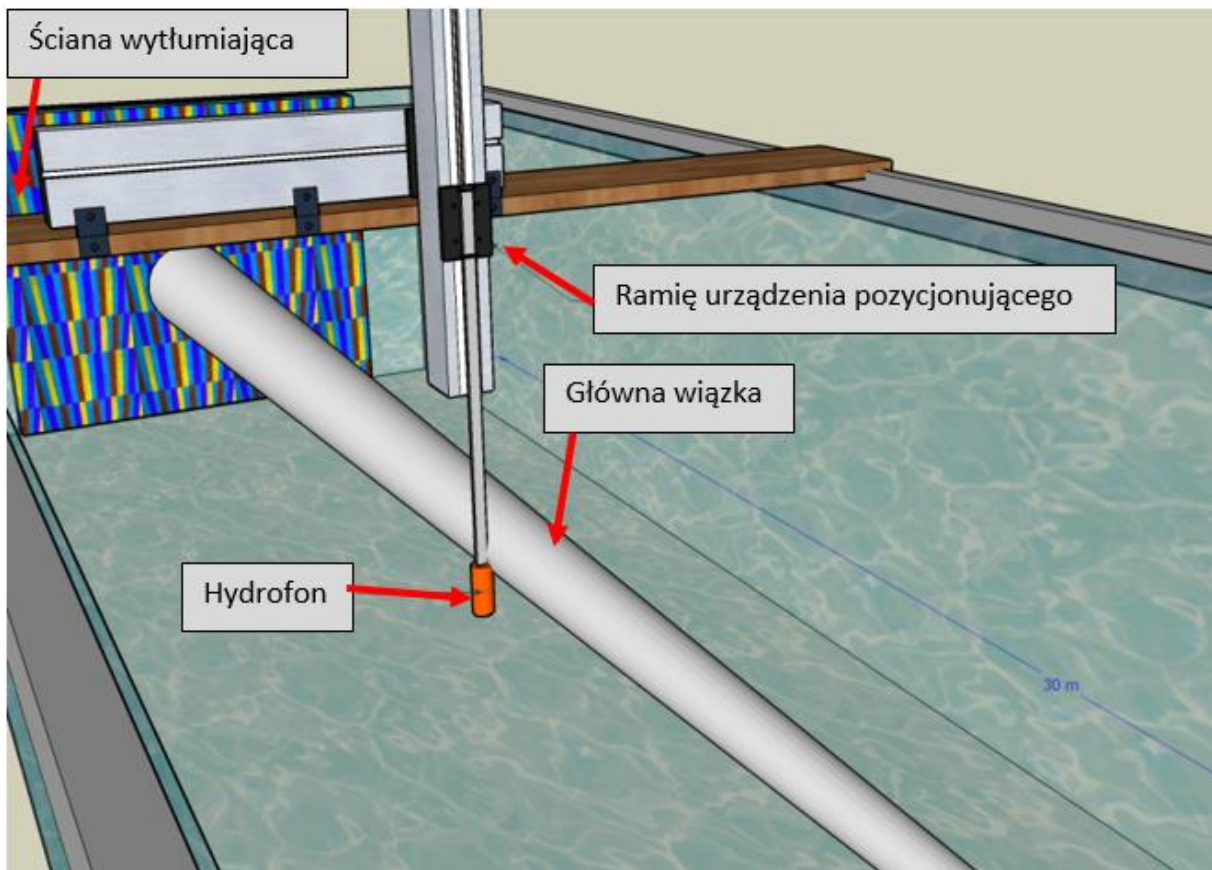


Rysunek 5-20 Antena echosondy parametrycznej na stelażu

Prawidłowo zamocowana antena powinna nadawać impulsy sondujące równoległe do płaskiego dna oraz bocznych ścian basenu. Odchylenie uniemożliwi badanie właściwości impulsu sondującego, ze względu na umiejscowiony w osi basenu uchwyt wraz z hydrofonem, przesuwający się na stalowej szynie – przypadek odchylenia wiązki głównej od osi przedstawiono na Rysunku 5-21.



Kalibracje układu przeprowadzono poprzez ustalenie w osi basenu dwóch punktów kontrolnych. Hydrofon pomiarowy został umieszczony na tej samej głębokości oraz w tej samej odległości od ścian basenu co środek anteny nadawczo-odbiorczej. W zadanych odległościach mierzono wartość amplitudy impulsu sondującego, jednocześnie dokonując regulacji na stelażu. Wskazanie maksymalnej wartości amplitudy impulsu sondującego na zadanych odległościach jest równoznaczne z zakończeniem procesu stabilizacji wiązki. Potwierdzeniem prawidłowego ustawienia jest powolne odsunięcie hydrofonu od centralnego punktu w kierunku bocznej ściany basenu, które powinno skutkować zmniejszeniem amplitudy analizowanego impulsu do momentu pojawienia się listka bocznego (podczas pomiarów impulsów wielkiej częstotliwości 100kHz). Opisany proces należy przeprowadzić przed rozpoczęciem badań. Pomimo prostej metodyki jest czasochłonny oraz wymaga dużej dokładności i synchronizacji odczytów z punktów pomiarowych z regulacją stelaża.



Rysunek 5-21 Wizualizacja przetwornika podczas badania głównej wiązki przetwornika

Ze względu na materiał, z którego zbudowany był basen – cementowy odlew – podjęta została próba wytłumienia przeciwległej do źródła nadźwiękawiającej ścianę basenu poprzez wyłożenie jej materiałem wytłumiającym. Dla określonych częstotliwości mogą to być gęsto



ułożone przy sobie plastikowe sztywne nitki. Do zbudowania powierzchni wycłumiającej wykorzystano szczotki, które gęsto połączone stworzyły jednolitą powierzchnię Rysunek 5-22. W wyniku pomiarów stwierdzono, że w przypadku impulsów o dużej mocy, przygotowane rozwiązanie rozprasza oraz tłumi impulsy w nieznacznym stopniu minimalizując echo odbitego impulsu sondującego. Niemniej jednak dane rozwiązanie wspomaga cały układ pomiarowy przed podwójnym odbiciem od przeciwległych ścian.



Rysunek 5-22 Układ warstwowy wycłumiający przeciwległą do przetwornika ścianę basenu pomiarowego

5.2.2 Pomiar charakterystyki kierunkowej

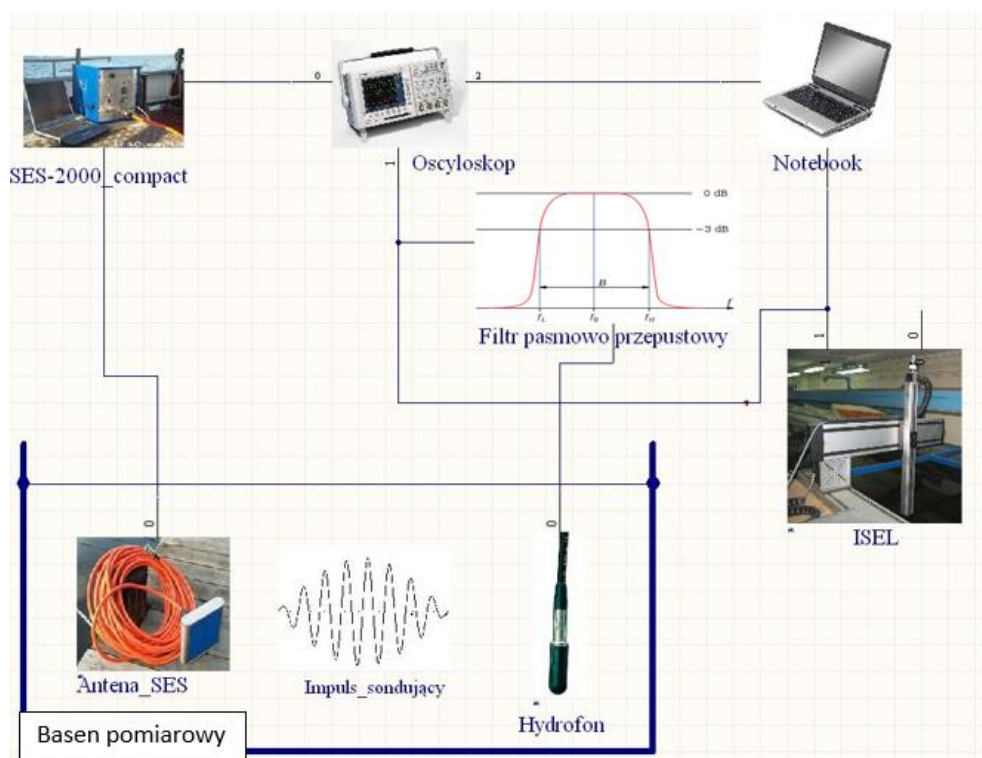
Celem pierwszego etapu badań było wyznaczenie charakterystyk nadawczych zarówno dla fal pierwotnych (częstotliwość w zakresie 85–115 kHz), jak i dla fali różnicy częstotliwości (częstotliwości w zakresie 6-15kHz). Ponieważ głębokość i szerokość basenu jest ograniczona, ważnym punktem było właściwe ukierunkowanie anteny echosondy parametrycznej. Zgodnie z przyjętą metodą prowadzenia pomiarów, antena znajdowała się w położeniu ustalonym, natomiast ruchowi podlegał hydrofon pomiarowy. Do skanowania obszaru pomiarowego zastosowano precyzyjny pozycjoner firmy ISEL charakteryzujący się dokładnością wyznaczania pozycji wzdłuż każdej z trzech prostopadłych osi równą 20 μm . Do sterowania ruchem hydrofonu wykorzystano przygotowany wcześniej program napisany w środowisku Delphi, co umożliwiło otrzymanie wystarczająco dokładnych charakterystyk kierunkowych.

Tabela 5-1 Spis aparatury używany podczas badań na basenie modelowym

| Część nadawcza | Część odbiorcza |
|----------------|----------------------|
| | Hydrofon ITC 1089D |
| | Oscyloskop Tektronix |

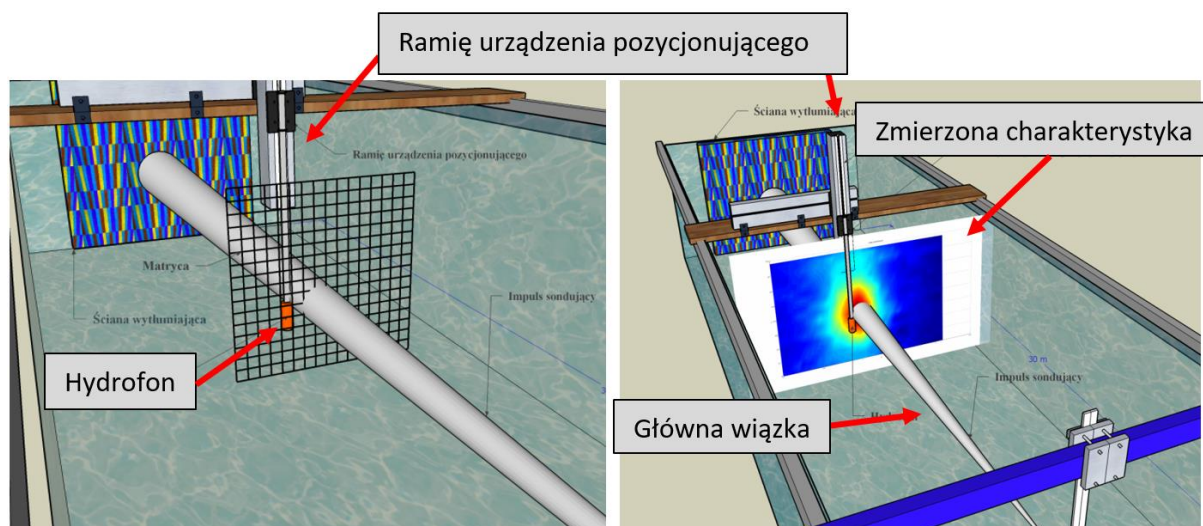
| | |
|---|---|
| Echosonda parametryczna SES–2000 compact | Notebook |
| | ISEL – urządzenie do pozycjonowania hydrofonu |
| | Filtr pasmowo–przepustowy |

Na Rysunku 5-23 przedstawiony został schemat połączenia urządzeń, używany między innymi podczas badania omawianych charakterystyk kierunkowych.



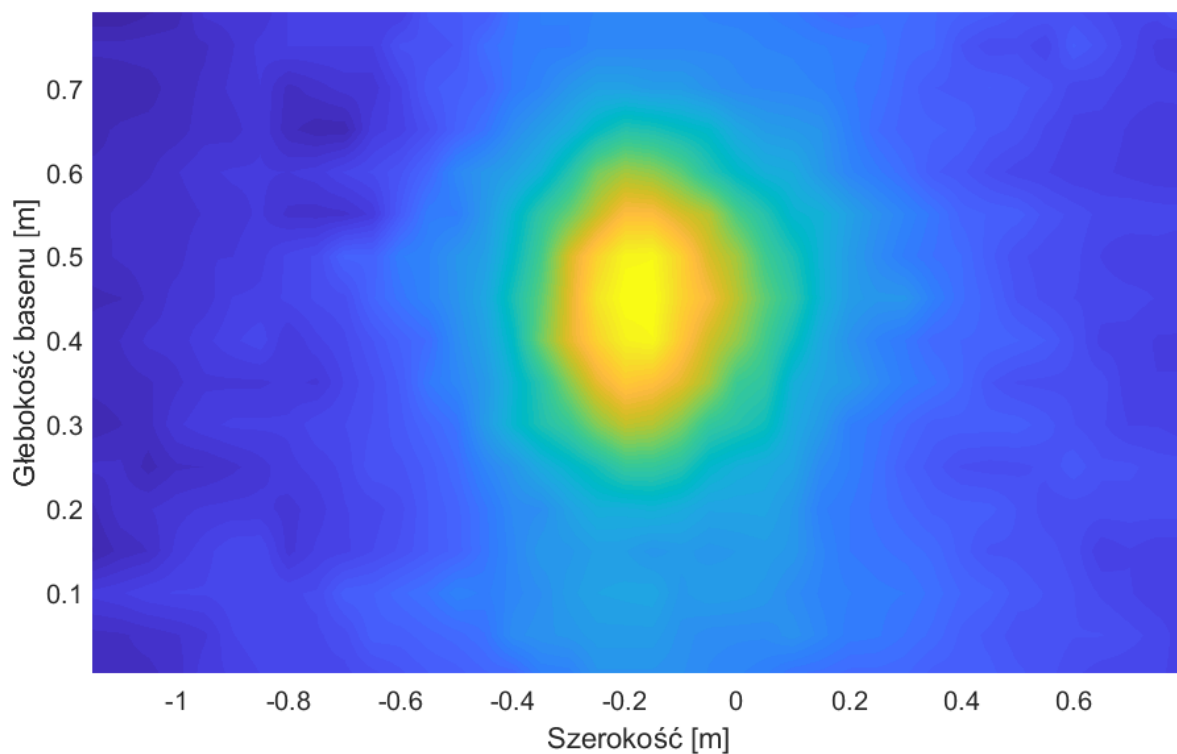
Rysunek 5-23 Schemat układu pomiarowego do pomiaru właściwości echosondy parametrycznej

Pomiar charakterystyki kierunkowej wymagał precyzyjnego pozycjonowania hydrofonu w płaszczyźnie prostopadłej do osi głównej basenu, gdzie pobierane były próbki impulsu sondującego (na Rysunku 5-24 pole pomiarów przedstawia matryca – punkty pomiarowe leżą na przecięciach odcinków). Na rysunku widzimy również charakterystykę kierunkową będącą wynikiem pomiarów, która została zaimportowana do narysowanego z zachowaniem wymiarów modelu.

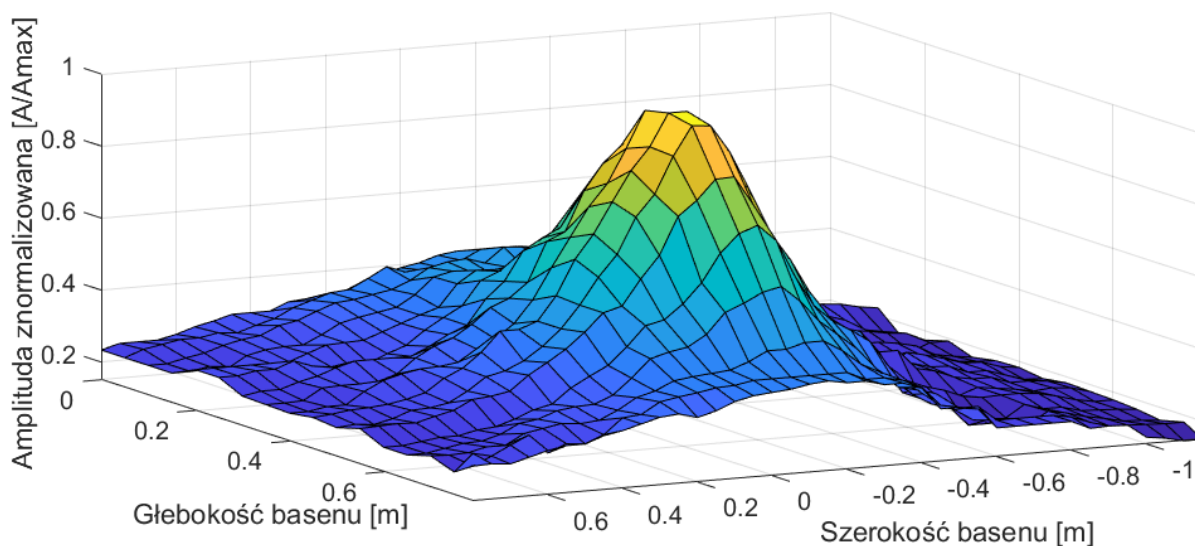


Rysunek 5-24 Punkty pomiarowe na przecięciach odcinków (po lewej), zarejestrowany wynik dla częstotliwości 6 kHz (po prawej)

Hydrofon pomiarowy (ITC 1089D) charakteryzujący się małymi wymiarami oraz wagą został zamontowany na stelażu zintegrowanym z urządzeniem do precyzyjnego pozycjonowania. Istotnym parametrem podczas pomiarów charakterystyk było uwzględnienie czasu wymaganego na ustabilizowanie przesuwanego ramienia po przejściu do nowego położenia (drgania wynikały z delikatnej konstrukcji stelażu, na którym zamocowany był hydrofon, co miało na celu zminimalizowanie wpływu sondy na propagację fali sprężystej). Odczyt wartości amplitudy impulsów sondujących oraz rejestracja przebiegów czasowych przeprowadzona została przy pomocy oscyloskopu podłączonego do komputera. Pomiarom poddano zarówno impulsy wielkiej, jak i małej częstotliwości. Rozdzielenie odbieranego sygnału możliwe było po zastosowaniu filtra pasmowo-przepustowego włączonego w torze odbiorczym. Zbierane dane zmagazynowane zostały w formularzu programu Excel, a następnie zobrazowane w oprogramowaniu do analizy sygnałów. Na Rysunkach 5-25 oraz 5-26 zaprezentowano rozkład ciśnienia, dla wytwarzanego impulsu różnego różnicy częstotliwości fal pierwotnych – 6kHz, w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w odległości 4 m od anteny nadawczej.



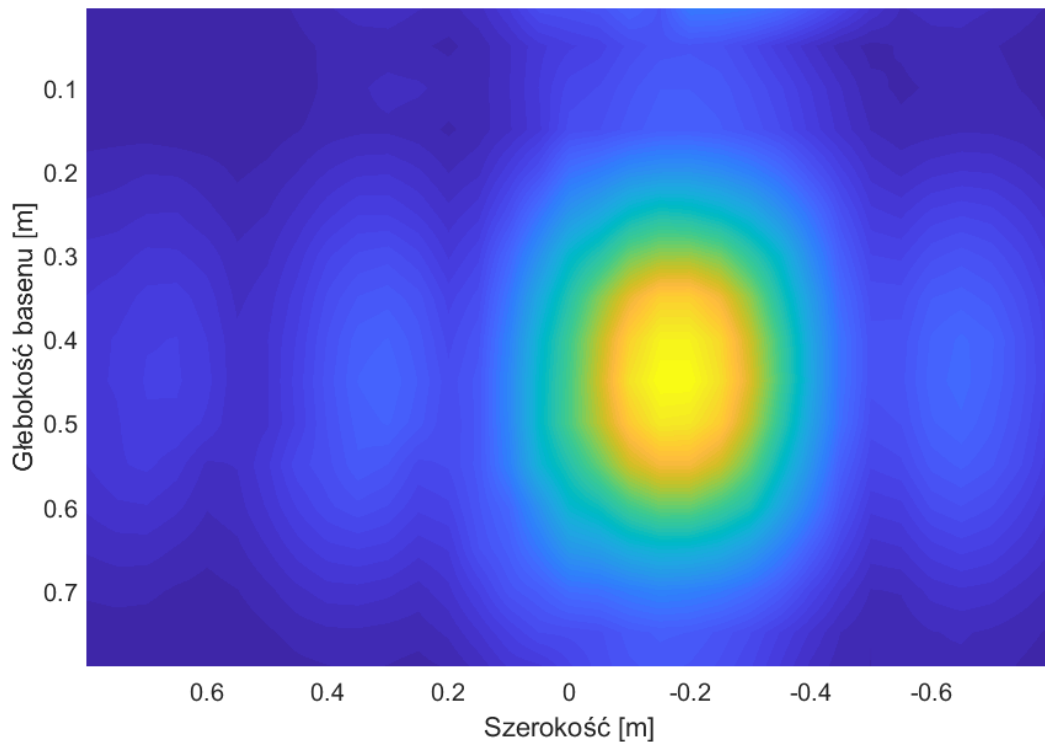
Rysunek 5-25 Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w odległości 4 m od anteny nadawczej, fali o częstotliwości równej różnicy częstotliwości fal pierwotnych – 6kHz



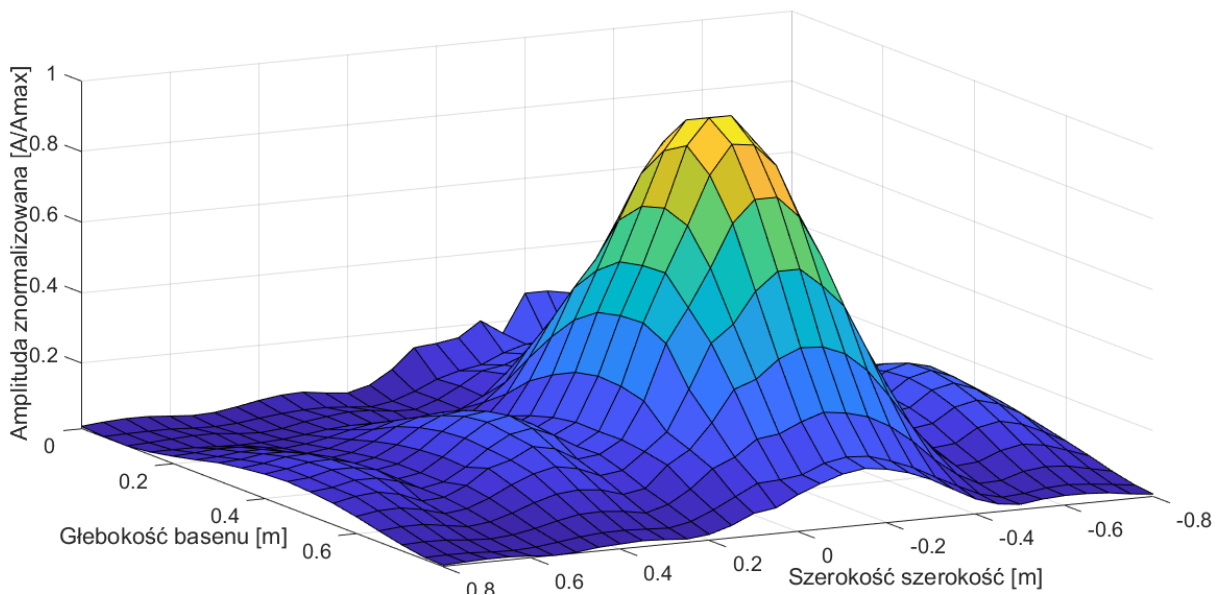
Rysunek 5-26 Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w odległości 4 m od anteny nadawczej, fali o częstotliwości równej różnicy częstotliwości fal pierwotnych – 6 kHz

Charakterystyka kierunkowa nie posiada listków bocznych, co potwierdza teorię wytwarzania impulsu w źródle objętościowym. Stosunek amplitudy fali pierwotnej do amplitudy różnicowej

wynosi 87 (38,78 dB), co potwierdza teoretyczne założenia dotyczące efektu nieliniowego [12]. Na rysunkach 5-27 oraz 5-28 przedstawiono rozkład ciśnienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w obrębie charakterystyki kierunkowej fali pierwotnej o częstotliwości 100 kHz.

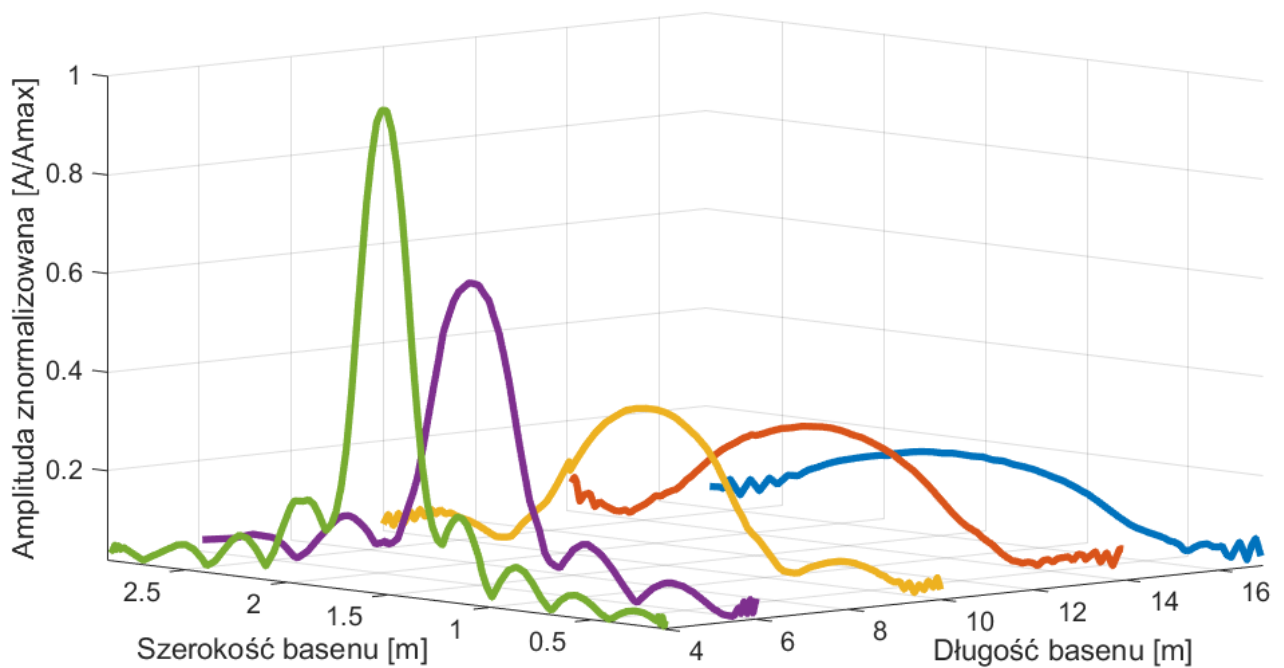


Rysunek 5-27 Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w odległości 4 m od anteny nadawczej, fali pierwotnej o częstotliwości 100 kHz

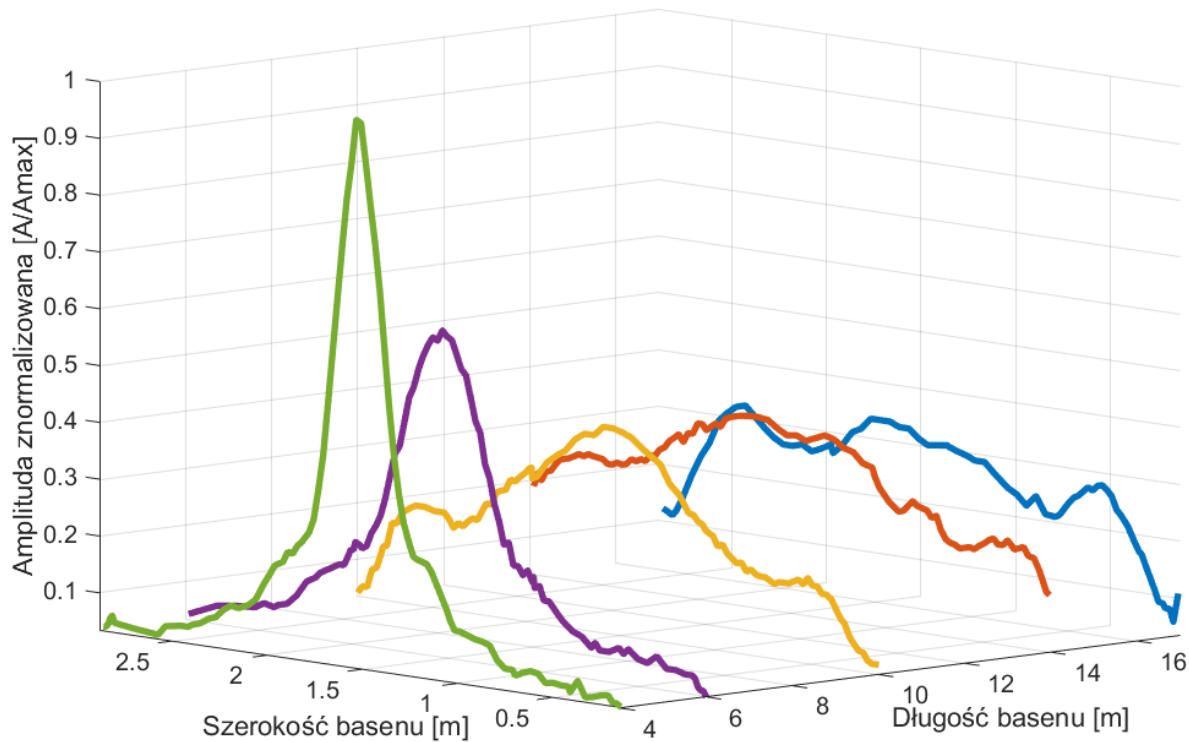


Rysunek 5-28 Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w odległości 4 m od anteny nadawczej, fali pierwotnej o częstotliwości – 100 kHz

Charakterystyka kierunkowa fali pierwotnej posiada listki boczne, co potwierdza teoretyczne założenia wytwarzania impulsu poprzez skończoną, wieloelementową powierzchnię drgającą. Dodatkowo wykonano pomiary charakterystyk kierunkowych w płaszczyźnie poziomej w odległościach: 6, 10, 14 i 17,5 m. Na Rysunku 5-29 zaprezentowano zmierzone zmiany charakterystyk kierunkowych na zadanych odległościach dla impulsu fali pierwotnej o częstotliwości —100 kHz oraz na Rysunku 5-30 dla fali o częstotliwości równej różnicy częstotliwości fal pierwotnych – 6kHz.

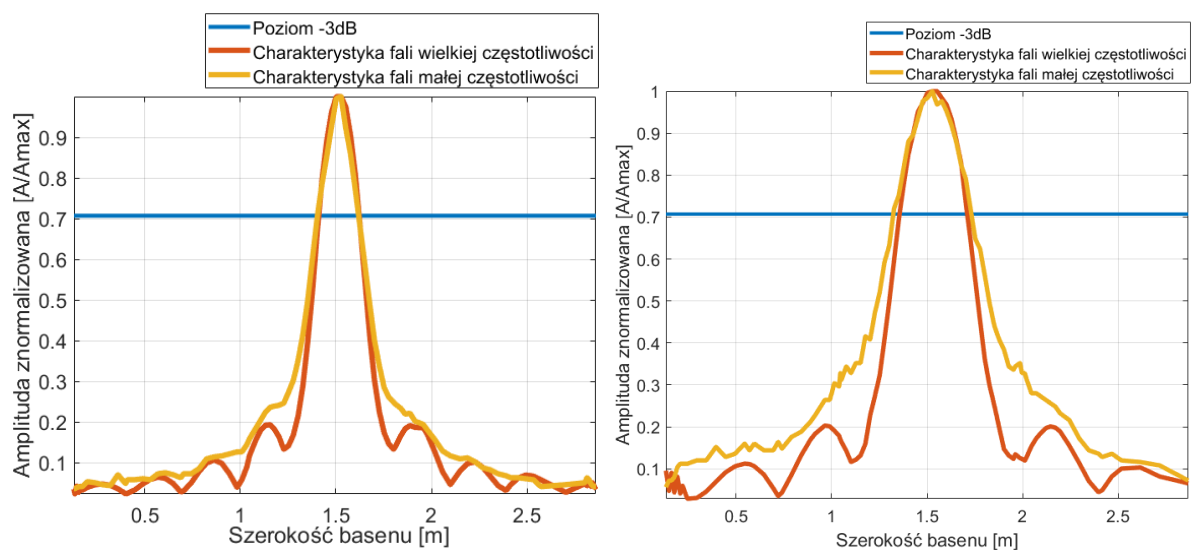


Rysunek 5-29 Zmiany charakterystyki kierunkowej fali wielkiej częstotliwości – 100 kHz wraz z odległością



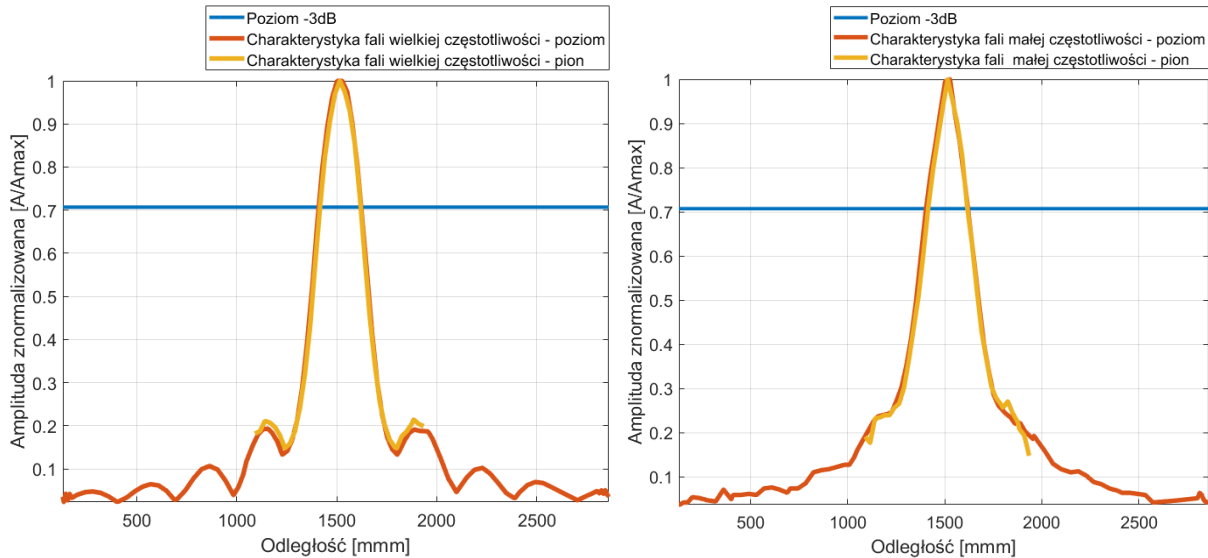
Rysunek 5-30 Zmiany charakterystyki kierunkowej fali różnicy częstotliwości – 6 kHz wraz z odległością

Powstały w wyniku oddziaływań impulsów wielkiej częstotliwości impuls różnicowy wypromieniowany przez źródło objętościowe posiada charakterystykę kierunkową o szerokości listka głównego równej charakterystyce kierunkowej impulsów pierwotnych – porównanie zostało przedstawione na Rysunku 5-31. Jest to jedna z głównych zalet parametrycznego źródła impulsów sondujących małej częstotliwości umożliwiająca przy pomocy przetwornika o kompaktowych wymiarach 0,34 x 0,26 m wygenerować impulsy sondujące w zakresie 4–15 kHz.



Rysunek 5-31 Porównanie charakterystyk kierunkowych w odległości 4 (po lewej) oraz 6 m (po prawej)

Na Rysunku 5-32 zaprezentowano porównanie charakterystyk kierunkowych wielkiej oraz małej częstotliwości zarejestrowanych w odległości odpowiednio 4 oraz 6 m zarówno w pionie jak i w poziomie. Widać zbieżność szerokości wiązek głównych na poziomie -3 dB, która wynosi $\pm 2^\circ$.



Rysunek 5-32 Porównanie charakterystyki poziomej z pionową dla impulsów wielkiej częstotliwości– 100 kHz (po lewej stronie) oraz małej częstotliwości – 6 kHz (po prawej)

5.2.3 Zmiana ciśnienia oraz kształtu impulsu sondującego w zależności od odległości

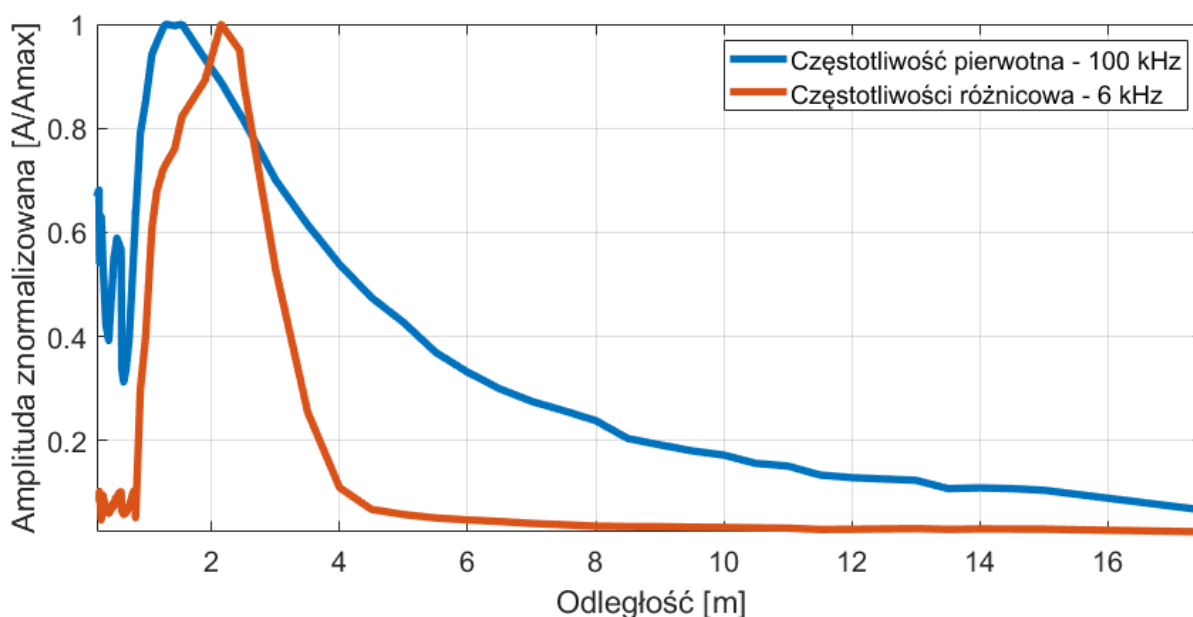
W celu uzyskania kompletnej informacji o badanym urządzeniu echolokacyjnym, istniała konieczność sprawdzenia zmiany natężenia impulsu sondującego małej oraz dużej częstotliwości wraz ze zmianą odległości od anteny. Pomiar został przeprowadzony przy użyciu ruchomego wózka poruszającego się na suwnicy umieszczonej na wysokości 1,5 m nad taflą wody. Hydrofon odbiorczy podłączony został do oscyloskopu przy pomocy 30 m przewodu koncentrycznego. W znacznym stopniu wpłynęło to na obniżenie amplitudy odbieranych impulsów, jednak nawet przy maksymalnej odległości od anteny umożliwiło określenie amplitudy sygnału. Podobnie jak w przypadku pomiaru charakterystyki kierunkowej istotne było prawidłowe ukierunkowanie wiązki głównej anteny. Informacje uzyskane podczas badania charakterystyki kierunkowej w znacznym stopniu pomogły przeprowadzić szybki proces weryfikacji poprawności kalibracji, jakim był:

- Pomiar środka anteny nadawczej względem lewej ściany basenu oraz tafli wody;
- Wyznaczenie trzech punktów kontrolnych, w których po umieszczeniu hydrofonu oddalonego od lewej ściany oraz tafli wody o zadaną odległość amplituda analizowanych

impulsów powinna być największa. Umożliwiło to zweryfikowanie, czy suwnica jest zamontowana w stałej odległości od tafli wody;

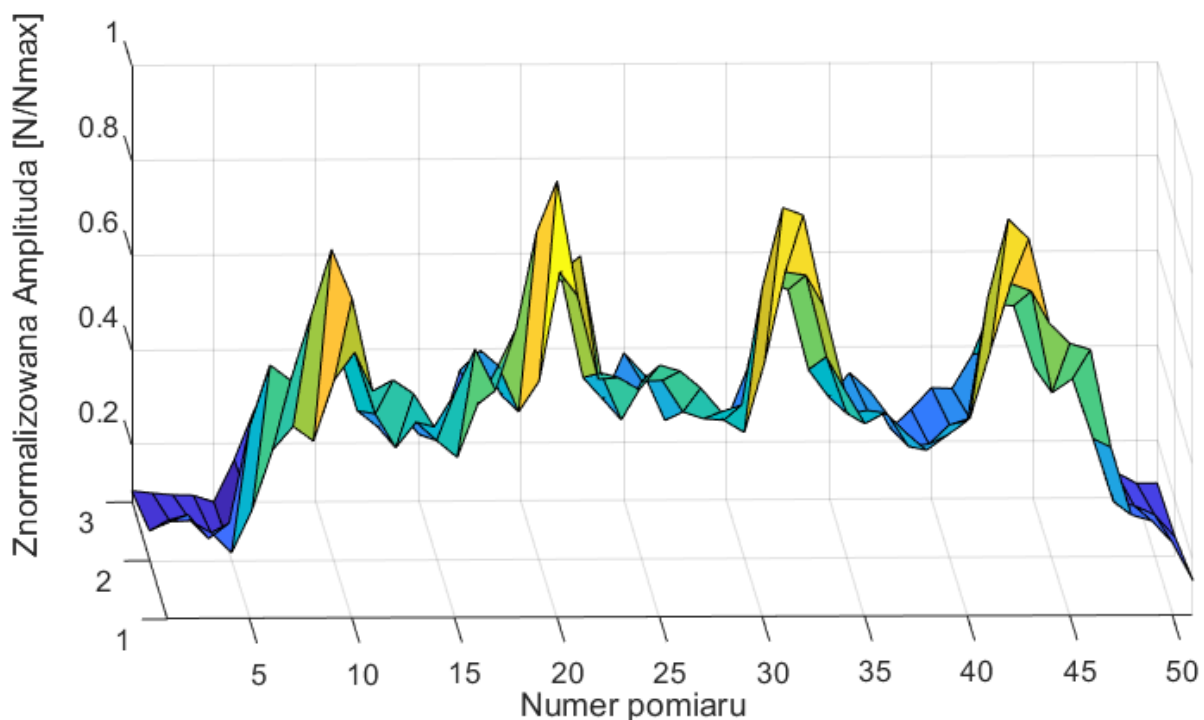
- Sprawdzenie, czy odczytana wartość jest maksymalna, odbywało się poprzez skanowanie w płaszczyźnie pionowej oraz poziomej punktów oddalonych od siebie o 5 mm. Jeżeli wartości malały podczas ruchu w każdym kierunku, oznaczało to prawidłowe umocowanie przetwornika.

Próbki zbierane były ze zmiennym interwałem odległościowym, rozpoczynając pomiary przy powierzchni anteny nadawczo-odbiorczej. Na Rysunku 5-33 zaprezentowano porównanie zmian amplitudy sygnału o częstotliwości 100 kHz oraz 6 kHz wraz z odległością.



Rysunek 5-33 Zmiany amplitudy sygnału o częstotliwości 100 kHz oraz 6 kHz wraz z odległością

Analizując powyższy wykres, widać, że dla fali wielkiej częstotliwości następuje w odległości 0,627 m formowanie głównej wiązki, a następnie gwałtowny wzrost amplitudy i w dalszym kroku tłumienie związane z przekazywaniem energii do wyższych harmonicznych, jak i do fali o różnicy częstotliwości pierwotnych. Gwałtowne zmiany amplitudy na odcinku od powierzchni przetwornika do odległości 0,627 m świadczą o rejestrowaniu impulsów z poszczególnych elementów piezoceramicznych wieloelementowej powierzchni nadawczej. Potwierdzeniem jest pomiar zmian ciśnienia w odległości 0,1 m od anteny pokazany na Rysunku 5-34, na którym widać, że w linii pomiaru zarejestrowano sygnał od czterech sekcji nadawczych.



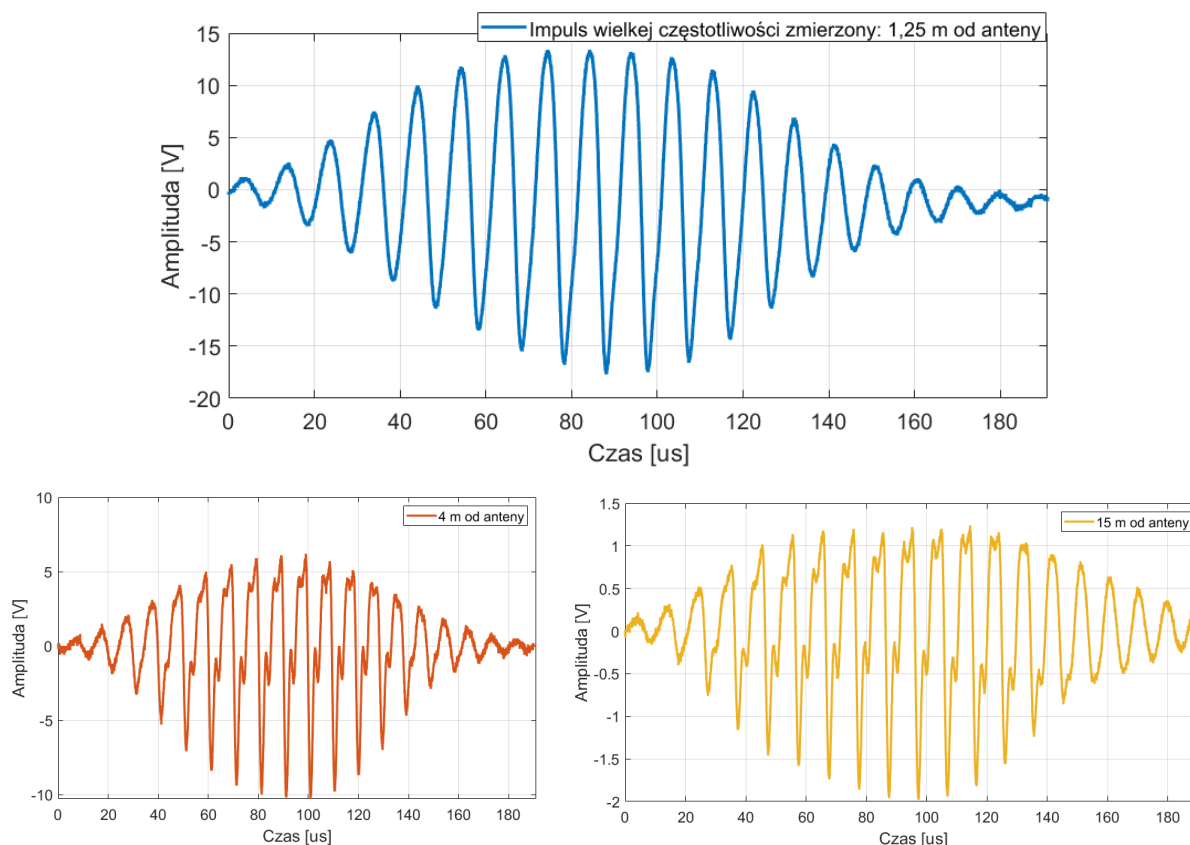
Rysunek 5-34 Charakterystyka kierunkowa anteny nadawczej w odległości 10 cm od przetwornika

W odległości 0,821 m od przetwornika zaczyna narastać amplituda fali małej częstotliwości (wykres w kolorze pomarańczowym – Rysunek 5-33). Można założyć, że ta wartość determinuje pole martwe anteny. Następnie amplituda osiąga maksimum w odległości 2,148 m i zaczyna gwałtownie zmniejszać się (odległość $\sigma \approx 4$ - odniesienie do danych opisanych w Tabeli 3-1) i zaczyna rozchodzić się jak fala o nieskończenie małej amplitudzie (tłumienie będzie realizowane jak w przypadku akustyki liniowej).



Rysunek 5-35 Stanowisko do pomiaru amplitudy oraz kształtu impulsów sondujących wraz z odległością (po lewej) laserowy miernik do określenia odległości hydrofonu od przetwornika (po prawej)

Podczas pomiarów ciśnienia impulsu sondującego zarejestrowano również pełne przebiegi czasowe impulsów sondujących. Ze względu na nieliniowe właściwości ośrodka, fala wielkiej częstotliwości o dużej mocy (240 dB re 1 μ Pa) ulega zniekształceniu, co jest zauważalne w odległości 1,25 m oraz wyraźnie widoczne dla kształtu impulsu zarejestrowanego w odległości 4 i 15 m od przetwornika zob. Rysunek 5-36.

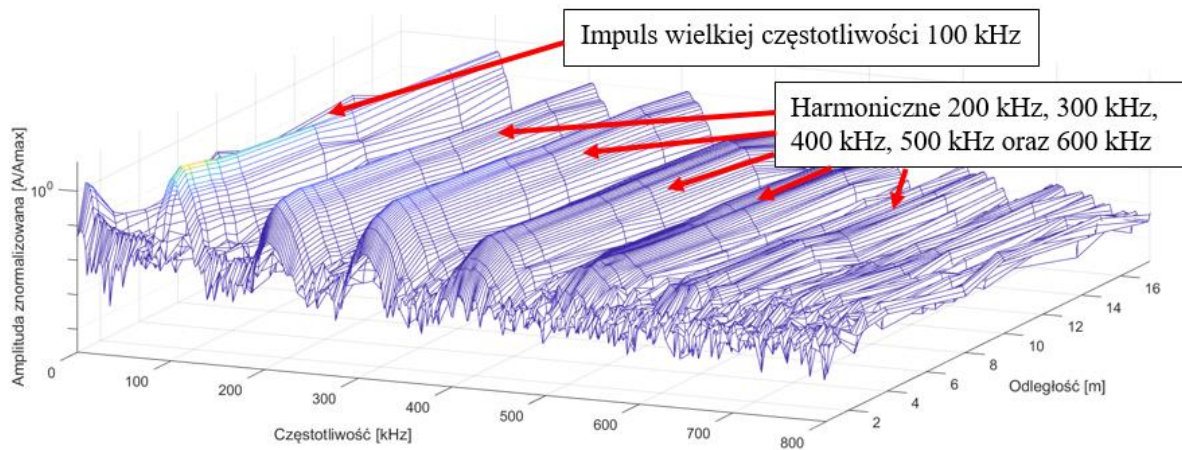


Rysunek 5-36 Porównanie kształtu impulsów wielkiej częstotliwości zarejestrowanych w odległości 1,25, 4 i 15 metrów od przetwornika.

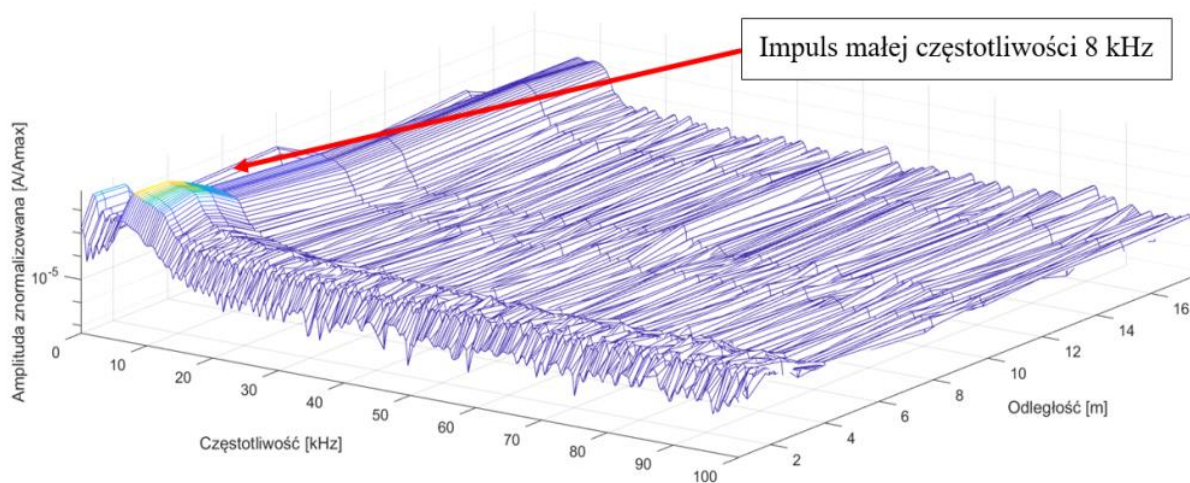
Nawiązując do omówionego w rozdziale 3 wytwarzania wyższych harmonicznych oraz impulsu o częstotliwości równej różnicy częstotliwości impulsów pierwotnych wielkiej mocy, zaprezentowano na Rysunku 5-37 oraz 5-37 spektrogramy z przebiegów czasowych zarejestrowanych wzdłuż kierunku rozchodzenia się wiązki głównej. Wykres na Rysunku 5-37 obrazuje przekazywanie energii od impulsów o częstotliwości 100 kHz do wyższych harmonicznych odpowiednio 200, 300, 400, 500 oraz 600 kHz. Powstały impuls o częstotliwości 600 kHz tłumiony jest w największym stopniu, widać wyraźnie zmniejszenia amplitudy na odległości do 10 m od przetwornika. Spektrogram z Rysunku 5-38 prezentuje wytwarzanie impulsu



małej częstotliwości w danym przypadku o częstotliwości 8 kHz. Analogicznie jak na Rysunku 5-33 widać kształtowanie impulsu i zmiany poziomu amplitudy.



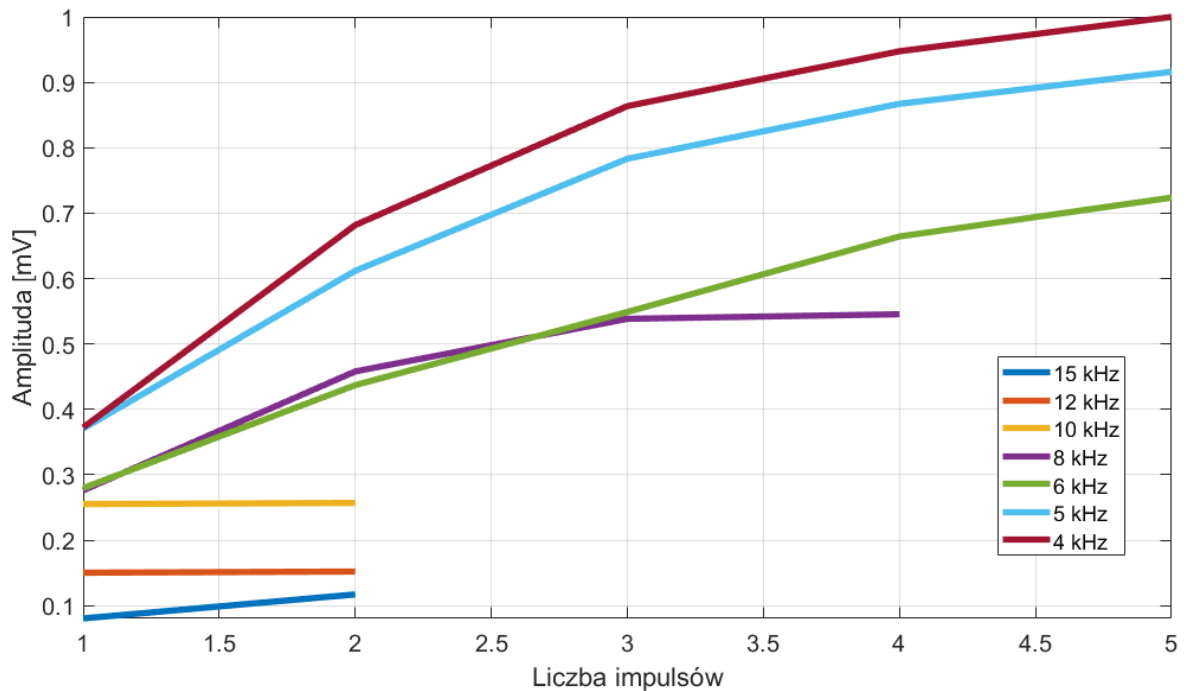
Rysunek 5-37 Spektrogram z wyższymi harmonicznymi powstałymi w wyniku nieliniowych właściwości wody



Rysunek 5-38 Spektrogram z powstałą w wyniku oddziaływań nieliniowych częstotliwością różnicową

W zależności od celu badań echosondą parametryczną należy wybrać odpowiednią częstotliwość oraz liczbę okresów impulsu różnicowego. W przypadku zadania jakim jest poszukiwanie obiektów zagrzebanych na dnie należy wybrać wyższe częstotliwości z zakresu 10-15 kHz o małej liczbie okresów, natomiast w przypadku kiedy głównym aspektem jest określenie struktury geologicznej osadów dennych należy używać częstotliwości z zakresu 4-8 kHz. Wartości te wpływają na głębokość penetracji osadów dennych między innymi poprzez

moc powstałego w wyniku oddziaływań fal pierwotnych impulsu, co zostało zaprezentowane na Rysunku 5-39.



Rysunek 5-39 Amplituda impulsów sondujących w zależności od liczby okresów

5.2.4 Badanie właściwości akustycznych osadów

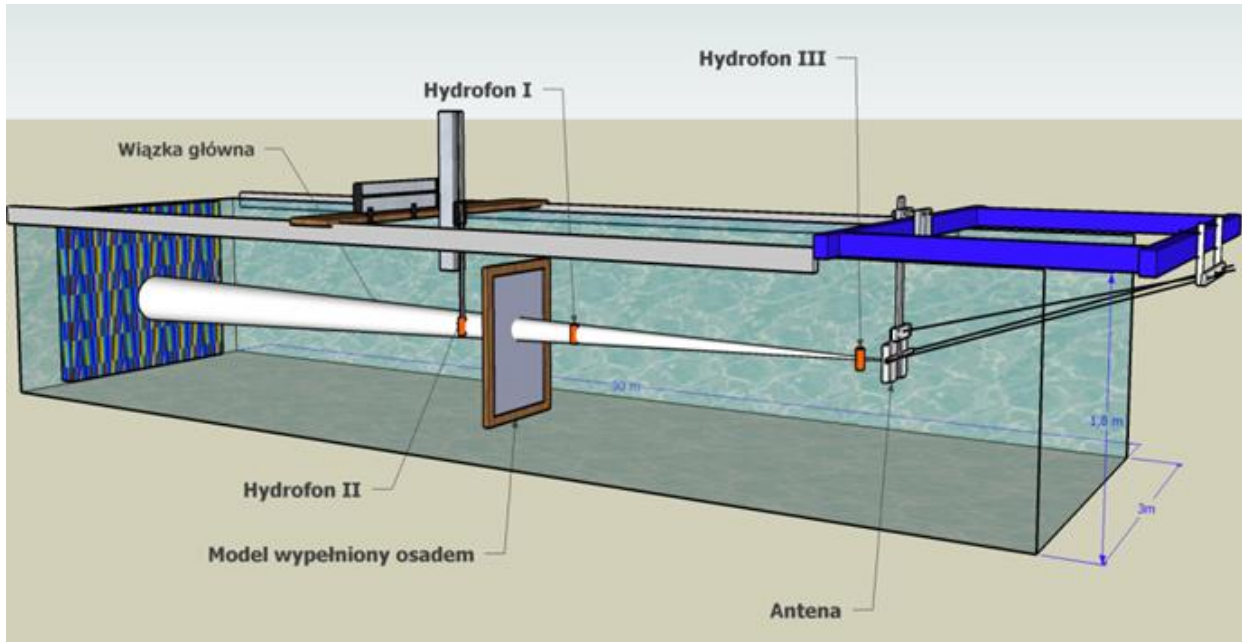
Kolejny etap badań polegał na wyznaczeniu właściwości akustycznych różnych typów osadów dennych na podstawie pomiaru współczynnika odbicia i współczynnika transmisji przez wybrane typy osadów Rysunek 5-40.



Rysunek 5-40 Przykładowe zdjęcia osadów dennych zarejestrowane kamerą podwodną oraz pobrane podczas pomiarów w warunkach rzeczywistych.

Pomiary wykonano przy użyciu hydrofonów pomiarowych tego samego typu. Modele warstw osadów stanowiły wypełnione próbkami gruntu worki polipropylenowe zamocowane

w specjalnie przygotowanych uchwytach w sposób uniemożliwiający przesuwanie się materiału badanego wewnątrz worka przy pionowym umieszczeniu modelu tak, żeby wsad był równomiernie rozłożony na całej powierzchni. Takie działanie umożliwiła konstrukcja posiadająca specjalną regulację naprężenia znajdującej się wewnątrz membrany. Model osadów umieszczano w odległości 5,5 m od anteny echosondy prostopadle do osi basenu, tak aby główna wiązka padała na środek modelu. Po umieszczeniu osadu w basenie pozostawiono każdą z próbek na 24 godziny w celu pełnej penetracji badanego materiału przez ciecz oraz wyeliminowania ewentualnych pęcherzyków powietrza, które mogły zalegać w przestrzeni wypełnionej osadem. Poprawność rozłożenia trzech punktów pomiarowych oraz ustawienia ramki tak, aby centralna część wiązki nadźwiękowała dokładnie środek wsadu, sprawdzano hydrofonem umieszczonym przed modelem, za pomocą którego wyszukano punkt z największą wartością amplitudy impulsu nadawanego. Ukierunkowanie anteny i celów było takie samo dla wszystkich badanych próbek, aby uzyskać wyniki możliwe do późniejszego porównania. Podczas badania rejestrowano sygnał padający (hydrofon I), odbity (hydrofon III) oraz przechodzący przez warstwę osadu (hydrofon II), a także rejestrowane wyniki w postaci echogramów z opcją rejestracji przebiegu czasowego echosondą parametryczną Rysunek 5-41.

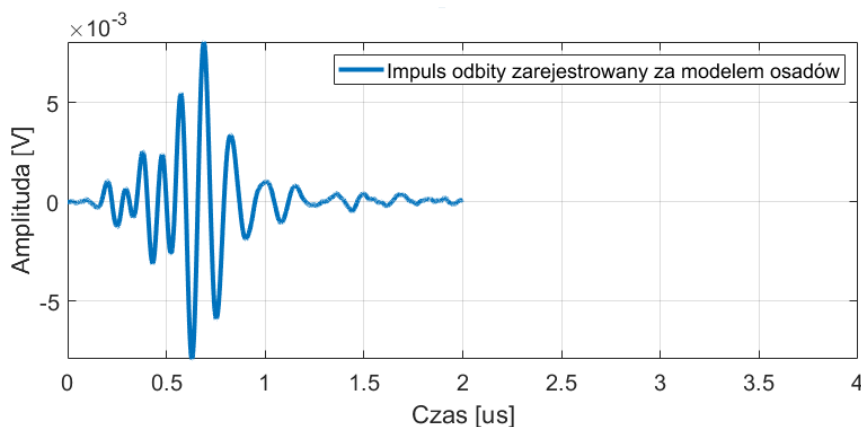


Rysunek 5-41 Konfiguracja układu pomiarowego do badania próbek osadów dennych

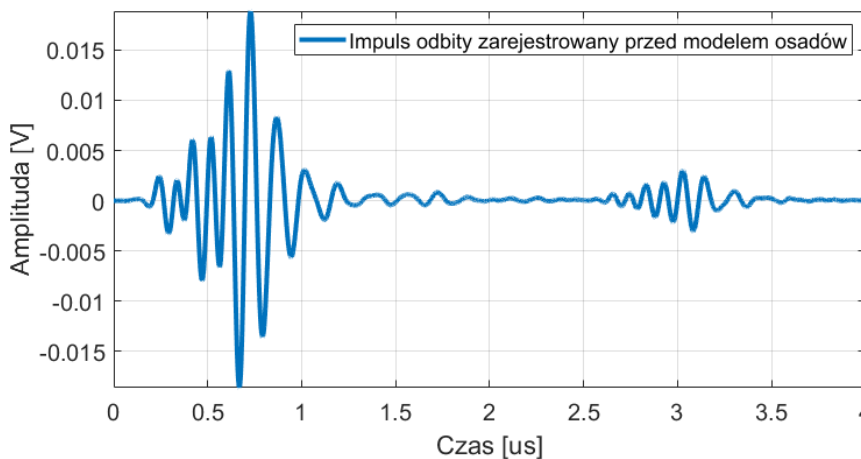


Rysunek 5-42 Hydrofony pomiarowe używane podczas rejestracji impulsów sondujących

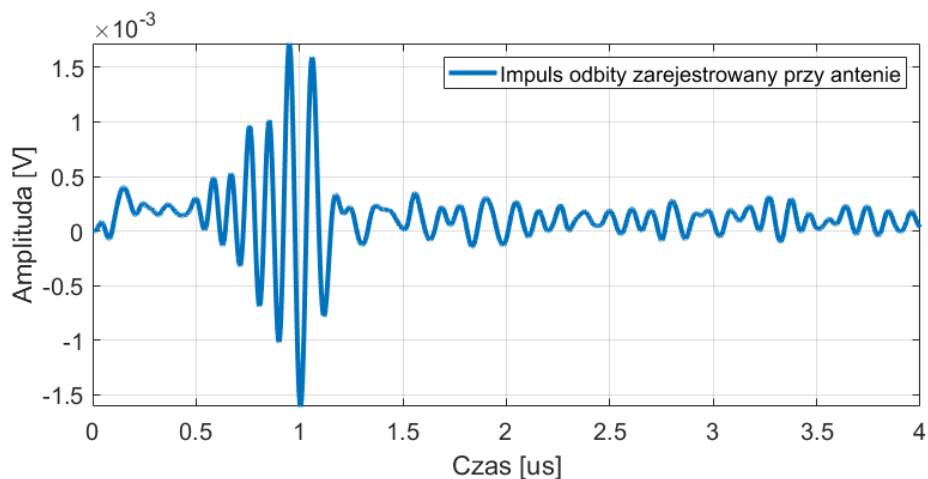
Pomiar impedancji akustycznej wybranych osadów dennych umożliwił stworzenie bazy danych przechowującej parametry przydatne podczas analizy wyników sondowania również w czasie rzeczywistym oraz tworzenia symulacji interakcji pomiędzy nakładającymi się impulsami odbitymi od obiektów oddalonych od siebie na odległość mniejszą niż długość impulsu sondującego. Na Rysunkach 5-43, 5-44 oraz 5-45 zaprezentowano kształt impulsu sondującego oraz jego echo zarejestrowane w trzech punktach pomiarowych.



Rysunek 5-43 Impuls sondujący zarejestrowany w punkcie I (maks. obwiedni 8 mV)

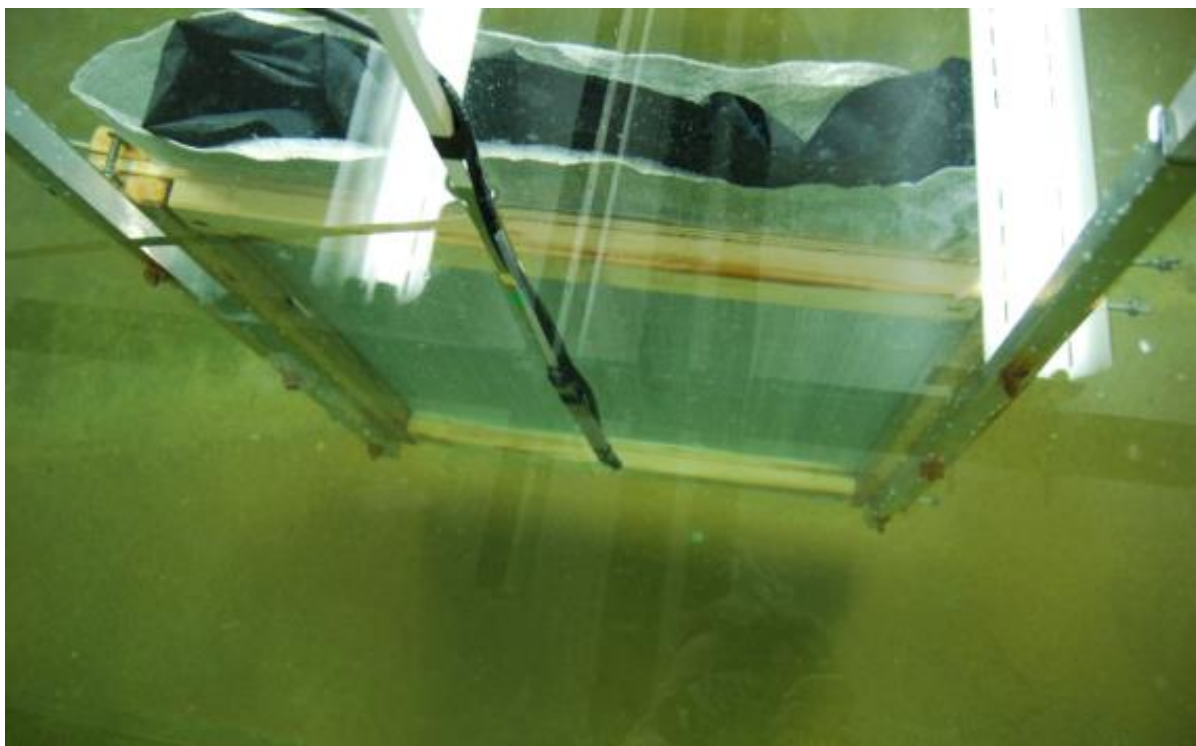


Rysunek 5-44 Impuls sondujący zarejestrowany w punkcie II (maks. obwiedni 15 mV)



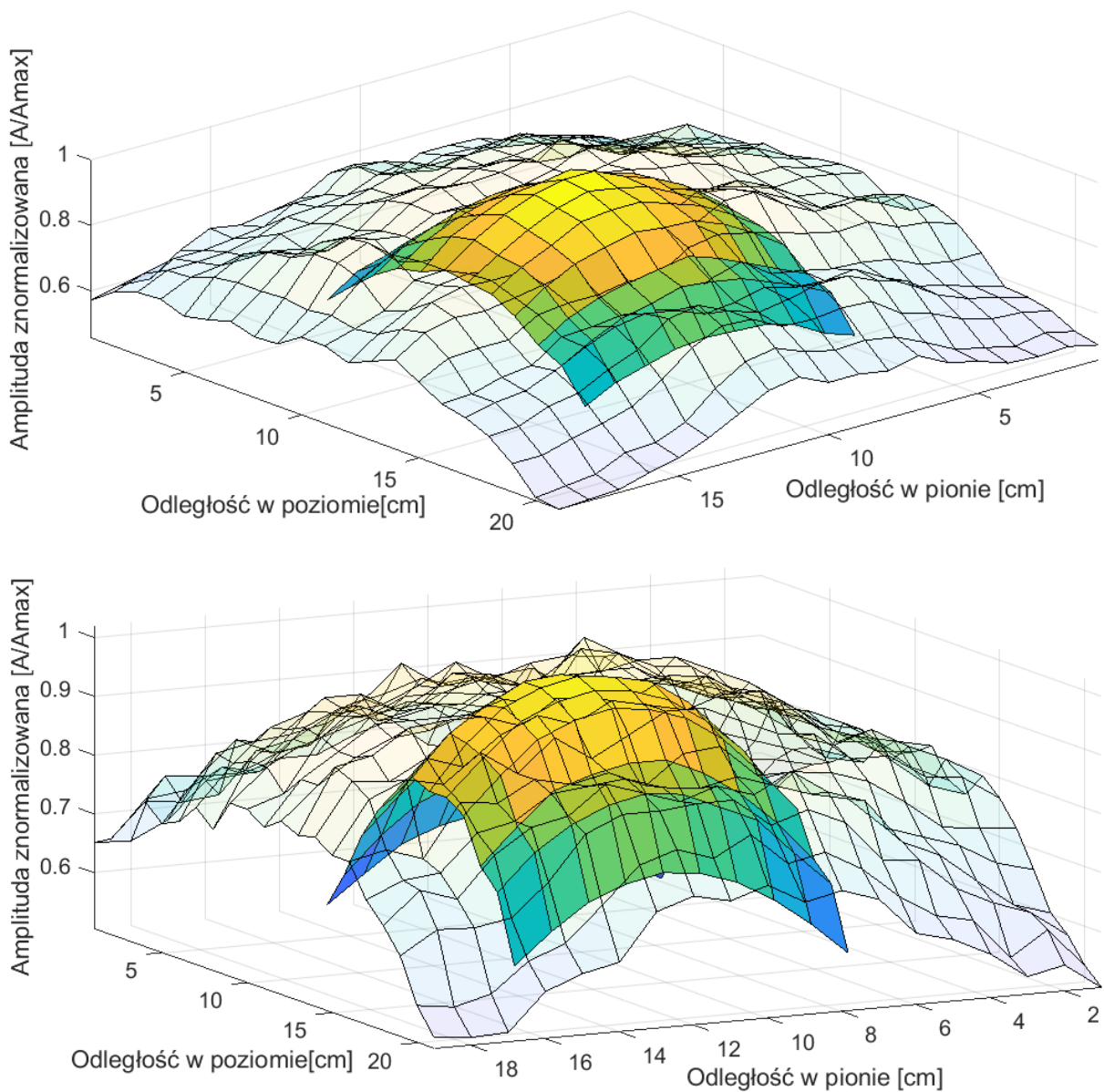
Rysunek 5-45 Impuls sondujący zarejestrowany w punkcie III (maks. obwiedni 1,5 mV)

W pierwszej fazie wykonano szereg pomiarów dla pojedynczego pustego pojemnika modelu (niewypełnionego żadnym materiałem osadowym) umieszczonego w ustalonym miejscu Rysunek 5-46 oraz pomiar tła, tzn. ciśnienia impulsu sondującego bez ramki. Zarejestrowane dane dla dostępnego zestawu ustawień częstotliwości oraz długości impulsu sondującego służyły jako baza porównawcza z sygnałami poddanymi tłumieniu w osadach (wartości zmierzonej podczas badań tła posłużyły do znormalizowania wyników).



Rysunek 5-46 Badanie wpływu membrany na propagację impulsu sondującego

Rysunek 5-47 prezentuje wyniki sondażu za membraną (wynik nałożone jako nie transparentna warstwa) oraz wyniki zebrane podczas pomiaru tła (transparentna warstwa). Porównane dane potwierdziły, że w centralnym punkcie wiązki głównej można założyć brak wpływu na amplitudę impulsów sondujących membrany w jakiej umieszczane były próbki osadów dennych.



Rysunek 5-47 Amplituda impulsu sondującego fali pierwotnej (u góry) oraz fali różnicowej (na dole)

Kolejnym etapem badań – zasadniczym – było wykonanie pomiarów przy wypełnieniu modelu różnego rodzaju próbkami osadów pobranych z dna morskiego. Ponowne umieszczenie modeli w wodzie (po wypełnieniu osadem piaszczystym lub kamieniami) wymuszało wykonanie

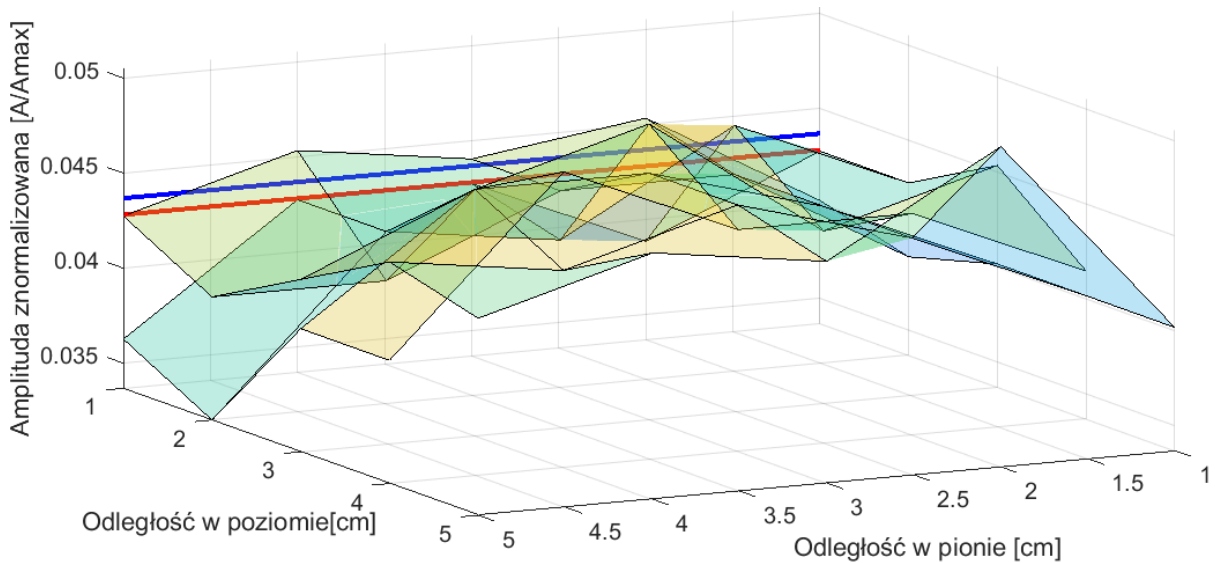
korekty położenia ze względu na odchylenie modelu pod ciężarem wsadu. Do tego celu posłużono się odciągami umożliwiającymi ustawienie modelu w pionie. Dodatkowym parametrem, który pojawił się podczas badań, była zaokrąglona powierzchnia membrany w przypadku wypełnienia osadem o grubości 10 cm. Czynnikiem ten wpływał na rozpraszanie impulsu nie tylko bezpośrednio w kierunku przetwornika (odbicie lustrzane), co w znacznym stopniu wpływało na uzyskiwane poziomy odbieranych ech sygnałów sondujących. Podczas pomiarów skupiono się na trzech podstawowych typach osadów: muł, piasek, kamienie. W celu pozyskania jak najbardziej optymalnego wyniku wykonywano od 36 do 120 pomiarów hydrofonem, tworząc tym samym macierz punktów pomiarowych, która następnie była uśredniana i porównywana do wyników pomiaru tła, w celu otrzymania parametru jakim jest współczynnika tłumienia. Na Rysunku 5-48 po lewej stronie zaprezentowano model osadu podczas pomiarów, na środkowym zdjęciu pomiary tła oraz po prawej stronie – pomiary ramki wypełnionej piaskiem z charakterystycznym wybrzuszeniem.



Rysunek 5-48 Konfiguracja stanowiska pomiarowego do określenia współczynnika tłumienia – patrząc od lewej strony: model wypełniony mułem, pomiar tła i ramka z piaskiem o grubości 10 cm

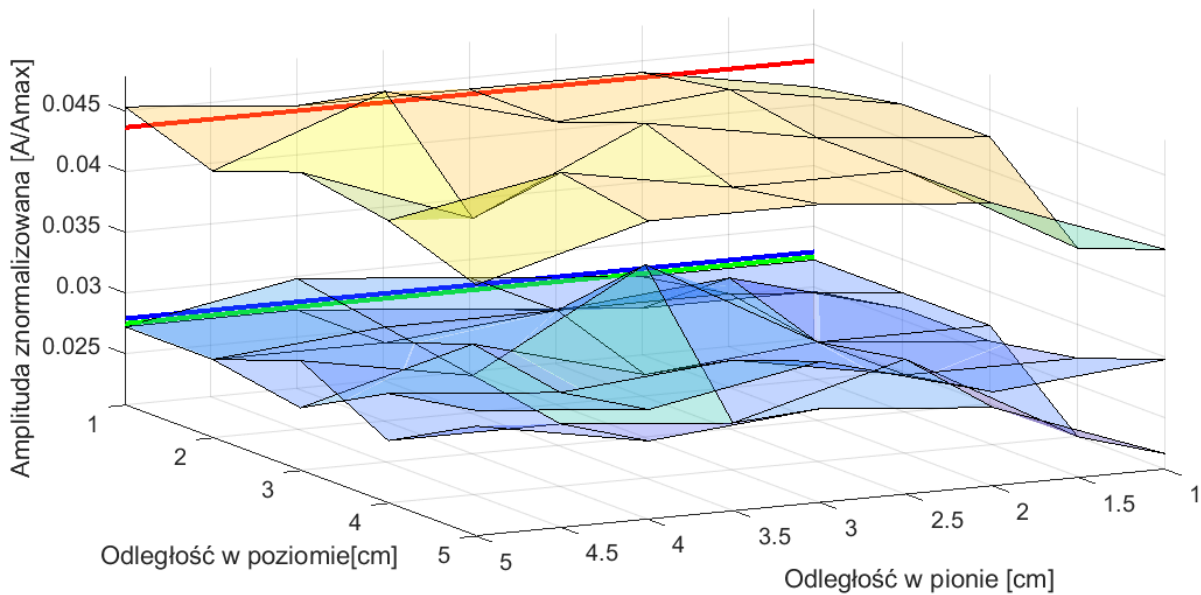
Poniżej zaprezentowane zostaną przykładowe wyniki określające amplitudę impulsu sondującego za ramką wypełnioną osadami. Każdy wynik jest odniesiony do maksymalnej amplitudy sygnału dla poszczególnych częstotliwości uzyskanych podczas pomiarów tła. Na Rysunku 5-49 zaprezentowano różnicę, jaką uzyskano po włożeniu kamieni w ramce i natychmiastowym pomiarze – wynik – 0,0428 – a następnie pomiar wykonano po 4 godzinach od włożenia i uzyskano uzyskując wynik 0,0437. Ze względu na zmiany wyników założono, że w

każdym przypadku umieszczenia nowego osadu, próbka zostanie poddana pomiarom po 24 godzinach od umieszczenia w basenie.



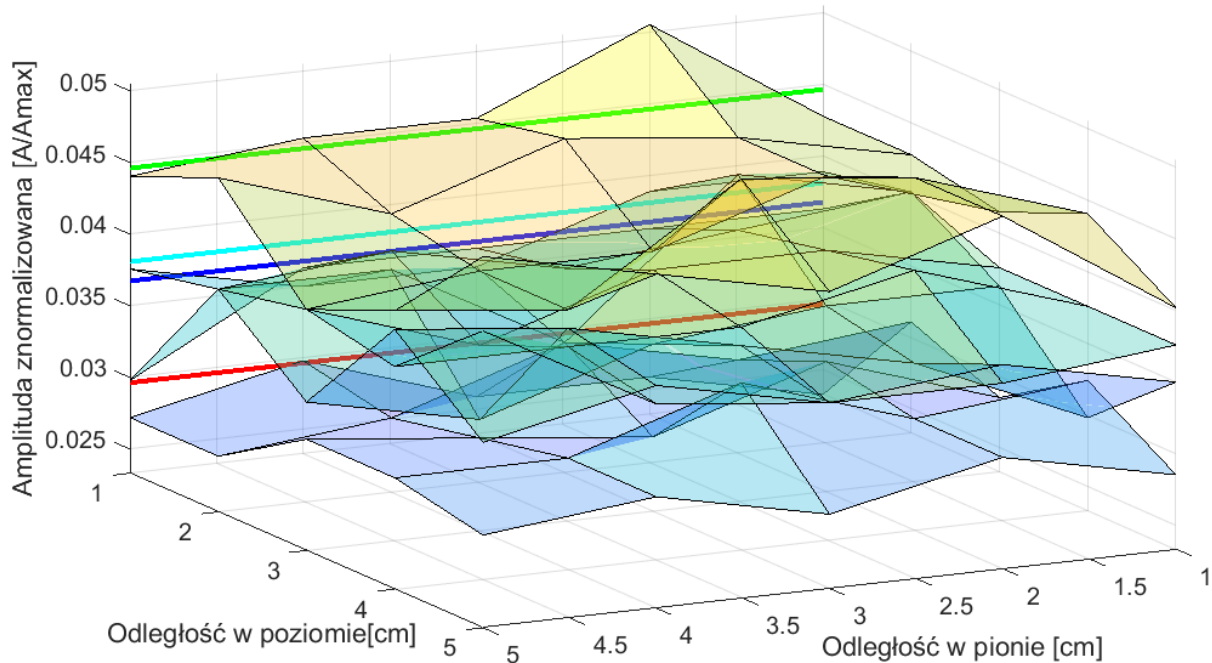
Rysunek 5-49 Porównanie tłumienia osadu bezpośrednio po włożeniu do basenu (linia czerwona) oraz po nasiąknięciu cieczą (linia niebieska)

Na Rysunku 5-50 zaprezentowano porównanie sondowania osadów, które po umieszczeniu w basenie nie zostały ustawione pionowo (średnia wartość z pomiarów zaznaczona kolorem czerwonym – 0,0436), a następnie po spionowaniu ramki impulsem o długości dwóch okresów (średnia wartość zaznaczona kolorem zielonym na poziomie 0,0275) i trzech okresów (wartość zaznaczona kolorem niebieskim – 0,0279). Analizując dany przypadek, stwierdzamy, że zmiana położenia modelu na prawidłowe spowodowała zmniejszenie rozpraszania impulsu w kierunku niezgodnym z normalną do powierzchni osadów, przez co również mniejsza część energii przenikała przez osad. Przy ustalonej pozycji ramki zmiana mocy impulsu, tzn. zwiększenie długości z dwóch do trzech okresów, spowodowało przeniknięcie większej energii przez model, co jest zgodne z oczekiwaniami.



Rysunek 5-50 Zestawienie pomiarów unormowanej amplitudy ciśnienia fali po przejściu przez próbkę osadów 1) bezpośrednio po umieszczeniu w wodzie (linia czerwona) 2) po 24 godz. linia zielona 3) po zmianie długości impulsu z dwóch na trzy okresy

Na Rysunku 5.51 zaprezentowano porównanie wyników uzyskanych podczas badań ramki wypełnionej wsadem piaskowym. Po włożeniu ramki i odczekaniu 24 godzin wykonano pomiar bez odchylenia modelu do pionu (wynik zaznaczony kolorem czerwonym - 0,0296). Po kalibracji ramki przeprowadzono sondowanie impulsami, w danym przypadku 8 kHz jeden okres – średnia wartość unormowanej amplitudy zaznaczona kolorem niebieskim wynosiła – 0.0367, dla 8 kHz i dwóch okresów – średnia wartość zaznaczona kolorem jasnoniebieskim -0,0381 oraz dla 8 kHz i trzech okresów, zaznaczona kolorem zielonym – 0,0446. Wyniki są zgodne z oczekiwaniami i w odróżnieniu od ramki wypełnionej kamieniami odchylenie modelu od pionu nie powodowało większego rozpraszania po procesie kalibracji, co może być związane z mniejszym zniekształceniem membrany w przypadku piaszczystego wsadu.



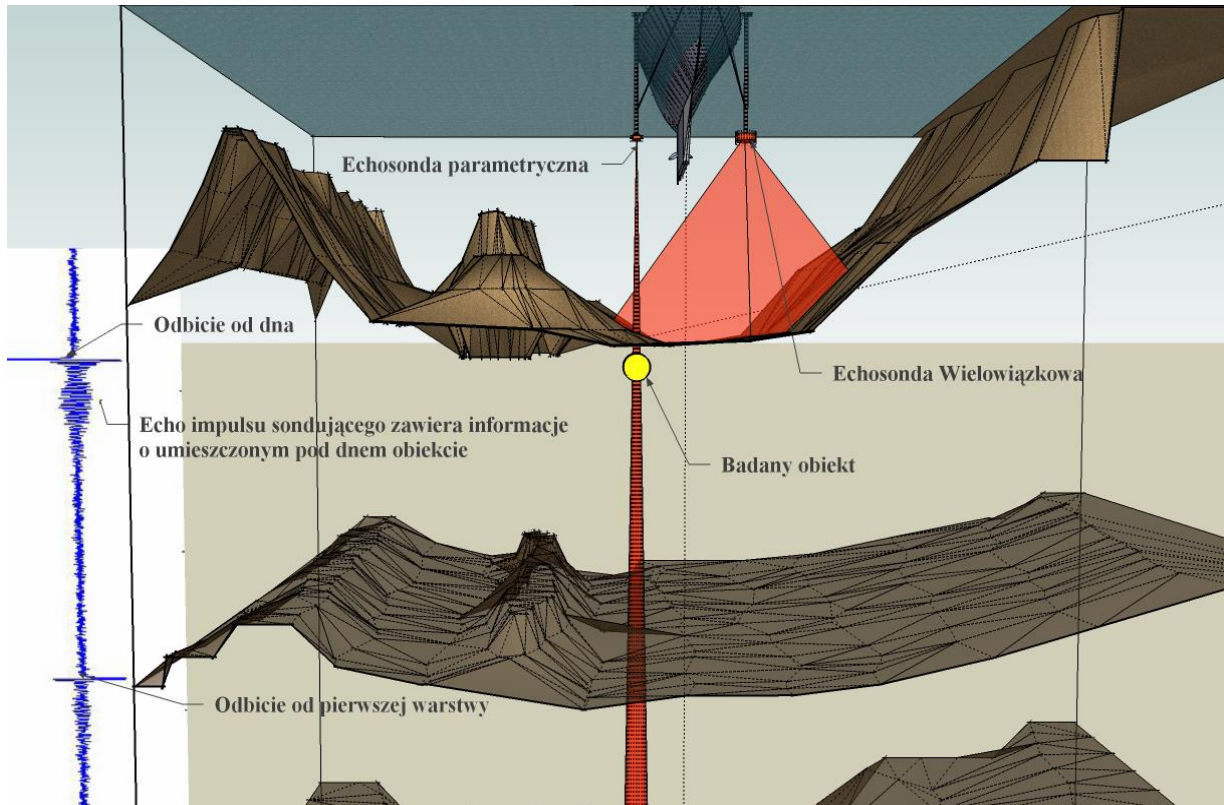
Rysunek 5-51 Zestawienie pomiarów unormowanej amplitudy ciśnienia fali dla modelu wypełnionego piaskowym wsadem 1) po 24 godz. bez odchylenia do pionu (linia czerwona) 2) po 24 godz. po ustabilizowaniu modelu w pionie – 8 kHz 1 impuls (linia niebieska) 3) po 24 godz. po ustabilizowaniu modelu w pionie – 8 kHz 2 impulsy (linia jasnoniebieska) 4) po 24 godz. po ustabilizowaniu modelu w pionie – 8 kHz 3 impulsy (linia zielona)

Dane pomiarowe uzyskane w warunkach laboratoryjnych posłużyły do oszacowania właściwości odbijających i tłumiących osadów, których należy spodziewać się w rejonie badań prowadzonych w warunkach naturalnych. Pozwoliły również nabrać doświadczenia w interpretacji echogramów echosondy parametrycznej oraz doboru impulsów sondujących. Należy jednak zaznaczyć, że badania osadów w warunkach laboratoryjnych nie są idealnym odzwierciedleniem pomiarów właściwości geoakustycznych, jak jest to w przypadku badań realizowanych w warunkach rzeczywistych z umieszczonym wzorcowym źródłem nadźwiękawiającym osad i zestawem umieszczonych na jednej ramie hydrofonów odbiorczych.

5.2.5 Pomiar rozdzielczości wgłębnej

Badanie rozdzielczości przestrzennej ma na celu doświadczalne przetestowanie praktycznego zastosowania echosondy parametrycznej do określenia geologicznej struktury osadów dennych oraz poszukiwania obiektów przykrytych cienką warstwą osadu dennego lub zakopanych pod dnem. Określenie tego parametru oraz zapoznanie z charakterystyką obwiedni echa impulsu

sondującego zapewni informacje niezbędne do precyzyjnego analizowania echogramów przez operatora zarówno w czasie wykonywania pomiarów, jaki i podczas przetwarzania sygnałów. Rysunek 5-52 przedstawia w sposób obrazowy celowość oraz potrzebę dokładnego przeanalizowania zjawiska.



Rysunek 5-52 Wizualizacja prezentująca strukturę geologiczną dna morskiego, z zaznaczeniem braku penetracji przy użyciu echosondy wielowiązkowej oraz możliwością penetracji dna za pomocą echosondy parametrycznej np. w celu poszukiwania zagrzebanych obiektów

Opis badania parametru, jakim jest rozdzielczość wglębna zostanie zaprezentowany na podstawie metod opisanych poniżej:

- Stanowisko z dwoma modelami warstw osadów dennych oraz umieszczonym między nimi obiektem w formie piankowego walca o średnicy 10 cm oraz aluminiowego walca o średnicy 25 cm;
- Stanowiska z dwoma modelami osadów ze zmienną odległością pomiędzy nimi – symulowanie warstwy mułu znajdującej się na piaszczystym podłożu (porównanie z rzeczywistymi wynikami).

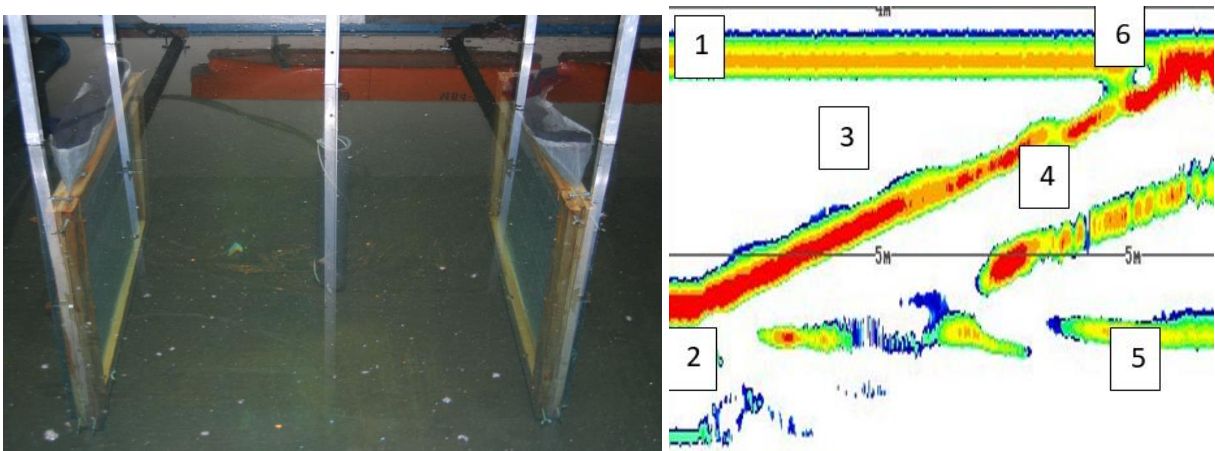
Ad a) Stanowisko z dwoma modelami warstw osadów dennych oraz umieszczonym między nimi obiektem w formie piankowego walca o średnicy 10 cm oraz aluminiowego walca o średnicy 25 cm;

Pierwszym zadaniem podczas pomiarów było zestawienie stanowiska umożliwiającego

- Ustawienie w dowolnej odległości od anteny nadawczo-odbiorczej ramek symulujących dno – w danym przypadku była to odległość 4 m;
- Umieszczenie badanego przedmiotu za ramką, z możliwością łatwego przemieszczania – zastosowano dwa rozwiązania, jedno z użyciem suwnicy umożliwiającej dynamiczny pomiar oraz drugie z obciążonym obiektem, który był ręcznie przesuwany.

Odległość pomiędzy ramkami wynosiła 1,3 m. W wolnej przestrzeni umieszczone zostały dwa obiekty: rura z pianki o średnicy 10 cm, grubości ścianki 1 cm i wysokości 1 m wykonana z polietylenu o zamkniętej strukturze komórkowej, która uniemożliwia wchłanianie wilgoci. Zamocowanie pierwszego obiektu na ruchomym stelażu suwnicy umożliwiło dynamiczny pomiar zmian odbieranych impulsów sondujących, a tym samym wizualizacji danych na echogramie. Na Rysunku 5-53 widać konfigurację stanowiska pomiarowego – dwie ramki symulujące osady dennie oraz umieszczony pomiędzy nimi obiekt. Po prawej stronie rysunku zaprezentowano echogram, na którym znajdują się:

- 1) Echo od modelu osadu symulującego pierwszą warstwę osadów;
- 2) Echo od drugiej ramki, przy której znajduje się obiekt;
- 3) Echo od obiektu, który porusza się w kierunku pierwszej ramki;
- 4) Podwójne echa będące wynikiem odbicia pomiędzy obiektem a pierwszym modelem osadów;
- 5) Echo od drugiej ramki.



Rysunek 5-53 Dynamiczny pomiar rozdzielczości w głębi – zdjęcie stanowiska oraz wynik

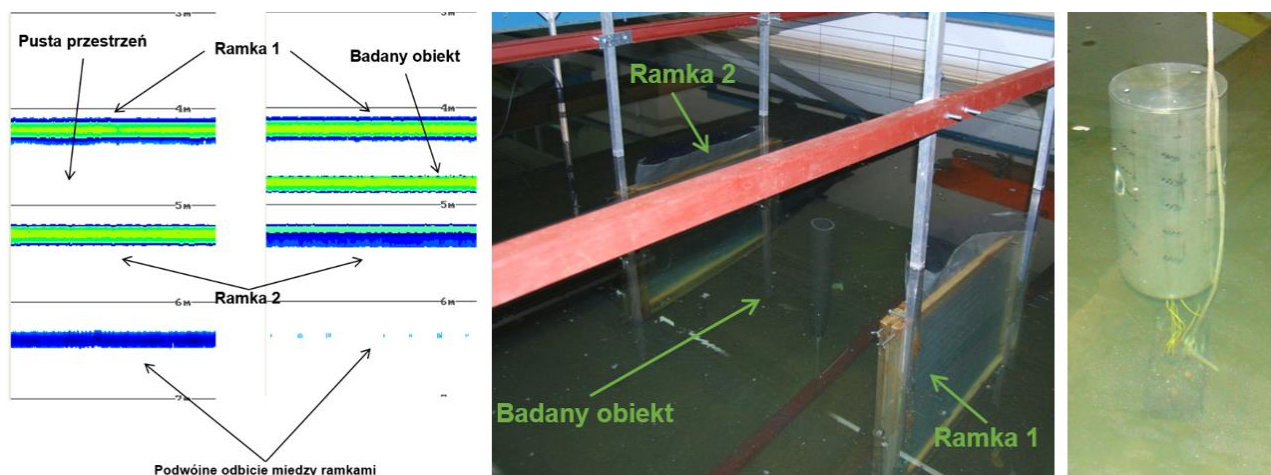
Pomiar wykazał możliwość wyznaczenia zmian położenia obiektu względem dwóch ramek z dokładnością do 3 cm. Przy danych warunkach laboratoryjnych jest to bardzo dobry wynik dla impulsu o częstotliwości 8 kHz i 1 impulsu. Pojawiające się w połowie nagrania podwójne echo nawiązuje do opisywanego w rozdziale dotyczącym teoretycznego modelu wnikania wiązki w dno oraz opisu skomplikowanej analizy wielowarstwowej struktury osadów ze względu na wielokrotne odbicia pomiędzy warstwami osadów i problematykę związaną z modelowaniem tego typu oddziaływań. W rzeczywistych warunkach pomiarowych dokładność rzędu 3 cm jest praktycznie niemożliwa do zagwarantowania ze względu na wpływ ruchów jednostki, które występują pomimo używanych systemów do kompensacji przewyższeń, przechyłów poprzecznych i podłużnych oraz błędów odbiorników GPS.

Drugi typ badania zakładał stacjonarne pomiary obiektów znajdujących się w zadanych odległościach od pierwszej warstwy osadu dennego. Pomiarom poddano dwa obiekty – aluminiowy walec o średnicy 25 cm i wysokości 1 m, grubości ścianki 5 mm wypełniony powietrzem o ciśnieniu atmosferycznym oraz rurę z pianki polietylenowej Rysunek 5-54. Wyniki pomiarów dla obydwu obiektów były zbliżone, różnica wynikała z siły celu i sposobu kształtowania się obwiedni odbieranych sygnałów.

Po każdorazowym przesunięciu obiektu został on pozostawiony na wyznaczony czas w celu stabilizacji. Takie podejście zapewniło jednakowe warunki pomiarów dla wszystkich impulsów sondujących, jakie możliwe są do wypromieniowania poprzez przetwornik urządzenia.

Wyniki potwierdziły założenia, jakie należy stosować dla różnych typów zadań realizowanych podczas badań hydrograficznych, tzn.:

1. Impulsy o częstotliwościach z grupy 4, 5, 6 oraz 8 kHz charakteryzują się mniejszym tłumieniem w osadach dennych, co umożliwia wnikanie w osady na większą głębokość. Ze względu na długość impulsu uzyskano mniejszą rozdzielczość wglębną (przestrzenną), co potwierdził opisywany eksperyment.
2. Impulsy z grupy 10, 12 i 15 kHz charakteryzują się większym współczynnikiem tłumienia, natomiast ze względu na mniejszą w porównaniu z opisaną w pierwszym punkcie długością fali umożliwiają uzyskanie rozdzielczości wglębnej od 1 do 5 cm.



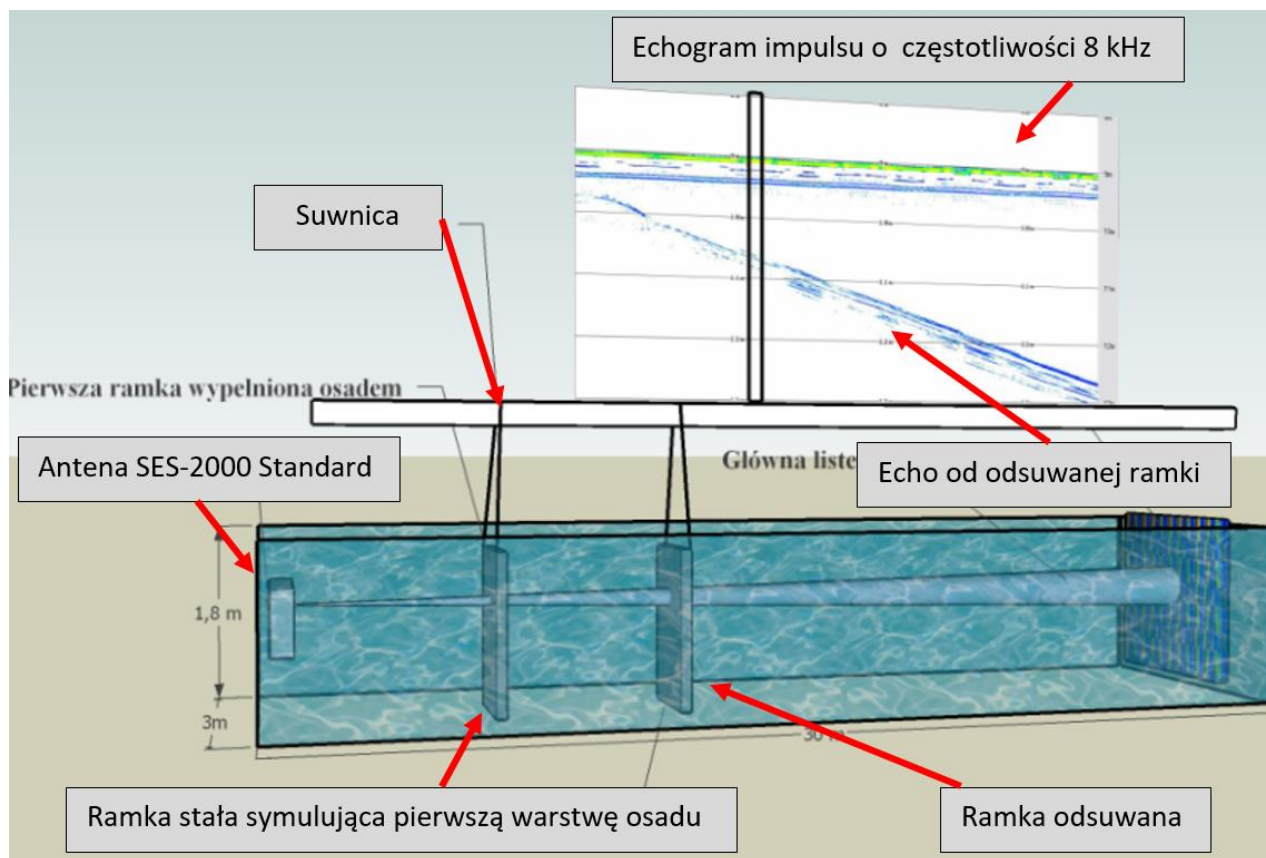
Rysunek 5-54 Pomiar rozdzielczości wgłębnej, po lewej stronie echogram z sondującego stanowiska którego zdjęcie znajduje się po lewej stronie

Ad b) Stanowiska z dwoma modelami osadów ze zmienną odległością pomiędzy nimi – symulowanie warstwy mułu znajdującej się na piaszczystym podłożu (prównanie z rzeczywistymi wynikami).

Analogicznie jak w opisywanej w punkcie A metodzie, przeprowadzono dynamiczny pomiar parametru, jakim jest rozdzielczość wgłębna. Pomiarowi poddawany był model warstwy osadu dennego Rysunek 5-55 odsuwanego ruchem jednostajnym od warstwy bliższej przetwornikowi hydroakustycznemu, która symulowała dno akwenu pomiarowego. W danym przypadku trudnością było utrzymanie przesuwanego modelu w pionie w celu zagwarantowania w każdym punkcie pomiarowym rozpraszania impulsu sondującego w tych samych kierunkach.



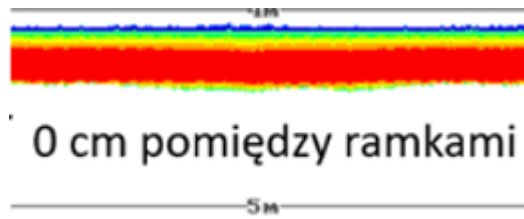
Rysunek 5-55 Pomiar dynamiczny rozdzielczości wgłębnej – rozpoczęcie procesu dynamicznego odsuwania ramki z osadem.



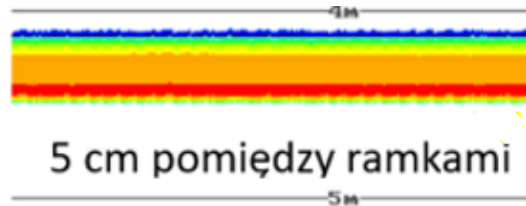
Rysunek 5-56 Pomiar dynamiczny rozdzielczości wglębnej – wizualizacja basenu pomiarowego oraz zdjęcie wyniku pomiaru dla częstotliwości różnicowej

Wyniki uzyskane podczas pomiarów wykazały (zob. Rysunek 5-56) znaczny wpływ odchyień przesuwanego modelu na poziom sygnału odbitego od niego oraz wykazały, podobnie jak w przypadku badań z obiektem, że wyznaczona doświadczalnie rozdzielczość przestrzenna uzyskana dla fali różnicowej jest zgodna z oczekiwaniami - równa rozdzielczości wglębnej fali pierwotnej - nie zaś długości fali o częstotliwości różnicowej (1-5 cm), na co ma wpływ efekt parametrycznego wytworzenia fali małej częstotliwości. Wynik pomiaru potwierdza dużą przydatność urządzenia działającego w oparciu o efekt nieliniowego oddziaływania fal do pozyskiwania informacji zarówno o geologicznej strukturze osadów, jak i możliwości poszukiwania obiektów zakopanych pod dnem. W celu precyzyjnego określenia możliwości rozróżnienia równoległych warstw podczas sondowania impulsami małej częstotliwości przeprowadzono stacjonarne pomiary, odsuwając modele osadów z 5 cm interwałem. Poniżej zaprezentowano wynik dla trzech przypadków podczas badania impulsem 6 kHz o długości 4 okresów w trzech konfiguracjach:

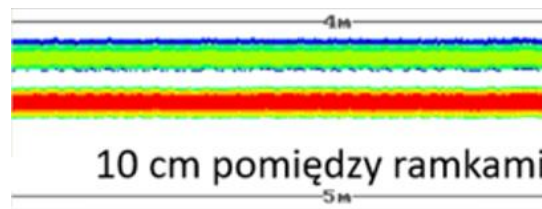
- a) dwie ramki stykały się ze sobą (jednolite echo od stykających się osadów);



- b) odległość pomiędzy ramkami 5 cm (widać zmianę w amplitudzie oraz długości echa, nie ma jednak jednoznacznego rozróżnienia);

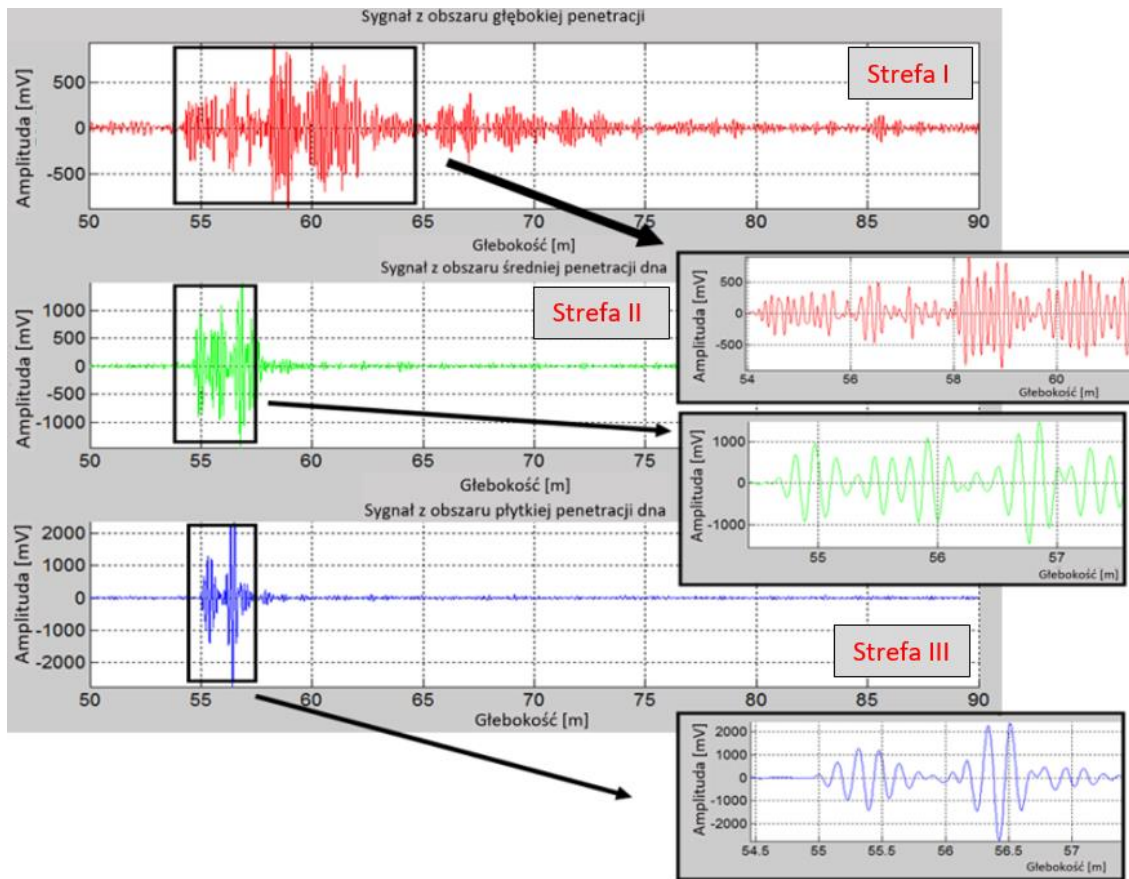


- c) odległość pomiędzy ramkami 10 cm (uzyskano pełne rozgraniczenia na zobrażowaniu przy sondowaniu niekorzystnym ze względu na długość fali oraz liczbę impulsów sygnałem).

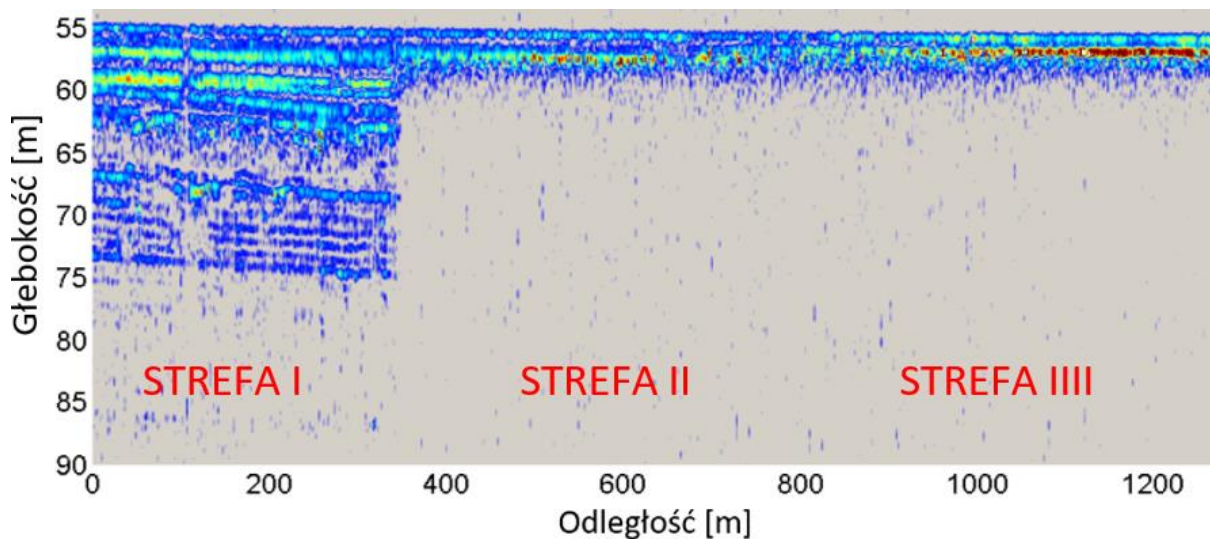


Trzeci przypadek prezentuje wyraźne rozgraniczenie pomiędzy modelami, które jest wyraźnie zauważalne już na zobrażowaniu uzyskiwanym w czasie rzeczywistym, bez dodatkowego analizowania przebiegów czasowych i poddawania ich np. filtracji lub określania punktów odbicia od warstw przy użyciu funkcji korelacji wzajemnych.

Warto w tym miejscu przytoczyć porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami uzyskanymi w warunkach naturalnych. W zależności od typu osadów dennych zalegających na dnie oraz na kolejnych warstwach geologicznych penetracja może sięgać do 30 metrów w głąb dna – przykład przebiegu czasowego z tego typu akwenu zaprezentowano na górnym wykresie Rysunku 5-57. Drugi przebieg przedstawia przykład wnikania fali akustycznej na głębokość 10 metrów, natomiast trzeci przypadek obrazuje wyniki penetracji do 5 metrów z charakterystycznymi dwoma pierwszymi echemi od warstw osadów. Interpretacja uwarstwienia geologicznego dna dla przypadku pierwszego za pomocą znanych modeli opisujących odbicia od różnych typów osadów jest zadaniem wyjątkowo skomplikowanym ze względu na złożoności występującej struktury geologicznej.



Rysunek 5-57 Zestawienie przebiegów czasowych z trzech charakterystycznych punktów akwenu pomiarowego

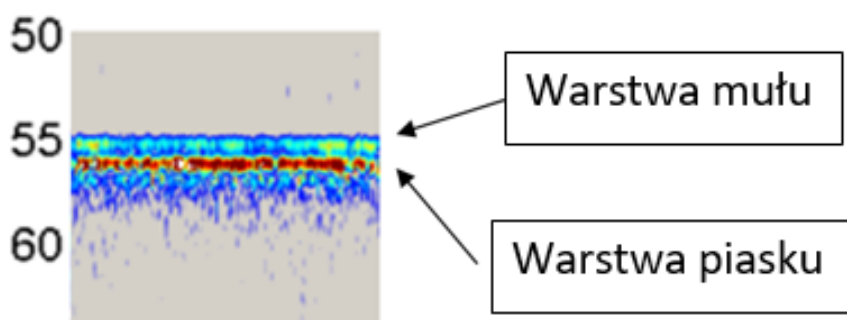


Rysunek 5-58 Echogram obrazujący sondowanie z trzech stref o różnych właściwościach geoakustycznych

Posiadane informacje związane z kształtem, amplitudą impulsów sondujących oraz próbkami osadów dennych z wybranych punktów pomiarowych umożliwiły podjęcie próby uzyskania wyników zbliżonych do tych otrzymanych z trzeciego przebiegu (prezentującego dane z

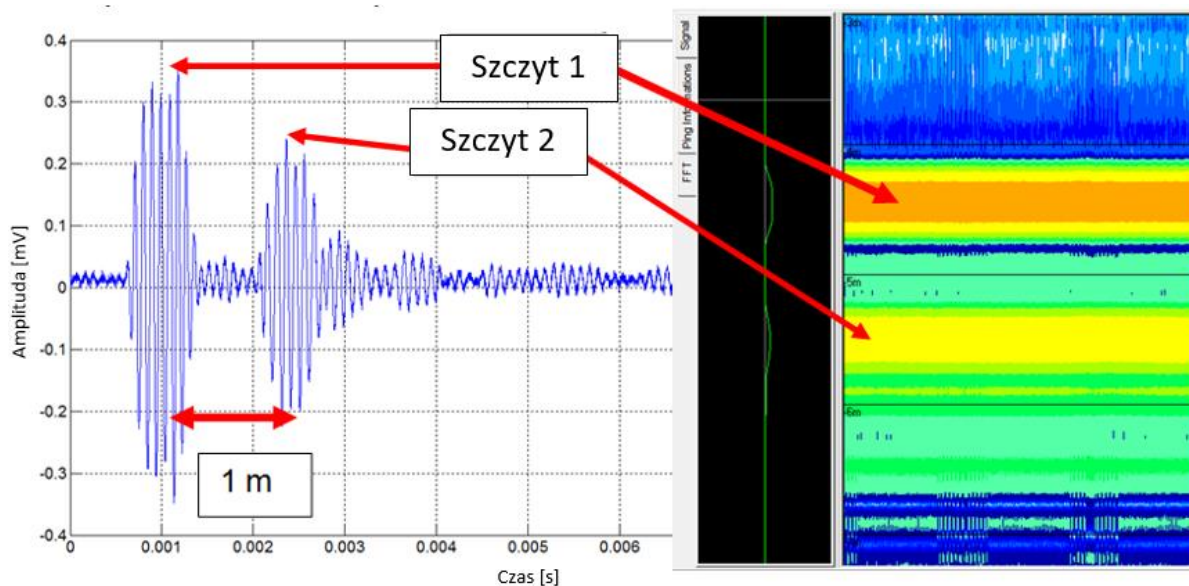
akwenu, na którym pod warstwą mułu znajduje się kolejna jednorodna warstwa piasku) w oparciu o badanie modeli osadów na basenie oraz przygotowany podstawowy program symulacyjny, w którym danymi wejściowymi były podstawowe parametry, np. odległość między warstwami, współczynnik tłumienia osadów, kształt, częstotliwość i liczba okresów impulsu sondującego.

Na Rysunku 5-43 przedstawiono echogram z obszaru numer 3. Podobnie jak na zobrazowaniu przebiegu czasowego wyraźnie widać warstwę mułu o niskiej impedancji oraz silne echo od piaszczystej drugiej warstwy 1 m poniżej. Strzałkami wskazano warstwę mułu oraz echo od jednorodnej warstwy piasku.



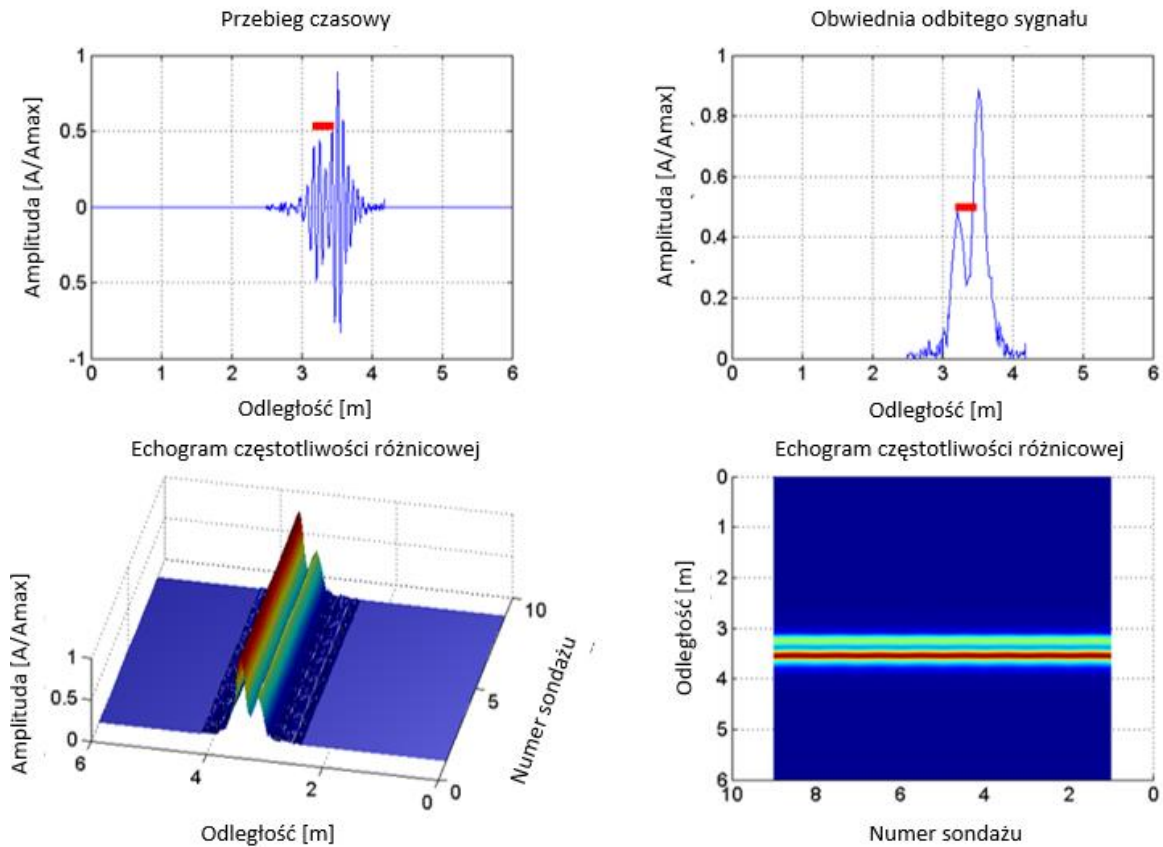
Rysunek 5-59 Echogram z wybranego punktu – strefa III

Po przygotowaniu, na basenie, stanowiska pomiarowego z modelami wypełnionymi wytypowanymi osadami uzyskano zobrazowanie zaprezentowane na Rysunku 5-44. W danym przypadku dla wskazanej odległości jednego metra pomiędzy modelami osadów założenia dotyczące rozróżnienia warstw na podstawie analizy echogramu zostało potwierdzone. Różnica w poziomach echa związana jest tu najprawdopodobniej z nierównomiernym rozłożeniem materiału oraz jego nagromadzeniem w ściśniętej strukturze membrany, przez co można zinterpretować, iż warstwa mułu charakteryzuje się większą impedancją akustyczną od warstwy piasku, co jest oczywiście błędnym wnioskiem (natomiast fakt ten został uwzględniony w programie symulacyjnym).



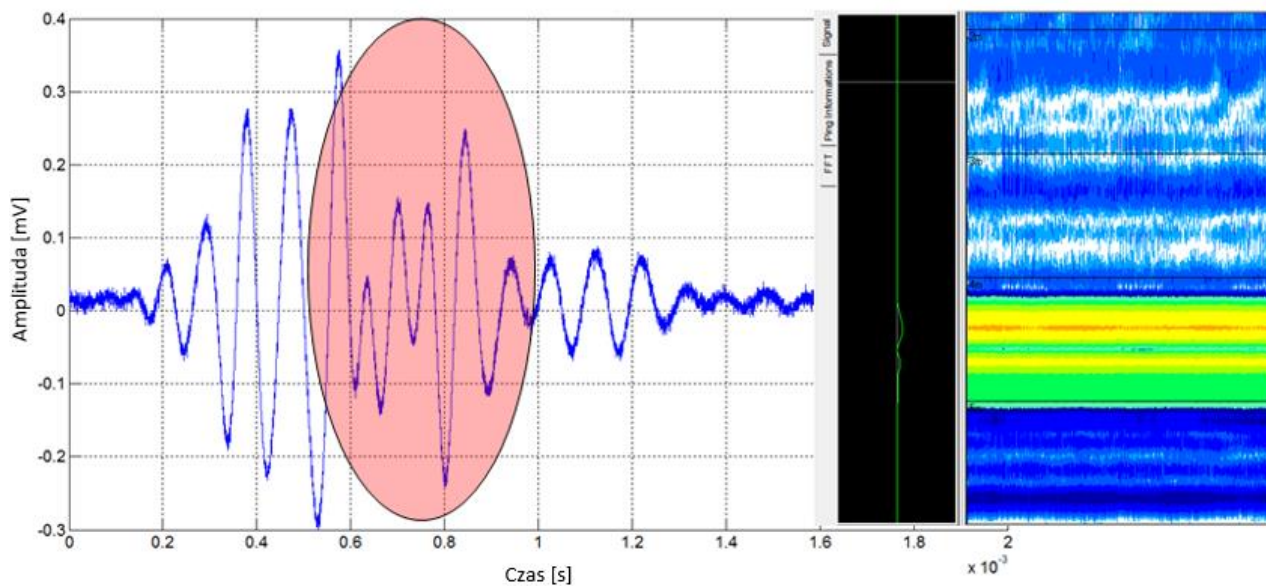
Rysunek 5-560 Wynik sondowania ramek wypełnionych osadami z akwenu pomiarowego (po lewej stronie wynik obliczeń numerycznych, po prawej echogram echosondy parametrycznej).

Przebieg czasowy po lewej stronie wykresu Rysunek 5-44 jest wynikiem symulacji numerycznej, w której założono współczynniki tłumienia w osadach zbliżone do naturalnych korzystając z wyników badań laboratoryjnych. Porównując wynik symulacji z widocznym po prawej stronie obrazem echosondy parametrycznej, można zauważyć pełną korelację pomiędzy maksymalnymi wartościami obwiedni, na podstawie której został przygotowany echogram. Ze względu na obiecujące wyniki przeprowadzono szereg symulacji i porównano je z danymi uzyskanymi podczas stacjonarnych badań modeli osadów (ze względu na brak zbliżonych wyników z pomiarów w warunkach rzeczywistych). Jeden z przykładów zostanie zaprezentowany poniżej. Zasymlowana została konfiguracja, w której odległość pomiędzy ramkami wynosi 20 cm – wynik symulacji przedstawiono na Rysunku 5-45. Przebieg czasowy prezentowane po lewej stronie u góry jest podstawą do obliczenia obwiedni sygnału (prawy górny rysunek), na podstawie której sporządzono echogramy w formie 2D oraz 3D.



Rysunek 5-61 Wynik programu symulującego wzajemne oddziaływanie impulsów odbitych od ramek

W danym przypadku (oraz w innych próbach, kiedy modele znajdują się w odległości do 50 cm) występuje interesujące w analizie wzajemne oddziaływanie impulsów zachodzących na siebie po odbiciu od warstw. W tej konfiguracji można zaobserwować ciekawe zniekształcenia zaznaczone przezroczystym czerwonym owalem na Rysunku 5-46. Ze względu na specyficzny charakter obwiedni, na której występują dwa maksima, można dokonać rozróżnienia pomiędzy dwiema warstwami.



Rysunek 5-62 Wynik pomiarów ramek w odległości 20 cm

Należy zauważyć, że nie we wszystkich badanych przypadkach odległości pomiędzy ramkami istnieje możliwość pewnego rozróżnienia dwóch warstw lub warstwy i obiektu zwłaszcza podczas analizy echogramów w czasie rzeczywistym. Dla niektórych częstotliwości i liczby okresów impulsu sondującego wynik sondowania dwóch ramek skutkowało rejestracją echa zbliżonego kształtem do wydłużonego dwa razy (w porównaniu z propagowanym impulsem) impulsu sondującego bez żadnych charakterystycznych zmian poziomu obwiedni, które mogłyby sugerować wzajemne oddziaływanie echa, co szczególnie w analizie w czasie rzeczywistym umożliwiłoby zauważenie różnorodności warstw lub zakopanych obiektów.

5.3 *Badania w warunkach naturalnych na jednostce badawczej s/y Windspeel i s/y Freija*

Badania dna morskiego wykonywane były z jednostek pływająca o nazwie s/y Windspeel i s/y Freija. Obie jednostki są dostosowane do przeprowadzania badań dna przy użyciu urządzeń echolokacyjnych w warunkach morskich. Jednostka badawcza s/y Windspell ma 9,5 m długości i 3 m szerokości, natomiast s/y Freija ma 12 m długości i 4 m szerokości. Obie jednostki posiadają kadłuby z balastem zintegrowanym, co zapewnia stabilność oraz bezpieczeństwo podczas badań-

5.3.1 Opis stanowiska pomiarowego

Badania z zastosowaniem echosondy parametrycznej zostały poszerzone równoległe o pomiary echosondą wielowiązkową oraz sonarem bocznym. Urządzenia zostały zainstalowane w tej samej odległości od dziobu i osi jachtu, aby zebrane w tym samym czasie informacje dotyczyły tego samego obszaru badań.



Rysunek 5-63 Zdjęcie jednostki pomiarowej s/y Windspell

Na Rysunku 5-62 zaprezentowana została jednostka pomiarowa z zaznaczonymi elementami:

- 1) Uchwyt echosondy parametrycznej;
- 2) Brama z czujnikami nawigacyjnymi (GPS, AIS, NAVTEX, NOAA, VHF);
- 3) Antena GPS Seapath 300;
- 4) Agregat prądotwórczy;
- 5) Uchwyt sonaru bocznego;
- 6) Uchwyt nawigacji podwodnej.

Antena echosondy parametrycznej ze względu na stosunkowo wąską wiązkę i specyficzne przeznaczenie jest w stanie objąć obszar o niewielkiej powierzchni w przeciwieństwie do echosondy wielowiązkowej, której specyfika pozwala na skanowanie powierzchni dna o dość dużej szerokości w zależności od ustawienia zakresu kąтового wiązek. Ze względu na nadźwiękawianie jednakowych fragmentów akwenu należało skonfigurować urządzenia w tryb naprzemiennego nadawania impulsów sondujących. W danym przypadku urządzeniem głównym była echosonda parametryczna, która wyzwała funkcję nadawania echosondy wielowiązkowej.



Rysunek 5-63 Operator podczas kalibracji echosondy wielowiązkowej

Prezentowane w pracy echogramy z sonaru bocznego pochodzą głównie z sonaru typu firmy Simrad model LSS-1 zamontowanego w kadłubie jednostki s/y Freija Rysunek 5-64 oraz 5-65.



Rys. 5.64 Jednostka s/y Freija z zainstalowany w kadłubie sonarem bocznym



Rys. 5.65 Wskazanie punktu montażowego w kadłubie przetwornika sonaru bocznego

Działania w rzeczywistych warunkach morskich wymagają dokładnego przygotowania do pracy wszystkich podsystemów i modułów. Duży nacisk położono na część nawigacyjną oraz monitorującą ruch jednostki, której niepoprawna kalibracja może całkowicie zmienić charakter otrzymywanych wyników. Podczas procesów konfiguracji odnoszono się do błędów, które zostały opisane w podrozdziale 5.1.

Komunikacja pomiędzy poszczególnymi modułami była ułatwiona dzięki protokołowi NMEA, jednak część z nich wymagała indywidualnej konfiguracji ze względu na stosowanie wewnętrznych protokołów używanych tylko przez danego producenta.



Rysunek 5-66 Zestaw monitorów przeznaczonych dla sternika, wyświetlacz GPS oraz urządzenia pomiarowe wewnątrz jednostki pomiarowej

5.3.2 Podsystem nawigacyjny

Ważną kwestią w trakcie zbierania danych batymetrycznych jest poprawna konfiguracja urządzeń hydroakustycznych z modułami służącymi do nawigacji. Mowa tu nie tylko o odbiorniku GPS, ale o wszystkich współpracujących ze sobą układach.

Odbiornik GPS składa się z dwóch modułów odbiorczych, dzięki czemu posiada możliwość podania rzeczywistego kierunku, w jakim znajduje się w danym momencie oś jednostki, nawet gdy jest ona w bezruchu. Odbiorniki SEAPATH 300 posiadają funkcję możliwości odczytu poprawki DGPS, przez co zwiększa się też dokładność wskazywanej pozycji.

Informacje pochodzące od urządzenia są w pierwszej kolejności przetwarzane z protokołu wewnętrznego na NMEA 0183, a następnie rozdzielane na wszystkie urządzenia wymagające ich do poprawnego działania. Do tych urządzeń należą:

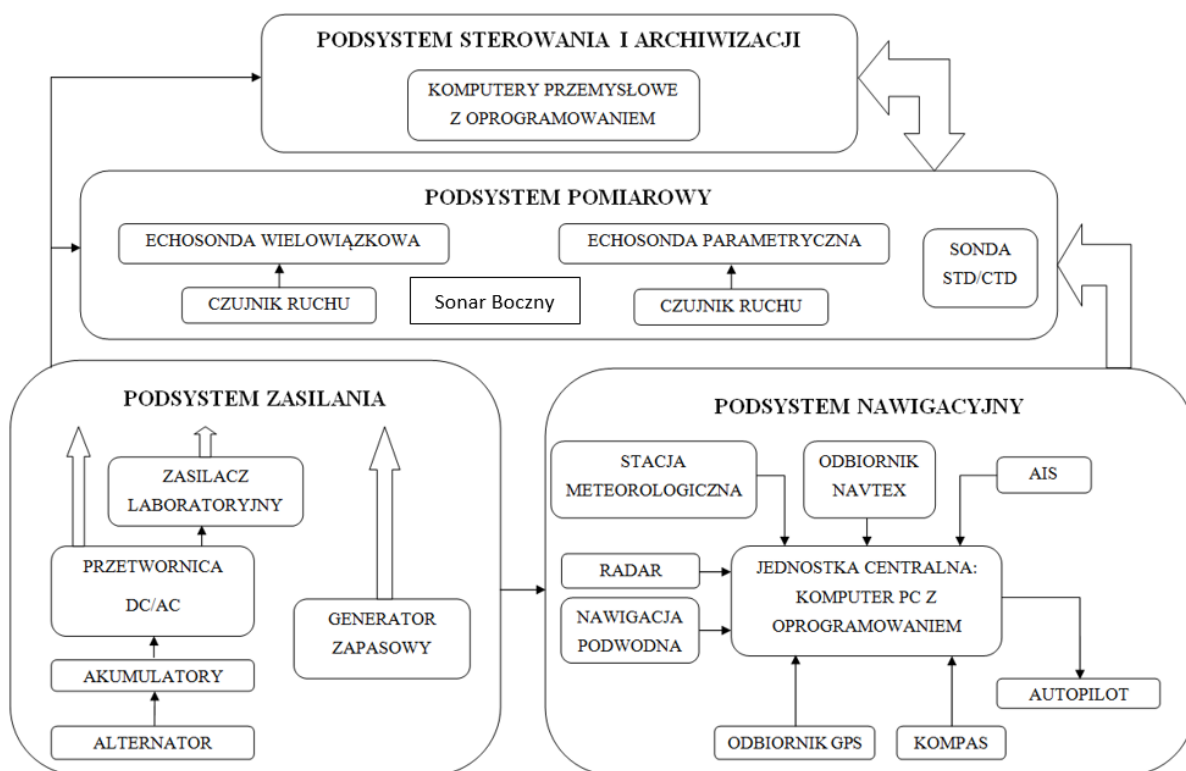
- echosonda parametryczna,
- echosonda wielowiązkowa,
- referencyjne czujniki ruchu,
- ploter z mapą w części nawigacyjnej,
- autopilot.



Rysunek 5-67 Antena SEAPATH 300 od systemu GPS (górny obraz) oraz wyświetlacz z oprogramowaniem nawigacyjnym – echosonda 50/200kHz, radar, AIS, mapa nawigacyjna (dolny obraz)

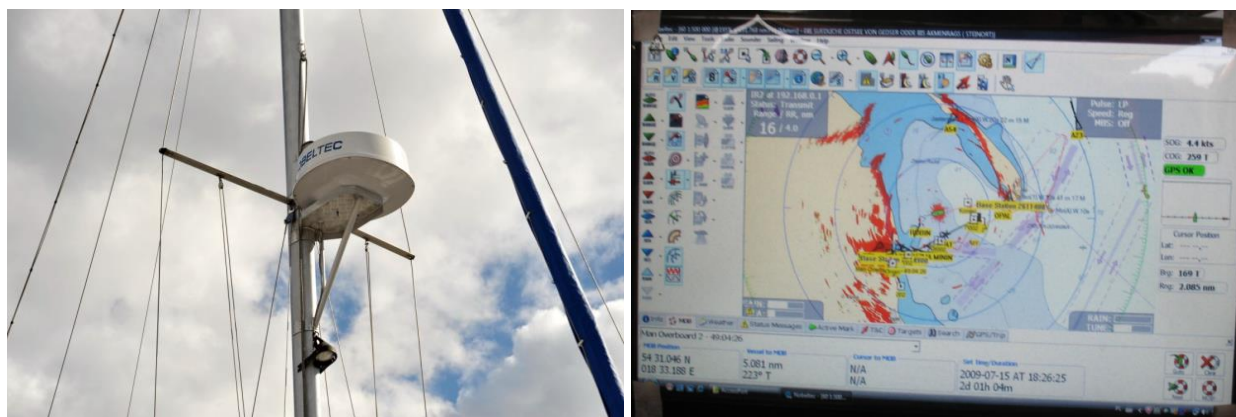
Nie należy zapominać o poprawnym wprowadzeniu położenia anteny odbiornika GPS względem urządzeń hydrolokacyjnych, tak by pozycja rzeczywistych sondży była określona stosunkowo dokładnie. Przy odległości rzędu kilku metrów błąd byłby znaczący, porównywalny do błędu określania pozycji.





Rysunek 5-68 Schemat blokowy kompletnego systemu pomiarowego, na który składały się echosonda parametryczna, echosonda wielowiązkowa, sonar boczny oraz urządzenia peryferyjne

Kolejnym modulem jest kompas umieszczony w możliwie dalekim miejscu od potencjalnych źródeł zaburzeń pola magnetycznego. Sygnał z niego również jest rozdzielany pomiędzy część urządzeń, służy on jako moduł zapasowy. Dane z kompasu są ważne nie tylko dla wymienionych wcześniej urządzeń, ale również dla radaru ze względu na zorientowanie odbieranych ech na mapie względem północy.



Rysunek 5-69 Radar dalekiego zasięgu oraz jego zobrazowanie w oprogramowaniu nawigacyjnym

Moduł autopilota ułatwiał poruszanie się jednostką po wyznaczonych trajektoriach z bardzo małą odchyłką pozycji i kursu. Ręczne prowadzenie jednostki nie jest tak precyzyjne ze względu na wiele czynników zewnętrznych wpływających w danym momencie na jej ruch. Autopilot pracował w dwóch trybach. Pierwszym z nich było sprzężenie z oprogramowaniem nawigacyjnym. W takiej konfiguracji otrzymywał w sposób ciągły sekwencje zapisane w protokole NMEA informujące o współrzędnych geograficznych do jakich należy się kierować. Drugim trybem była praca z wyłączeniem mapy – tryb automatyczny utrzymujący zadany kurs.

Pozostałe wymienione urządzenia, tj. radar, stacja meteorologiczna, Navtex oraz AIS służyły jako komplementarne moduły do bezpiecznego prowadzenia jednostki, zważywszy na możliwość dużej dynamiki zmian pogody jako cechę charakterystyczną naszej strefy klimatycznej oraz na poruszające się mniejsze i większe jednostki pływające w sąsiedztwie prowadzonych badań, które stanowiły pewne ryzyko podczas prac w warunkach naturalnych.



Rysunek 5-70 Zobrazowanie mapy pogodowej odebranej przy użyciu anteny NOAA

5.3.3 Opis podsystemu zasilania

Blok zasilania został podzielony na kilka części w zależności od wymogów urządzeń. Na jednostce pomiarowej część modułów jest zasilana napięciem 12 VDC, część 24 VDC a pozostałe 230 VAC. Aby sprostać tym za potrzebom na różne rodzaje źródła zasilania, należało skorzystać z odpowiednich urządzeń przetwarzających. Najprostszym zestawem modułów pod względem zasilania był ten, który wymagał 12 VDC. Źródłem energii były akumulatory, które regularnie doładowywano przez alternator znajdujący się na jednostce napędowej. Do zasilania bazującego na napięciu 230 VAC stosowano przetwornicę DC/AC o dużej sprawności, która umożliwiała dostarczenie energii dla obciążenia do 1500 W mocy ciągłej. Suma mocy tych urządzeń w praktyce nie przewyższała wartości 600 W, co dawało dość duży zapas ze strony przetwornicy.



Rysunek 5-71 Uchwyt echosondy wielowiązkowej (po lewej stronie), agregat zainstalowany na dziobie jednostki pomiarowej (po prawej stronie)

Kolejna grupa urządzeń wymagała zasilania napięciem 24 VDC, które można było uzyskać w dwojaki sposób: dzięki zastosowaniu przetwornicy DC/DC lub wykorzystaniu regulowanego zasilacza na napięciu przemiennie. Pierwszy sposób jest efektywniejszy, jednak fakt posiadania laboratoryjnego zasilacza spowodował, że zastosowano drugą opcję.

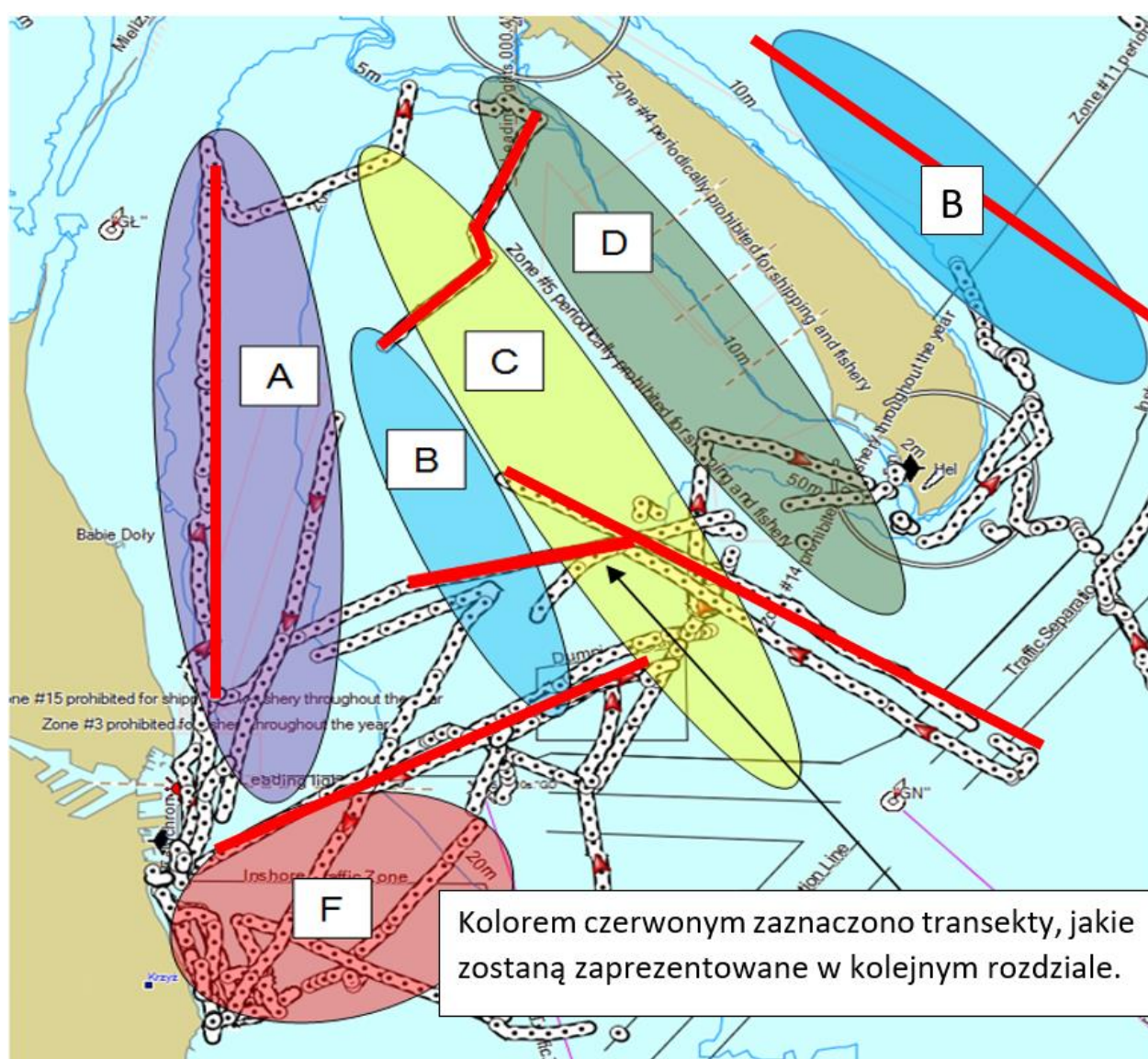
Mimo iż prawdopodobieństwo awarii zasilania było niewielkie, zainstalowano źródło zasilania awaryjnego, jakim był spalinowy agregat prądowórczy. Instalacja elektryczna zastosowana tylko do zasilania aparatury była tak przygotowana, aby przy ewentualnej awarii głównego źródła można było w sposób błyskawiczny zmienić źródło na awaryjne. Niestety wiązałyby się to z chwilowym kilkudziesięciosekundowym brakiem energii. Agregat posiadał duży

zapas mocy (3,5 kW) i wystarczająco duży zbiornik na paliwo, dzięki temu w sposób ciągły pracował nawet do 10 godzin.

Tak wyposażony podsystem zasilania sprawdził się w wielu próbach morskich. Często też badania wykonywano, korzystając jedynie ze źródła w postaci agregatu prądotwórczego. Ewentualne przejście z tego źródła na podstawowe nie wymagało dużego nakładu pracy, natomiast wiązało się z restartem wszystkich urządzeń zasilanych z 24VDC oraz 230 VAC.

6 Prezentacja wyników badań – analiza i interpretacja

Wynikiem badań przeprowadzonych na akwenie Zatoki Gdańskiej jest mapa zaprezentowana na Rysunku 6-1, na której pokazano klasyfikację osadów dennych Zatoki Gdańskiej na podstawie analizy charakteru pozyskiwanych wyników przy użyciu sondowania echosonda parametryczną, echosonda wielowiązkową oraz sonarem bocznym. Dane o klasyfikacji dna w zaznaczonych obszarach, wiążą zarówno informacje o wierzchniej warstwie osadu dennego, jak i zróżnicowaniu struktury geologicznej [54–59].



Rysunek 6-1 Mapa podziału Zatoki Gdańskiej na pięć charakterystycznych obszarów

Zaprezentowane strefy zostały opisane w Tabeli 6-1.

Tabela 6-1 Wyróżnione obszary Zatoki Gdańskiej o różnym typie osadu powierzchniowego

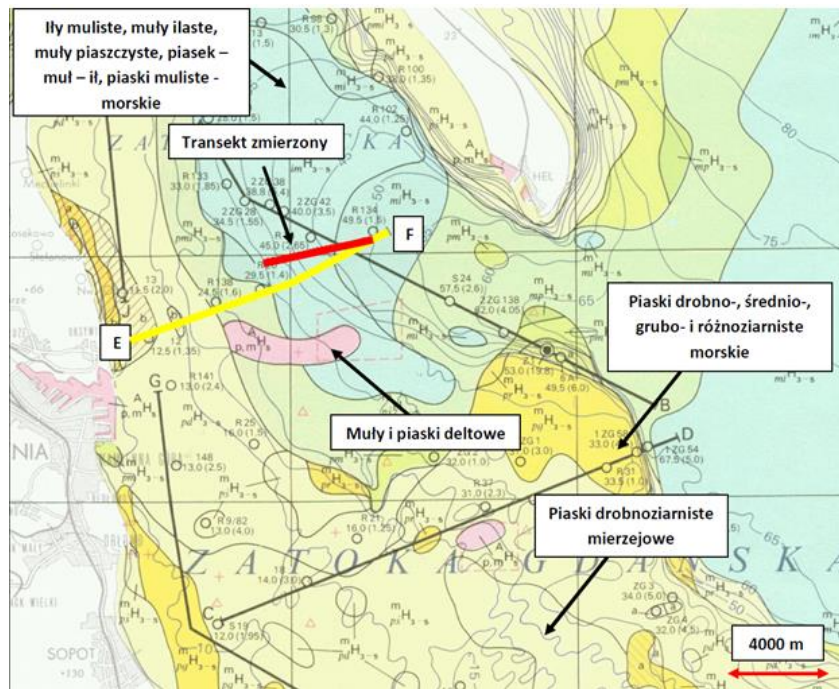
| | |
|---|--|
| A | Obszar „górzyste dno” |
| B | Obszar charakteryzujący się głębokością penetracji do 5 metrów |
| C | Obszar charakteryzujący się głębokością penetracji do 30 metrów |
| D | Obszar charakteryzujący się silnym odbiciem od dna – brak penetracji dna |
| F | Obszar ze zmieniającą się głębokością penetracji od 2 do 10 metrów |

W podrozdziale 6.1 zostaną zaprezentowane echogramy opracowane na bazie wyników od echosondy parametrycznej o długości sondażu do około 13000 m. W niektórych przypadkach zostaną one porównane z mapami geologicznymi dna Bałtyku opracowanymi przez Państwowy Instytut Geologiczny.

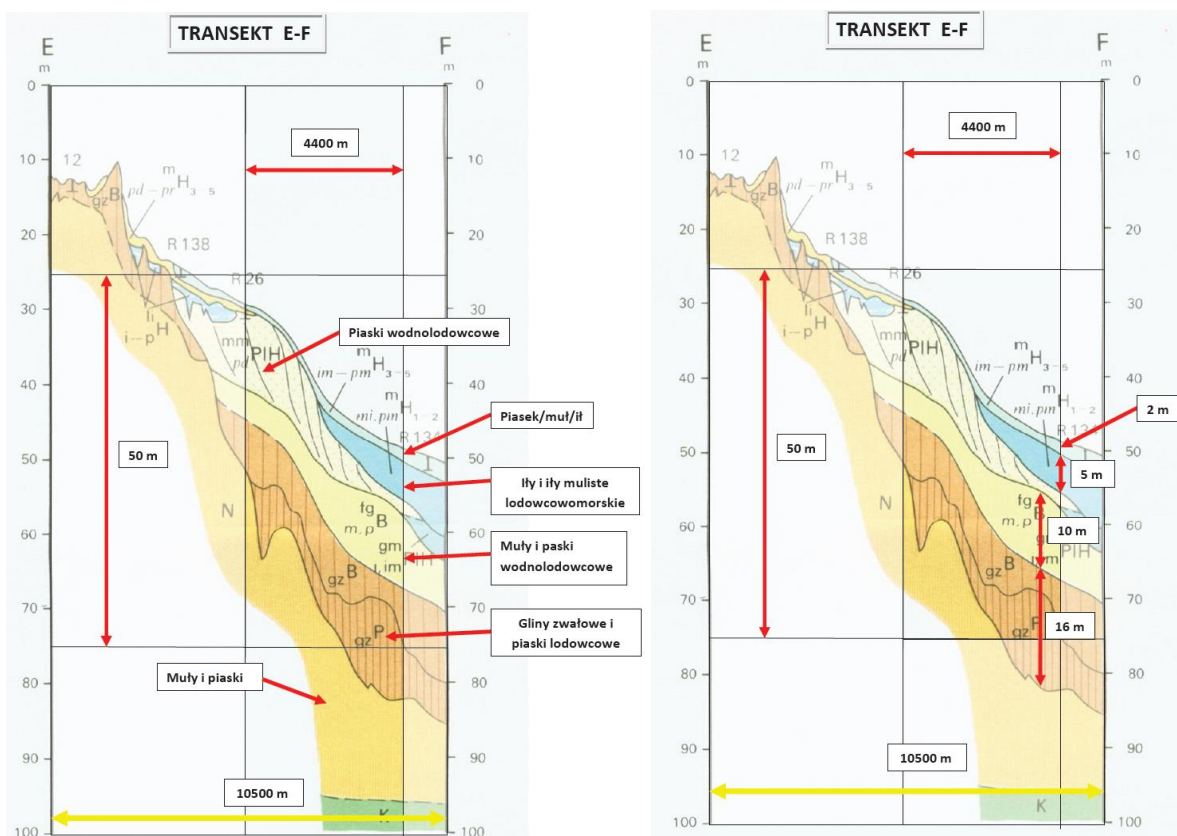
6.1 Odwzorowanie górnej warstwy osadów dennych

Echosonda parametryczna jest urządzeniem umożliwiającym uzyskanie obrazów górnej warstwy osadów. W celu oceny poprawności tego odwzorowania wykonano badanie polegające na wykonaniu pomiaru wzdłuż transektów, dla których Państwowy Instytut Geologiczny opublikował dane w postaci map geologicznych struktury osadów dennych służących w niniejszym rozdziale do porównania z wynikami od echosondy parametrycznej (por. Rysunek 6-3 oraz 6-6). W wybranych przypadkach poszczególne echogramy zostaną zaprezentowane w różnych zobrazowaniach kolorystycznych – pozwala to na zaprezentowanie pewnych charakterystycznych cech, uwypuklanych na zobrazowaniu w różnych odcieniach kolorystycznych.

Na mapie (Rysunek 6-2) żółtą linią zaznaczono transekt EF, którego strukturę geologiczną pokazano na Rysunku 6-3. Natomiast linią czerwoną zaznaczono trasę, dla wzdłuż której wykonano sondowanie.

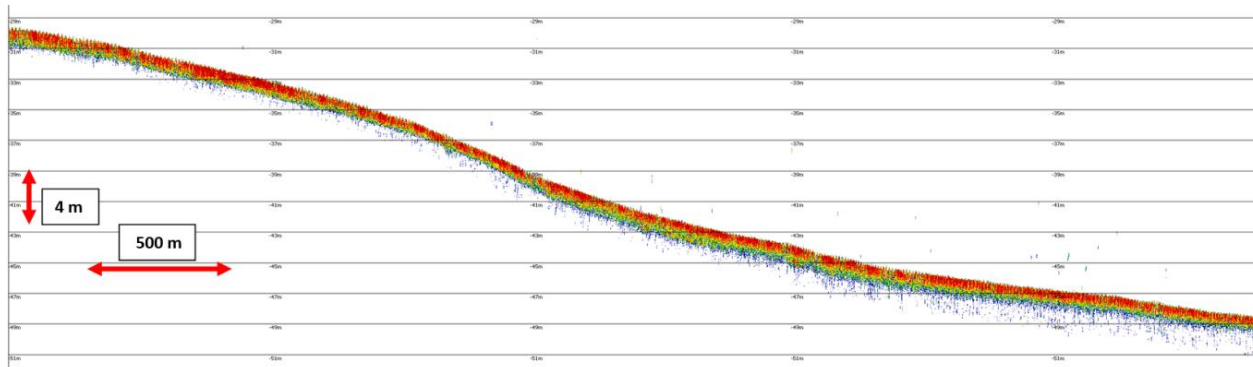


Rysunek 6-2 Mapa geologiczna Zatoki Gdańskiej z zaznaczonym transektem EF (żółta linia) oraz śladem GPS wzdłuż którego wykonano sondowanie.

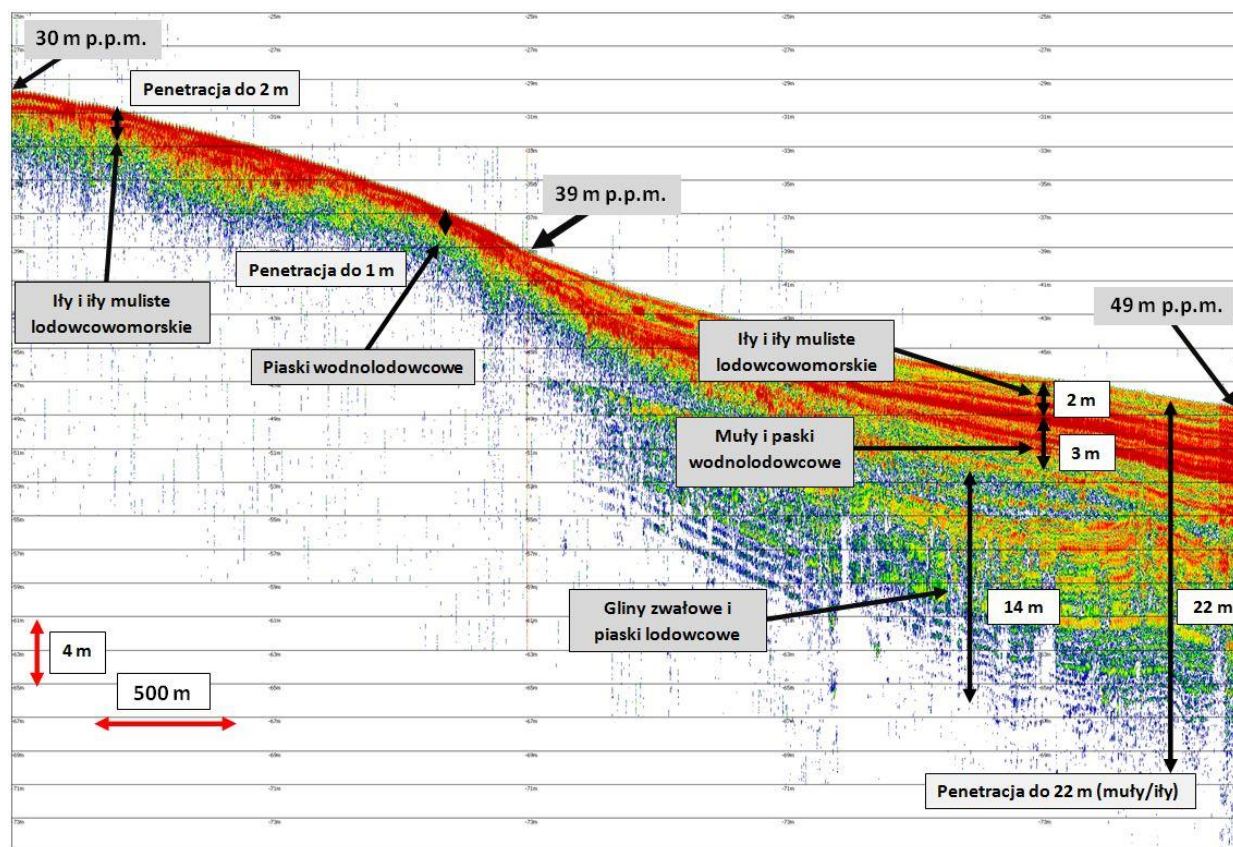


Rysunek 6-3 Przekroje geologiczne otrzymane na podstawie pobranych rdzeni – zaznaczony fragment został użyty do porównania (opracowanie Państwowy Instytut Geologiczny)

Zobrazowanie będące wynikiem sondowania impulsami fali pierwotnej o częstotliwości (100 kHz) daje typową informację batymetryczną (Rysunek 6-4). Sondowanie impulsami małej częstotliwości (fala różnicy częstotliwości – 8 kHz) umożliwia zobrazowanie struktury osadów dennych zalegających pod dnem (Rysunek 6-5). Porównanie echogramu z danymi Państwowego Instytutu Geologicznego wskazuje duże podobieństwo obrazów oraz wysokie podobieństwo w rozróżnianiu kolejnych zalegających warstw osadów.



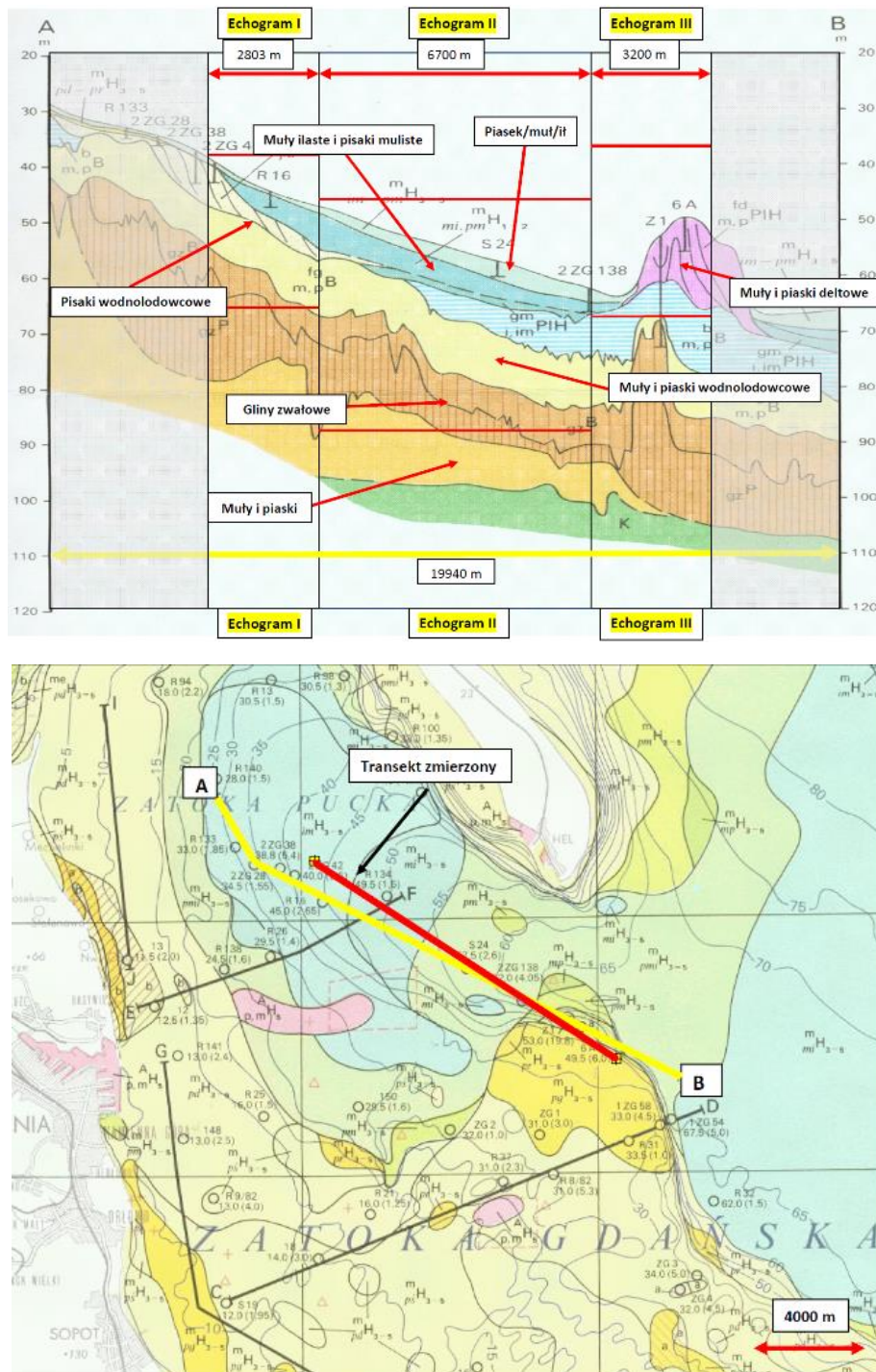
Rysunek 6-4 Zobrazowanie dna na podstawie impulsów wielkiej częstotliwości 100 kHz



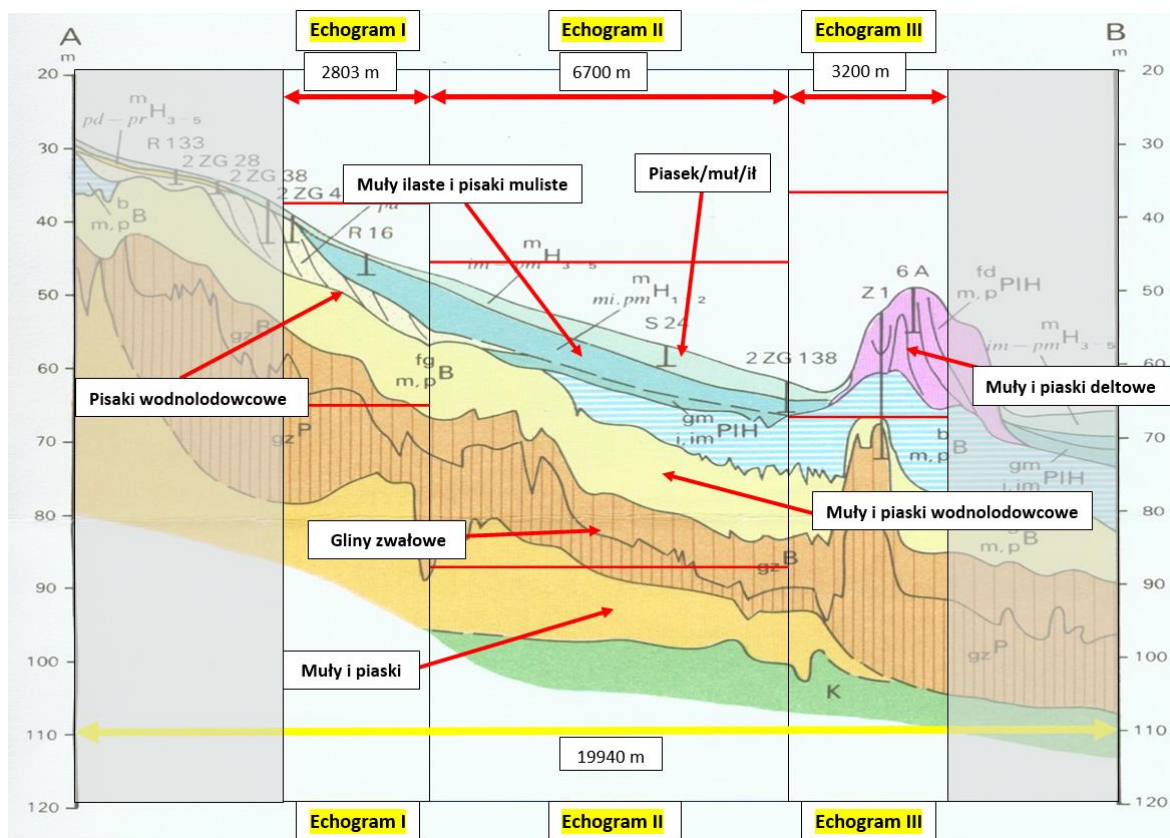
Rysunek 6-5 Zobrazowanie tego samego wycinka dna, jak na Rysunku 6-4 na podstawie impulsów małej częstotliwości – 8 kHz.

Prezentowany kolejny przypadek przedstawia wynik sondowania wzdłuż transektu zaznaczonego czerwoną linią w przybliżeniu odpowiadającemu transektowi A-B na Rysunku 6-6,

którego długość wynosi dwanaście tysięcy siedemset metrów. Podobnie jak poprzedni echogram, przedstawia on obrazy struktury dna wyznaczone metoda akustyczną wzdłuż transektu, dla którego istniała możliwość porównania z danymi geologicznymi. Ze względu na jego długość został podzielony na trzy fragmenty Rysunek 6-7. Na Rysunkach 6-8, 6-9 i 6-10 przedstawiono wyniki sondażu impulsami małej częstotliwości – 8 kHz 2 impulsy.

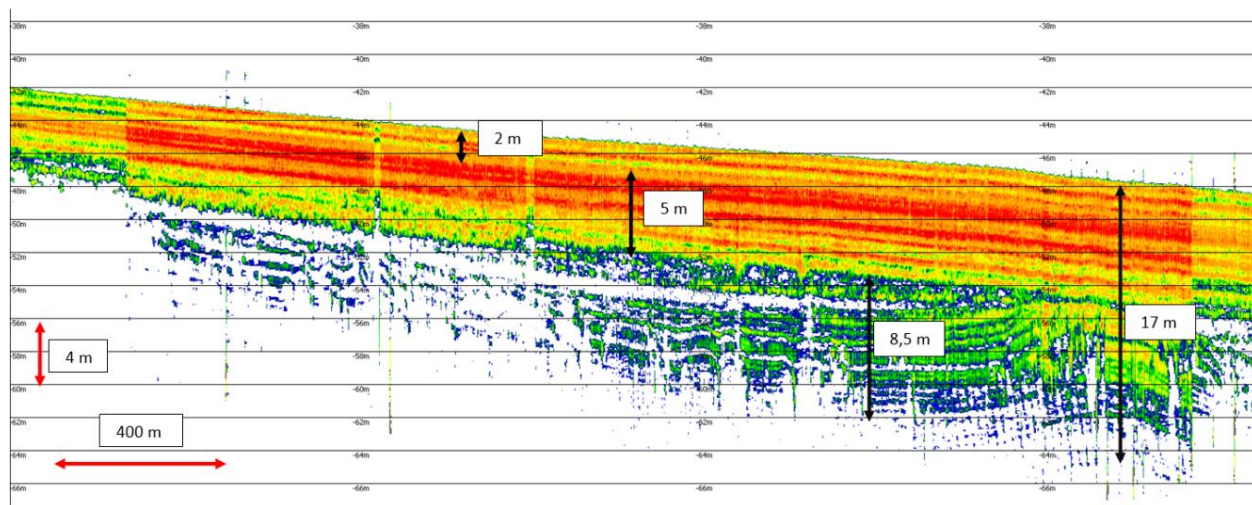


Rysunek 6-6 Mapa struktury geologicznej (górny wykres) oraz mapa z zaznaczonym prezentowanym transektem (kolorem czerwonym zaznaczony ślad GPS wzdłuż którego wykonano sondaż) (dolny wykres)

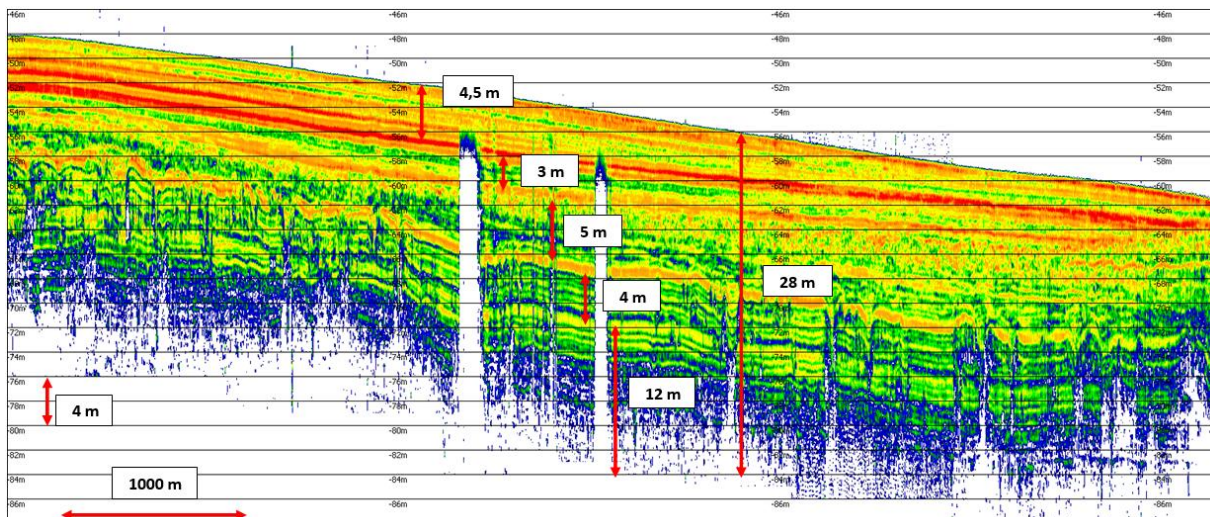


Rysunek 6-7 Struktura geologiczna z zaznaczonymi warstwami osadów – podział na trzy echogramy, które zostaną zaprezentowane kolejno na Rysunku 6-8/6-9/6-10

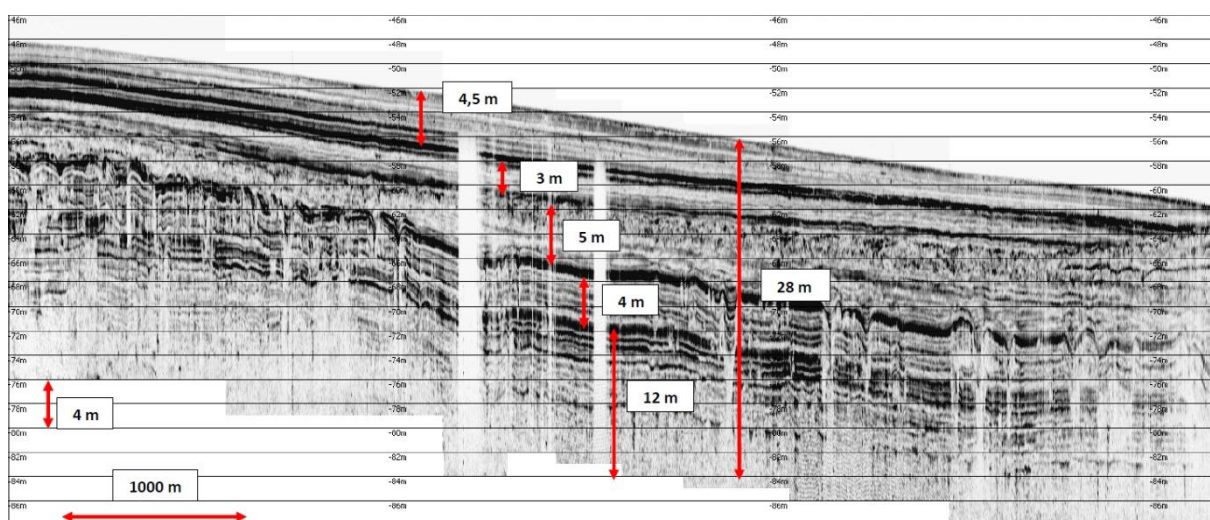
Sondaż został rozpoczęty na akwenu Zatoki Puckiej, gdzie charakter osadów umożliwiała penetrację do maksymalnie 5 metrów. W dalszej części echogramu pojawiają się echa od głębszych warstw do głębokości około 17 metrów (rysunek 6-8). Na obszarze, który obrazuje echogram II widać strukturę osadów przy maksymalnej penetracji do 28 metrów.



Rysunek 6-8 Zobrazowanie zaznaczonego fragmentu echogramu I impulsami małej częstotliwości



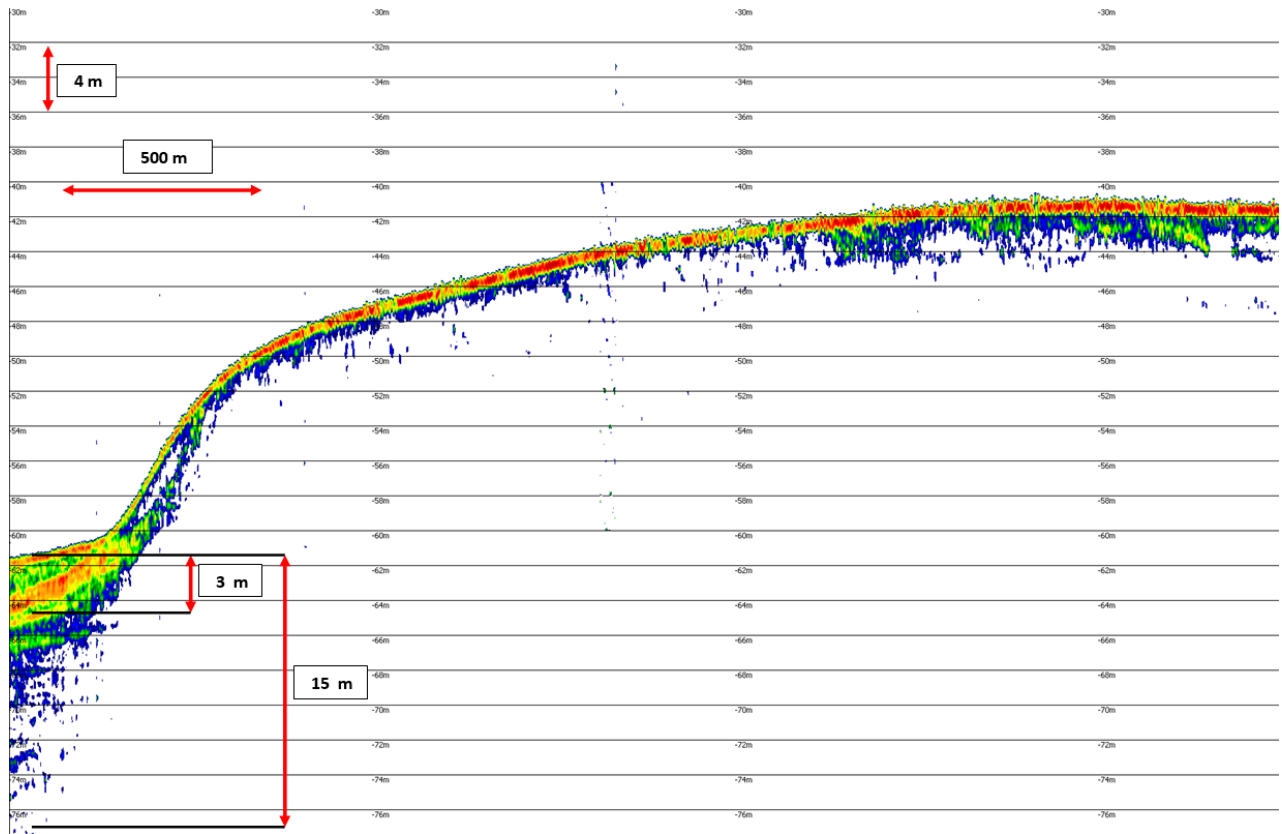
Rysunek 6-9 Zobrazowanie zaznaczonego fragmentu echogramu II impulsami małej częstotliwości



Rysunek 6-10 Zobrazowanie zaznaczonego fragmentu echogramu II impulsami małej częstotliwości – monochromatyczna mapa kolorów

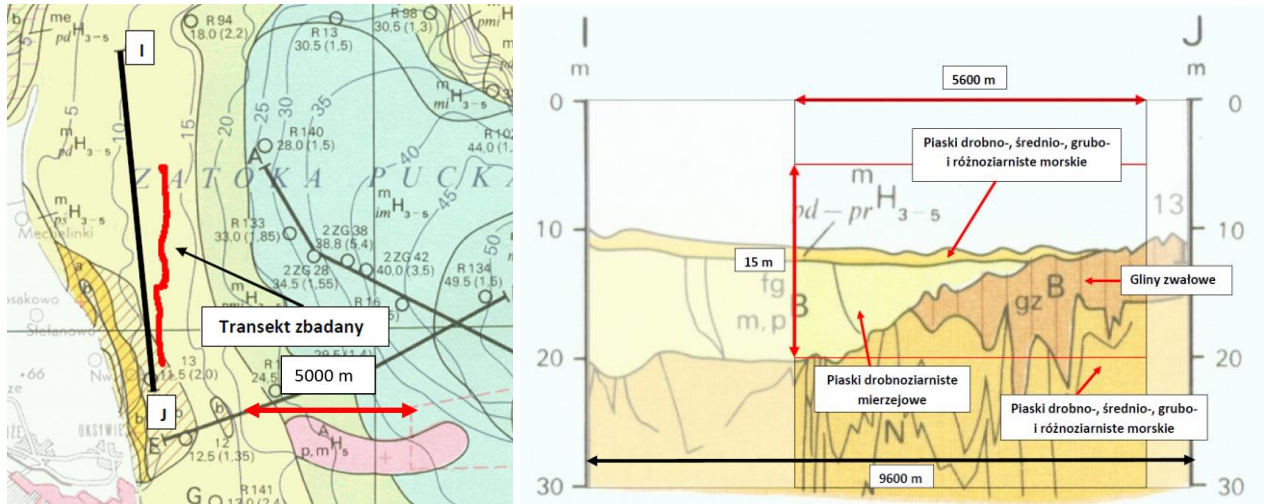
Na echogramie II dodatkowo widać dwa charakterystyczne obszary z cieniami akustycznymi. Są to miejsca, w których prawdopodobnie występują osady z pęcherzykami gazowymi (dokładnie zjawisko to zostało opisane w podrozdziale 6.2). W końcowej części transektu, w jego południowo – wschodniej części (echogram III) penetracja osadów jest znacznie mniejsza, a w momencie, kiedy ma miejsce nagłe zmniejszenie głębokości widać jedynie wyraźne echo od jednorodnej piaszczystej warstwy odpowiadające typowemu zobrazowaniu batymetrycznemu impulsami wielkiej częstotliwości. Podany przykład prezentuje wyniki sondu centralnej części Zatoki Puckiej oraz fragmentu Zatoki Gdańskiej, w której zagłębieniu, ze względu na działanie prądów morskich, zebrał się zestaw osadów dennych o małej impedancji akustycznej

umożliwiającej penetrację licznych warstw geologicznych. Dany przypadek prezentuje wyjątkowo skomplikowaną strukturę do zamodelowania ze względu na liczne odbicia między warstwami oraz brak możliwości zweryfikowania właściwości geoakustycznych głębiej położonych warstw.

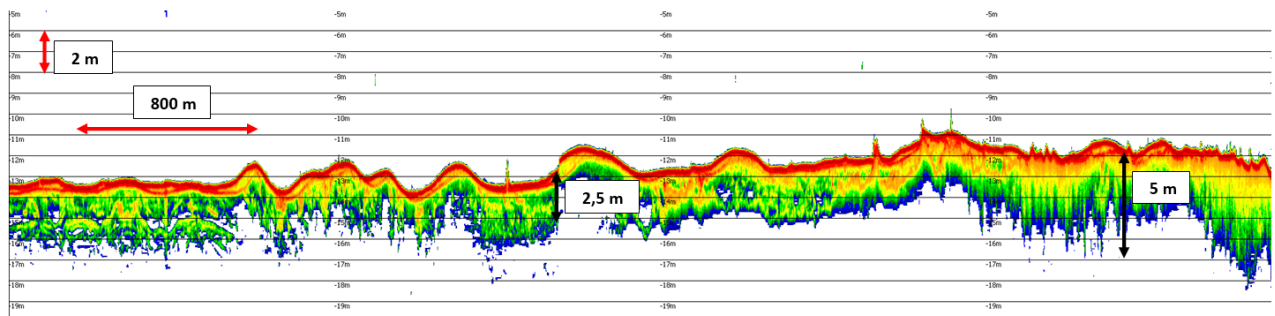


Rysunek 6-11 Zobrazowanie zaznaczonego fragmentu echogramu III impulsami małej częstotliwości

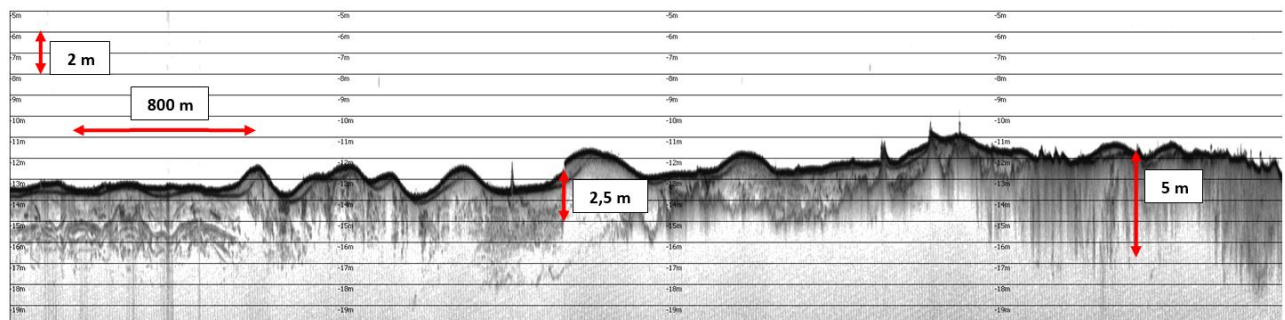
Trzecim, przypadkiem obrazującym wynik sondażu porównany z mapą geologiczną struktury osadów dennych, jest echogram, który powstał na trasie zaznaczonej na Rysunku 6-12 kolorem czerwonym. Obszar charakteryzuje się piaszczystym dnem, pod którym można zaobserwować tzw. górzystą strukturę dochodzącą do wierzchniej warstwy osadów.



Rysunek 6-12 Mapa z zaznaczonym transektem oraz struktura geologiczna osadów

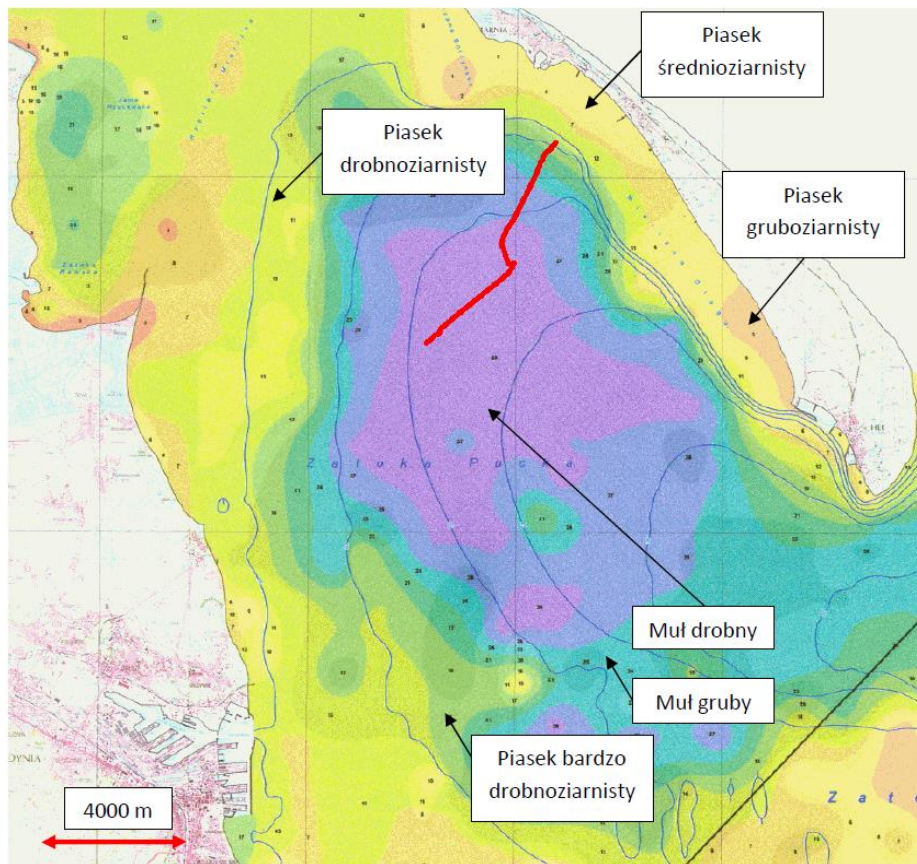


Rysunek 6-13 Zobrazowanie sondowanego akwenu impulsami małej częstotliwości 6 kHz

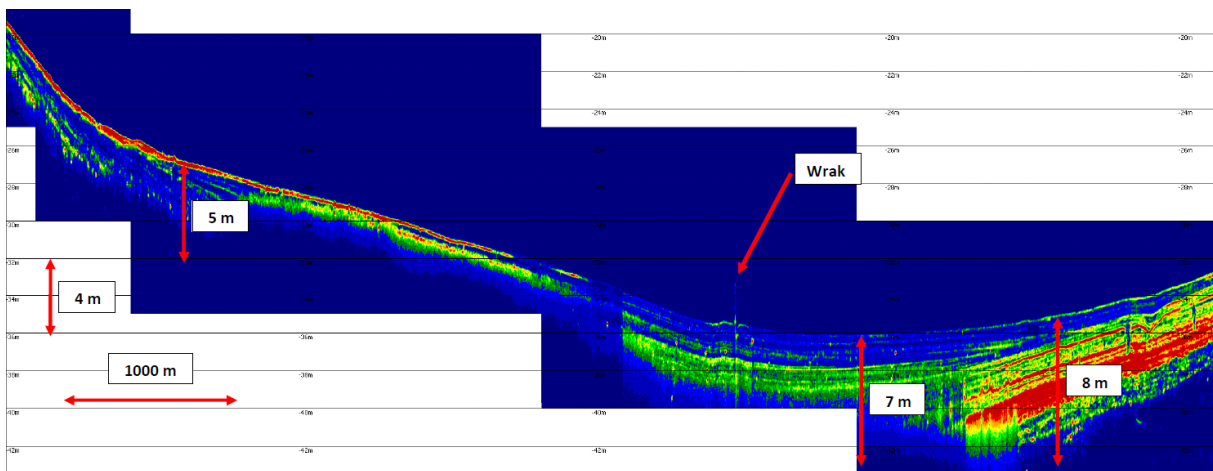


Rysunek 6-14 Zobrazowanie sondowanego akwenu impulsami małej częstotliwości 6 kHz – zobrazowanie monochromatyczne

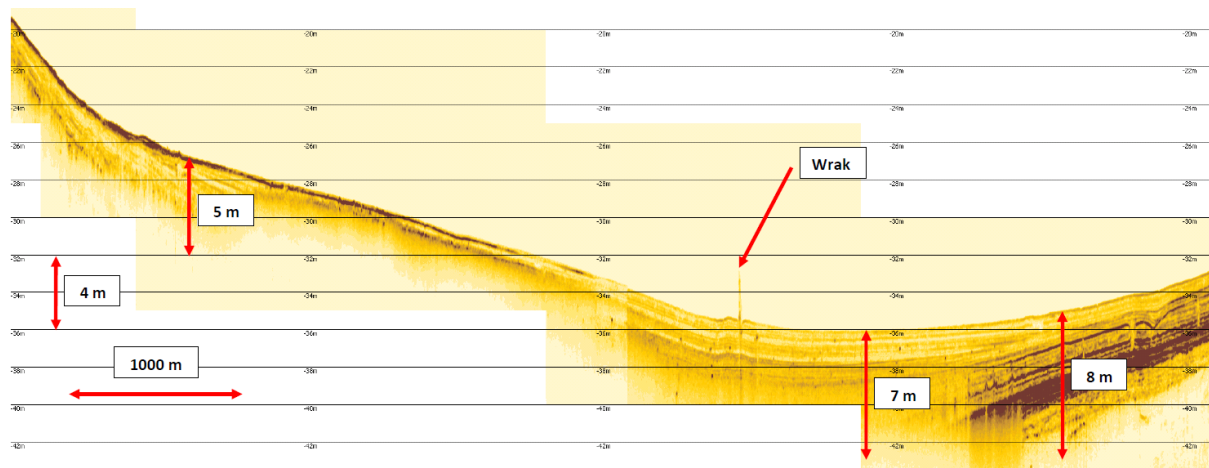
Kolejny wynik prezentuje sondaż wykonany na kursie 028–040 stopni (czerwona linia na rysunku 6-15) z uwidocznionym wrakiem okrętu ORP Delfin jest interesujący ze względu na uwidocznienie na danym transekcie granic stref z charakterystycznym zacienieniem akustycznym. Dodatkowo jest to akwen poligonu testowego, na którym zlokalizowane są liczne obiekty zakopane pod dnem (dokładny opis w podrozdziale 6.6).



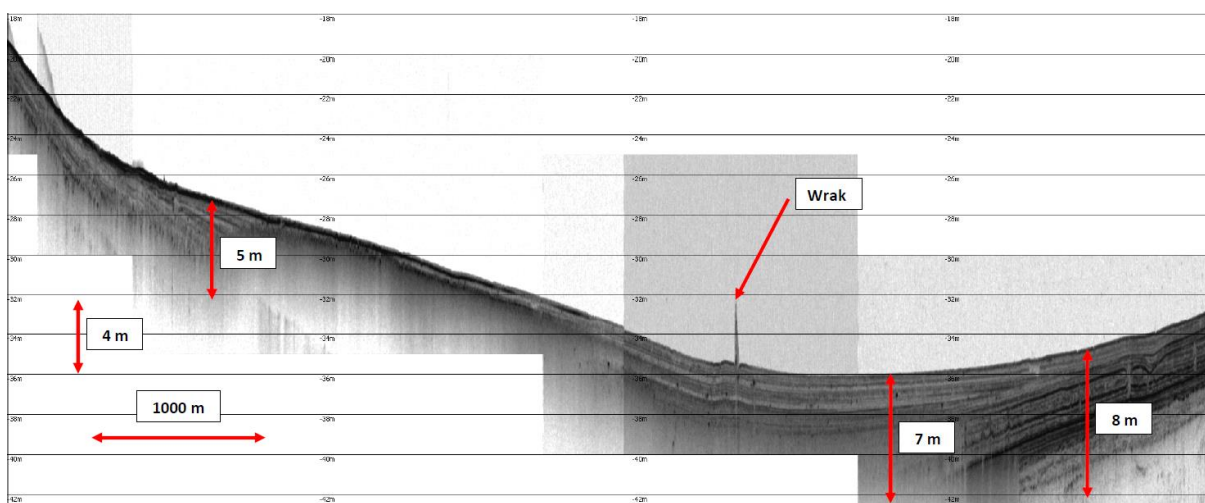
Rysunek 6-15 Mapa prezentująca transekt (czerwona linia), wzdłuż którego prowadzono badania



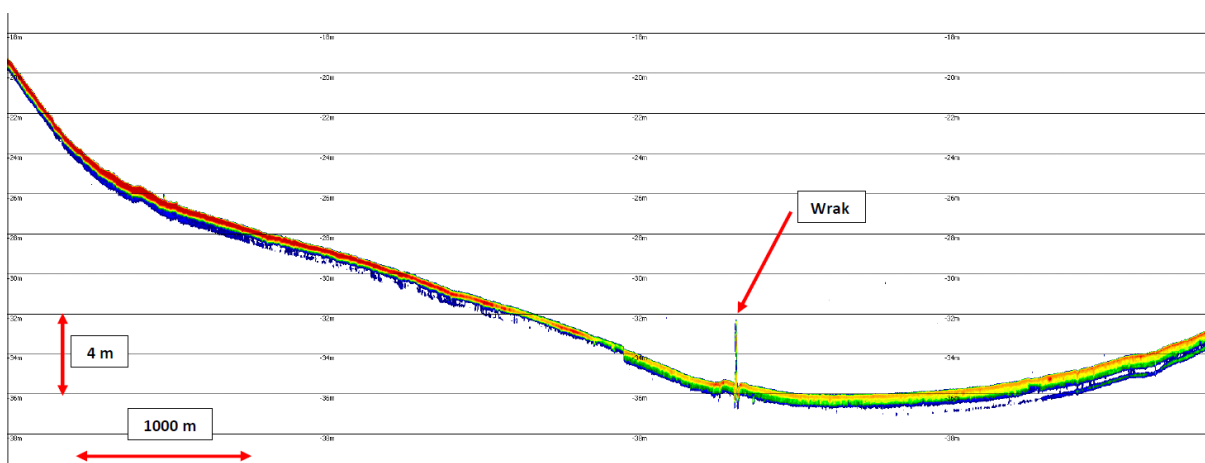
Rysunek 6-16 Wynik sondowania akwenu Zatoki Puckiej impulsami małej częstotliwości - 8 kHz



Rysunek 6-17 Wynik sondowania akwenu Zatoki Puckiej impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

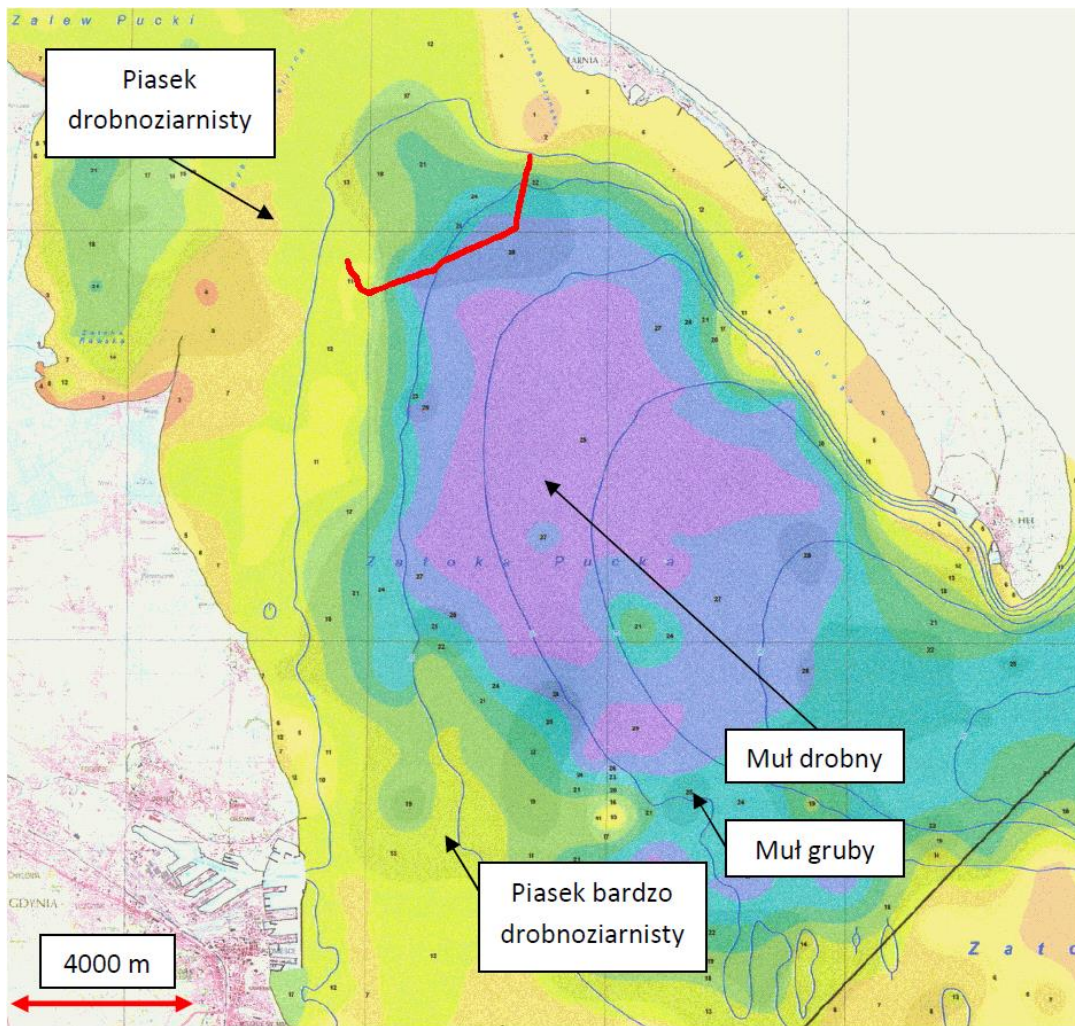


Rysunek 6-18 Wynik sondowania akwenu Zatoki Puckiej impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

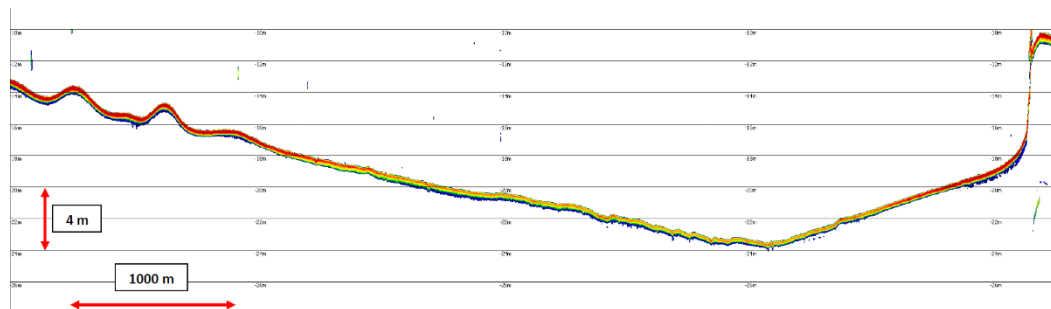


Rysunek 6-19 Wynik sondowania akwenu Zatoki Puckiej impulsami wielkiej częstotliwości – 100 kHz – pozyskanie typowej informacji batymetrycznej

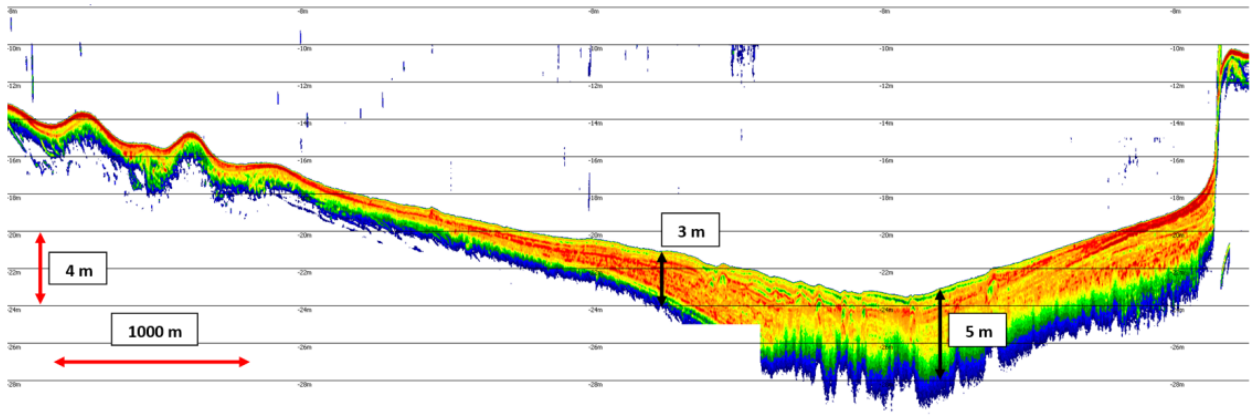
Następny prezentowany wynik to echogram z Zatoki Puckiej (rys. 6-20) prezentuje sondaż zaznaczonego na mapie transektu rozpoczynającego piaszczystym, jednorodnym dnem (piaszczysty obszar), które następnie przechodzi w mulisty akwen i ulega nagłemu wypłyceciu w pobliżu Jastarni. W punktach z najmniejszą impedancją akustyczną penetracja sięga 5 m, co jest prawdopodobnie związane z akustycznym zacienieniem od osadów z pęcherzykami gazowymi.



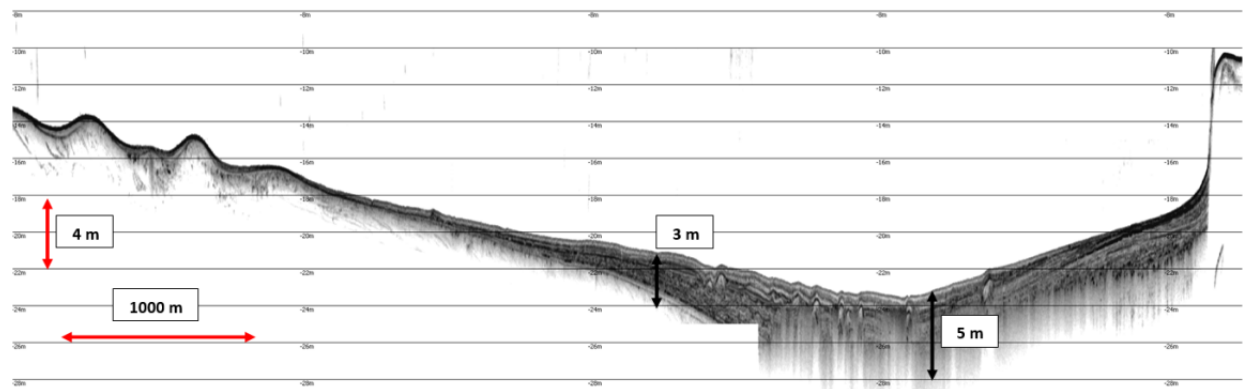
Rysunek 6-20 Mapa z zaznaczonym nadźwiękowanym transektem



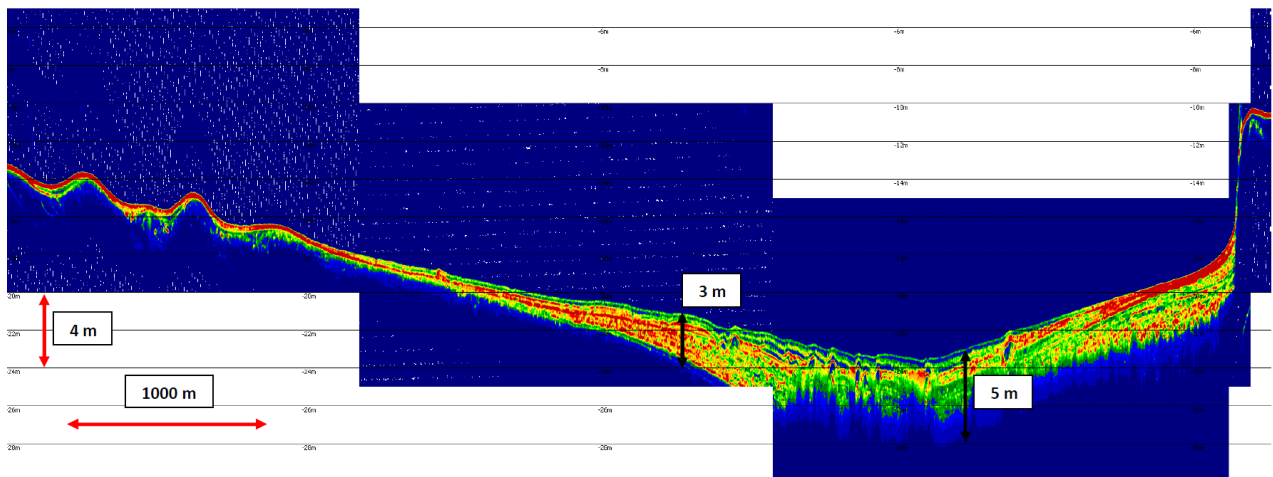
Rysunek 6-21 Wynik sondowania akwenu Zatoki Puckiej impulsami wielkiej częstotliwości – 100 kHz – pozyskanie typowej informacji batymetrycznej



Rysunek 6-22 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

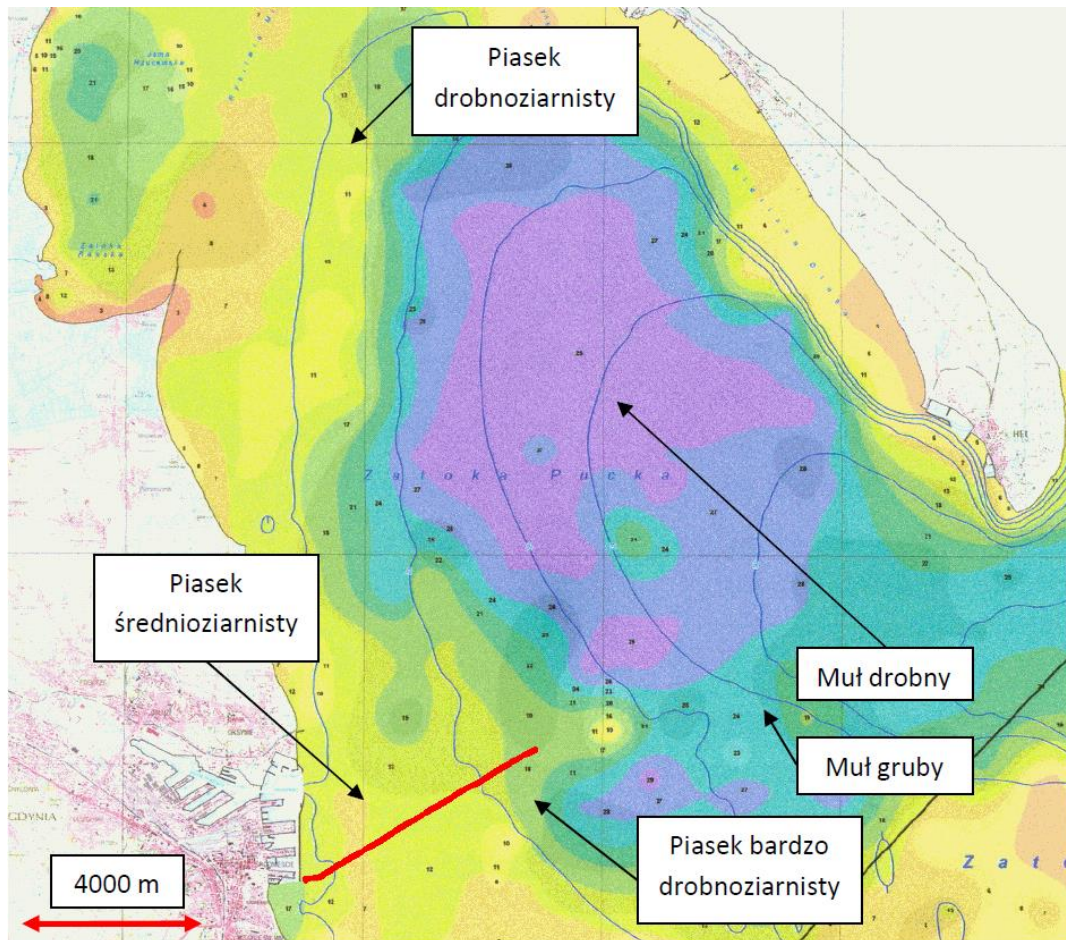


Rysunek 6-23 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

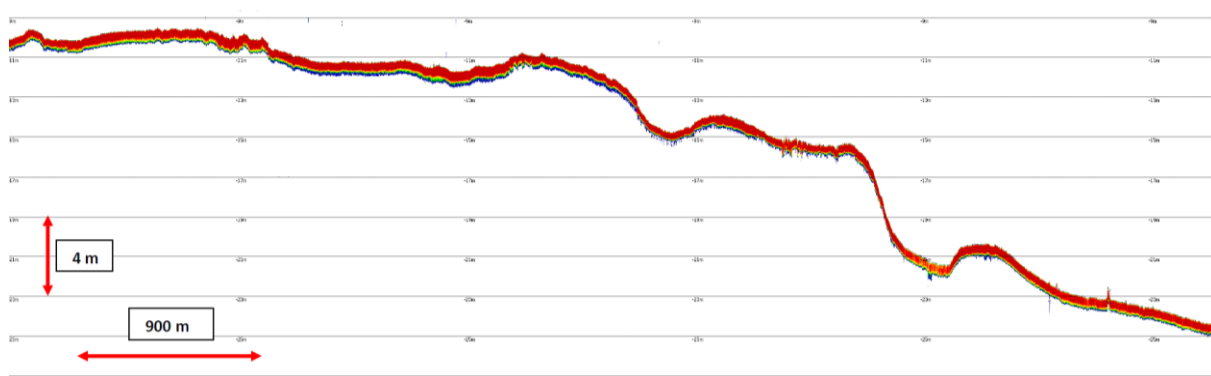


Rysunek 6-24 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

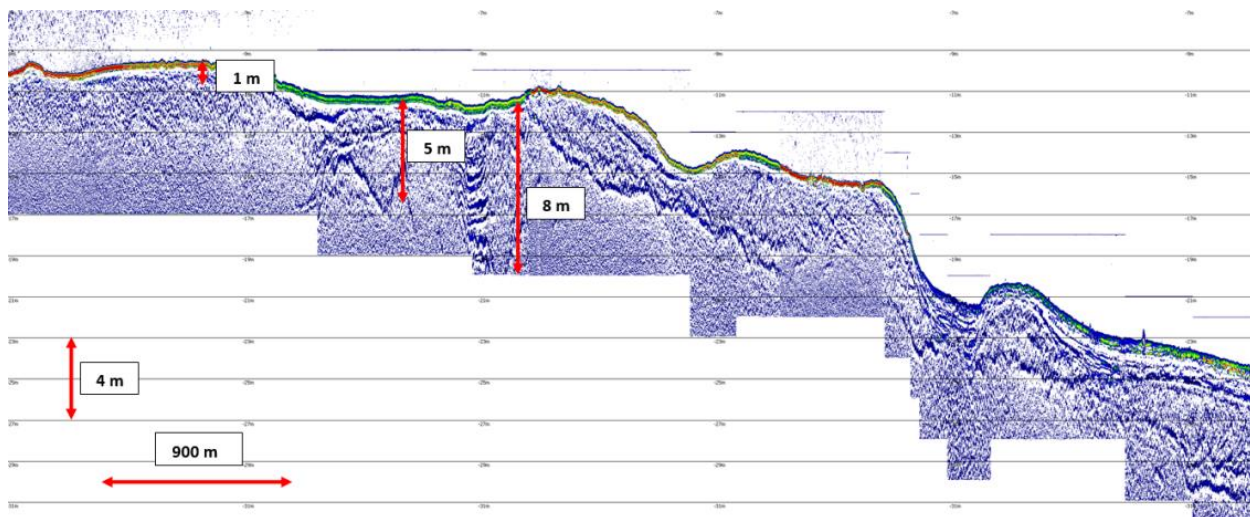
W sondażu wzdłuż trasy promu kursującego z Gdyni na Hel widać interesującą strukturę z fragmentami sięgającymi penetracji 8 m (może być to spowodowane nieaktywnymi źródłami wody) oraz lokalnie występujące nierównoległe do powierzchni dna struktury geologiczne osadów.



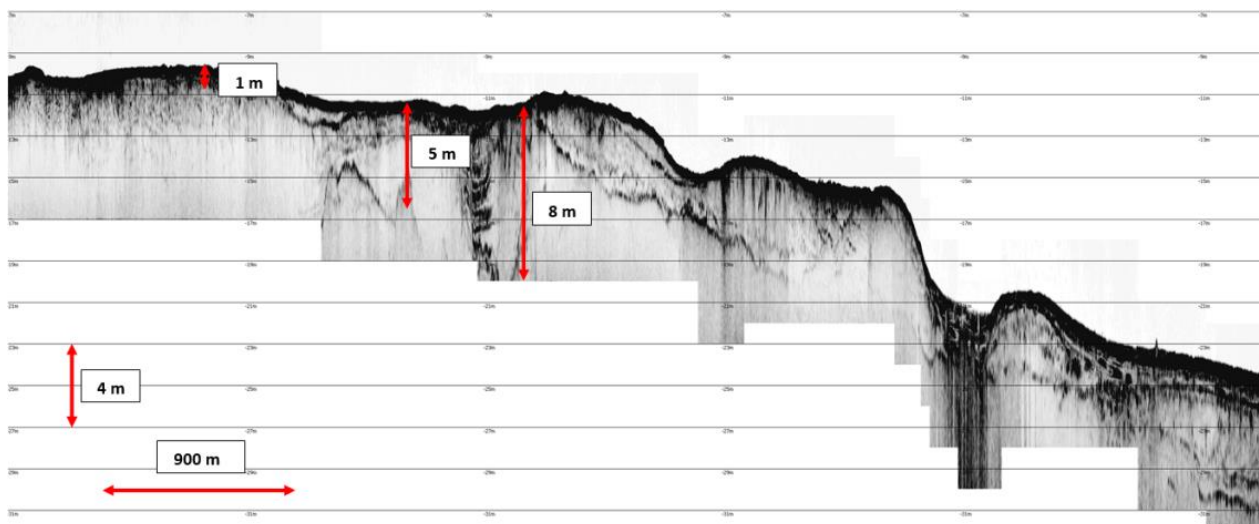
Rysunek 6-25 Mapa z zaznaczonym transektem sondażu akwenu od mariny jachtowej w Gdyni w kierunku Helu



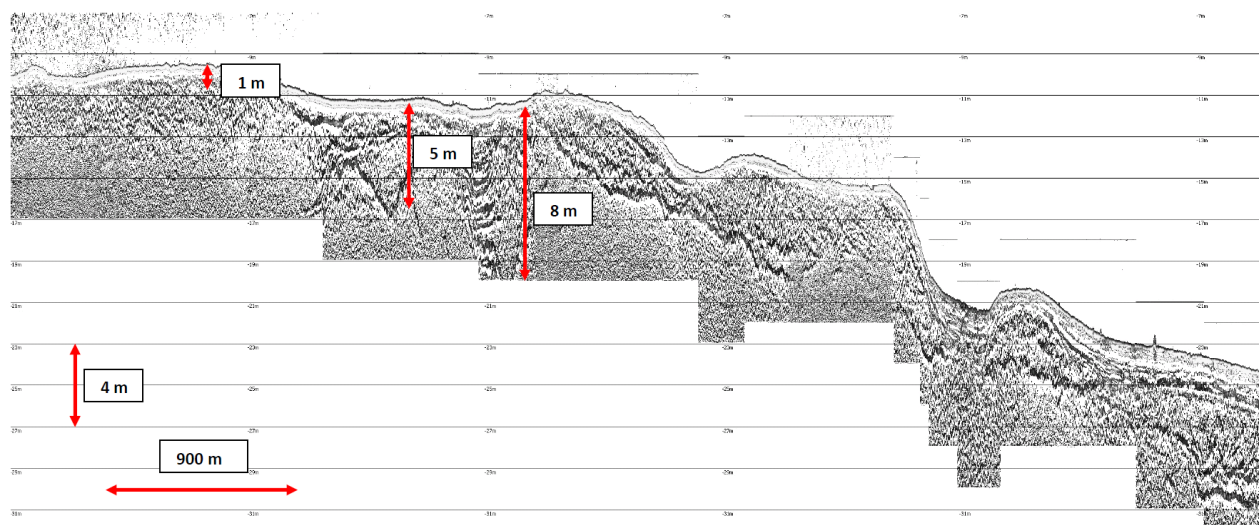
Rysunek 6-26 Wynik sondowania akwenu impulsami wielkiej częstotliwości – 100 kHz – pozyskanie typowej informacji batymetrycznej



Rysunek 6-27 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

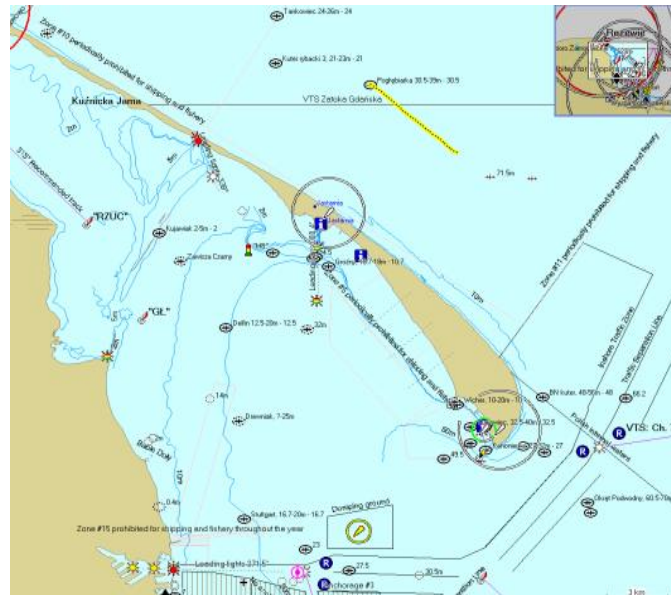


Rysunek 6-28 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

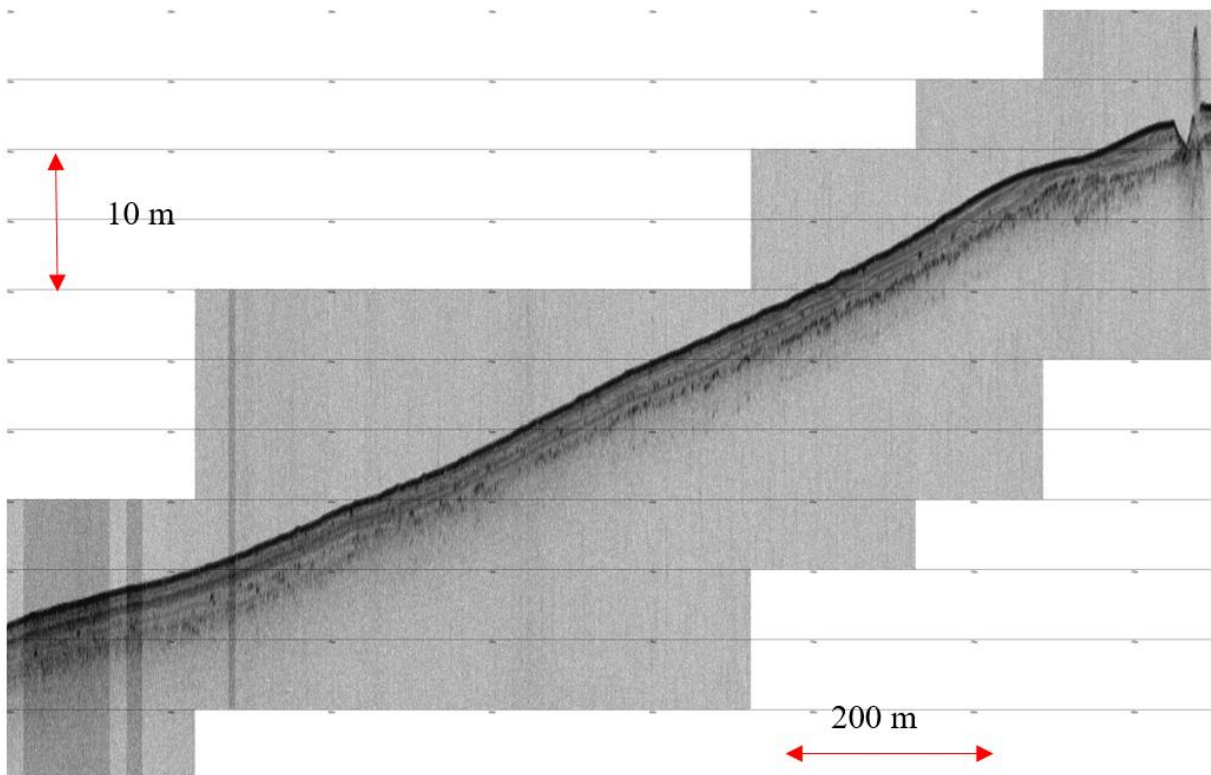


Rysunek 6-29 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 8 kHz

Ostatni prezentowany echogram zebrany z akwenu południowego Bałtyku wzdłuż śladu GPS zaznaczonego kolorem żółtym na Rysunku 6-19 rozpoczyna się na głębokości 75 metrów. W trakcie sondażu głębokość dna o homogenicznej strukturze w jednostajny sposób wzrasta. Charakterystyczny punkt na końcu obrazowania to wrak pogłębiarki, która zatonała podczas transportu.



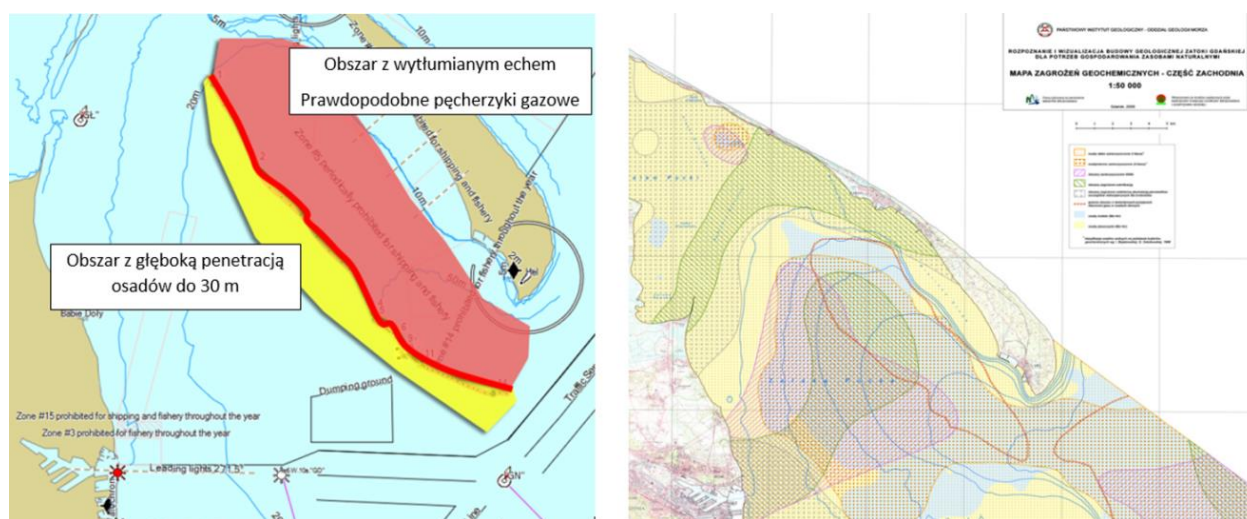
Rysunek 6-30 Mapa z zaznaczonym transektem



Rysunek 6-31 Wynik sondowania akwenu impulsami małej częstotliwości - 10 kHz

6.2 Lokalizacja zjawiska nagłej zmiany penetracji osadów dennych

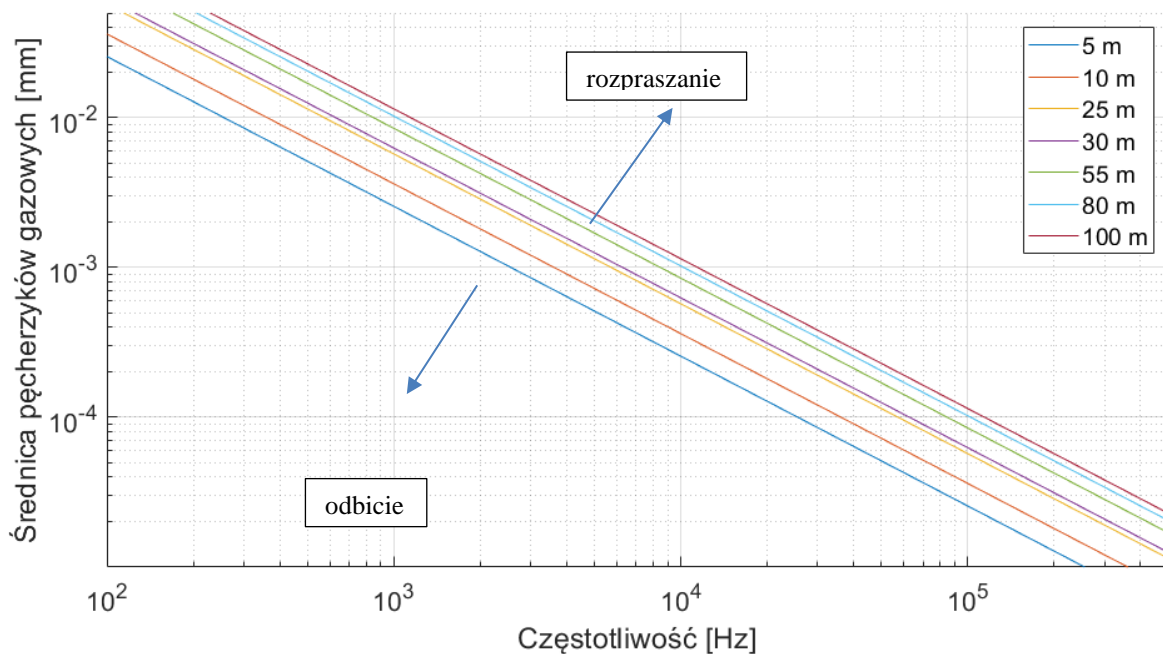
Osady dennie mogą zawierać drobne pęcherzyki gazowe. Rozpuszczony w ośrodku wodnym gaz nie ma dużego wpływu na właściwości akustyczne impulsu sondującego, natomiast pęcherzyki o średnicy 0,01 mm do 10 mm mają znaczny wpływ na prędkość dźwięku i tłumienie w osadach, co skutkuje zwiększonym współczynnikiem rozpraszania impulsów akustycznych. Pęcherzyki gazowe rozpatrywane w większości przypadków na płytkich mulistych akwenach bogatych w składniki organiczne są pęcherzykami wypełnionymi metanem [60]. Określeniem używanym do nazwania tego zjawiska w sondowanym akwenu jest między innymi akustyczne maskowanie. Wypełnienie gazem osadów na płytkich wodach zazwyczaj nie przekracza 1% objętości, natomiast wyższe wartości rzędu 6–7% występują w rejonie tzw. Pockmarków [61] (punktów, z których wydobywają się pęcherzyki) oraz nawet do 12% w przypadku zatok charakteryzujących się bardzo dużym natężeniem materiałów organicznych [62]. Koncentracja na poziomie mniejszym niż 0,01% objętości może mieć główny wpływ na właściwości fali podłużnej takie jak: prędkość, tłumienie oraz rozpraszanie [63–67]. W dokumencie przygotowanym przez Fleishera i in. [68] przedstawiono ponad sto przypadków zlokalizowania osadów wypełnionych małymi pęcherzykami gazu pomierzonych (do 2001 roku).



Rysunek 6-32 Charakterystyczny akwen z osadami wypełnionymi pęcherzykami gazowymi wyznaczony na podstawie pomiarów echosondą parametryczną (po lewej stronie); mapa z zaznaczonym obszarem gdzie występują pęcherzyki gazowe określonym na podstawie próbek pobieranych osadów (Mapa Zagrożeń Geochemicznych) (po prawej stronie)

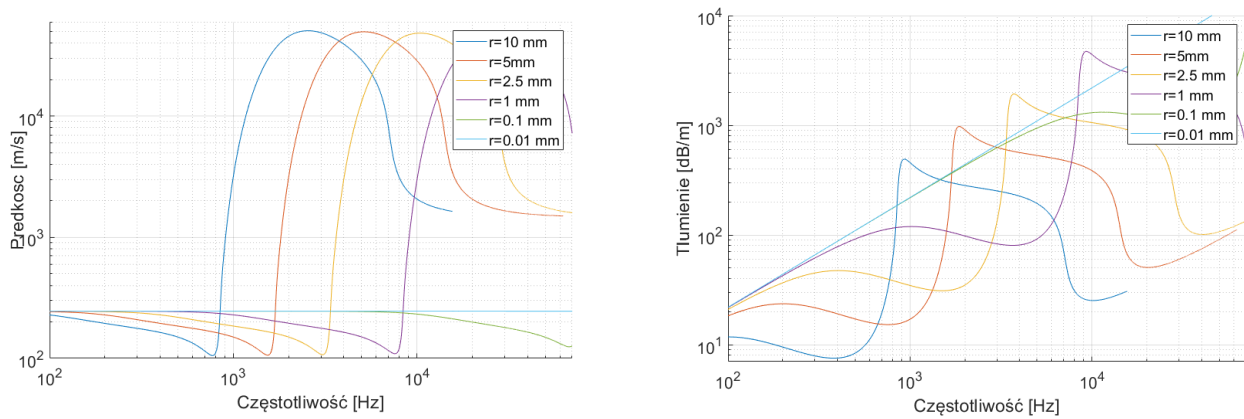
Większość analiz akustycznych związanych z danym zjawiskiem przedstawia informacje dotyczące obecności pęcherzyków, akwenu, na którym występują, głębokości, na której rozpoczyna się

rozmywanie echa impulsu akustycznego. W artykułach od 1980 roku można spotkać się z opracowaniami mającymi na celu zaprezentowanie wpływu nagromadzonych charakterystycznych osadów na częstotliwość impulsów sondujących [64–67]. Najdokładniejszą metodą na scharakteryzowanie wielkości, kształtu oraz rozmieszczenia pęcherzyków w badanej objętości osadów jest użycie radiografii bazującej na promieniowaniu X [62, 66, 69, 70]. W celu odzwierciedlenia warunków najbliższych środowisku, w jakim dane osady zalegały, wymagane jest zastosowanie pojemników hermetycznych do czasu wykonania zdjęcia. Zabezpieczają one próbkę przed zmianą ciśnienia, co eliminuje efekt zwiększenia objętości gazu. W mulistych osadach pęcherzyki o małej średnicy są sferyczne, natomiast większe pęcherzyki przybierają kształt zbliżony do monety lub płatków kukurydzianych. Stopień saturacji osadów przez metan jest kontrolowany przez trzy parametry: temperaturę, zasolenie oraz ciśnienie. Głębokość rozpoczęcia akustycznej anomalii oraz obszar zazwyczaj zmienia się sezonowo, co związane jest głównie z temperaturami panującymi przy dnie [74, 75]. Akustyczne modele oddziaływania pęcherzyków w osadach na różne częstotliwości impulsów sondujących opracowane przez Andersona oraz Hamptona [78, 79], dodatkowo zostały potwierdzone podczas eksperymentów laboratoryjnych [129] oraz pomiarów w warunkach rzeczywistych [64–67]. Większość zależności częstotliwościowych związana jest z rezonansem pęcherzyków, przy którym dochodzi do największych zmian tłumienia, prędkości dźwięku oraz rozpraszania.

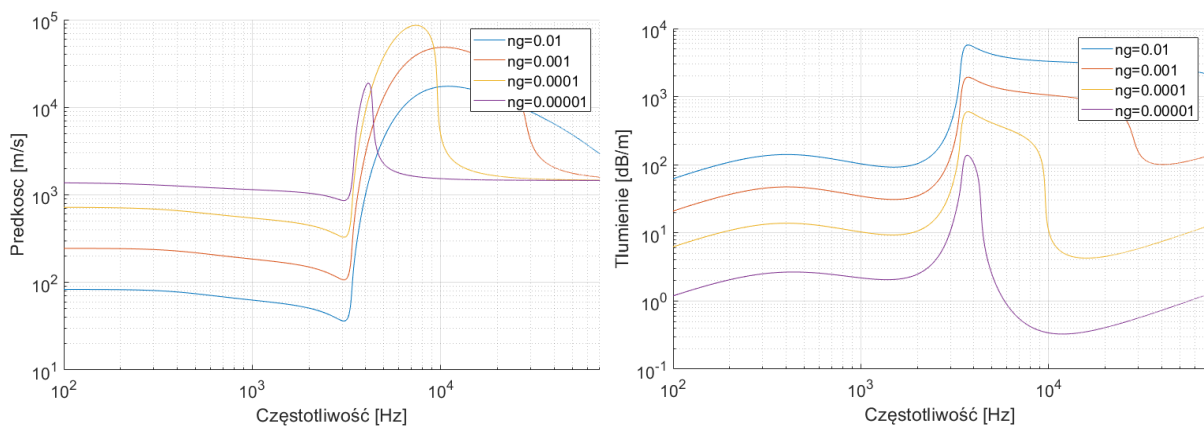


Rysunek 6-33 Określenie częstotliwości rezonansowej pęcherzyków gazowych o różnych średnicach

Dla częstotliwości dużo mniejszych od rezonansowych dominuje efekt znacznego obniżenia prędkości dźwięku, co wpływa na zwiększenie kontrastu impedancji akustycznej pomiędzy osadami zawierającymi i wolnymi od pęcherzyków, co dodatkowo skutkuje zmianą polaryzacji odbitego impulsu [81]. Określenie zmian prędkości fali podłużnej oraz częstotliwości rezonansowej może być użyte do określenia nasycenia osadu gazem. Dla częstotliwości powyżej rezonansowej wpływ na prędkość jest nieznaczny, natomiast rozpraszanie ma dominujący wpływ na tłumienie. Na Rysunku 6-34 zaprezentowana została zależność wpływu średnicy pęcherzyków na prędkość dźwięku i tłumienie przy stałej frakcji gazu (0,001). Na Rysunku 6-35 przedstawiono wpływ zawartości gazu w objętości dla stałej średnicy pęcherzyków $r = 2,5$ mm. Wykresy otrzymano na podstawie rozwiązania modelu Andersona i Hampton [78].



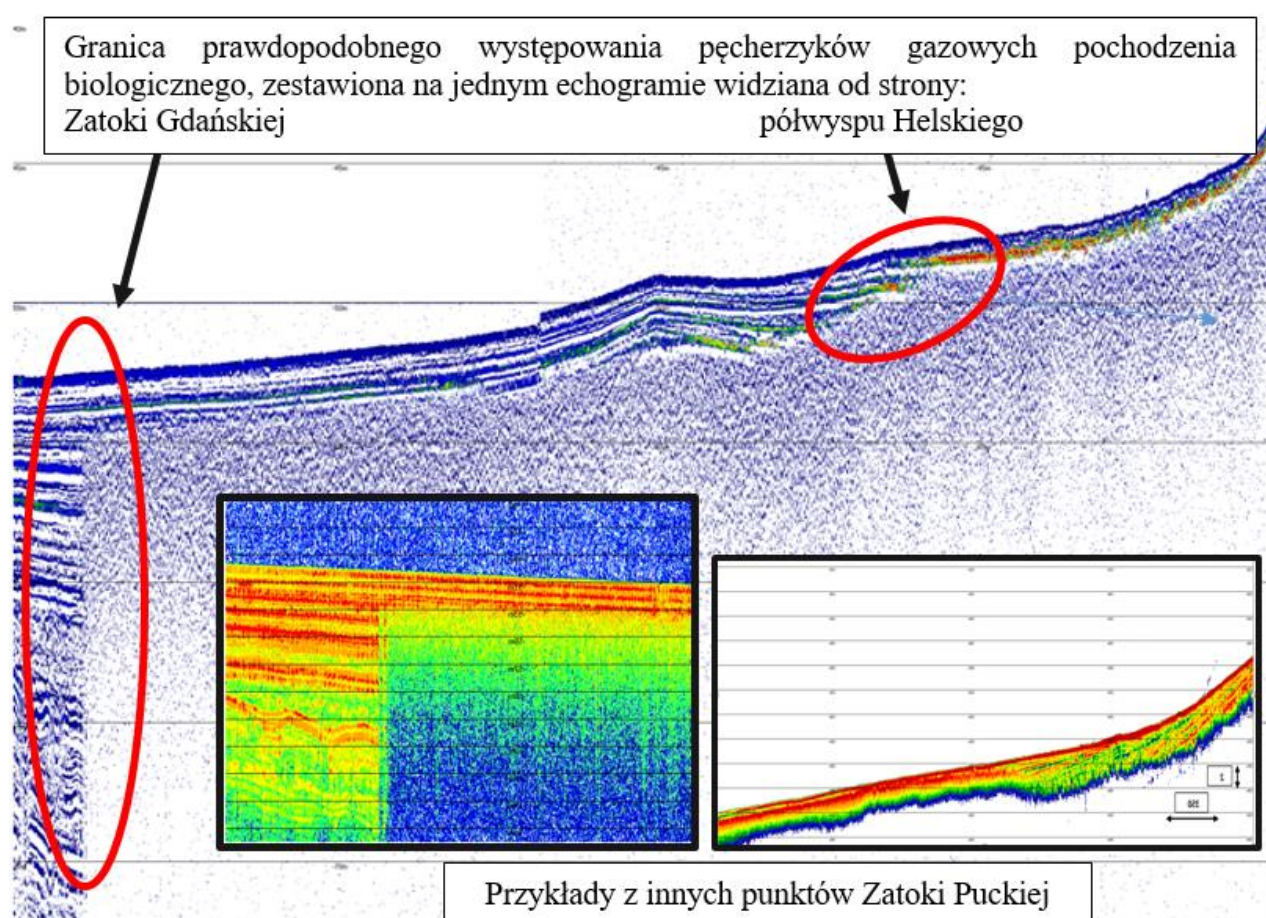
Rysunek 6-34 Zależność prędkości fali podłużnej oraz współczynnika tłumienia od średnicy pęcherzyków przy stałej frakcji gazu $n=0,001$, wskazująca wynik dla zakresu częstotliwości używanych w echosondzie parametrycznej 4-15 kHz (na podstawie modelu Andersona oraz Hamptona)



Rysunek 6-35 Zależność prędkości fali podłużnej oraz współczynnika tłumienia dla zmiennego nasycenia osadu pęcherzykami przy stałej średnicy pęcherzyków $r=2,5$ mm wskazująca wynik dla zakresu

częstotliwości używanych w echosondzie parametrycznej 4-15 kHz (na podstawie modelu Andresona oraz Hamptona)

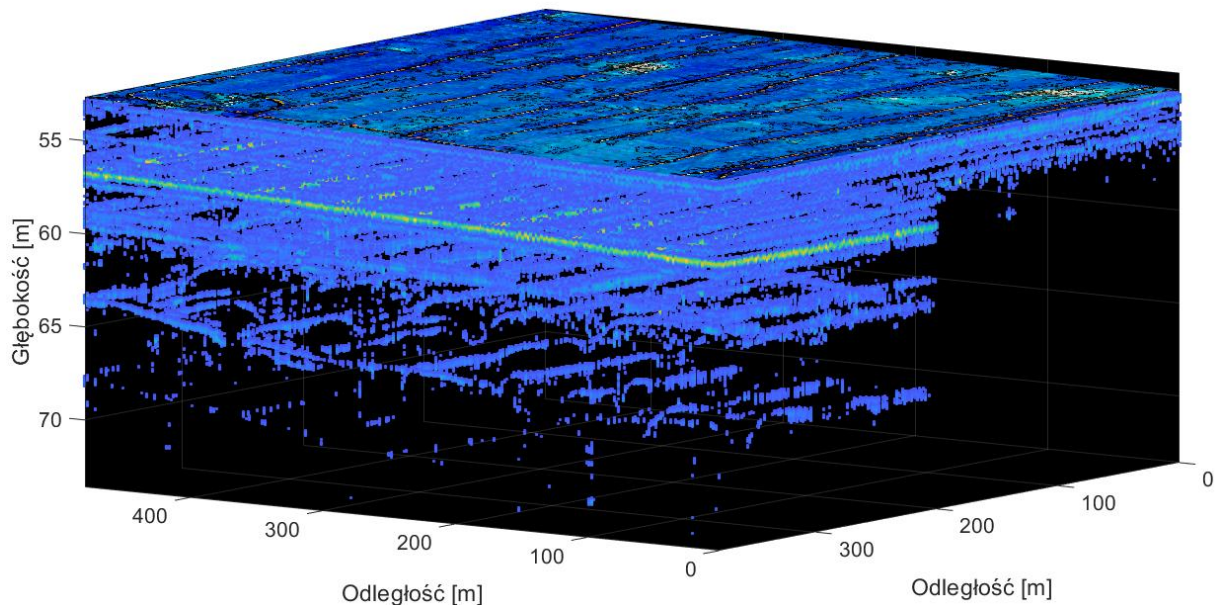
Kolejne modyfikacje modelu Anderson i Hamptona umożliwiające przewidywanie częstotliwości rezonansowej pęcherzyków (w zależności od ich promienia) oraz prędkości i tłumienia fali podłużnej zostały wprowadzone i opisane przez Wilkensa i Richardsona [65] oraz Jacksona i Richardsona [18]. Na Rysunku 6-36 zaprezentowano rozpoczęcie oraz zakończenie sondowania obszaru, w którym dochodzi do zjawiska rozpraszania impulsu sondującego na zalegających osadach z pęcherzykami.



Rysunek 6-36 Echogram z obszaru nasyconego pęcherzykami gazowymi

Owałami na Rysunku 6-36 zaznaczono nagły uskok penetracji po stronie lewej oraz trudniejszą do zlokalizowania zmianę po stronie prawej. Obie anomalie zostały zlokalizowane wielokrotnie, potwierdzając naszkicowany na mapie geologicznej obszar, w którym na podstawie inwazyjnych pomiarów oceniono obecność pęcherzyków gazowych.

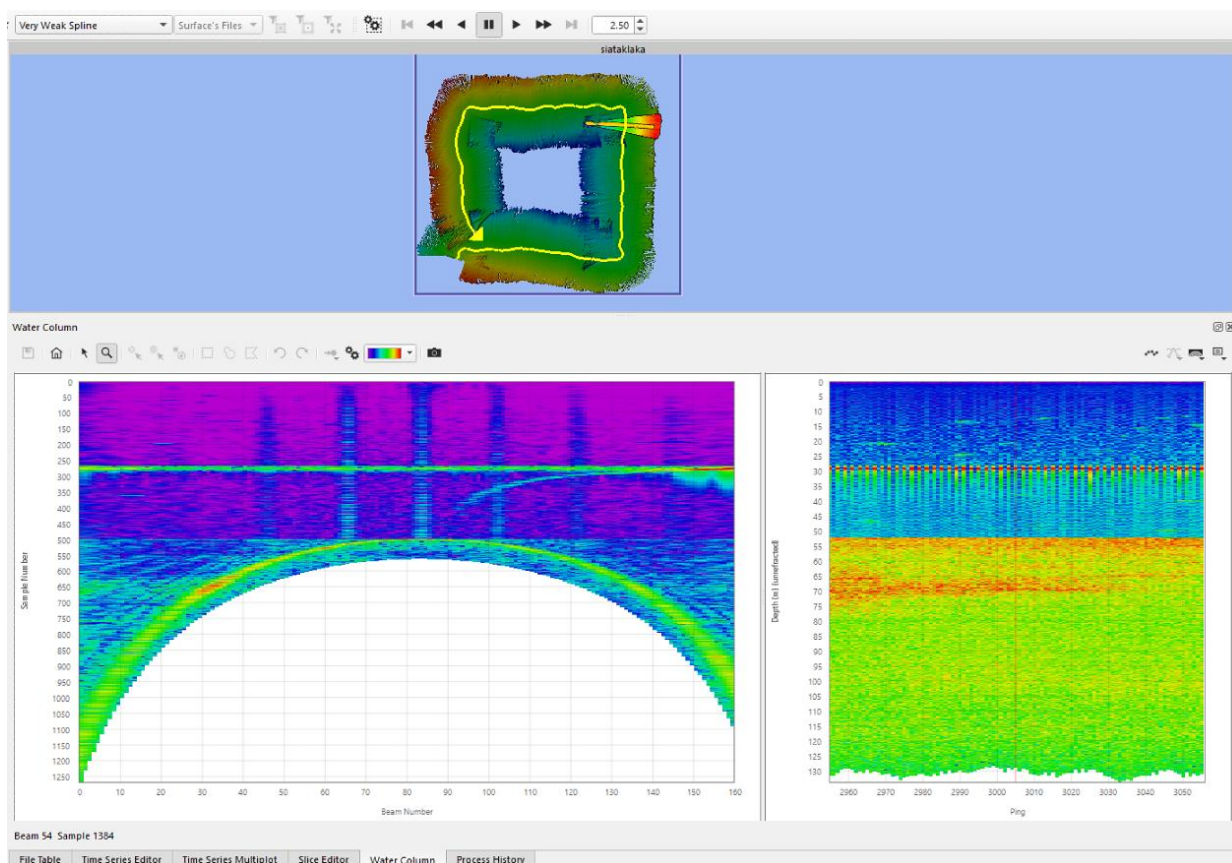
Na Rysunku 6-37 zaprezentowano nałożoną mapę batymetryczną na wynik sondowania echosondą parametryczną. Można zaobserwować płaskie dno z powtarzającą się strukturą geologiczną przy kolejnych równoległych sondażach, które zostały zaprezentowane na trójwymiarowym zobrazowaniu charakterystycznego obszaru. Taki wynik potwierdza regularność zjawiska, poprzez nakładanie się przy kolejnych sondowanych pasach obszarów z silnym rozpraszaniem/tłumieniem impulsów sondujących. Wynik jest również zbliżony do danych prezentowanych w artykułach naukowych opisujących dane zjawisko.



Rysunek 6-37 Zobrazowanie trójwymiarowe sondażu akwenu z pęcherzykami gazowymi, opracowane na podstawie równoległych przejść tworzących siatkę sondażową. Górna część zobrazowania prezentuje płaskie dno z nałożoną mapą batymetryczną.

Na Rysunku 6-37 widać obrys badanego akwenu, gdzie kolor odpowiada natężeniu impulsu odbitego. Echosonda wielowiązkowa ze względu na częstotliwość pracy (300 kHz) nie wnika w głąb osadów, dlatego nie jest możliwa ocena punktów granicznych występowania charakterystycznych osadów zarówno na zobrazowaniu waterfall, jak i water column. Jednym charakterystycznym punktem na danym zobrazowaniu jest czerwony okrąg znacznie odbiegający natężeniem impulsu odbitego. Może być to wynikiem aktywności biologicznej albo np. znajdującym się na dnie obiektem o impedancji akustycznej odbiegającej od osadów. Zobrazowanie water column potwierdza teorię związaną z brakiem penetracji osadów (nawet tych o małej impedancji akustycznej) przy wysokiej częstotliwości impulsu sondującego np. tak jak w danym przypadku o częstotliwości 300 kHz.

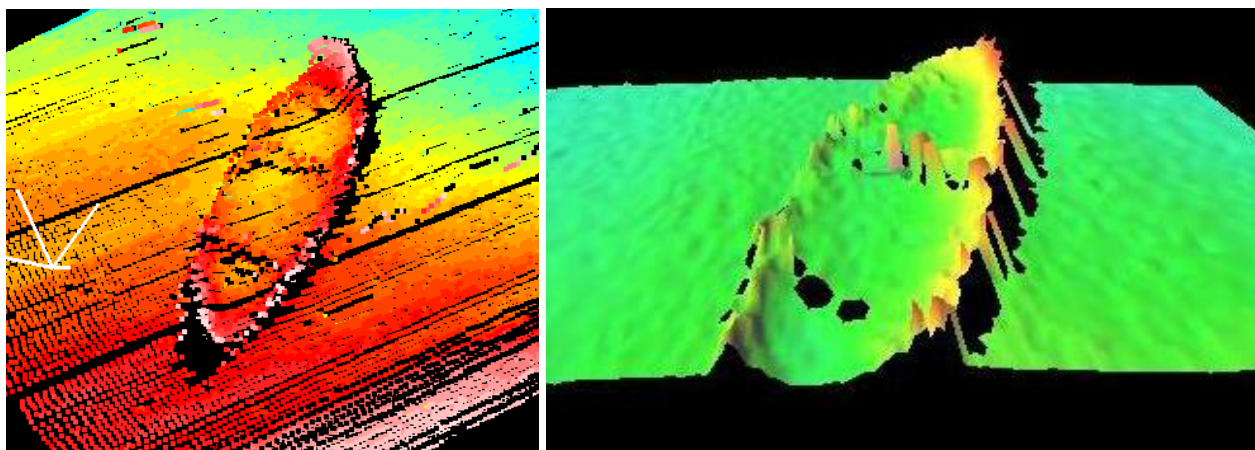




Rysunek 6-38 Wynik od echosondy wielowiązkowej –u góry przedstawionu jest batymetryczny obrys skanowanego obszary, na dole po lewej zobrazowanie water-column, oraz po prawej zestaw impulsów z kolejnych sondowań dla wybranego kąta

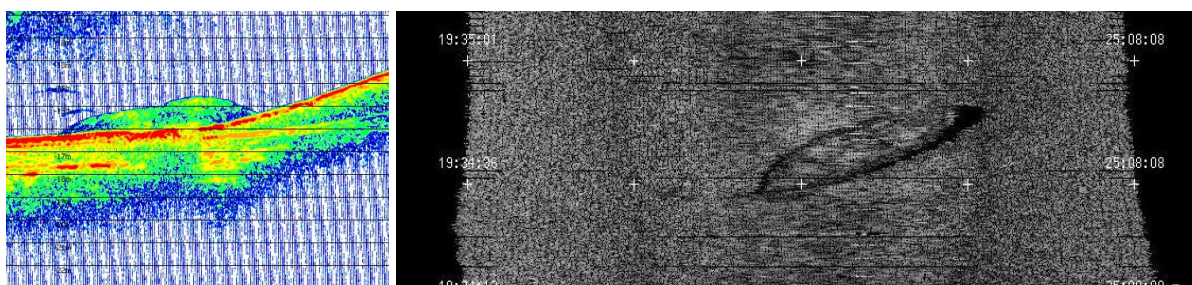
6.3 Wraki

W obrębie Zatoki Gdańskiej można spotkać wiele interesujących wraków. Zostaną tu zaprezentowane trzy wybrane przykłady. Na Rysunku 6-39 zwizualizowano kuter rybacki. Po lewej stronie znajduje się zobrazowanie składające się z punktów pomiarowych po przeprowadzeniu analizy sygnałów. Po prawej stronie – obraz, jaki został pozyskany bez przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym.



Rysunek 6-39 Wrak kutra rybackiego zlokalizowanego koło Jastarni – echosonda wielowiązkowa

Zobrazowanie wraku pochodzące od echosondy parametrycznej nie jest tak spektakularne jak powyższe wyniki, jednakże należy mieć na uwadze, iż nie jest to urządzenie do wizualizowania w przestrzeni obiektów zalegających na dnie. Po prawej stronie Rysunku 6-40 widać wynik badania echosondą wielowiązkową wytworzony w oparciu o ciągle próbkowanie echa odbitego od dna tzw. seabed image. Można porównać je do wyniku pozyskanego od sonaru bocznego (Rysunek 6-41) dodatkowo uzupełnionego o tzw. martwą strefę pod przetwornikiem.



Rysunek 6-40 Wrak kutra rybackiego – echosonda parametryczna (po lewej) i wielowiązkowa – seabed image (po prawej)

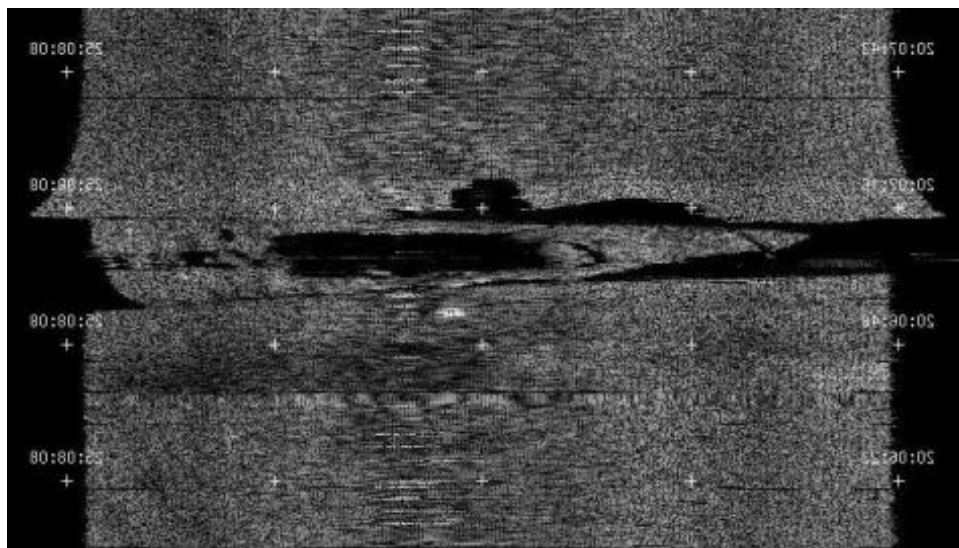
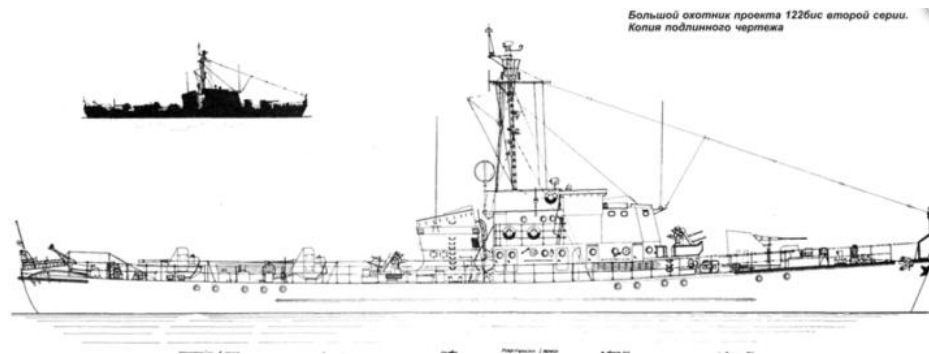


Na Rysunku 6-41 zaprezentowano wynik sondażu wraku ORP Delfin oraz jego zdjęcie. Pomimo wykonywania pomiarów przy zafalowaniu o wysokości 70–100 cm udało się pozyskać akustyczne zdjęcie wraku w pełni odwzorowujące jego szczegóły.

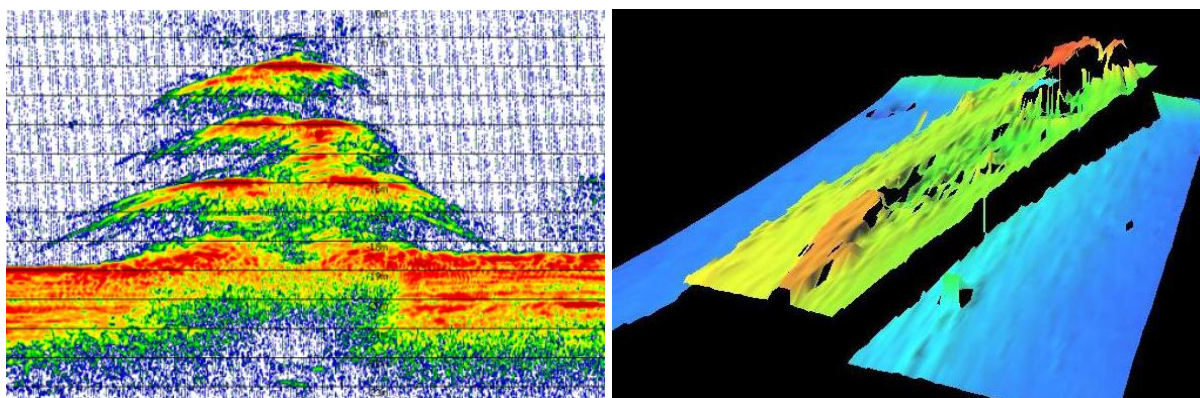


Rysunek 6-41 Wrak Delfin – porównanie wyniku badania sonarem bocznym ze zdjęciem

Ostatnim przykładem jest wrak ORP Groźny. Na Rysunku 6-42 zaprezentowano zobrazowanie seabed-image charakterystycznego dziobu z wyraźnym trójkątem. Rysunek prezentuje wynik badania echosondą parametryczną i zobrazowanie echosondą wielowiązkową uzyskane w czasie wykonywania pomiarów bez przetwarzania sygnałów.



Rysunek 6-42 Wrak ORP Groźny – schemat oraz zobrazowanie seabed-image charakterystycznego dziobu

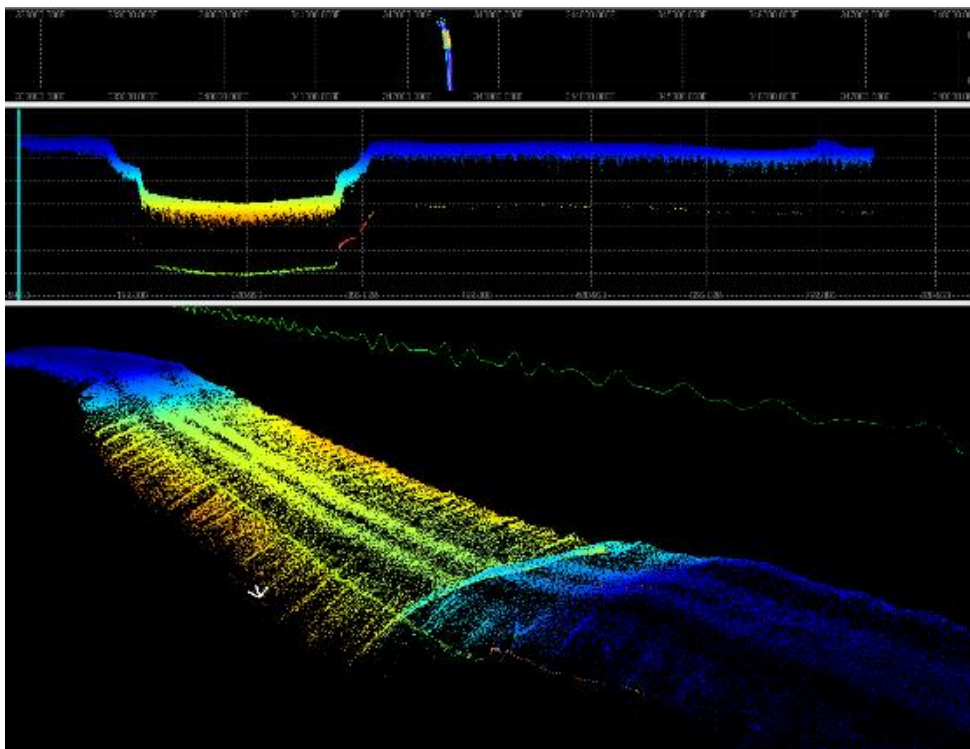
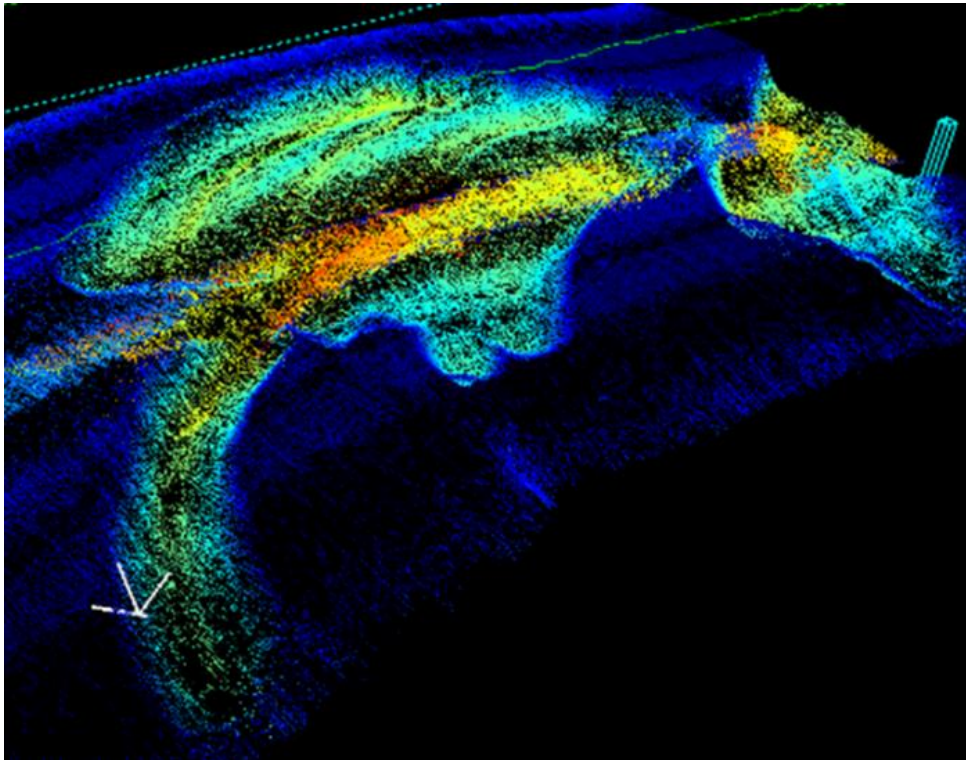


Rysunek 6-43 Wrak ORP Groźny – echosonda parametryczna (po lewej) oraz wielowiązkowa (po prawej)

6.4 Zobrazowania dna Zatoki Gdańskiej przy wykorzystaniu echosondy wielowiązkowej
 Echosonda wielowiązkowa umożliwia pozyskiwanie informacji batymetrycznej oraz wartości natężenia impulsu odbitego do celów hydrograficznych, tj. do tworzenia map oraz klasyfikacji

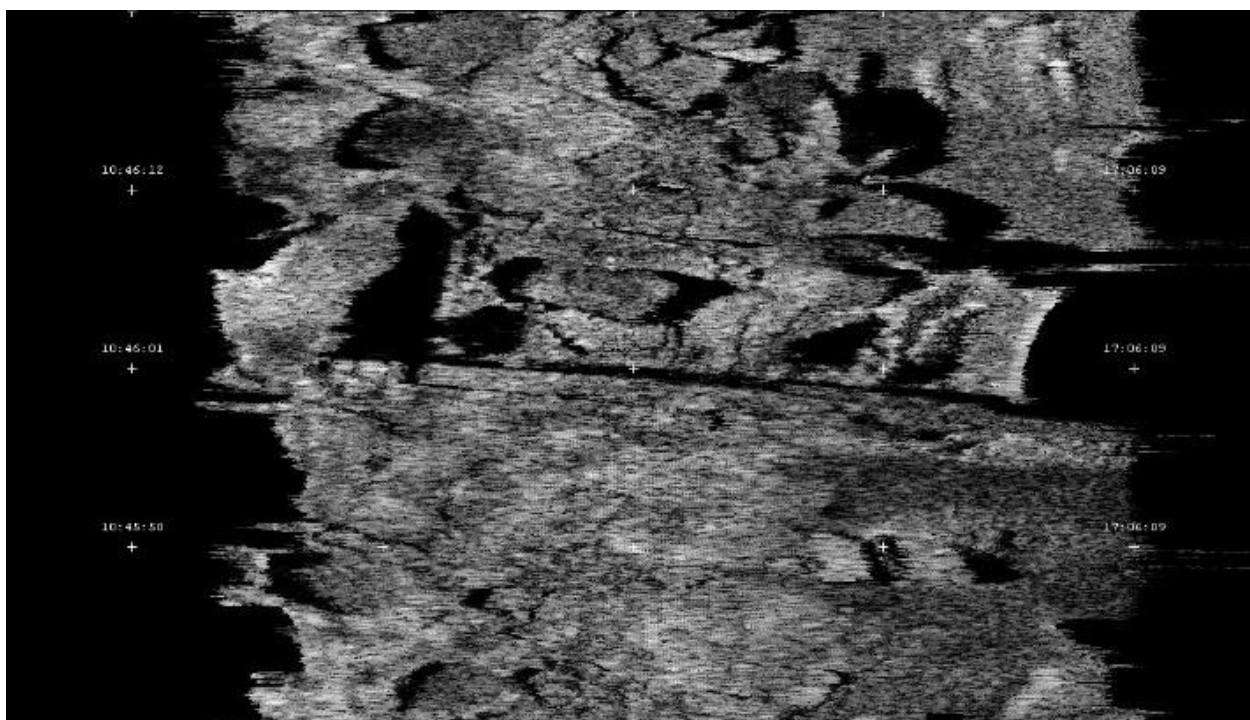


osadów zalegających na dnie. Główną zaletą echosondy jest możliwość zwielokrotnienia wąskich wiązek odbiorczych (*beamforming*) w celu określenia kąta odbicia impulsów sondujących odbieranych jednocześnie i przyporządkowania im odległości od przetwornika.



Rysunek 6-44 Wynik pracy pogłębiarki (górne zobrazowanie), przejście nad torem obejściowym do portu w Gdyni (dolne zobrazowanie)

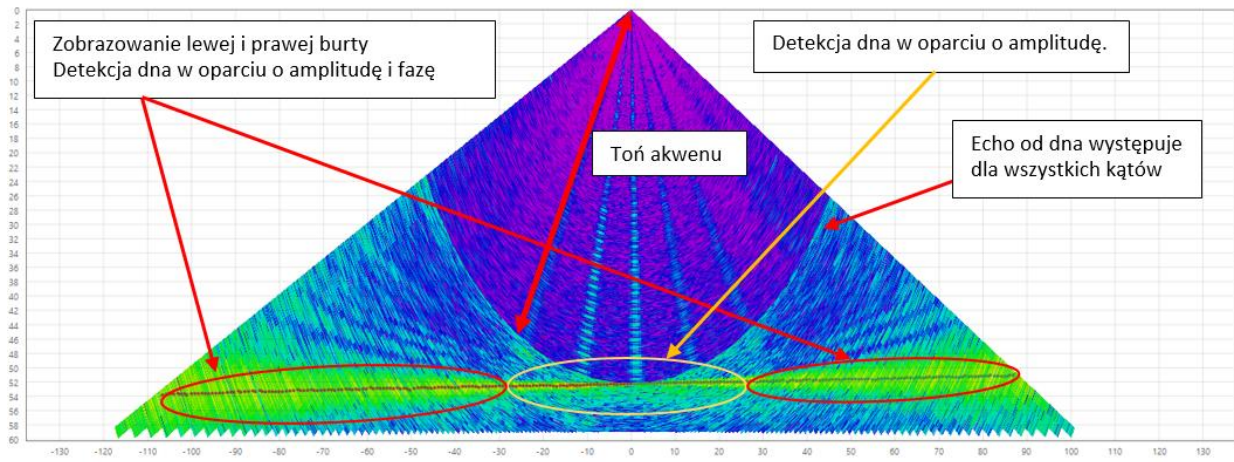
Powstające w ten sposób zobrazowanie zostało zaprezentowane na Rysunku 6-44, gdzie w górnej części widać efekt pracy pogłębiarki w piaszczystym osadzie, a w dolnej części zaprezentowano przejście nad torem podejściowym do Portu Morskiego Gdynia. Drugim typem zobrazowania pozyskiwanego od echosondy wielowiązkowej jest wspomniany wcześniej tzw. seabed image zbliżony do obrazu od sonaru bocznego, jednak głównymi różnicami są: brak możliwości pomiaru siły celu na podstawie kalibracji (możliwość pomiaru amplitudy i jej kompensacji), brak możliwości poprawnego określenia ułożenia obiektów na powierzchni o zmiennej głębokości oraz ze względu na sondowanie w bliskiej odległości od dna (sonar holowany) nadźwiękowanie dna pod dużym kątem, co utrudnia proces klasyfikacji osadu oraz tworzy strefy cieni akustycznych.



Rysunek 6-45 Zobrazowanie typu seabed image odpowiadające sonarowi bocznemu –sondowanie obiektów przy falochronie w Gdyni.

Ostatnim typem zobrazowania jest tzw. water column, które prezentuje wynik zbierania pełnej obwiedni sygnału od momentu wypromieniowania impulsu z przetwornika do maksymalnego czasu, jaki jest potrzebny do pokonania drogi od przetwornika do nadźwiękowanego dna znajdującego się w skrajnych położeniach. Zaletą tego typu wizualizacji jest możliwość prezentacji detali, które mają słaby sygnał, aby zostały zakwalifikowane do udziału w algorytmie detekcji dna (np. lokalizacja źródeł pęcherzyków gazowych lub świeżej źródła wody), określanie biomas (np. wielkości ławic ryb), uzyskiwanie detali podczas inspekcji wraków

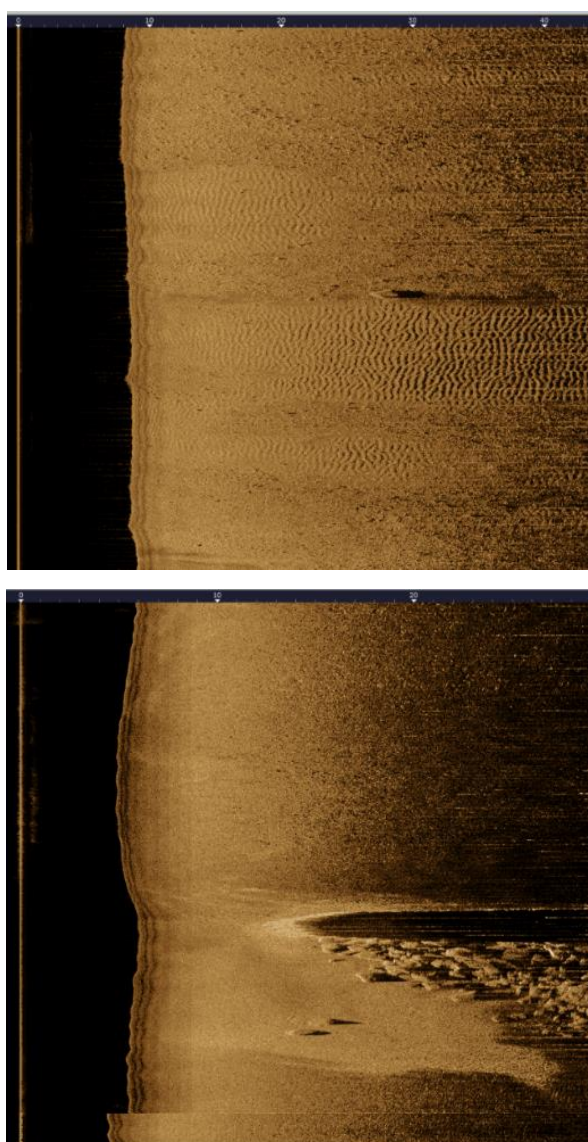
(wizualizacja masztów, łańcuchów itp.). Prezentowany wynik na Rysunku 6-46 został zarejestrowany na głębokości 54,5 m, natomiast szerokość nadźwiękowanego dna wynosi 220 m.



Rysunek 6-46 Zobrazowanie typu water-column

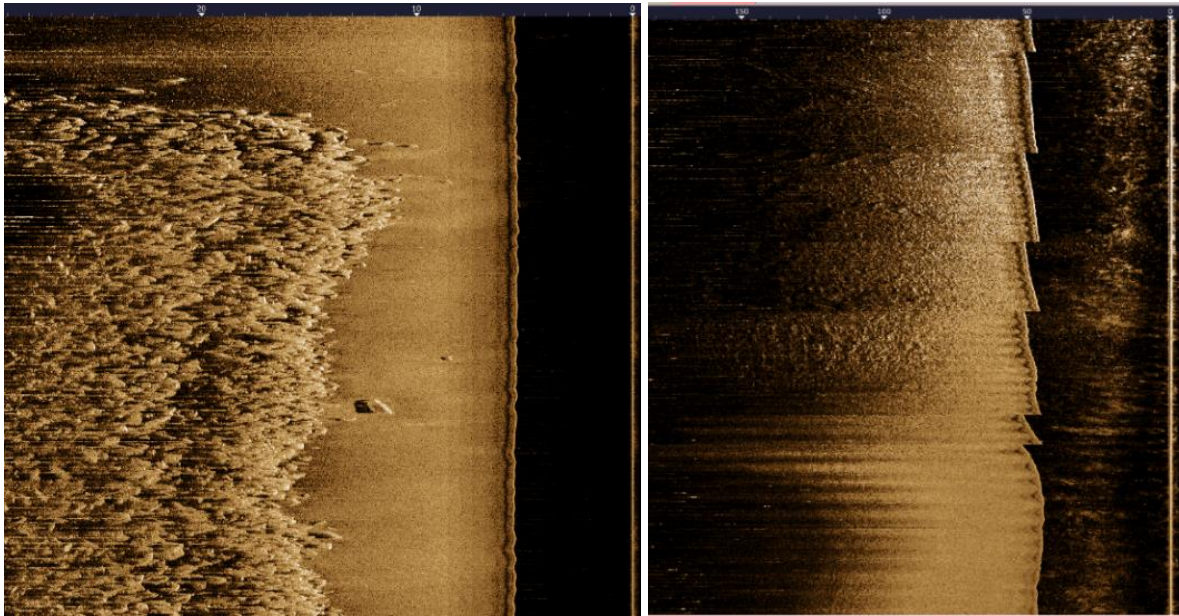
6.5 *Zobrazowania dna Zatoki Gdańskiej przy wykorzystaniu sonaru bocznego*

W niniejszym podrozdziale zaprezentowane zostaną wyniki pozyskane od sonaru bocznego pracującego na częstotliwości 455 kHz. Na Rysunku 6-47 u góry widać sondowany obszar, na którym można zauważyć charakterystyczne tzw. pofalowane piaszczyste dno oraz w jego sąsiedztwie płaskie dno. Zróżnicowanie w strukturze dennej jest w danym przypadku powiązane z prądami morskimi. Dodatkowo na środku echogramu widać sześcienny obiekt o pomierzonej na postawie cienia akustycznego wysokości około 70 cm. U dołu rysunku zaprezentowano zobrazowanie dna przy wyjściu z mariny jachtowej w Gdyni – silne echo od falochronu tworzące wyraźny cień akustyczny oraz zwizualizowane ułożone równoległe kamienie.



Rysunek 6-47 Obszar z płaskim oraz zafalowanym piaszczystym dnem (górny obraz), cień od falochronu w Gdyni (dolne zobrazowanie)

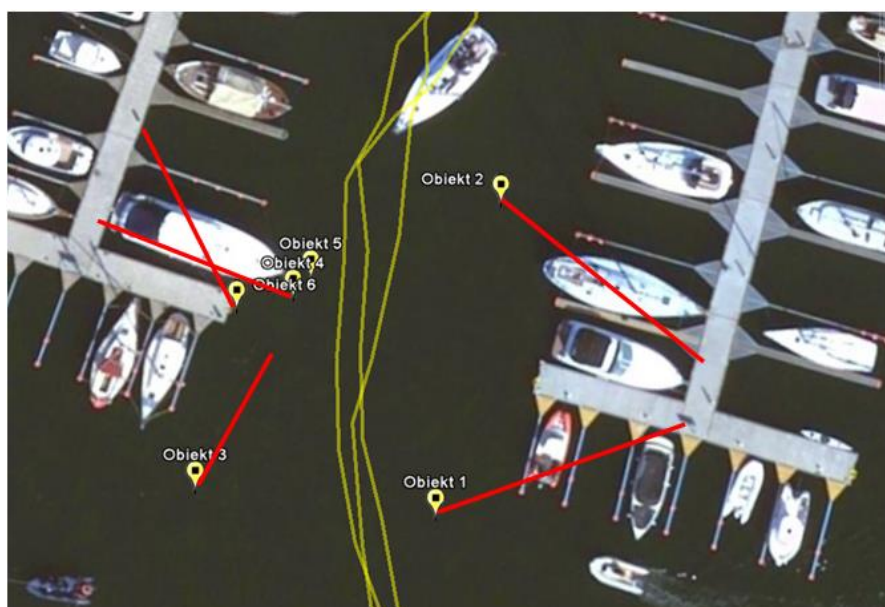
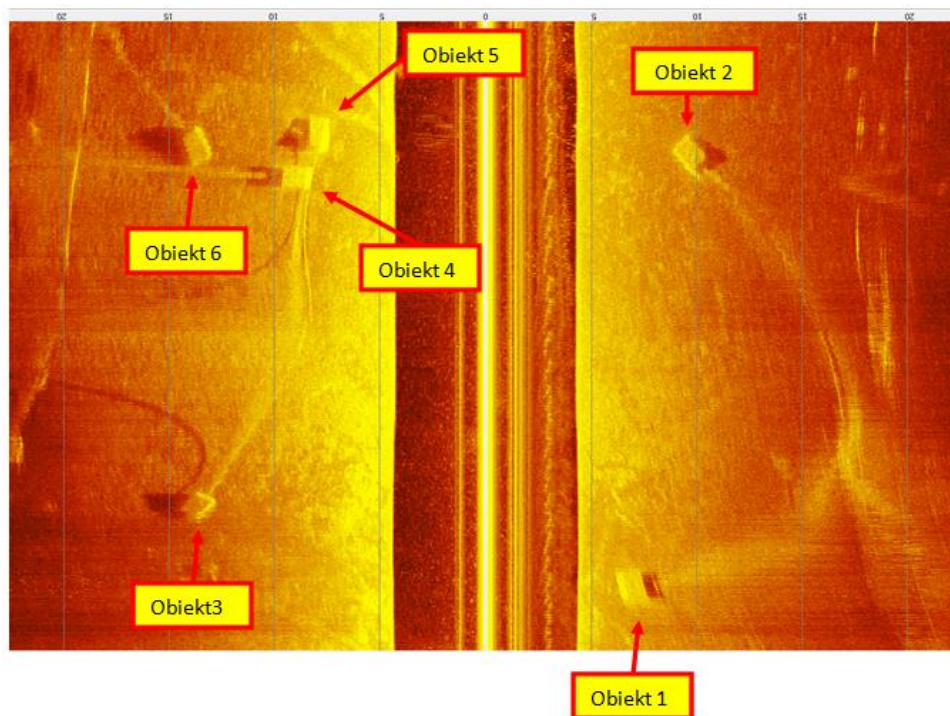
Zobrazowanie przy małej głębokości do 10 m dla danej częstotliwości można porównać do zdjęć fotograficznych ze względu na ich ostrość. Na Rysunku 6-48 zaprezentowano wyniki sondażu wykonanego równoległe do falochronu chroniącego marinę jachtową wybudowaną na końcu mola w Sopocie. Ułożone kamienie tworzą barierę rozbijającą fale podczas sztormu. Na zobrazowaniu widać płaskie piaszczyste dno oraz grupę ułożonych głazów. Przykład na rysunku po prawej stronie prezentuje zmianę impedancji akustycznej osadów, a co się z tym wiąże – zmniejszanie się natężenia impulsu sondującego. Wyraźnie widać zmiany natężenia oraz zasięgu, z jakiego pozyskiwane jest echo.



Rysunek 6-48 Kamienie zabezpieczające molo w Sopocie (po lewej), zmiana impedancji akustycznej (po prawej)

Ostatni przykład prezentuje lokalizację betonowych bloków utrzymujących pływające pomosty na metalowych łańcuchach. U góry Rysunku 6-49 zaprezentowano obraz sonarowy z zaznaczonymi obiektami. Wyraźnie widać kształt bloków oraz elementów umieszczonych na dnie, a także echo od łańcuchów. Odczytane współrzędne geograficzne z charakterystycznych punktów zostały naniesione na mapę wraz z odczytanymi kierunkami łańcuchów. Przedstawiona prezentacja potwierdza poprawne skalibrowanie systemu pomiarowego oraz interpretację otrzymanego obrazu.



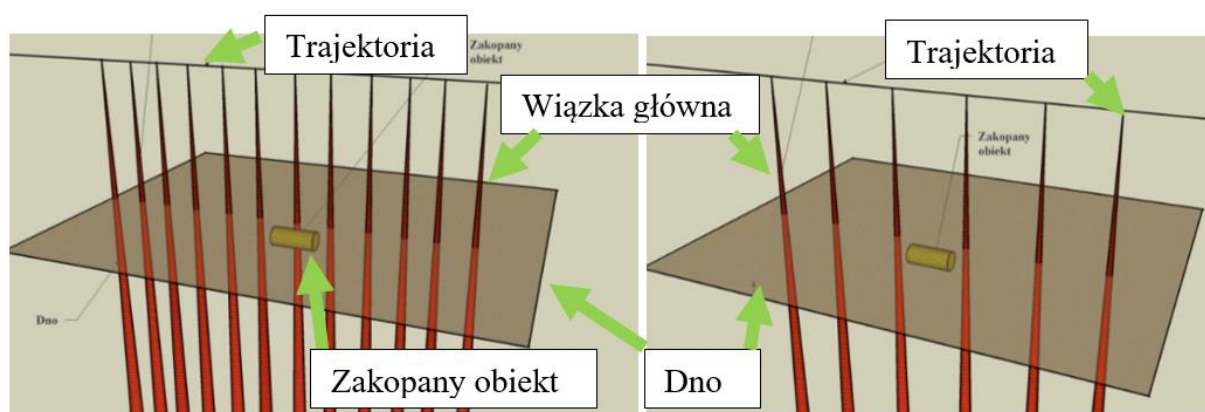


Rysunek 6-49 Wynik lokalizacji betonowych bloków utrzymujących pływające pomosty w marinie w Gdyni

6.6 Wyniki prezentujące możliwości lokalizacji obiektów zakopanych pod dnem

Właściwości echosondy parametrycznej (możliwość penetracji osadów dennych) umożliwiają poszukiwanie obiektów zagrzebanych pod dnem. Nie jest to łatwe zadanie ze względu na wąską wiązkę echosondy (relatywnie mały obszar dna nadźwiękawiany podczas badań), co utrudnia zadanie lokalizacji małych obiektów (przy wąskiej charakterystyce kierunkowej istnieje ryzyko ominięcia lokalizowanego obiektu - Rysunek 6-50).





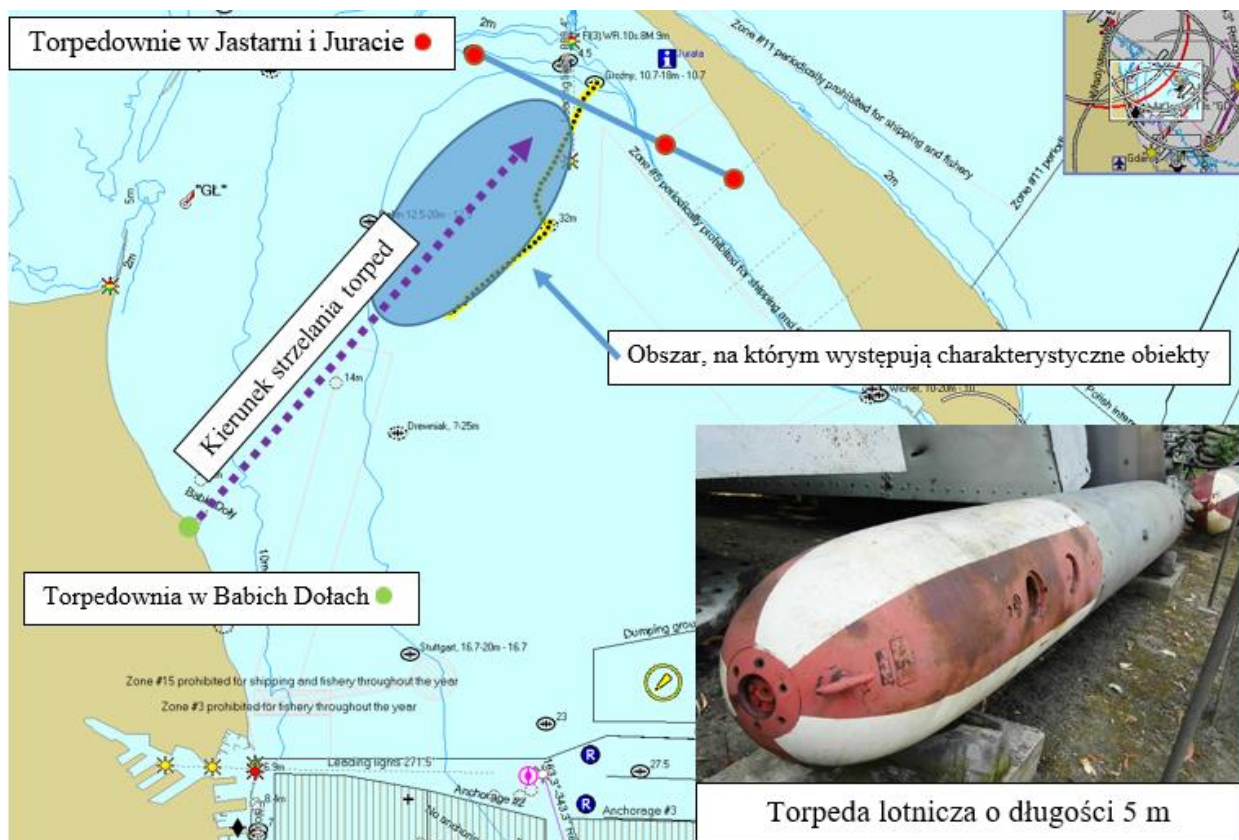
Rysunek 6-50 Poszukiwanie obiektów zakopanych pod dnem urządzeniem o wąskiej charakterystyce nadawczej, zbyt duża prędkość podczas pomiarów może doprowadzić do ominięcia sondażem poszukiwanego obiektu.

Dodatkowym aspektem jest typ osadów dna. Poniżej zaprezentowane zostaną dwa przypadki:

- a) Obiekty w osadach mulistych, o niskiej wartości współczynnika impedancji akustycznej;
- b) Obiekty w osadach piaszczystych, o wysokiej wartości współczynnika impedancji akustycznej.

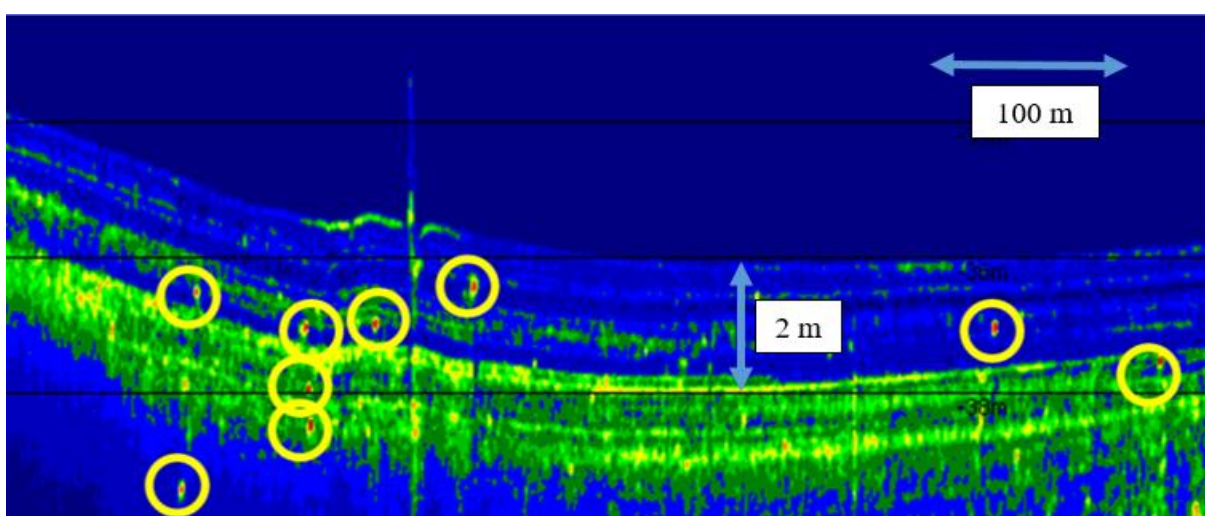
Ad a)

Na Rysunku 6-51 zaprezentowano mapę z zaznaczoną elipsą koloru niebieskiego wyznaczającą akwen, na którym podczas pomiarów zlokalizowano dużą liczbę charakterystycznych obiektów odbiegających natężeniem impulsu odbitego od naturalnego środowiska występującego na wskazanym obszarze. W odniesieniu do wszystkich wykonywanych badań zarówno na obszarze Zatoki Gdańskiej, jak i w południowej części Bałtyku, nie zlokalizowano akwenu, na którym można znaleźć równie dużą liczbę obiektów nagromadzonych na niewielkim obszarze. Historyczna analiza infrastruktury oraz działań prowadzonych na Zatoce Gdańskiej w okresie II wojny światowej umożliwiła wysunięcie hipotezy związanej z pozostałościami w postaci testowych torped lotniczych typu F5, które były wystrzeliwane z kompleksu w Babich Dołach w kierunku 32⁰ (przerywana linia) oraz zrzucane na linię łączącą trzy czerwone punkty zaznaczone na mapie, które określają położenie trzech obiektów wybudowane na akwenu o głębokości nie większej niż 3 m).



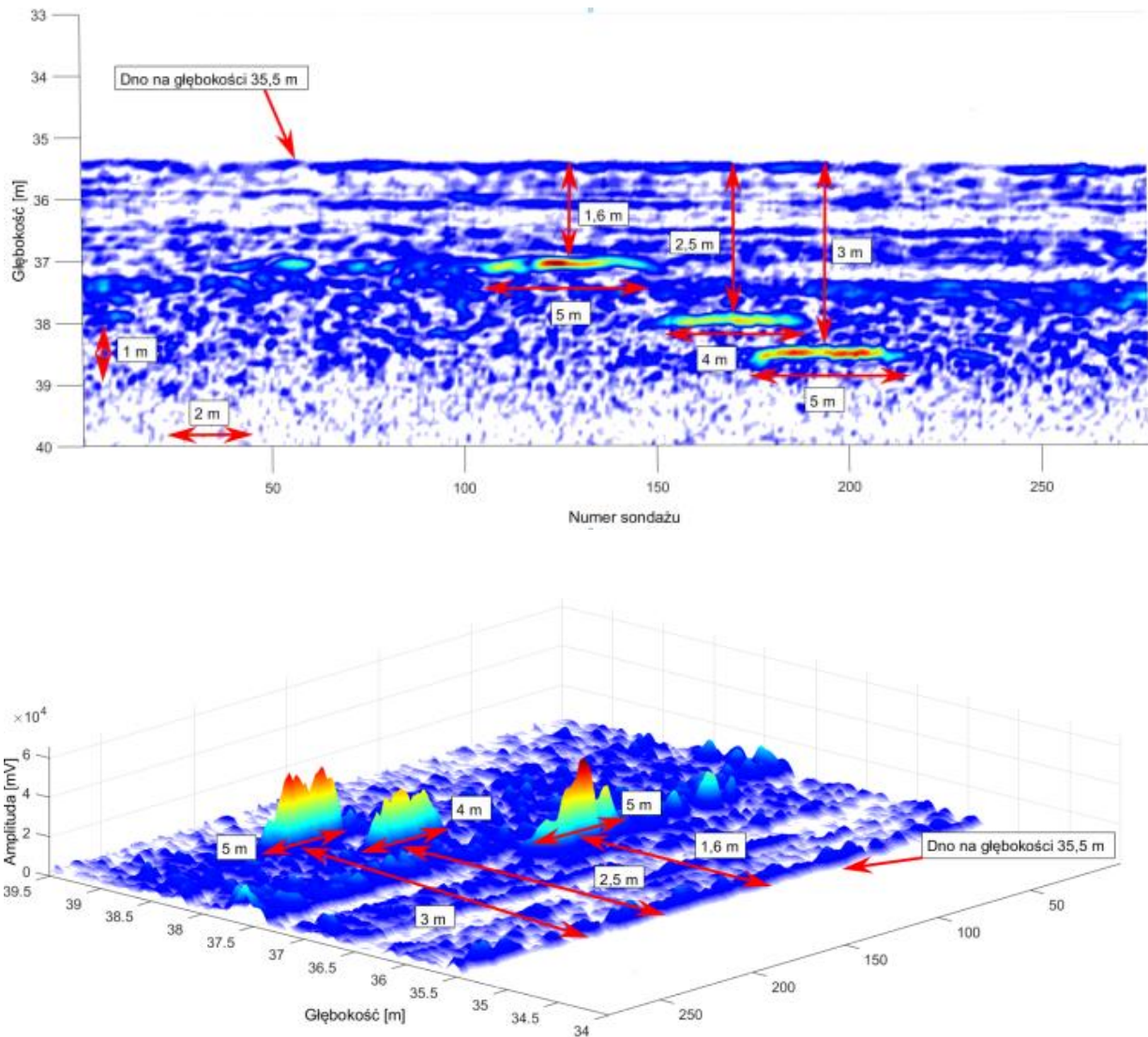
Rysunek 6-51 Mapa obrazująca obszar strzelania torped lotniczych

Na Rysunku 6-51 można zobaczyć zdjęcie torpedy wystawionej w Muzeum Marynarki Wojennej w Gdyni. Torpedy miały długość 4,804–5,160 m (w zależności od typu głowicy bojowej) i średnicę 0,45 m.



Rysunek 6-52 Echogram z obszaru strzelania torped lotniczych z zaznaczonymi charakterystycznymi obiektami

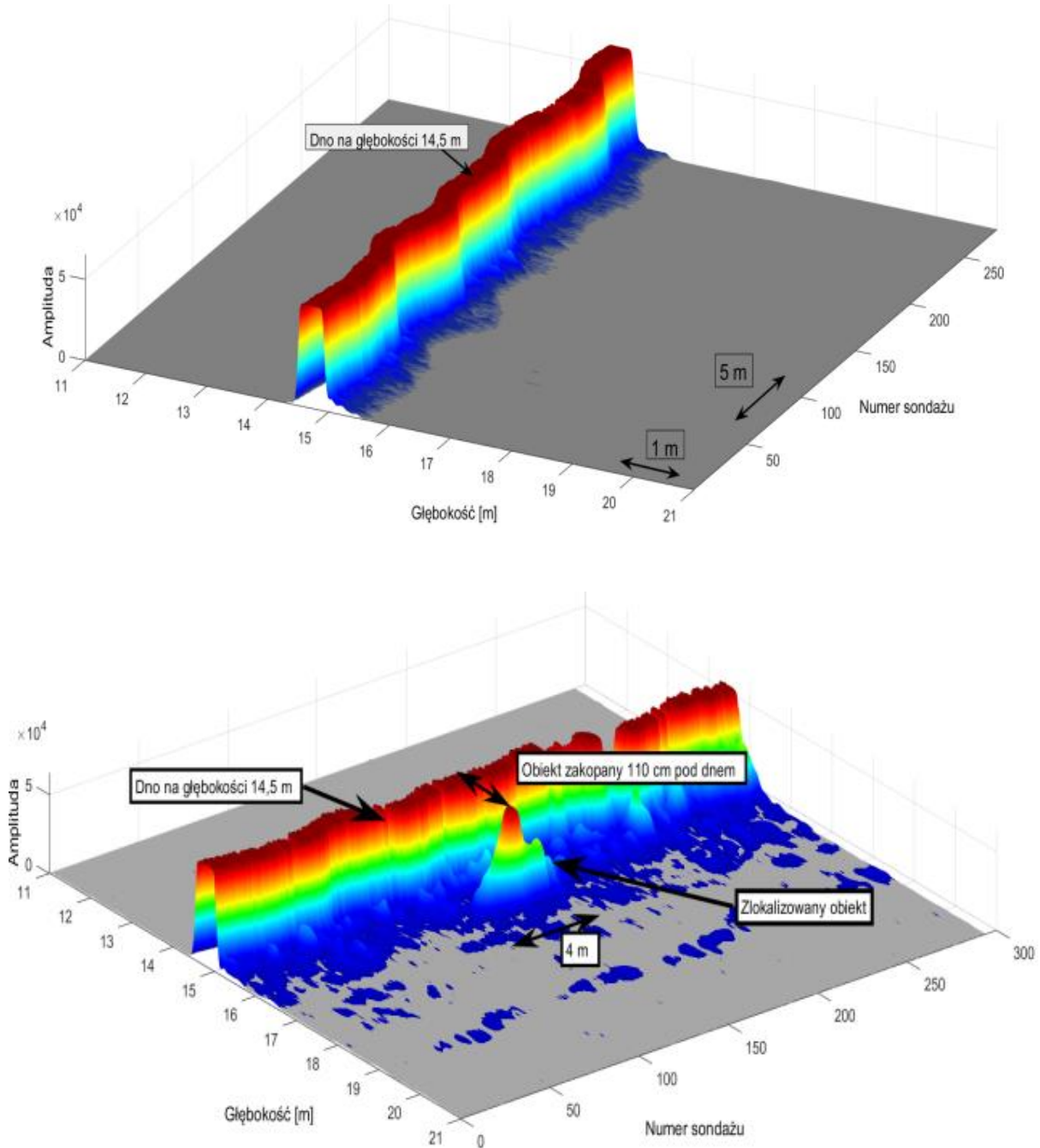
Na Rysunku 6-53 zaprezentowano zobrazowanie 2D oraz 3D wybranego fragmentu echogramu poddanego przetwarzaniu sygnałów w postaci filtrowania w celu usunięcia z echogramu szumów. Obydwie metody zobrazowania umożliwiają łatwą detekcję obiektów, jednak model przestrzenny, który byłby prezentowany operatorowi podczas pomiarów w czasie rzeczywistym, ułatwiłby analizę wyników. Uwzględnienie współrzędnych geograficznych przypisanych do poszczególnych impulsów sondujących umożliwia przybliżone określenie długości oraz precyzyjne wyznaczenie głębokości pod dnem, na jakiej występują dane obiekty. Przykład pokazany na rysunku w przejrzysty sposób prezentuje możliwości rozróżnienia obiektów znajdujących się w małej odległości (w danym przypadku 30 cm) pionie (rozdzielczość wgłębna) oraz obiektów znajdujących się małej odległości w poziomie (rozdzielczość kątowna).



Rysunek 6-53 Echogram prezentujący trzy charakterystyczne obiekty zlokalizowane na trzech różnych głębokościach – u góry zobrazowanie na płaszczyźnie, na dole prezentacja przestrzenna

Ad b)

Kolejne dwa przykłady związane są z możliwością lokalizacji obiektów występujących w osadach charakteryzujących się dużą impedancją akustyczną. Na Rysunku 6-54 zaprezentowano przykład zlokalizowania obiektu zagrzebanego w piaszczystym, jednorodnym dnie 1,1 m pod powierzchnią.



Rysunek 6-54 Przestrzenne zobrazowanie sondowanie akwenu impulsami wielkiej częstotliwości (100 kHz) górne zobrazowanie oraz małej częstotliwości (6 kHz) dolne zobrazowanie

Zobrazowania prezentują wynik sondowania akwenu przy użyciu impulsów wielkiej częstotliwości (100 kHz, górny echogram). Widać na nim wyraźne echo od powierzchni, brak penetracji wglębnej oraz rzadko spotykany przypadek zbliżonych wartości amplitudy odbieranych ech. Związane jest to z warunkami hydrometeorologicznymi panującymi na akwenu – stan morza 0 w skali Beauforta. Echogram po prawej stronie przedstawia zlokalizowany obiekt w homogenicznej strukturze osadów piaszczystych. Ze względu na wysoki poziom echa można założyć, że cel posiada właściwości geoakustyczne odbiegające w znacznym stopniu od właściwości osadu piaszczystego. Rozważając hipotetyczny przypadek, w którym dany obiekt znajdowałby się na równi z osadami wierzchniej warstwy, nie zostałby on zlokalizowany przy użyciu echosondy parametrycznej – zobrazowanie byłoby zbliżone do wyników sondowania impulsami wielkiej częstotliwości. Analogiczna sytuacja miała miejsce podczas eksperymentu, jakim było poszukiwanie zagrzebanej tuż pod powierzchnią piaszczystego dna rury gazowej o średnicy 10 cm. Na Rysunku 6-55 po lewej stronie zaprezentowano model cylindra oraz wynik wyznaczania siły celu na podstawie numerycznego modelu skończonego cylindra Urick [36] w zależności od częstotliwości impulsu sondującego i funkcji kąta padania.

$$TS = 10 \log \frac{aL^2}{2\lambda} \left[\frac{\sin(kL \sin \theta)}{kL \sin \theta} \right]^2 \cos \theta \quad (6.1)$$

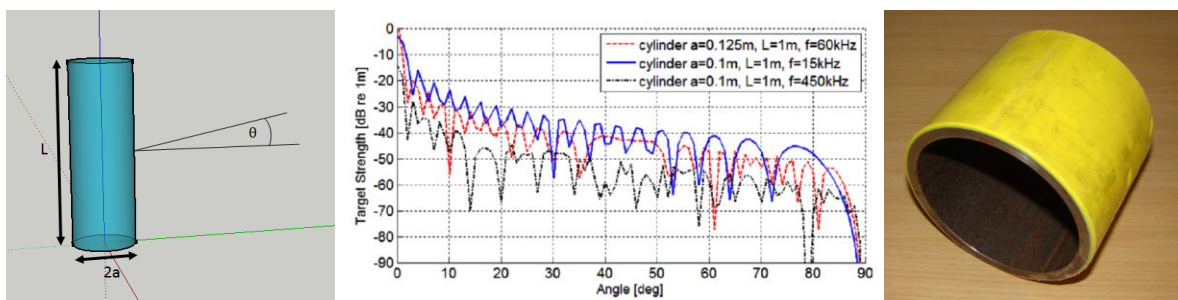
gdzie:

L – długość cylindra

a – promień

θ – kąt padania impulsu sondującego

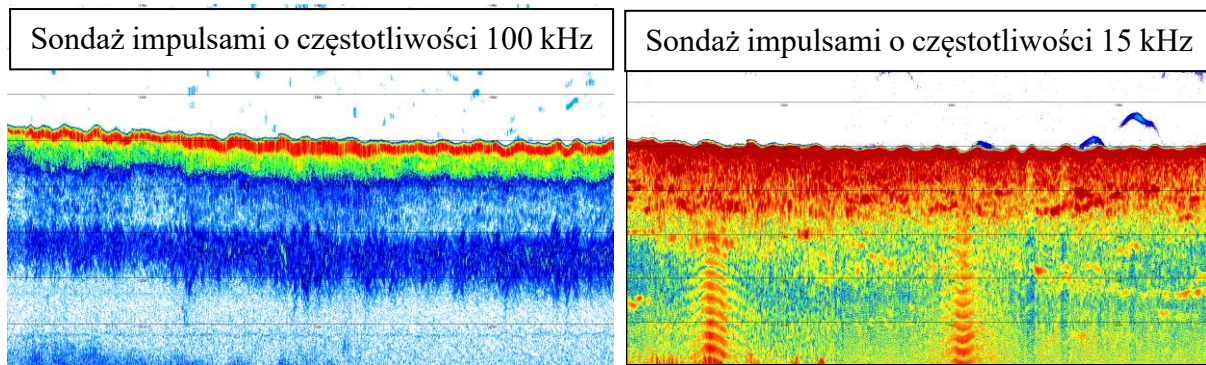
k – liczba falowa: $2\pi/\lambda$



Rysunek 6-55 Model skończonego cylindra (po lewej), obliczona siła celu (w środku), fragment gazociągu (po prawej)

Podczas pomiarów w warunkach rzeczywistych przy jednoczesnym użyciu zarówno echosondy wielowiązkowej oraz echosondy parametrycznej nie udało się potwierdzić pozycji

gazociągu na podstawie analiz echogramów oraz zobrazowania typu waterfall echosondy wielowiązkowej. Poszukiwanie rury pomimo jej małej średnicy było ułatwione ze względu na jej spozycjonowanie na morskich mapach nawigacyjnych oraz występowanie w jednym odcinku pomiędzy linią brzegową a platformą usytuowaną 78 km na północ od Władysławowa. Analizy prowadzone w oprogramowaniu dedykowanym do przetwarzania sygnałów echosondy nieliniowej umożliwiły zwizualizowanie charakterystycznego zjawiska, jakim były rewerberacje od rury gazowej pobudzonej impulsem o częstotliwości 15 kHz. Po lewej stronie Rysunku 6-56 zaprezentowano echogram uzyskany podczas sondażu impulsami wielkiej częstotliwości prezentujący typowe dane batymetryczne bez wskazania jakichkolwiek anomalii sugerujących występowanie nienaturalnych obiektów.



Rysunek 6-56 Porównanie wyników sondowania wielką i małą częstotliwością

Zobrazowanie oparte na sondażu impulsami małej częstotliwości (prawa strona rysunku 6-56) po zastosowaniu procesów analizy sygnałów echa (filtracja, wzmocnienie typu TVG, skalowanie poziomu echa) umożliwiło przedstawienie obrazu z wyraźnymi zakłóceniami odbieranymi od pobudzonego walca.

Taki wynik został uzyskany tylko dla częstotliwości 15 kHz, która jest w przybliżeniu równa częstotliwości drgań własnych gazociągu. W przypadku sygnałów o częstotliwościach 6 oraz 12 kHz nie zaobserwowano charakterystycznych punktów.

Nanosząc współrzędne geograficzne punktu środkowego rewerberacji na mapę, wyznaczono piętnaście punktów pokrywających się z lokalizacją gazociągu na mapach nawigacyjnych (zob. Rysunek 6-57). Eksperyment potwierdza rozszerzone możliwości określania położenia obiektów poprzez właściwości i zjawiska fizyczne, które wiążą się pobudzeniem mechanicznym o odpowiedniej częstotliwości.



Rysunek 6-57 Mapa z zaznaczonymi charakterystycznymi punktami gdzie występowały rewerberacje
 naniesiona na mapę nawigacyjną z zaznaczoną trasą gazociągu

7 Metoda klasyfikacji osadów dennych na podstawie zarejestrowanych sygnałów

Tradycyjnie charakter dna morskiego określany jest za pomocą pobierania próbek rdzeniowych, fotografii i szeregu innych metod pozyskiwania próbek i określania parametrów dna w warunkach rzeczywistych. Używanie takich metod jest czasochłonne i kosztowne, szczególnie w przypadku kiedy do scharakteryzowania jest akwen o dużej powierzchni. Bezinwazyjne akustyczne metody rozwijano od kilku dekad z nastawieniem na szybkie sondowanie dużych akwenów wyznaczonych do pomiarów. Rozpoznaniem materiałów osadów dennych i ich klasyfikacja w odniesieniu do powierzchni dna była przedmiotem obszernych badań prowadzonych przez J. Tęgowskiego [12, 106].

Wśród akustycznych metod można wyróżnić podstawowe, tj. mające na celu scharakteryzowanie typów osadów znajdujących się na powierzchni dna (np. osady twarde oraz miękkie, muł, piasek, ły) lub bardziej zaawansowane umożliwiające klasyfikację uwzględniającą średnicę ziaren osadów, nierówności na dnie, impedancję akustyczną itp.

W przypadku sonarów pracujących na wielkich częstotliwościach można skupić się jedynie na wierzchniej warstwie osadów dennych, natomiast penetracja dna morskiego jest możliwa przy użyciu impulsów sondujących o większej długości fali aż do pomiarów sejsmicznych umożliwiających głęboką penetrację prowadzącą do zwizualizowania struktury geologicznej osadów dennych.

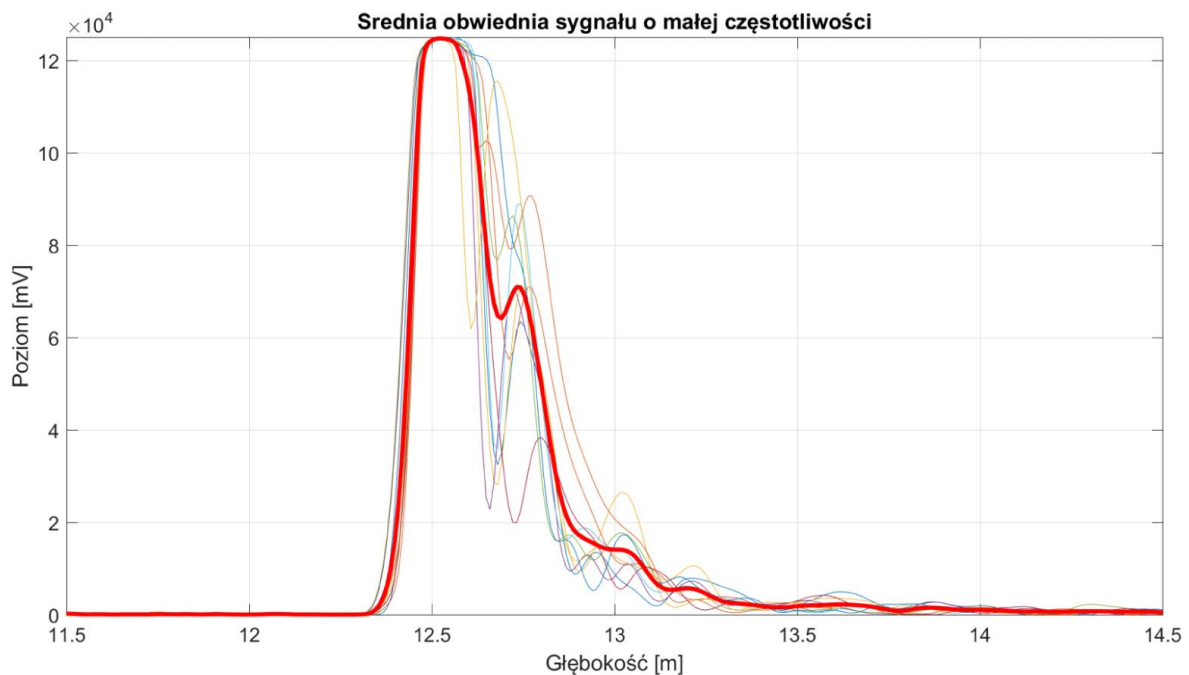
Wiele różnych technik może być użytych do procesu klasyfikacji typu dna, w tym:

- a) Amplituda impulsu odbitego,
- b) Ocena kształtu echa,
- c) Analiza tekstury obrazu,
- d) Analiza drugiego echa od dna,
- e) Użycie modelu dna do określenia kształtu impulsu, jaki powinien być uzyskany.

Wybór pojedynczej metody nastawionej na klasyfikację danych na jednym akwencie pomiarowym może być równie skuteczny, jak wykorzystanie wielu metod równolegle. Systemy sonarowe coraz częściej używane do identyfikacji i klasyfikacji osadów dennych to wymienione już systemy echosond jednowiązkowych (echosonda parametryczna), sonarów bocznych oraz echosond wielowiązkowych. Niektóre metody przetwarzania sygnałów mogą być współdzielone przez wszystkie trzy typy urządzeń echolokacyjnych, natomiast inne znajdują zastosowanie w konkretnym układzie. Wszystkie wymagają ekstrakcji charakterystycznych cech sygnału odbitego prowadzącej do zidentyfikowania typu dna morskiego: piasek, muł, żwir lub innego charakteryzowania dna morskiego w zależności od potrzeb danych pomiarów.

Echa impulsów sondujących odbierane przez antenę są bardzo zróżnicowane (dla tego samego typu dna), dlatego różne metody uśredniania oraz wygładzania przebiegów czasowych są stosowane w celu zapewnienia stabilnych wyników [82].

Uśrednianie ech pojedynczych impulsów sondujących wzdłuż śladu pomiaru zmniejsza rozdzielczość, ale można w ten sposób uzyskać kompromis pomiędzy przypadkowymi fluktuacjami amplitudy obwiedni a dokładnością ekstrakcji cech charakterystycznych sygnału. Należy również uwzględnić, że platforma, na której zainstalowany jest system pomiarowy, poddawana jest nieregularnym przechyłom poprzecznym, podłużnym i przewyższeniom. Dodatkowo należy uwzględnić różną głębokość akwenu (wpływa to na tłumienie impulsu sondującego) oraz nachylenie dna. W przypadku systemów jednowiązkowych konieczne jest wyrównanie punktów rozpoczynających wizualizowanie narastającego zbocza obwiedni impulsu sondującego przed rozpoczęciem procesu uśredniania. Określenie przesunięć czasowych można zrealizować na podstawie ustawienia poziomu lub wyznaczenia maksymalnej wartości funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy poszczególnymi przebiegami czasowymi. W przypadku systemów wielowiązkowych można zastosować podobne jak opisane powyżej uśrednianie, jednak dodatkowo należy uwzględnić ułożenie platformy pomiarowej w celu dokładnego określenia kierunku, w jakim wypromieniowany jest impuls sondujący oraz korekcję algorytmu *beamformingu* w celu określenia rzeczywistych kątów pomiędzy uformowaną wiązką odbiorczą a dnem. Na Rysunku 7-1 zaprezentowano przykład uśredniania impulsów wielkiej częstotliwości 100 kHz (echosonda parametryczna).



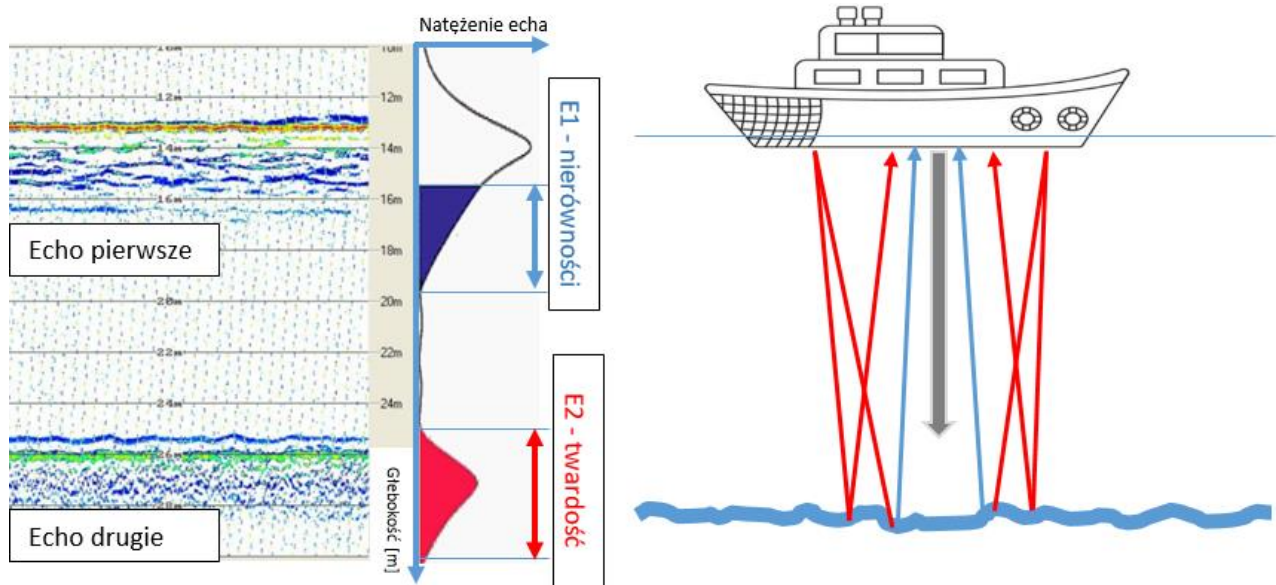
Rysunek 7-1 Średnia obwiednia impulsu sondującego fali różnicy częstotliwości od echosondy parametrycznej

W tym przypadku dziesięć impulsów sondujących zostaje ujednoczonych pod kątem punktu rozpoczynającego proces narastania echa, a następnie uśrednionych. W celu osiągnięcia dokładniejszych wyników można poddać analizie ułożenie jednostki podczas nadawania, by dokonać wyboru impulsów z określonego zakresu przechyłów, np. nie są brane pod uwagę podczas sondowania dna, kiedy odchylenie wzdłużne lub poprzeczne przekracza 5 stopni. Na Rysunku 7-1 przedstawiono uśrednioną obwiednię prezentującą pewne aspekty umożliwiające scharakteryzowanie typu osadów dennych. Dominujące w obrazowaniu jest zbocze narastające obwiedni echa od granicy ośrodków woda – osad denny (tu piasek gruboziarnisty). Długość impulsu sondującego w tym przypadku wynosi 175 μ s. Impuls sondujący o dłuższym czasie trwania mógłby spowodować zamazanie wyraźnej w danym przypadku informacji o odbiciu od płaszczyzny dna oraz komponent związany z rozpraszaniem objętościowym. W przypadku impulsów sondujących odchylonych od normalnej w stosunku do dna, echo będzie wydłużone a wpływ rozpraszania od nierówności oraz od objętości będzie trudny do wyodrębnienia. W przypadku sonaru bocznego szerokość impulsu w poprzek kierunku sondowania również będzie miała wpływ na charakter odbieranego echa.

- Określenie parametrów wejściowych systemu klasyfikacji

Charakterystyczne cechy impulsu odbitego używane w procesie klasyfikacji są pobierane bezpośrednio z przebiegów czasowych albo obwiedni sygnału, a w ich skład mogą wchodzić między innymi: szerokość oraz kształt echa, aspekt widmowy, energia (natężenie sygnału odbitego) itd. Te cechy będą przyjmowały różne wartości w zależności od zmian geometrii układu pomiarowego oraz od typu urządzenia pomiarowego. Jest to dodatkowe utrudnienie w określeniu uniwersalnej metody klasyfikacji ze względu na różnorodne wyniki uzyskiwane od tego samego typu dna dla różnych konfiguracji systemu pomiarowego. Kształt oraz szerokość echa również będzie się zmieniała w zależności od długości transmitowanego impulsu, częstotliwości oraz charakterystyk kierunkowych anten nadawczej i odbiorczej. Trudności wynikające z przedstawionych niejednoznaczności są rozwiązywane na podstawie metod określenia parametrów dna badanego akwenu przy pomocy próbek osadów wierzchnich, pobrania rdzeni osadów, zdjęć itp. W takim przypadku, kiedy możliwe jest wykonanie tego typu pomiarów, można skorelować poszczególne cechy echa z danymi otrzymywanymi innymi metodami. Różnego rodzaju programy dostępne komercyjnie mogą realizować tę klasyfikację poprzez przyporządkowanie echa do typu dna (QTC View, ECHOplus, SWATHplus). Klasyfikacja dwuwymiarowa cech została zaimplementowana w oprogramowaniu

RoxAnn, gdzie jedną cechą jest określenie energii E1 w ognie echa od dna, natomiast całkowita energia E2 jest wynikiem odbicia echa od powierzchni morza, kolejnego nadźwiękowania akwenu i powrotu echa dna do przetwornika Rysunek 7-2. W początkowych opisach tej metody [84] E1 było traktowane jako parametr określający nierówności, natomiast E2 definiowało pomierzoną twardość dna. Późniejsze analizy i kolejne eksperymenty [85] nie potwierdziły tej metody klasyfikacji, jednak wskazały, że te dwie charakterystyczne cechy echa mogą być wystąpić dla różnych typów dna. Algorytm funkcjonuje najsprawniej w momencie, gdy powierzchnia morza jest możliwie najmniej zafalowana [84]. Znaczącą zaletą metod używany w QTC View oraz Rox Ann jest to, że są one otwarte na dane od szerokiej gamy sonarów oraz dla różnych typów dna bez konieczności odnoszenia się do modelu. Dodatkowo nie ma w tym przypadku konieczności kalibrowania układu pomiarowego. Problemem jest natomiast pozyskanie zestawu informacji w różnych punktach akwenu pomiarowego poprzez pobranie próbek osadów dennych, wykonanie zdjęć itp. Większa liczba próbek powoduje zwiększenie liczby rozróżnianych punktów.



Rysunek 7-2 Ocena właściwości osadów na podstawie pomiarów podwójnego echa – opracowane na podstawie White 1999

Innym podejściem do problemu klasyfikacji osadów dna morskiego jest pozyskiwanie charakterystycznych cech obrazów pozyskanych od sonaru bocznego [86, 87] lub echosondy wielowiązkowej [88]. Procedura ta wykorzystuje techniki segmentacji obrazu, jednak przed jej użyciem należy usunąć błędy wynikające ze zmian natężenia dźwięku w poprzek drogi, którą

porusza się jednostka sondująca oraz znormalizować siłę rozpraszania w zależności od kąta padania impulsu sondującego. Zaletą tej metody jest również brak konieczności kalibracji układu pomiarowego, natomiast niedogodnością jest konieczność weryfikacji rzeczywistych warunków metodami inwazyjnymi oraz zdjęciami. Zarówno echosonda wielowiązkowa, jak i sonar boczny pokrywają szeroki pas podczas sondowania. Używanie impulsów sondujących z małych kątów padania może negatywnie wpływać na algorytm klasyfikacji, ponieważ tego typu echa mają natężenie zbliżone dla szerokiej gamy typów dna charakteryzujących się np. mocnym rozpraszaniem i niską siłą rozpraszania wstecznego.

Opisane powyżej przypadki klasyfikacji opierały się na parametrach związanych z geometrią układu pomiarowego oraz na właściwościach zestawu pomiarowego. Oznacza to, że cechy, jakie są pozyskiwane, nie określają w bezpośredni sposób właściwości geofizycznych osadów. Niektóre metody wykorzystują cechy odebranych sygnałów do określenia współczynnika odbicia [88–93]. Współczynnik odbicia umożliwia oszacowanie impedancji akustycznej, na podstawie której można określić inne właściwości geoakustyczne i geofizyczne osadów, uwzględniając metody odwrotne, tzn. na podstawie wcześniej zebranych danych parametryzujących poszczególne typy osadów dna morskiego. Możliwość zastosowania metody inwersji impedancji opiera się na założeniu, że dno morskie jest płaskie i bez znaczącej stratyfikacji w skali rozdzielczości impulsu. Metoda ta polega na analizie echa padającego prostopadle do dna ze względu na fakt, iż pomiar pod innymi kątami wymaga użycia dwóch platform – na jednej znajduje się nadajnik, a na drugiej odbiornik. Jeżeli dno morskie posiada uwarstwioną strukturę geologiczną, najlepszym rozwiązaniem jest użycie impulsu o częstotliwości dającej możliwość odbicia od pierwszej warstwy osadów. Zastosowanie metody inwersji w danym przypadku jest proste: otrzymujemy wynik w postaci znormalizowanej impedancji, używając zależności na współczynnik odbicia z modelu opartego na teorii płynów. Dla miękkich osadów (iły, muły) impedancja zależy od prędkości i gęstości dźwięku w osadach, dla piasków jest to iloczyn prędkości dźwięku osadu i efektywnej gęstości, natomiast dla skał jest to iloczyn prędkości i gęstości fali uciskowej. Rozpraszanie związane z nierównościami warstwy dennej może spowodować zmniejszenie współczynnika odbicia ze względu na fakt, iż mniej energii odbije się w kierunku przetwornika. Podobna sytuacja będzie miała miejsce w przypadku, gdy odbity impuls rozprzestrzenił się w obrębie znacznie większego kąta aniżeli rozwartość charakterystyki nadawczo-odbiorczej przetwornika.

La Blanc [94, 95] opracował metodę wykorzystującą odbicia od poddennych warstw w celu estymacji tłumienia impulsu sondującego w osadach w zależności od częstotliwości. Metoda wykorzystuje urządzenia szerokopasmowe typu chirp z dopasowanymi filtrami i odpowiednim kształtem sygnału. Odbicia pochodzące od głębszych warstw osadów dennych posiadają mocno stłumione informacje związane z wysoką częstotliwością, co powoduje przesunięcie częstotliwości środkowej impulsu w dół. Zastosowanie modelu w danym przypadku dodatkowo umożliwia oszacowanie wielkości ziarna.

Kolejną metodą powszechnie stosowaną umożliwiającą estymację cech osadu jest siła rozpraszania $10 \log \sigma_b$, która jest funkcją kąta padania impulsu sondującego na dno. Wartość siły rozpraszania jest uzyskiwana na podstawie równania sonarowego, które zostało zaprezentowane w podrozdziale 4.3. Ze względu na fakt iż większość sonarów używanych podczas badań nie jest kalibrowana pod względem określenia natężenia impulsu sondującego wypromieniowanego z anteny oraz czułości odbiornika, zakłada się wprowadzenie wyrównania poziomu nadawczego względem odbieranego poziomu [96]. Ta nie do końca precyzyjnie określona wartość wyrównująca rzędu kilku, kilkunastu dB często dobierana jest w sposób eksperymentalny w celu dopasowania wyników do pozyskanych już na danym akwenu danych. Jeżeli badany akwen obejmuje kilka różnych typów dna, dostosowanie jednego parametru w celu dopasowania się do różnych typów osadów jest rozsądną strategią. Jedną z procedur klasyfikacji jest dopasowanie wyniku rozpraszania [97–101] tak, by parametry mogły być określone na podstawie modelu (gęstość, nierówności itp.). Jeżeli model dostarcza rozsądnej reprezentacji rozkładu rozpraszania względem kąta, nie ma konieczności wykonywania oględzin dna w celu weryfikacji. Oczywiście nie wszystkie warunki środowiskowe określające dno morskie da się w sposób idealny zamodelować.

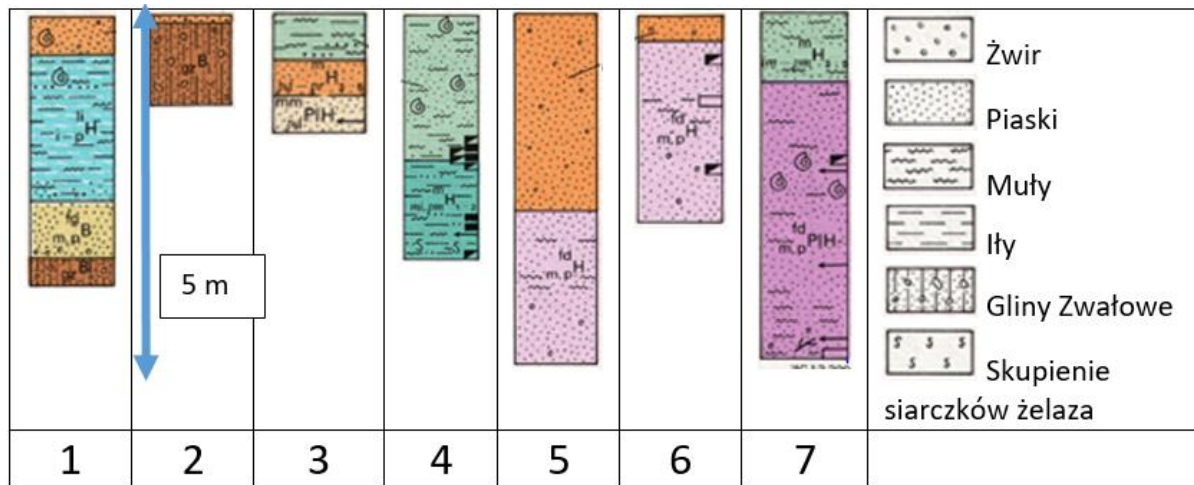
Najbardziej ambitnym sposobem określenia parametrów dna jest zamodelowanie na podstawie parametrów wejściowych kształtu impulsu odbitego od dna. Taka metoda została zaproponowana przez Poliquena i Lurtona [102] oraz Sternlichta i de Mousitiera [103, 104]. Kiedyś to podejście miało ograniczone praktyczne zastosowanie [96, 105] i oferowało mało wiarygodne wyniki, zakładając, że model może być zastosowany do wielu rodzajów osadów dennych. Metoda ta wykorzystuje metody optymalizacji, aby dopasować prognozy modelu do zmierzonych przebiegów czasowych echa. Wymaga to ustalenia zestawu parametrów geoakustycznych oraz informacji dotyczących rozpraszania impulsu sondującego, chociaż często minimalizuje się zestaw zmiennych w celu ograniczenia liczby niezależnych danych wejściowych. Ze względu na skomplikowaną strukturę uzyskiwanych w modelowaniu przebiegów czasowych, dobrym



urządzeniem do weryfikacji wyników jest echosonda wielowiązkowa, która umożliwia pozyskiwanie więcej niż stu przebiegów podczas jednego sondażu dla różnych kątów padania – umożliwia to dobrą weryfikację danych z modelu.

7.1 Akwen pomiarowy używany podczas procesu automatycznej klasyfikacji osadów

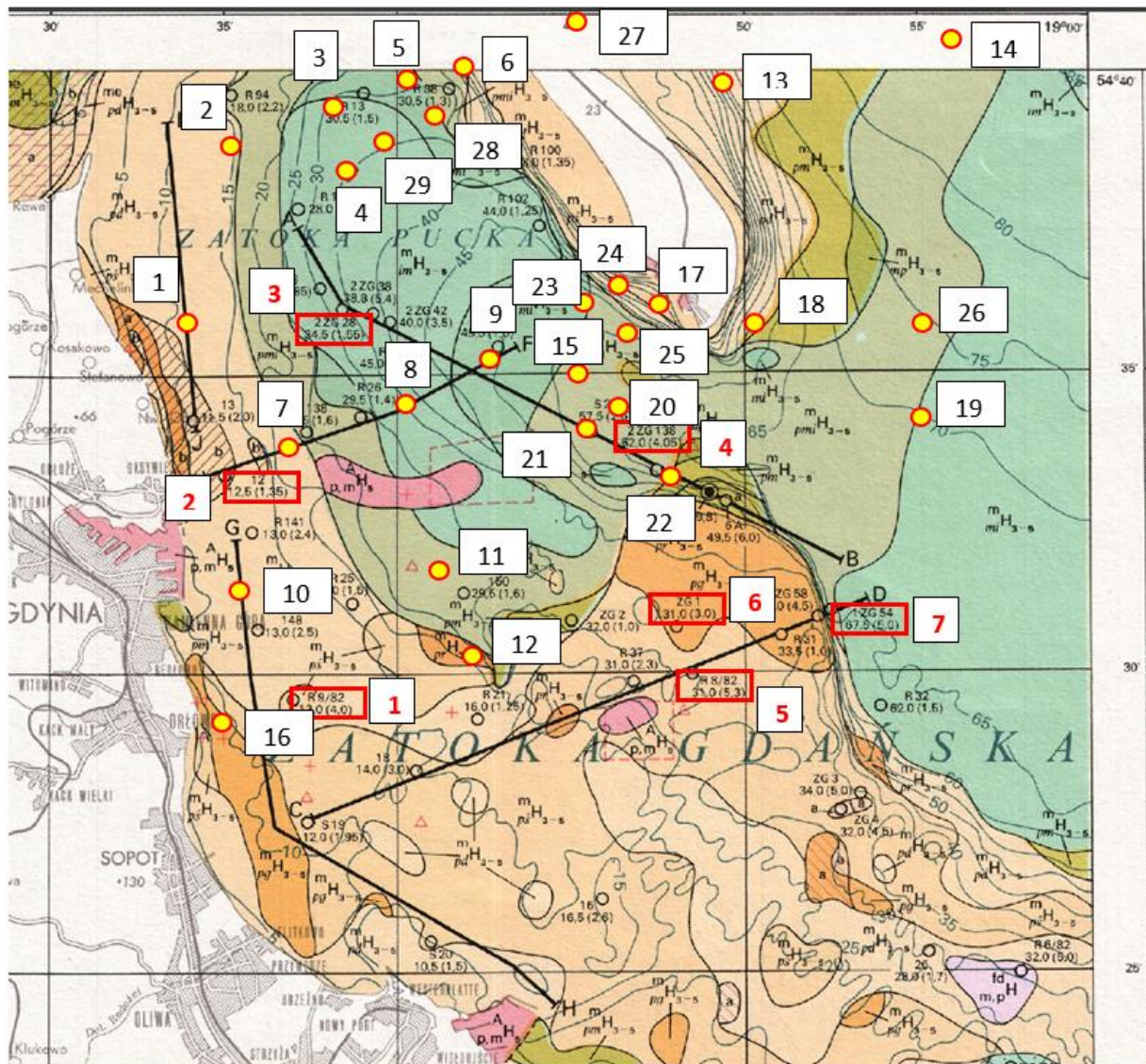
Akwen Zatoki Gdańskiej jest wyjątkowym miejscem, które łączy obszary zróżnicowane zarówno pod względem osadów wierzchniej warstwy dna morskiego, jak i zróżnicowanej struktury warstw osadów zalegających do 30 metrów pod dnem (maksymalna głębokość, z jakiej otrzymano echo). Analizując osady denne wzdłuż linii brzegowej Hel – Świnoujście, trudno jest znaleźć akwen, na którym będą występowały inne typy osadów aniżeli dno piaszczyste w odległości do 15 nm od brzegu. Na mapie geologicznej dna Bałtyku opracowanej przez Państwowy Instytut Geologiczny w 1992 r. Sz. Uścińowicz i J. Zachowicz zaprezentowali typy osadów znajdujących się na wierzchniej warstwie dna oraz siedem charakterystycznych punktów, w których pobrano rdzenie o maksymalnej głębokości do 5 m. Należy nadmienić, iż trudno zweryfikować niektóre parametry osadów dennych pobieranych przez rdzenie, jak np. rozmiar pęcherzyków gazowych, które podczas zmiany otaczającego je ciśnienia zmieniają swoją objętość.



Rysunek 7-3 Zestawienie rdzeni opracowane przez Państwowy Instytut Geologiczny

Informację związaną z osadami zalegającymi na dnie w wybranych punktach gdzie przeprowadzono pobranie rdzeni zaprezentowano na Rysunku 7-3. Na mapie zaprezentowanej (Rysunek 7-4) wybrano 35 punktów sondażowych na zróżnicowanych pod względem głębokości oraz typu osadów wierzchnich fragmentach akwenu. Niektóre z nich znajdowały się w jednym pliku sondażowym, dlatego na mapie zaznaczono 25 pozycji – żółte kółka o czerwonym konturze. Dla

wszystkich punktów zebrano dane pochodzące zarówno od echosondy wielowiązkowej, jak i parametrycznej, natomiast dla 54% punktów zebrano dane pochodzące z sonaru bocznego. Wiązało się to z dwoma aspektami. Pierwszym był brak możliwości wyzwalania nadajnika sonaru bocznego, tym samym współpracy z pozostałymi układami echolokacyjnymi. Praca w trybie ciągłym przynosiła mocno zniekształcone wyniki ze względu na wpływ impulsów echosondy wielowiązkowej. Drugim aspektem była częstotliwość wynosząca 455 kHz, która umożliwiła pozyskiwanie wyników na głębokości do 35 m w zależności od typu osadu zalegającego na dnie.

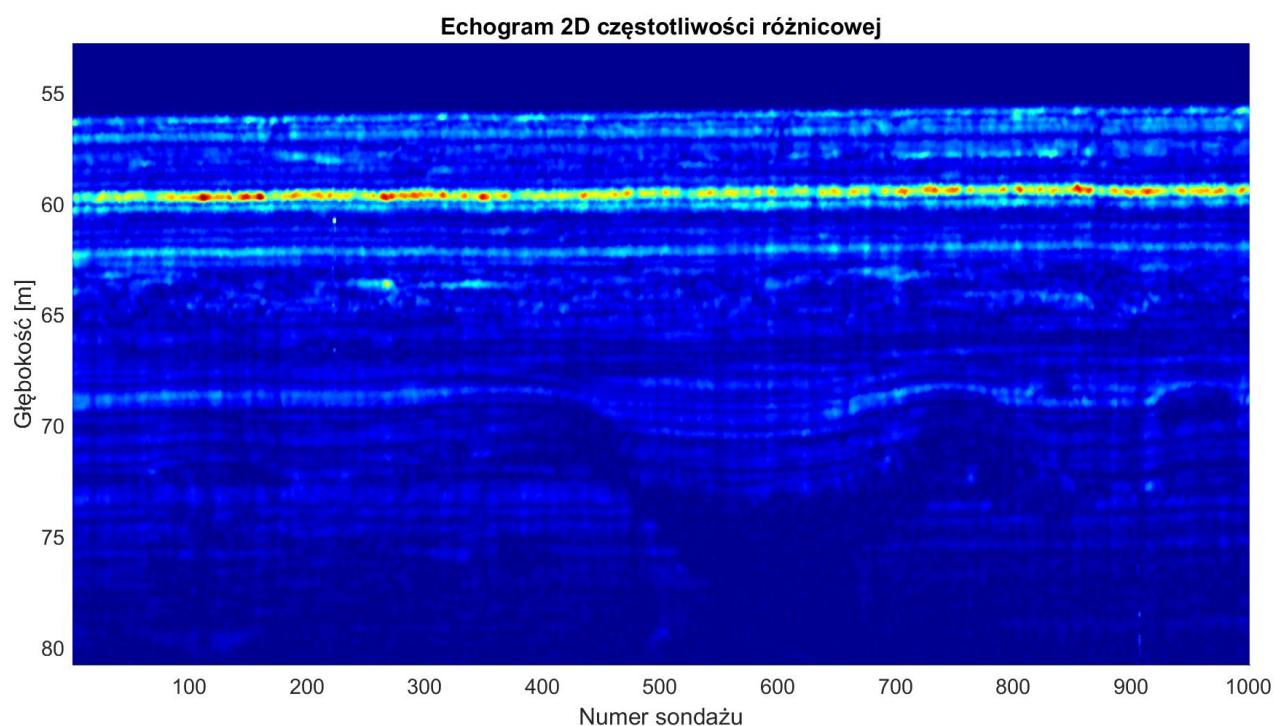


Rysunek 7-4 Mapa obrazująca typy osadów dennych oraz punkty pomiarowe użyte w procesie klasyfikacji

Sparametryzowany zestaw danych został użyty do określenia granic wartości parametrów określających cztery główne grupy osadów powierzchniowych występujących na akwenu pomiarowym. W tym celu użyto podstawowej sieci neuronowej nauczonej metodą wskazywania, które grupy parametrów określają poszczególne grupy wyjściowe – typy osadów.

7.2 Opis metod parametryzacji wyników dla echosondy parametrycznej

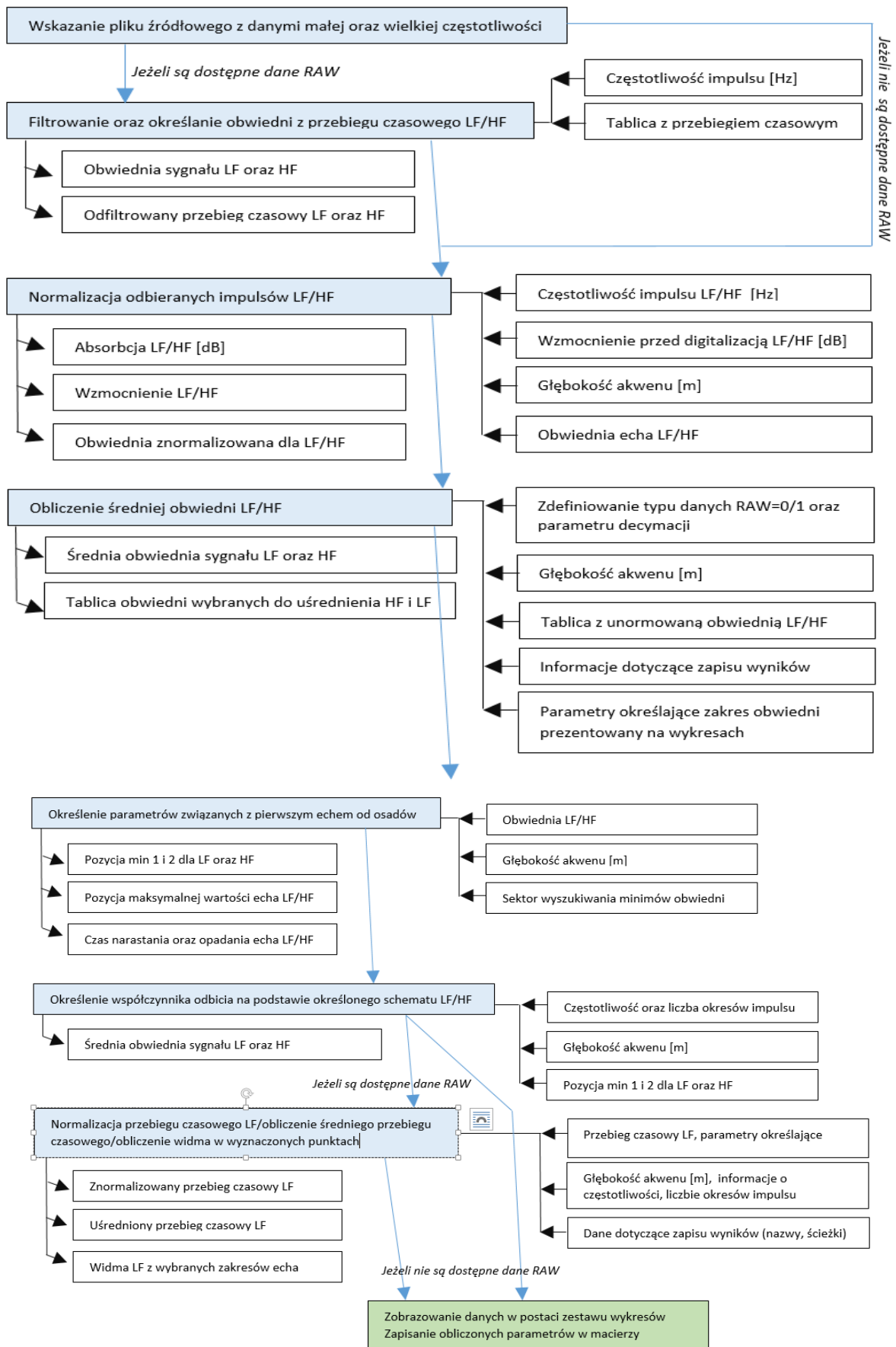
Badania dna echosondą pracującą w oparciu o nieliniowe właściwości wody prowadzone były przy użyciu dwóch modeli: SES–2000 compact oraz SES–2000 standard. Różniły się one głównie trzema parametrami: mocą wypromieniowywanych impulsów pierwotnych, stabilizacją wiązki poddawanej przechyłom poprzecznym oraz możliwością zapisu danych w formie *.RAW. Oznacza to, że oprócz pliku o rozszerzeniu *.SES zawierającego informacje o współrzędnych geograficznych, przechyłach wzdłużnych, poprzecznych oraz przewyższeniach jednostki pomiarowej, głębokości, na jakiej rozpoczyna się i przez jaki czas próbkowany jest sygnał echa oraz obwiedni impulsów o częstotliwości pierwotnej i różnicowej, w oddzielnym pliku zapisywane są pełne przebiegi czasowe wraz z informacją o częstotliwości próbkowania. Posiadając dostęp do tego typu danych, możliwe jest przeprowadzenie parametryzacji wyników z poszczególnych części akwenu pomiarowego, które mogą być dodatkowo poddane metodom przetwarzania i analizy sygnałów, np. filtrowaniu, obliczaniu obwiedni sygnału odfiltrowanego, korelacji pomiędzy czasowym przebiegiem echa a pozycjonowanym w czasie zarejestrowanym podczas badań laboratoryjnych różnicowym impulsem sondującym, obliczenie widma impulsu odbitego od wierzchniej warstwy i analiza jego zmian w zależności od typu osadu.



Rysunek 7-5 Przykładowy echogram zarejestrowany na Zatoce Gdańskiej za pomocą echosondy parametrycznej



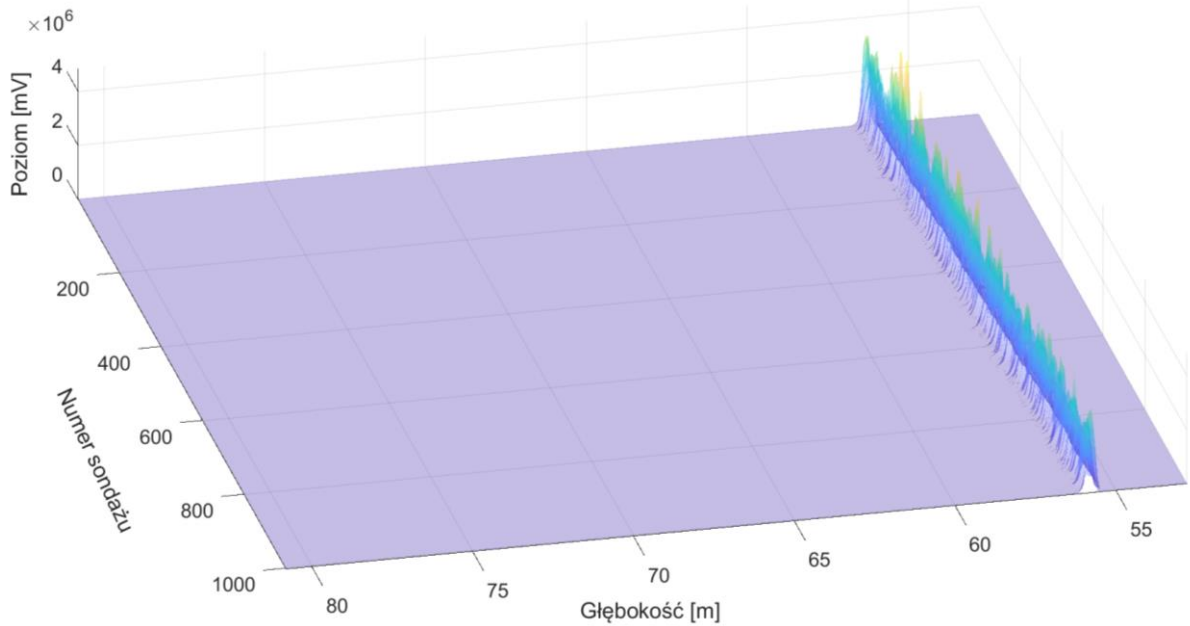
Parametryzacja właściwości impulsów odbitych od wierzchniej warstwy wymagała w pierwszym kroku wyselekcjonowania grupy sygnałów z echogramu (Rysunek 7-5), będących wynikiem nadźwiękawiania, które posiadały zbliżone wyniki, tzn. były w możliwie najmniejszym stopniu poddane wpływowi przechyłów poprzecznych i podłużnych, które pomimo zastosowanych systemów stabilizacji i rejestracji wychyleń anteny podczas sondowania miały bezpośredni wpływ na kąt, pod jakim impuls padał na dno, a co się z tym wiąże – na kształt oraz amplitudę impulsu odbitego. Najlepsze warunki pomiarowe są przy stanie morza 0 w skali Beauforta, na możliwie płaskim dnie akwenu. Podsumowując, należy odnotować, że podczas określania średniej obwiedni lub przebiegu czasowego używano 100 sygnałów, z których wybrano 10 zbliżonych kształtem oraz poziomem. W przypadku danych z pliku o rozszerzeniu *.SES użyto gotowych obwiedni, podczas gdy dostępne były pełne przebiegi czasowe (pliku o rozszerzeniu *.RAW) stosowano algorytmy filtrujące i obliczające obwiednię w przygotowanym kodzie programu parametryzującego. Schemat pracy algorytmu zaprezentowano na Rysunku 7-6. Dane wejściowe dla 35 punktów pomiarowych używanych podczas pracy opracowanego programu parametryzującego zostały opracowane za pomocą oprogramowania dostarczonego wraz z echosondą parametryczną o nazwie Interactive Sediment Layer Editor ISE v. 2.9.5. Wybrano interesujące fragmenty echogramów, które następnie zostały wyeksportowane do plików kompatybilnych z oprogramowaniem parametryzującym. Dodatkowo każdy punkt posiadał plik z danymi określającymi nastawy parametrów pracy echosondy, jak np. liczba okresów, częstotliwość impulsu różnicowego, wzmocnienie przed poddaniem sygnału, próbkowanie zarówno dla małej, jak i wielkiej częstotliwości, głębokość dna oraz parametr określający, na jakiej głębokości rozpoczęto próbkowanie i ile czasu trwał dany proces. Przygotowane w ten sposób wyniki poddano parametryzacji, która ze względu na różnorodność kształtów obwiedni nie mogła być w pełni automatyczna, dlatego zastosowano pewne parametry wejściowe, jak np. poziomy oraz zakresy, w jakich algorytm powinien wyszukiwać punkty umożliwiające określenie czasu narastania oraz opadania obwiedni impulsu odbitego od wierzchniej warstwy osadów, która nie we wszystkich przypadkach była w oczywisty sposób rozróżnialna względem kolejnej równoległej struktury geologicznej. Analiza 35 charakterystycznych punktów pomiarowych potwierdziła złożoność problemu automatycznej klasyfikacji z uwagi na niejednorodność wyników i ich złożoną strukturę nawet w przypadku zadania, jakim jest analiza echa od wierzchniej warstwy osadów.



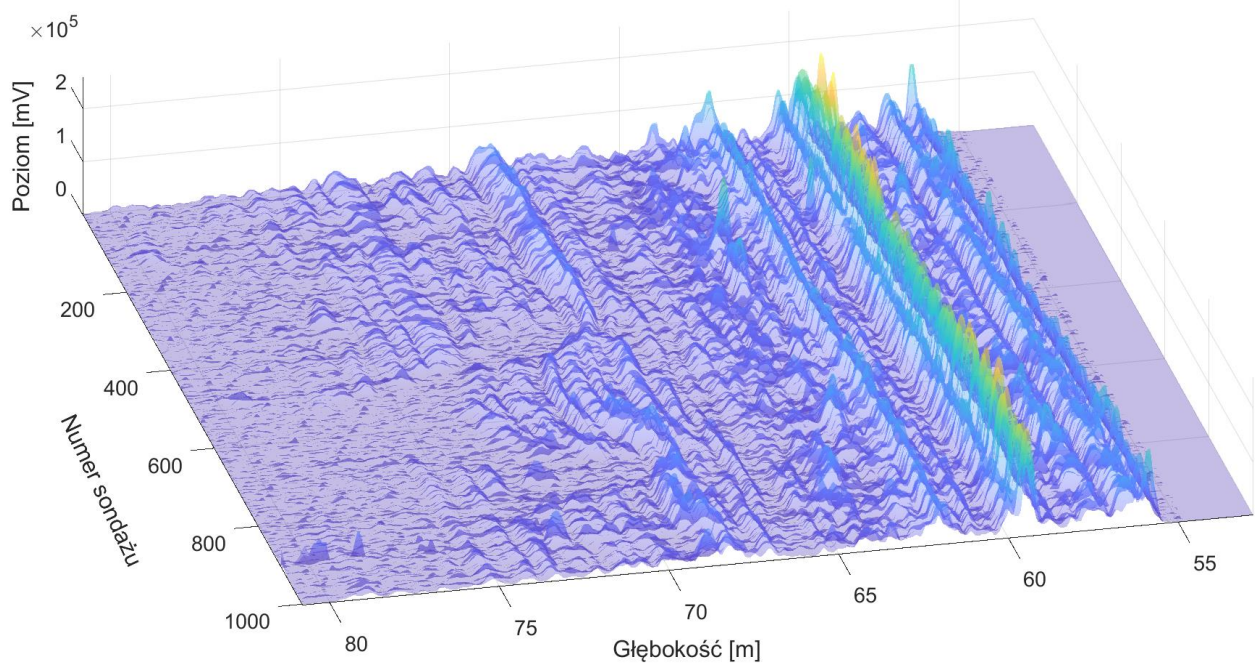
Rysunek 7-6 Schemat algorytmu parametryzacji danych od echosondy parametrycznej

Na Rysunku 7-7 zaprezentowano wyniki sondowania punktu numer 1. Po lewej stronie widać dane pochodzące od impulsów sondujących wielkiej częstotliwości, gdzie charakterystyczne jest echo od wierzchniej warstwy bez charakterystycznej dla impulsów o małej częstotliwości penetracji warstw struktury geologicznej. Wyraźnie zaznaczają się zmiany w poziomie echa wymuszające wyselekcjonowanie 10 impulsów o zbliżonym kształcie i poziomie.

Echogram 3D częstotliwości pierwotnej (HF)

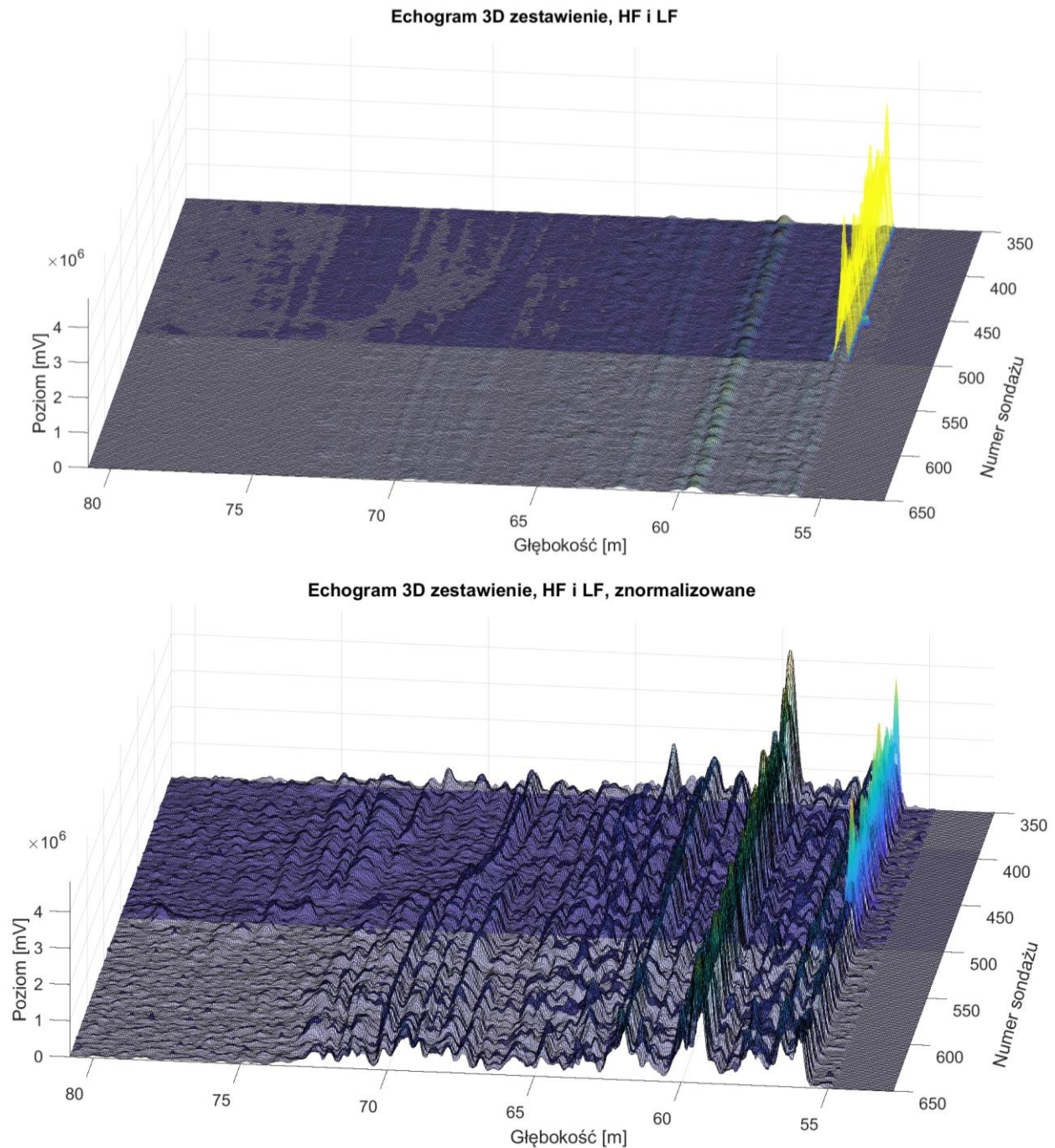


Echogram 3D częstotliwości różnicowej (LF)



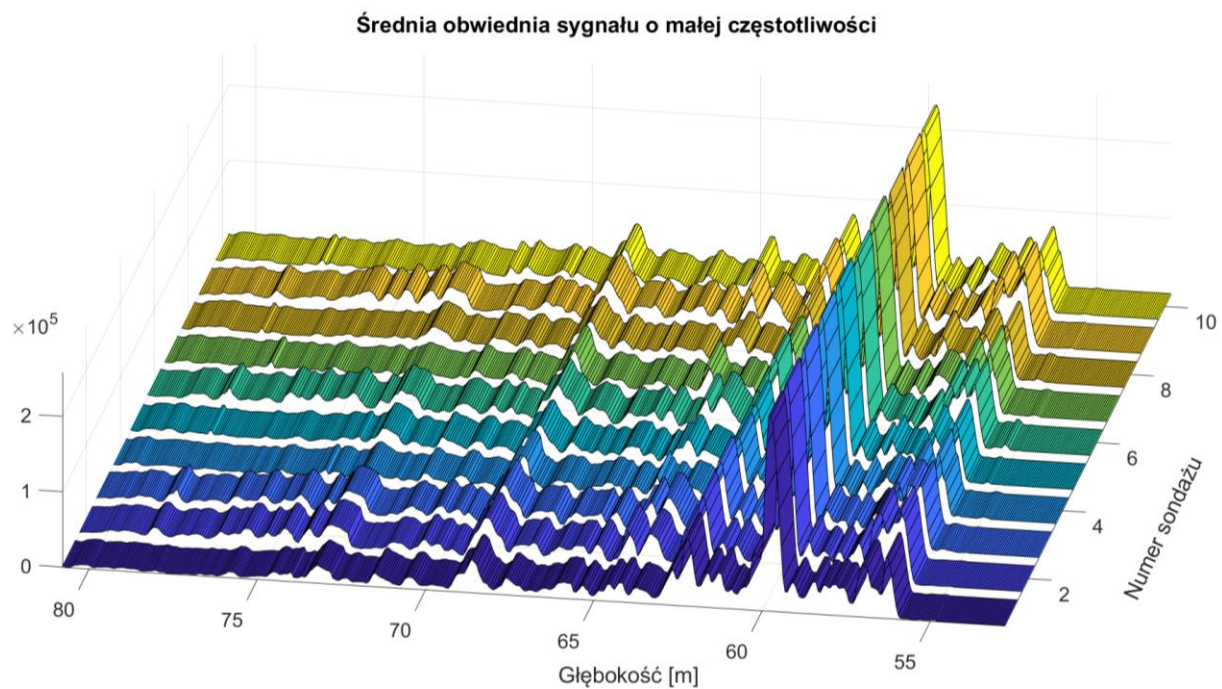
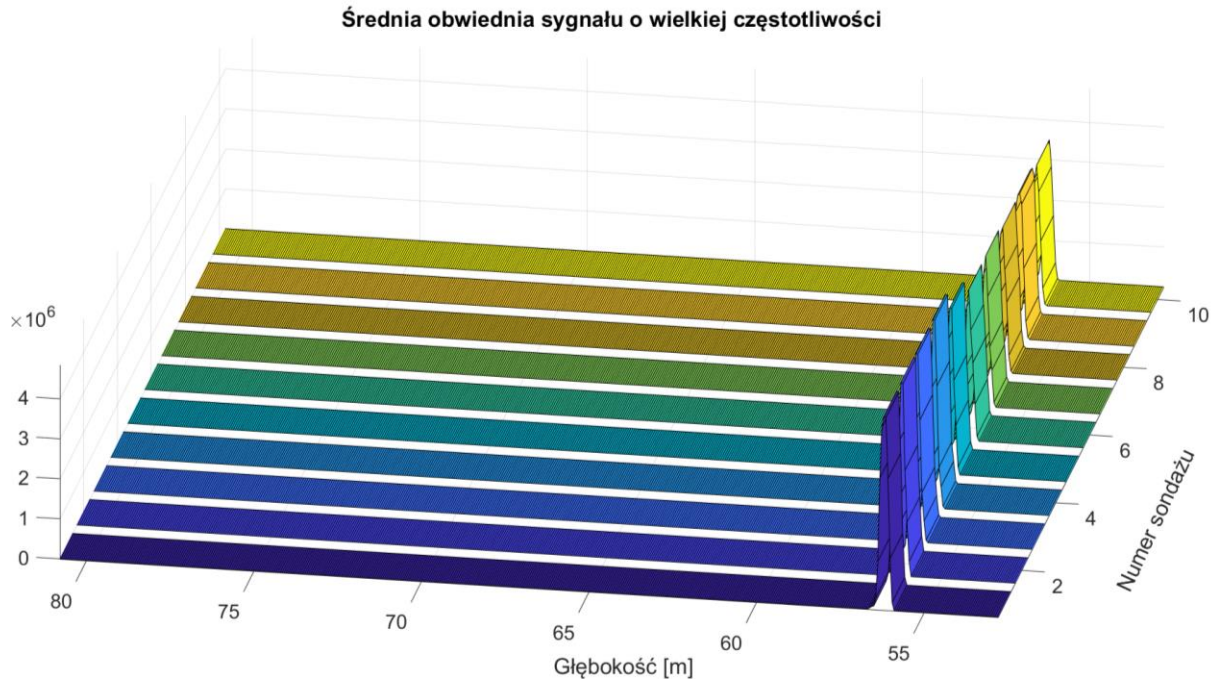
Rysunek 7-7 Wyniki sondowania impulsami wielkiej częstotliwości (górny wykres) i impulsami małej częstotliwości (dolny wykres) dla punktu pomiarowego numer 1 wybranego z mapy

Wybór dokonywany był ze stu impulsów dla każdego z 35 punktów pomiarowych. Na Rysunku 7-8 zaprezentowano porównanie poprzez narysowanie na jednym echogramie danych od impulsów HF – wielkiej częstotliwości oraz LF – małej częstotliwości.



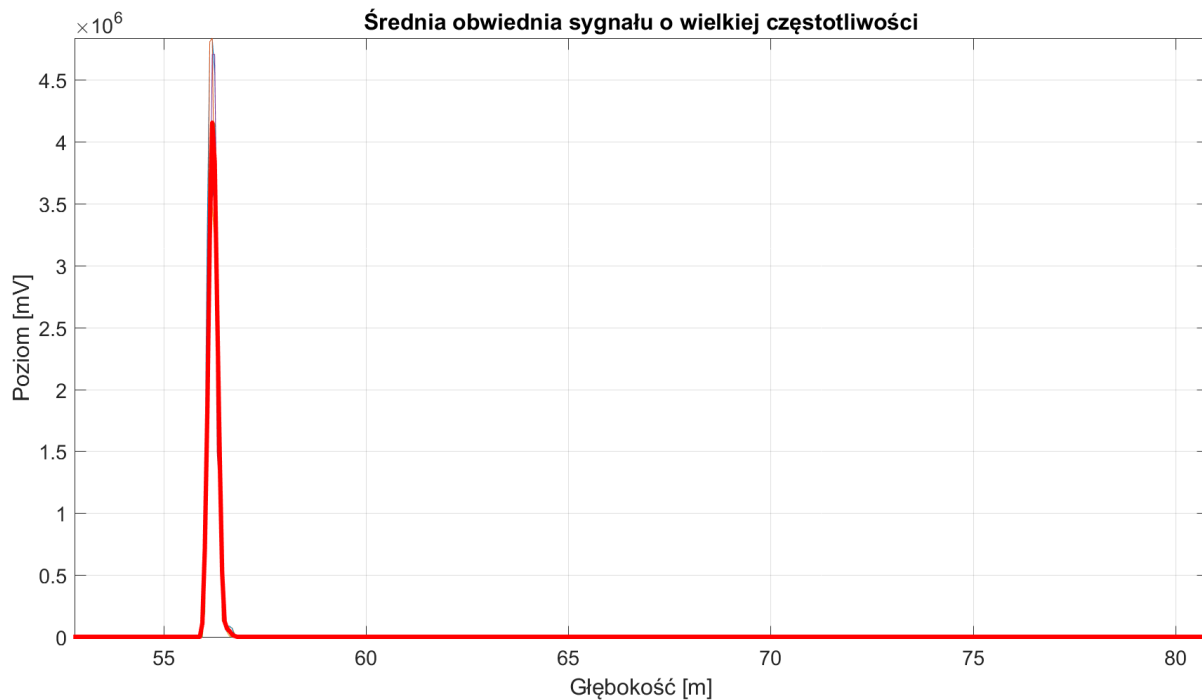
Rysunek 7-8 Echogram 100 punktów sondażowych dla HF i LF przed (górnny wykres) oraz po (dolny wykres) normalizacji

Po wyborze 10 punktów sondażowych algorytm wyrównywał punkty rozpoczynające narastanie obwiedni świadczące o wykryciu dna, dzięki czemu możliwe było uzyskanie czystego kształtu uśrednionych obwiedni Rysunek 7-9.

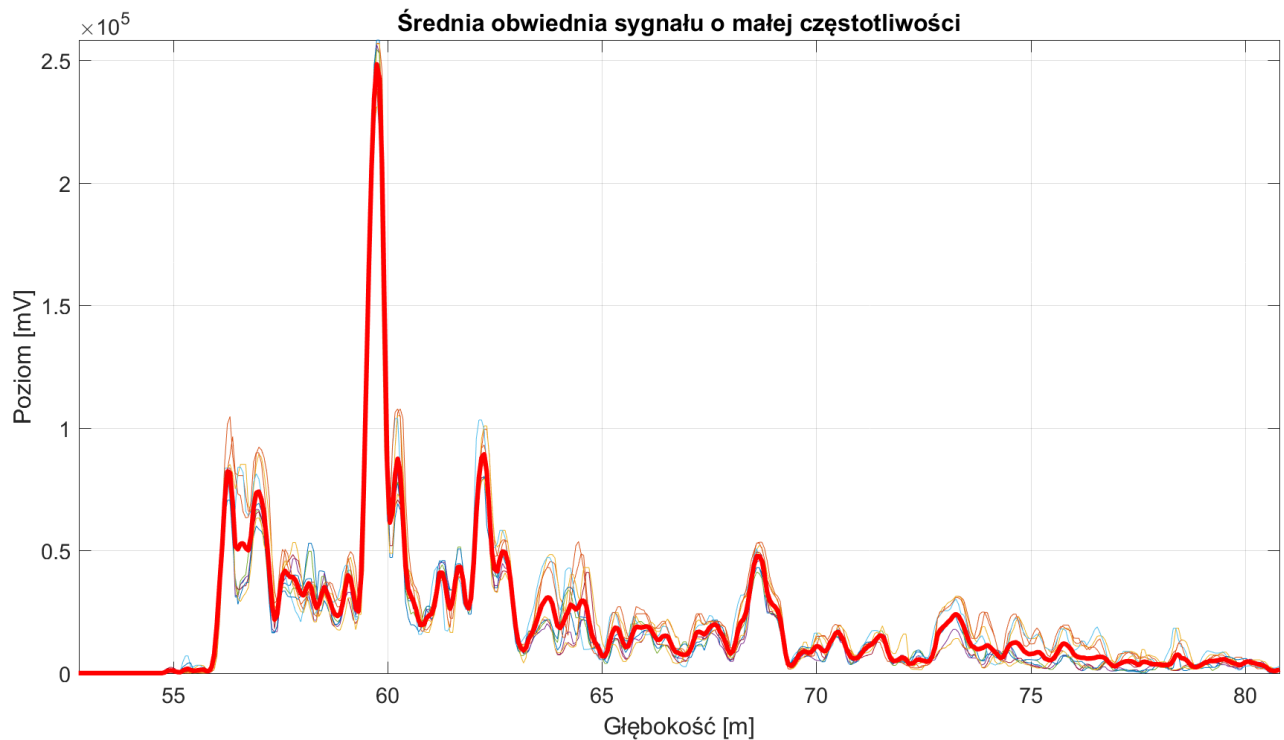


Rysunek 7-9 Echogram wielkiej (górny wykres) oraz małej (dolny wykres) częstotliwości dla 10 wybranych sondowań

W przypadku impulsów małej częstotliwości średnia obwiednia jest skorelowana ze składowymi wytypowanymi do uśredniania pod względem kształtu Rysunek 7-11. W przypadku impulsów wielkiej częstotliwości można zauważyć równą szerokość podstawy obwiedni, natomiast na odległości 50 cm w niektórych przypadkach pojawiają się w różnych punktach szczytowe wartości obwiedni Rysunek 7-10. Efekt ten jest związany z charakterystyką impulsu sondującego. Możliwe byłoby wyeliminowanie tego efektu poprzez ustawienie impulsów względem maksymalnego punktu obwiedni, jednak wpłynęłoby to na szerokość podstawy obwiedni, co skutkowałoby błędną parametryzacją czasów narastania oraz opadania charakterystyczną dla badania impulsu padającego pod kątem względem dna oraz występowaniem na danym obszarze osadu o niskiej impedancji akustycznej. W danym przypadku byłoby to błędną interpretacją materiału zalegającego na dnie.

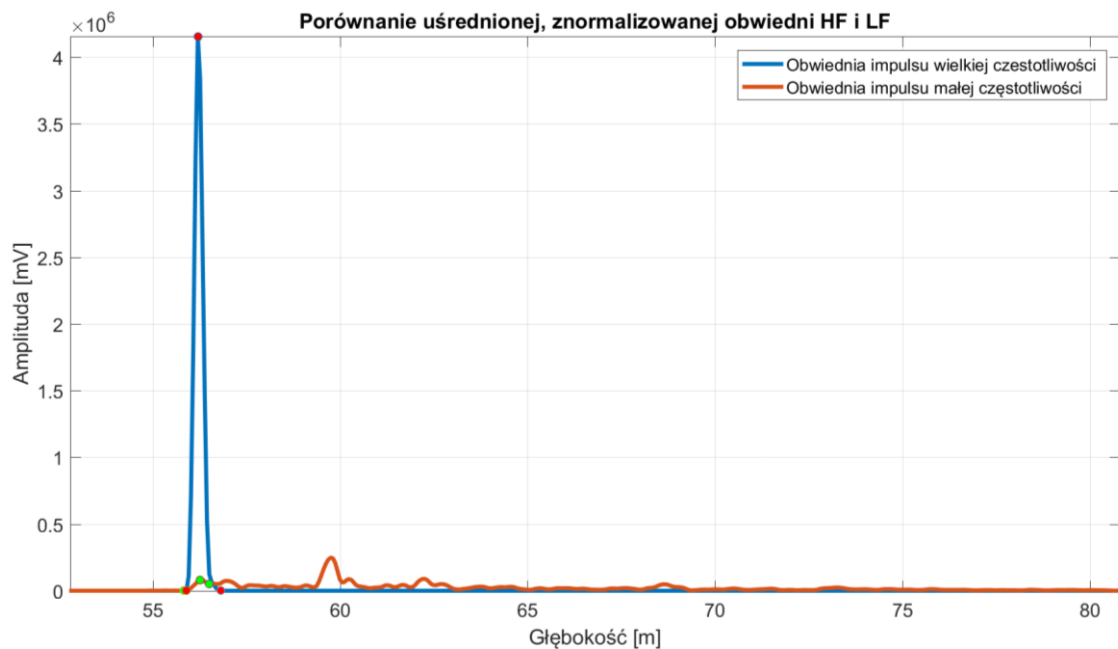


Rysunek 7-10 Uśredniona obwiednia dla impulsów wielkiej częstotliwości



Rysunek 7-3 Uśredniona obwiednia dla impulsów małej częstotliwości

Zaprezentowana sytuacja wymagała w przypadku automatycznego określania punktów minimum, obwiedni HF, do wyznaczenia czasów narastania oraz opadania zastosowania ręcznie dobieranych parametrów.



Rysunek 7-4 Obwiednie małej oraz wielkiej częstotliwości z zaznaczonymi charakterystycznymi punktami (czas narastania oraz opadania obwiedni impulsu sondującego wielkiej oraz małej częstotliwości wyznaczany jest pomiędzy charakterystycznymi punktami)

Końcowym wynikiem działania programu jest zaprezentowanie wykresów obrazujących wyniki analizy (przedstawionych dla punktu 1 z mapy na Rysunku 7-4) oraz zapisanie wszystkich parametrów w macierzy zawierającej pola opisane w Tabeli 7-1.

Tabela 7-1 Zestawienie danych będących wynikiem parametryzacji sygnałów echosondy parametrycznej

| Nazwa parametru | Opis |
|---------------------------------|--|
| Numer sondażu | Numer określający, z jakiej części akwenu pochodzą dane |
| Częstotliwość [kHz] | Częstotliwość impulsu różnicowego |
| Liczba impulsów | Liczba okresów impulsu różnicowego |
| Głębokość dna odczytana ręcznie | Zdefiniowana głębokość akwenu pomiarowego |
| Głębokość dna obliczona | Głębokość określona na podstawie odbicia impulsu HF |
| Obszar nadźwiękawiany FP | Określenie powierzchni dna poddanej nadźwiękawianiu obliczonej na podstawie pomierzonych charakterystyk kierunkowych na basenie pomiarowym |
| Czas narastania obwiedni HF | Wyznaczony czas narastania obwiedni echa od pierwszej warstwy osadów dennych dla HF |
| Czas narastania obwiedni LF | Wyznaczony czas narastania obwiedni echa od pierwszej warstwy osadów dennych dla LF |
| Czas opadania obwiedni HF | Wyznaczony czas opadania obwiedni echa od pierwszej warstwy osadów dennych dla HF |
| Czas opadania obwiedni LF | Wyznaczony czas opadania obwiedni echa od pierwszej warstwy osadów dennych dla LF |
| Maksymalna amplituda HF | Określenie maksymalnej amplitudy echa od pierwszej warstwy dla HF |
| Maksymalna amplituda LF | Określenie maksymalnej amplitudy echa od pierwszej warstwy dla LF |
| Pełna obwiednia LF | Macierz zawierająca pełną obwiednię sygnału małej częstotliwości |
| Pełna obwiednia HF | Macierz zawierająca pełną obwiednię sygnału wielkiej częstotliwości |
| Macierz głębokości | Obliczona macierz punktów głębokości przyporządkowująca poszczególnym próbkom obwiedni/przebiegu czasowego wartość głębokości |
| Punkt min 1 LF | |

| | |
|-------------------------|---|
| Punkt min 1 HF | Minimum obwiedni impulsu odbitego od pierwszej warstwy osadów – wyznaczane dla LF i HF – od strony ośrodka płynnego |
| Punkt min 2 LF | Minimum obwiedni impulsu odbitego od pierwszej warstwy osadów – wyznaczane dla LF i HF – od strony osadów |
| Punkt min 2 HF | |
| Punkt max HF | Pozycja maksymalnej wartości amplitudy – wyznaczona dla LF i HF |
| Punkt max LF | |
| Współczynnik odbicia HF | Zdefiniowany współczynnik odbicia obliczany na podstawie stosunku parametrów impulsu odbitego (długość/natężenie) do impulsu wypromieniowywanego z przetwornika – LF i HF |
| Współczynnik odbicia LF | |

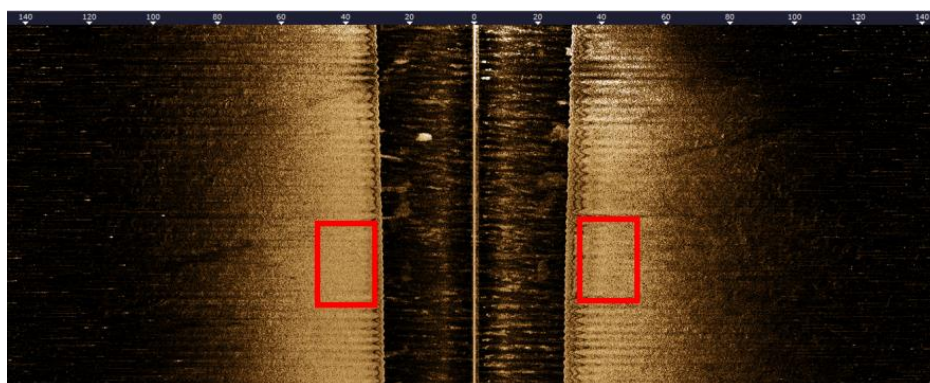
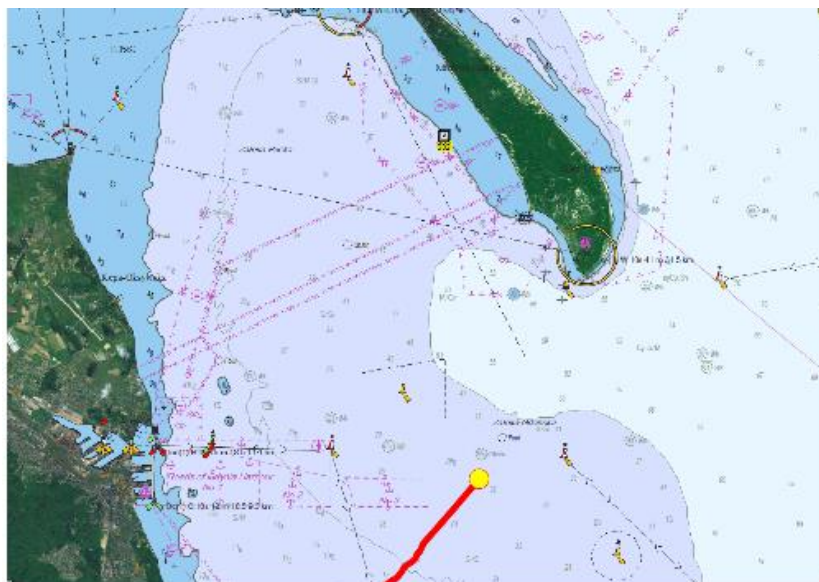
Dodatkowe parametry dla przypadku, kiedy dostępne są pełne przebiegi czasowe impulsów sondujących opisane zostały w Tabeli 7-2.

Tabela 7-2 Zestawienie danych od echosondy parametrycznej SES–2000 standard

| Nazwa parametru | Opis |
|---------------------|---|
| FFT_LF_pojedyncze | Macierz zawierająca widma obliczone dla obszaru pomiędzy punktami min 1 i min 2 |
| FFT_LF_zestaw | Macierz zawierająca zestaw widm obliczonych dla różnych głębokości w celu określenia wpływu typu osadu na zmianę kształtu widma |
| f | Liczba okresów impulsu różnicowego |
| FFT_LF_powierzchnia | Obliczony parametr powierzchni pod widmem znormalizowanego sygnału echa |

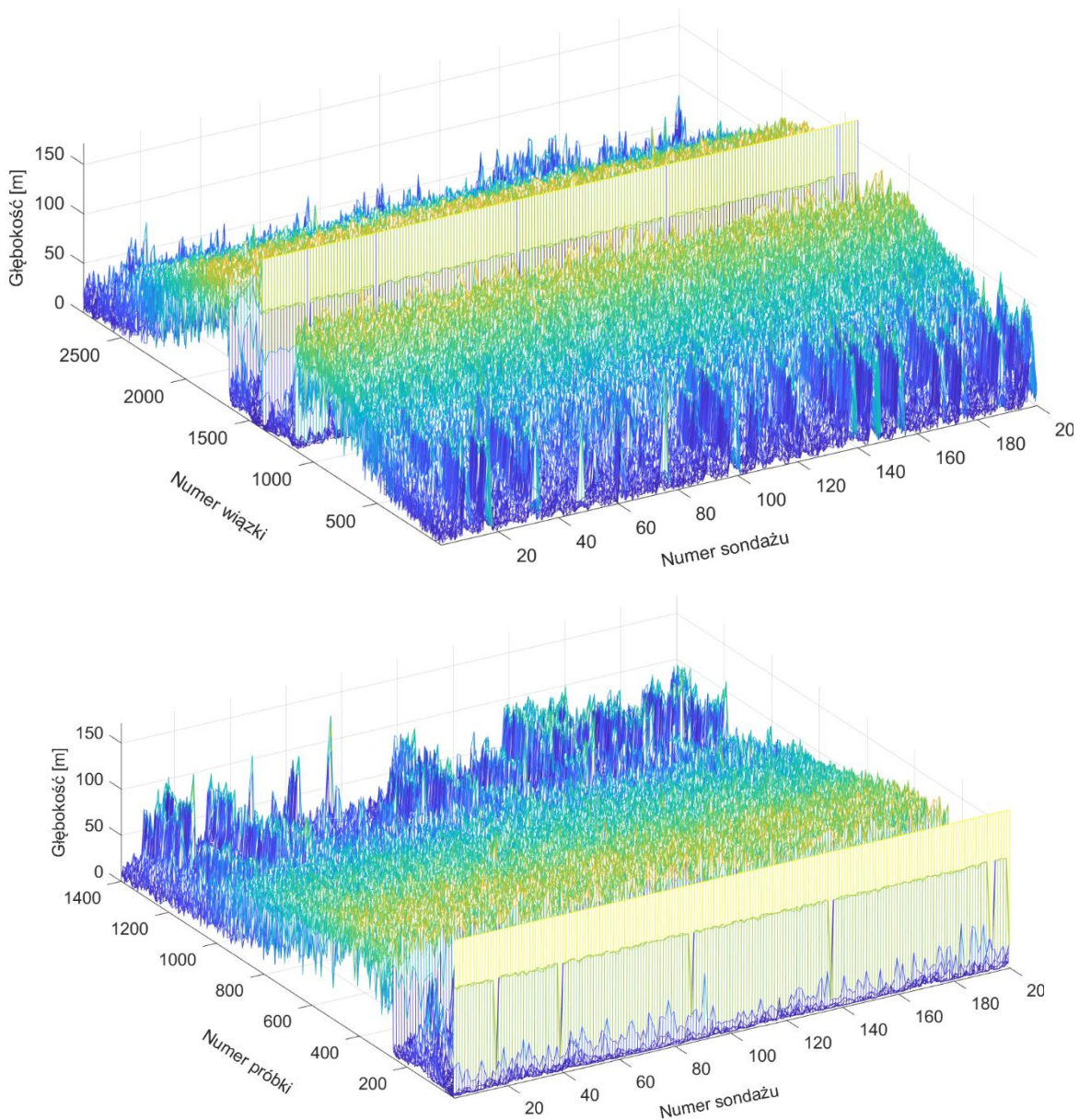
7.3 Opis metod parametryzacji wyników dla sonaru bocznego

Ze względu na dużą częstotliwość impulsów sondujących (455 kHz) możliwe było pozyskiwanie danych do głębokości 40 m, co uniemożliwiło zebranie wyników ze wszystkich punktów akwenu pomiarowego sięgającego maksymalnie 94 m. Przygotowane oprogramowanie umożliwiło konwersję plików zapisanych w ogólnoświatowym formacie o rozszerzeniu *.xtf do oprogramowania napisanego na potrzeby klasyfikacji osadów. Pozyskano dane, tj. numer impulsu, współrzędne geograficzne przypisane do wyniku, maksymalna odległość pomiędzy przetwornikiem a skrajnym punktem na zobrażowaniu tzw. Slant Range, głębokość oraz echo wypromieniowanego impulsu. Ze względu na brak zapisywanej informacji o wzmacnieniu impulsu odbieranego, podczas pomiarów funkcja ta została ustawiona w tryb ręczny, a wartości były zapisywane dla poszczególnych punktów pomiarowych.



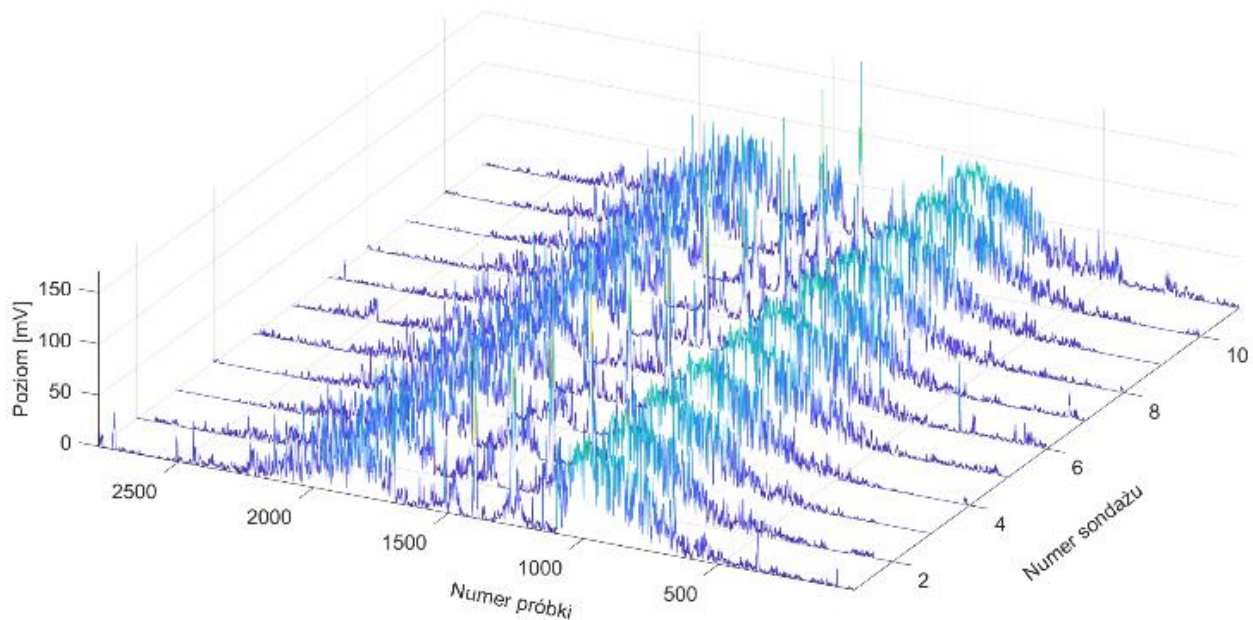
Rysunek 7-5 Mapa akwenu pomiarowego z trasą jednostki oraz zaznaczonym punktem użytymi do klasyfikacji (górny obraz) oraz zobrażowanie dna przez sonar boczny, z zaznaczonymi fragmentami użytymi w procesie analizy (dolny obraz)

Na Rysunku 7-13 przedstawiono mapę akwenu pomiarowego z naniesionym torem sondażu oraz w dolnej części zobrazenie analizowanego fragmentu. Wraz ze zwiększeniem kąta, pod jakim pada wiązka, w zależności od typu dna coraz większy wpływ na amplitudę impulsu odbitego ma rozpraszanie na nierównościach oraz rozpraszanie objętościowe. Z tego powodu skupiono się na analizie średniego natężenia impulsu odbitego z obszaru zaznaczonego kolorem czerwonym, który odpowiada stu impulsom sondującym. Zaprezentowano zobrazenie trójwymiarowe poszczególnych punktów sondażowych (Rysunek 7-14). W celu wyboru impulsów do uśredniania, zastosowany został algorytm wybierający spośród zestawu danych dziesięć ech, które są do siebie najbardziej zbliżone.



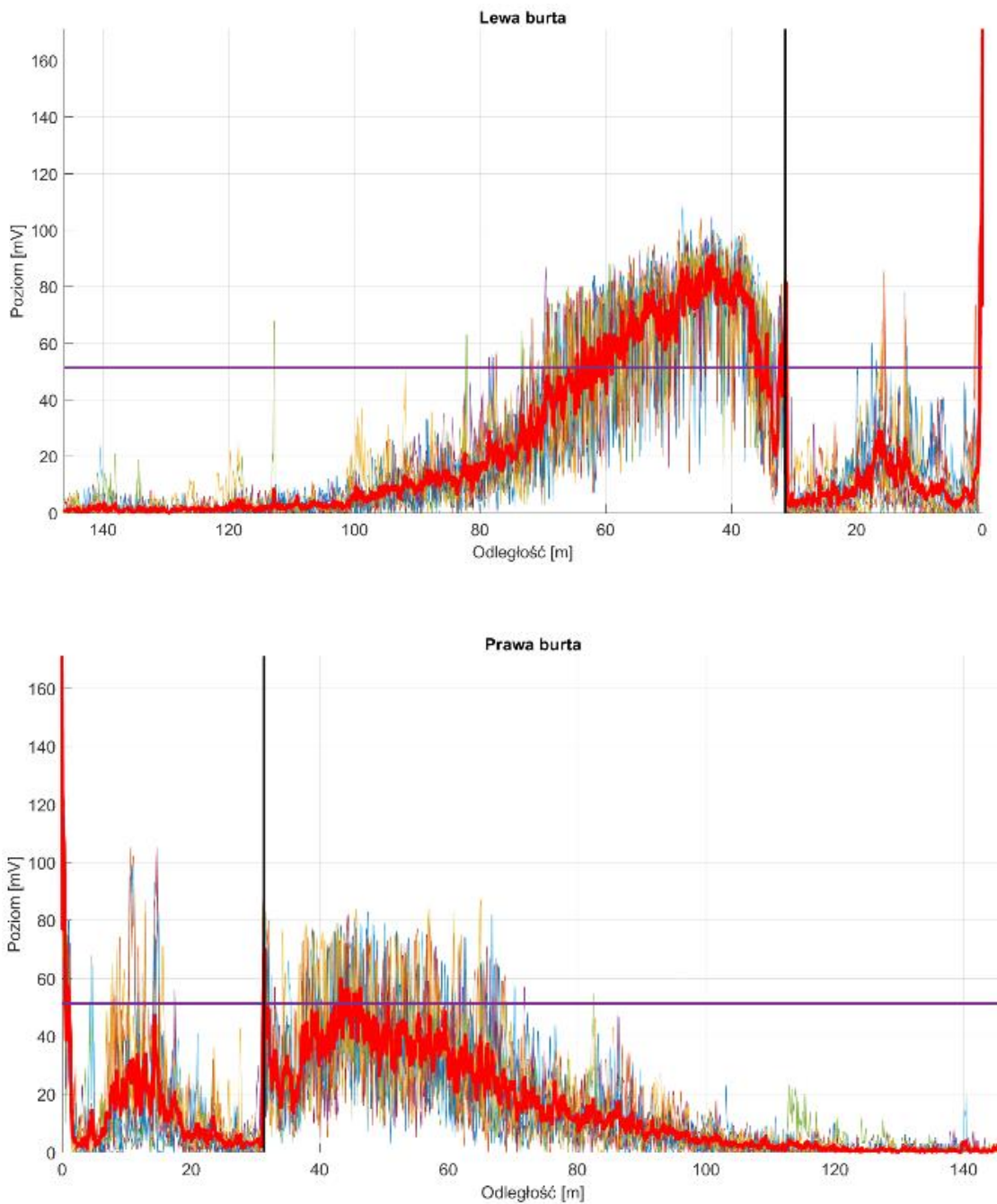
Rysunek 7-6 Zobrazenie wybranego fragmentu do klasyfikacji (górny wykres) oraz wyników z prawej burty (dolny wykres)

Na Rysunku 7.15 zostały przedstawione wartości natężenia impulsu odbitego dla wyselekcjonowanych dziesięciu najbardziej zbliżonych od siebie wyników echa impulsu sondującego.



Rysunek 7-7 Zobrazowanie wyselekcjonowanych dziesięciu najbardziej zbliżonych od siebie wyników echa impulsu sondującego

Określenie wartości średniej odbywa się w każdym przypadku na takiej samej powierzchni nadźwiękawianej. Jest to możliwe na podstawie współrzędnych geograficznych przypisanych do impulsów oraz znanej częstotliwości próbkowania, prędkości dźwięku i głębokości akwenu, co umożliwia wybór odpowiedniej liczby próbek.



Rysunek 7-8 Wyznaczanie średniej wartości natężenia dla wyselekcjonowanych ech

Wynikiem zapisywanym do macierzy danych w celu dalszej analizy oraz przeprowadzenia procesu klasyfikacji z udziałem sieci neuronowych są parametry opisane w Tabeli 7-3.

Tabela 7-3 Spis parametrów zapisywanych w wyniku parametryzacji danych od sonaru bocznego

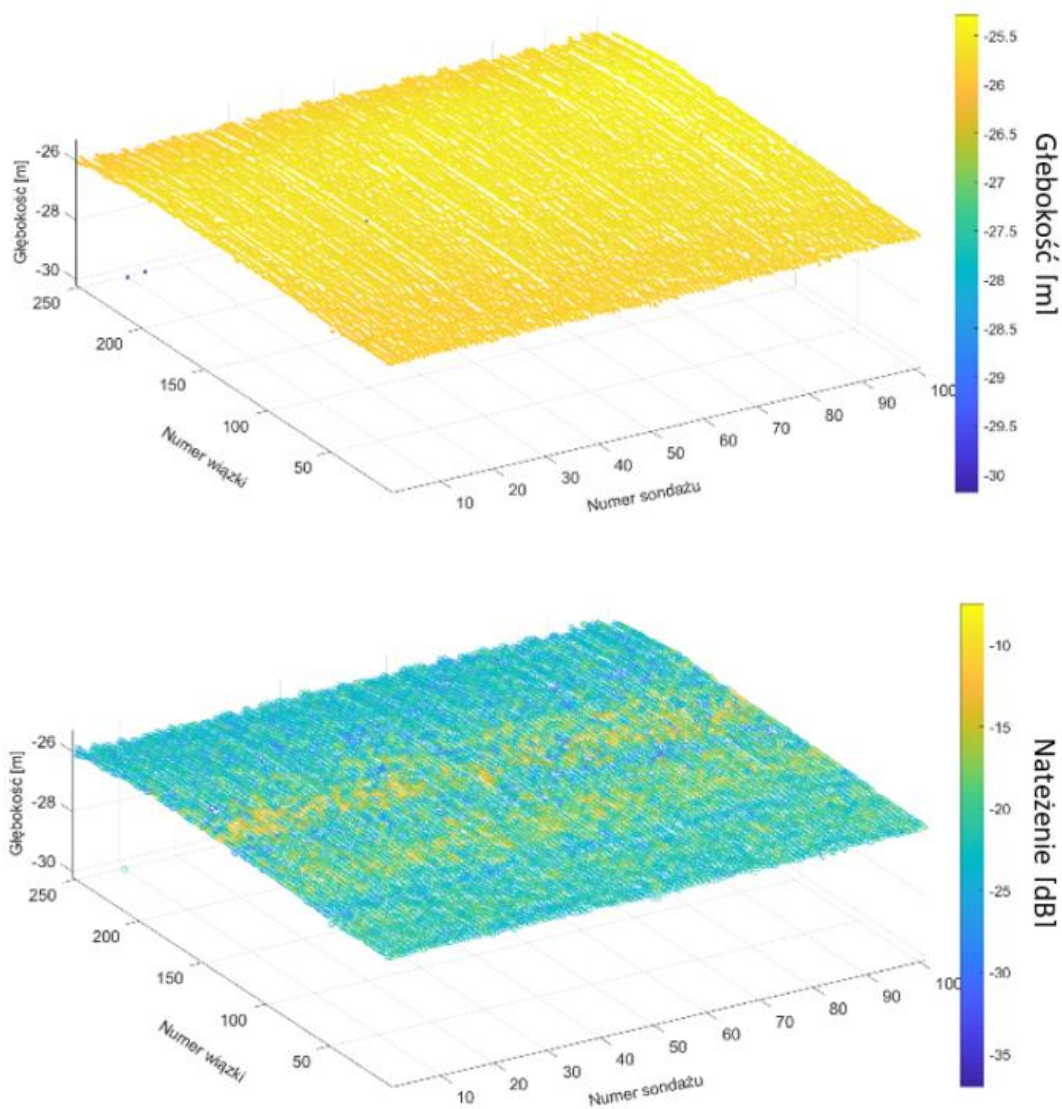
| Nazwa parametru | Opis |
|---|---|
| Numer sondażu | Numer porządkowy punktu sondażowego akwenu |
| Średnia głębokość prawa burta | Obliczona na podstawie echa średnia głębokość akwenu |
| Średnia głębokość lewa burta | |
| Średnia siła odbicia prawa burta normalizacja | Znormalizowane natężenie echa obliczone dla wskazanego obszaru impulsów odbitych od dna |
| Średnia siła odbicia lewa burta normalizacja | |
| Latitude | Współrzędne geograficzne do naszkicowania śladu na mapie |
| Longitude | |
| Średnia siła odbicia prawa burta | Siła odbicia bez uwzględnienia procedury normalizacji impulsu odbitego |
| Średnia siła odbicia lewa burta | |

7.4 Opis metod parametryzacji wyników dla echosondy wielowiązkowej

Dane otrzymywane z echosondy wielowiązkowej stanowiły najbardziej skomplikowany pod względem przetwarzania system oceny natężenia impulsu odbitego. Z punktu widzenia naukowca, dla którego istotna jest informacja o właściwościach akustycznych osadów nadźwiękawianych impulsami o częstotliwości 300 kHz zadanie to związane jest głównie z:

- Weryfikacją nastaw układu podczas prowadzonych badań w warunkach rzeczywistych;
- Usunięciem impulsów zawierających błędne dane;
- Oceną impulsów na podstawie parametru, jakim jest współczynnik jakości (*quality factor*).

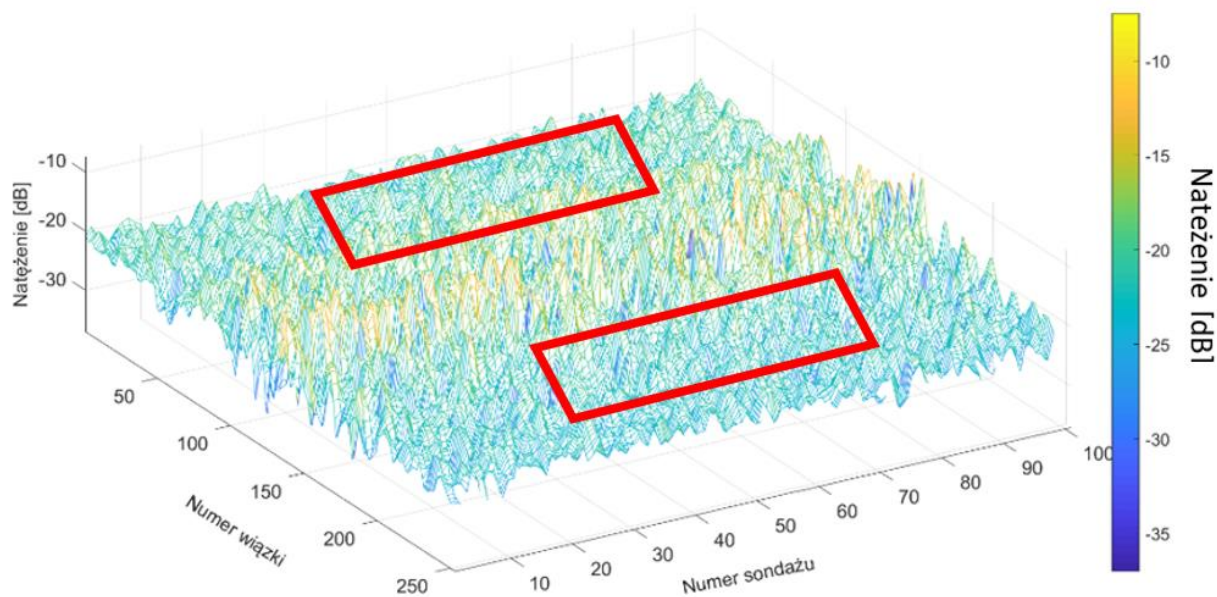
Uwzględniając powyższe czynności, możliwe jest wyselekcjonowanie i wyeksportowanie danych, z których w bezpośredni sposób można odczytać średnie natężenie dźwięku. Firma Kongsberg udostępnia specyfikację plików, w których zapisywane są dane. Umożliwia to dogłębną analizę oraz próby tworzenia nowych sposobów zarówno wizualizacji danych, jak i ich parametryzacji. Na Rysunku 7-17 zaprezentowano po lewej stronie typową informację batymetryczną, jaka może być użyta np. do tworzenia mapy nawigacyjnej. Kolor jasnożółty odpowiada głębokości 20,5 m. Zobrazowanie po prawej stronie prezentuje naniesioną na strukturę batymetryczną informację o natężeniu impulsu sondującego poprzez związany z wartością kolor.



Rysunek 7-9 Zobrazowanie batymetryczne (górny wykres) oraz zobrazowanie batymetryczne rozszerzone - informacja o natężeniu impulsu odbitego

Natężeniu impulsów odbitych w pobliżu normalnej towarzyszy zwiększenie wartości, co jest związane z odbiciem lustrzanym. Do procesu parametryzacji zostały wyselekcjonowane wartości echa zawarte w obszarze ograniczonym kątami padania 15 i 50 stopni. Określenie średniej wartości natężenia z danego nadźwiękowanego obszaru zapewniło otrzymanie najbardziej rzeczywistego wyniku. Na Rysunku 7-18 zaprezentowano ~~wynik~~ wartości natężeń sygnałów odebranych z akwenu, dla którego określano średnią wartość do parametryzacji. Kolorem czerwonym zaznaczono obszary, z których impulsy zostały uśrednione.





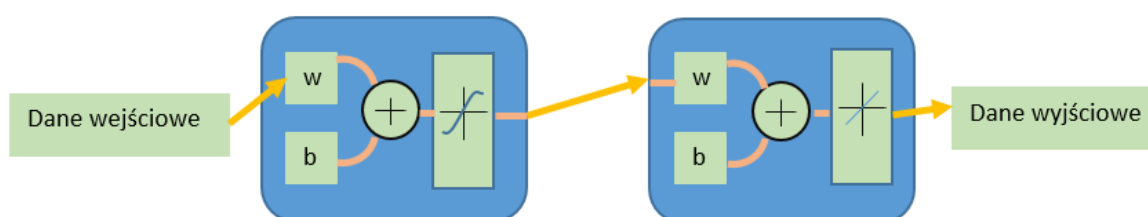
Rysunek 7-10 Wartości zapisywane w procesie parametryzacji oraz importowania danych z pliku echosondy wielowiązkowej

Tabela 7-4 Zestawienie danych będących wynikiem parametryzacji sygnałów echosondy wielowiązkowej

| Nazwa parametru | Opis |
|----------------------|---|
| Numer sondażu | Numer sondażu |
| Średnia głębokość | Średnia głębokość na wybranym fragmencie |
| Średnia siła odbicia | Określone średnie natężenie impulsu odbitego od wyznaczonego, nadźwiękawianego akwenu |
| Height | Głębokość w poszczególnych punktach zobrazowania |
| Intensity | Natężenie w poszczególnych punktach |
| Beam_ID | Numer wiązki z procesu beamformingu (odpowiada kątowi, z jakiego analizowany jest dany sygnał) |
| Quality | |
| Beam_Angle | Kąt, do jakiego należy przypisać wynik |
| Tilt | Przechył jednostki podczas pomiaru |
| Range | Zakres sondowanego obszaru (głębokość, zasięg sondowania odczytywany zarówno z lewej, jak i z prawej burty) |

7.5 Wyniki klasyfikacji

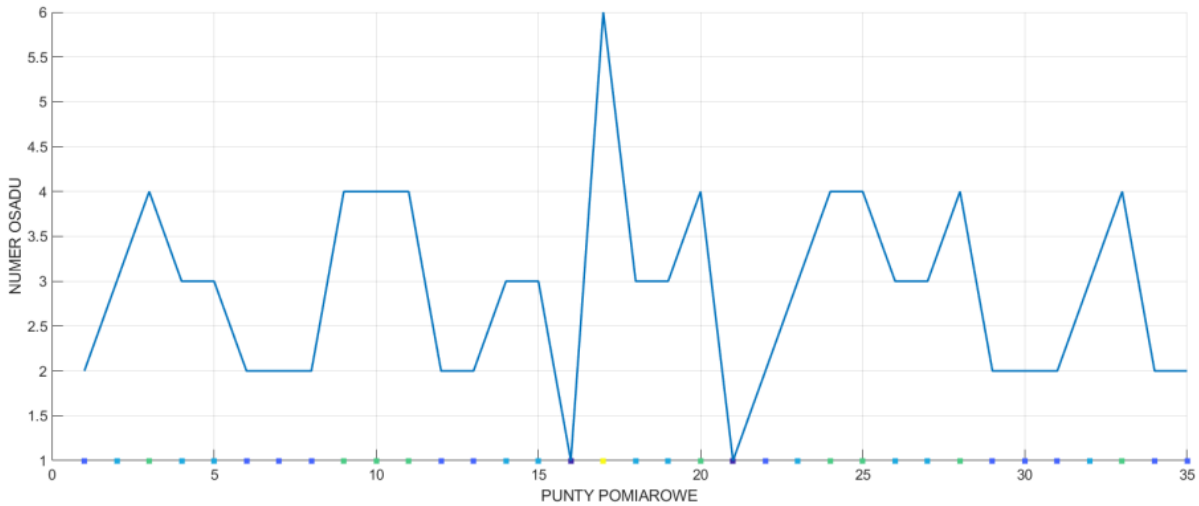
Zestawienie danych w macierzy parametryzującej sygnały z wybranych trzydziestu pięciu punktów Zatoki Gdańskiej i południowego Bałtyku w sposób przejrzysty definiują trzy główne typy osadów zalegających na badanym akwenu. Różne metody umożliwiają zwizualizowanie wyników parametryzacji. Na potrzeby niniejszych badań przeprowadzony został test w oparciu podstawowe o sieci neuronowe, w których dla rozwiązania problemu wykonana zostaje nauka sieci, tzn. do zadanych parametrów przypisany zostaje typ osadu dennego. Następnie podjęta została próba z podaniem sieci jako danych wejściowych parametrów z punktów pomiarowych oddalonych o 160–300 metrów od punktów używanych do nauki. Ten przypadek wpisuje się w problematykę sieci neuronowych, które doskonale sprawdzają się w razie konieczności rozwiązywania problemów, gdy należy określić funkcję dopasowania. Sieć neuronowa z wystarczającą liczbą neuronów może zmieścić wszelkie dane z dowolną dokładnością Rysunek 7-19. Szczególnie dobrze nadaje się do rozwiązywania problemów nieliniowych. W danym przypadku jedenaście parametrów (czasy narastania i opadania zbrocza, natężenie impulsów, długość echa w porównaniu z impulsem padającym) zapisanych w macierzach integrujących sparametryzowane dane będzie pełniło rolę danych wejściowych sieci neuronowej, natomiast celem będzie przyporządkowanie ich jednemu z czterech typów osadu. Pierwszym krokiem w przygotowaniu programu była organizacja dwóch macierzy zawierających macierz danych wejściowych oraz macierz docelową przypisującą w procesie nauki zestawowi parametrów konkretny wynik. Każda kolumna macierzy wejściowej posiada jedenaście wierszy z danymi określającymi parametry osadu, natomiast przechowująca wyniki macierz docelowa w kolumnach ma zapisane nazwy osadów.



Rysunek 7-11 Schemat ideowy sieci

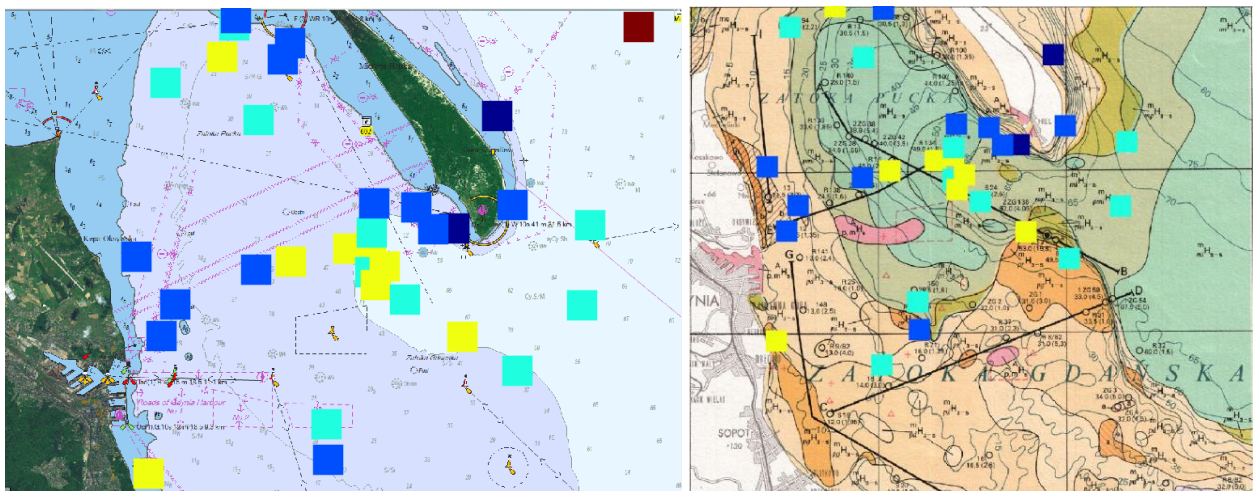
W omawianym przypadku macierz wejściowa posiada trzydzieści pięć kolumn, co jest związane z trzydziestoma pięcioma punktami pomiarowymi. Kolejnym krokiem jest przygotowanie sieci neuronowej, która zostanie nauczona przypisywania grupie parametrów wejściowych nazwy osadu wierzchniej warstwy. Dwie warstwy – ukryta i wyjściowa – umożliwiają dopasowanie zależności

przy założeniu odpowiedniej liczby neuronów (ukrytych warstw). Przeprowadzono testy z piętnastoma neuronami w wyniku nauki oraz testu przeprowadzonego poprzez podanie sparametryzowanych punktów oddalonych o 160–330 metrów od tych, które zostały użyte w procesie nauczania.



Rysunek 7-12 Wynik dopasowania danych sparametryzowanych do typu osadu 2,3 i 4 – osady zdefiniowane

Użycie podstawowej sieci neuronowej umożliwiło w 95% poprawne sklasyfikowanie danych wejściowych. Na Rysunku 7-21 pokazano naniesione punkty kolorami odpowiadające typom osadów.



Rysunek 7-13 Zobrazowanie na mapie klasyfikacji osadu – trzy kolory kwadratów określają trzy podstawowe typy osadów jakie występują na akwenu pomiarowym

8 Zakończenie

Rozprawa składa się z dwóch zasadniczych części – teoretycznej i doświadczalnej. W pierwszej skupiono się na zaprezentowaniu teorii związanej z:

- a) wytwarzaniem parametrycznym fal o małej częstotliwości jako wynik nieliniowego oddziaływania kolinearnych wiązek akustycznych o dużym natężeniu i nieznacznie różniących się wielkich częstotliwościach. Tak powstałe parametryczne urządzenie zostało poddane kalibracji a następnie wykorzystane do badań laboratoryjnych mających na celu wyznaczenie charakterystyk polowych echosondy.
- b) badaniami modelu osadów dennych oraz ich ewolucją, co pozwala na zaprezentowanie skomplikowania problematyki związanej z jednoznacznym scharakteryzowaniem osadów dennych oraz zebraniem wartości parametrów jakie mogą być danymi wejściowymi do budowy struktury na podstawie której wyznaczane będą charakterystyki echa stanowiące materiał źródłowy do dalszej działalności klasyfikacji i identyfikacji osadów dennych,
- c) właściwościami geofizycznymi osadów, rozpraszaniem wstecznym impulsów oraz wpływającymi na nie parametrami, a także sposobem kształtowania obwiedni, która między innymi jest używana do analizy i klasyfikowania osadów dennych.

W drugiej części pracy skupiono się na:

- a) opracowaniu metodyki pomiarów co zostało wykorzystane podczas badań prowadzonych z wykorzystaniem jednostek pomiarowych s/y Windspeel oraz s/y Freija. Przedstawiono czynniki wpływające na błędy jakie mogą występować podczas pozyskiwania echogramów, wraz z przykładami, oraz omówiono najistotniejsze procedury i ustawienia jakie należy wprowadzić do urządzeń echolokacyjnych w celu pozyskiwania dokładnych wyników,
- b) dużo uwagi poświęcono czujnikowi prędkości dźwięku oraz błędowi związanemu z refrakcją akustyczną (co jest niezwykle istotne w przypadku badań prowadzonych przy użyciu echosondy wielowiązkowej) oraz czujnikowi ruchu, który ma wpływ na prawidłowe pozycjonowanie nadźwiękowanego obszaru, w pełnym zakresie badań morskich,
- c) prezentacji wyników badań prowadzonych na basenie modelowym Politechniki Gdańskiej mających na celu wyznaczenie charakterystyk pracy urządzenia echolokacyjnego jakim jest echosonda parametryczna rozpoczynając od pomiaru charakterystyk kierunkowych, analizy wpływu nastaw echosondy na pozyskiwane wyniki, informacji o kształtowaniu się

impulsów pomiarowych małej oraz wielkiej częstotliwości oraz doświadczalnej analizie nieliniowych oddziaływań w ośrodku wodnym. Analiza wyników pozyskanych przy badaniu osadów dennych umieszczonych w specjalnie przygotowanych fantomach, dała możliwość próby klasyfikacji osadów oraz korelacji wyników badań basenowych z danymi pozyskanymi podczas pomiarów w warunkach rzeczywistych. Ocena rozdzielczości wglębnej oraz możliwości detekcji obiektów zakopanych w dnie w warunkach laboratoryjnych dodatkowo dostarczyła interesujących wyników,

- d) prezentacji przygotowanej do pomiarów małej jednostki pomiarowej, na której zestawiono pełne stanowisko laboratoryjne oraz przedstawienie danych zebranych podczas prowadzonych sesji pomiarowych. Ze względu na zróżnicowanie pozyskiwanych danych zostały one podzielone na wyniki prezentujące strukturę geologiczną osadów dennych, wyznaczoną między innymi wzdłuż punktów, w których pobierane były rdzenie osadów. Umożliwiło to porównanie wyników otrzymanych z echosondy parametrycznej z danymi rzeczywistymi i wykazanie korelacji w otrzymanych zobrazowaniach. Kolejnym obszarem badań była analiza zjawiska związanego z nagłą zmianą głębokości penetracji osadów dennych, gdzie jest prawdopodobne występowanie w osadach pęcherzyków gazowych pochodzenia biologicznego. Wyniki poddano analizie, porównano z mapą zagrożeń geochemicznych oraz wyeliminowano błąd związany z błędną pracą urządzenia echolokacyjnego poprzez wykonanie serii równoległych pomiarów nad interesującym obszarem i wykazanie powtarzalności w otrzymywanych wynikach. Dodatkowo podjęto próbę wyznaczenia współczynnika tłumienia oraz prędkości dźwięku na podstawie dostępnych modeli przy założeniach stałej oraz zmiennej średnicy pęcherzyków gazowych przy stałej oraz zróżnicowanej ich koncentracji. Kolejne wyniki zawierają dane pozyskiwane podczas sondowania zalegających na dnie wraków oraz innych obiektów kończąc na określeniu możliwości detekcji obiektów zakopanych pod dnem przy użyciu echosondy parametrycznej.
- e) W końcowej części rozprawy podjęto próbę przeprowadzenia analizy metod używanych do klasyfikacji osadów dennych na podstawie przeglądu literatury przedmiotu. Pozyskane informacje posłużyły do opracowania metod parametryzacji danych od trzech urządzeń echolokacyjnych: echosondy parametrycznej, sonaru bocznego oraz echosondy wielowiązkowej. Podjęta została próba klasyfikacji osadów dennych, na podstawie

prostego modelu sieci neuronowej. Zaprezentowano wynik, przyporządkowujący trzy główne typy osadów dennych. Pomimo satysfakcjonującego wyniku, pozwalającego na klasyfikację próbki z dokładnością 95%, problem związany z automatyczną klasyfikacją osadów jest nadal doskonalony i pozostaje kwestią otwartą.

Głównym celem zaprezentowanej pracy była weryfikacja tezy, że metody akustyczne dają możliwość bezinwazyjnej klasyfikacji osadów dennych. Hipoteza zakłada związek pomiędzy wynikami symulacji echogramów w oparciu o informację geologiczną (zebrane próbki osadów dennych), wynikami pozyskanymi podczas badań laboratoryjnych oraz pomiarami w warunkach rzeczywistych.

Za najważniejsze samodzielne osiągnięcie naukowe spośród wymienionych w rozprawie należy uznać następujące:

- budowę pomiarowego stanowiska laboratoryjnego oraz wykonanie badań na basenie badawczym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa,
- budowę i kalibrację systemu pomiarowego oraz wykonanie obszernych badań morskich na akwenu południowego Bałtyku,
- analizę i syntezę otrzymanych obrazów akustycznych dna morskiego,
- zastosowanie metod akustyki nieliniowej do badania dna morskiego,
- próbę klasyfikacji osadów wierzchniej warstwy osadów dennych.

Mając na uwadze aktualne trendy w rozwoju urządzeń echolokacyjnych możliwe jest prowadzenie badań przy użyciu równoległego systemu echosondy wielowiązkowej firmy RESON, pracującej na częstotliwościach na które nie mają wpływ pracy echosondy parametrycznej – eliminuje to konieczność używania układów do synchronizacji tzn. naprzemiennego transmitowania impulsów sondujących. Dodatkowo rozwój układów pracujących w oparciu o nieliniowe właściwości wody umożliwi wyznaczenie struktury dna morskiego przy użyciu wielowiązkowej echosondy parametrycznej.



Bibliografia

1. Westervelt, P. J., Parametric acoustic array. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(4), 535–537, 1963.
2. Westervelt, P. J., Scattering of sound by sound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29(8), 934–935, 1957.
3. Bjørnø, L., Parametric Acoustic Arrays. In: G. Tacconi (Ed.), *Aspects of Signal Processing*, Vol. 1, Boston, MA: D. Reidel Publishing Company, 33–59, 1977.
4. Bjørnø, L., Acoustical field prediction and performance assessment by a vertically down-looking parametric array. Internal Techn. Rep. No. IA–TR–69, Dept. Ind. Acoust., Techn. Univ. Denmark, February 1998.
5. Berkta, H. O., Parametric sources design considerations in the generation of low frequency signals. In: T. Akal, J. M. Berkson (Eds.), *Ocean Seismo-Acoustics e Low-frequency underwater acoustics*, NATO Conference Series, Plenum Press, 785–800, 1986.
6. Lowag, J., van den Heuvelm, M., Advanced Sub-bottom Profiler Equipment for Soil Investigation Campaigns During Dredging Projects, PT17–26/1.
7. Wunderlich, J., Müller, S., High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. *International Ocean Systems*, 7 (4), 6–11, 2003.
8. Kozaczka, E., *Wprowadzenie do teorii hydroakustyki nieliniowej*, Gdynia: Akademia Marynarki Wojennej 1988.
9. Kozaczka, E., *Fale nieliniowe w wodzie*, Materiały XLIV Otwartego Seminarium z Akustyki.
10. Kozaczka, E., *Acoustical non linearity of seawater*, Conference Proceedings of the Undersea Defence Technology, Londyn 2000.
11. Kozaczka, E. Grelowska, G., *Koncepcja pomiaru metodą akustyczną nieliniowego parametru B/A wody morskiej*, Materiały XL Otwartego Seminarium z Akustyki, Polańczyk 74–76, 1993.
12. J. Tęgowski, *Akustyczna klasyfikacja osadów dennych*, Instytut Oceanologii PAN, 219, 2006.
13. Grelowska G., *Fale sprężyste o dużym natężeniu w wodzie*, Zeszyty Naukowe AMW, 146A, Gdynia 2001.
14. Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., Schmidt, H., *Computational Ocean Acoustics*, London: Springer, 154, 2011.

15. Hamilton, E. L., Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments. *Geophysics*, 36(2), 266–284, 1971.
16. Hamilton, E. L., Acoustic properties of sediments. In: A. Lara-Saenz, C. Ranz-Guerra, C. Carbo-Fite (Eds.), *Acoustics and Ocean Bottom*, II FASE Specialized Conference. CISC, Madrid, 1987.
17. Hamilton, E. L., Geoacoustic modeling of the seafloor. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1313–1340, 1980.
18. Jackson, D. R., Richardson, M. D, *High-Frequency Seafloor Acoustics*, New York: Springer Verlag, 2007.
19. Wentworth, C. K., A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30(5), 377–392, 1922.
20. Folk, R. L., The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature, *Journal of Geology*, 62(4), 344–359, 1954.
21. Zhou, J.-X., Zhang, X.-Z., Knobles, D. P., Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5), 2847–2866, 2009.
22. Turgut, A., Yamamoto, T., Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(6), 2376–2382, 1990.
23. Williams, K. L., Jackson, D. R., Thorsos, E. I., Tang, D., Schock, S. G., Comparison of sound speed and attenuation measured in a sandy sediment to predictions based on the Biot Theory of porous media, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(3), 413–428, 2002.
24. Biot, M. A., Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid – I. Low Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2), 168–178, 1956.
25. Biot, M. A., Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid – II. Higher Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 179–191, 1956.
26. Stoll, R. D., *Sediment acoustics*, New York: Springer Verlag, 1989.
27. Kimura, M., Frame bulk modulus of porous granular marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 699–710, 2006.
28. Chotiros, N. P., Isakson, M. J., Acoustic virtual mass of granular media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(2), 70–76, 2007.
29. Chotiros, N. P., Isakson, M. J., High-frequency dispersion from viscous drag at the grain-grain contact in water-saturated sand. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 296–301, 2008.

30. Hefner, B. T., Williams, K. L., Sound speed and attenuation measurements in unconsolidated glass-bead sediments saturated with viscous pore fluids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2538–2549, 2006.
31. Chotiros, N. P., Isakson, M. J., A broadband model of sandy ocean sediments: Biot–Stoll with contact squirt flow and shear drag. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 2011–2022, 2004.
32. Buckingham, M. J., On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123 (3), 1486–1501, 2007.
33. Chotiros, N. P., Isakson, M. J., Shear attenuation and micro-fluidics in watersaturated sand and glass beads. *Journal of the Acoustical Society of America*, 135(6), 3264–3279, 2014.
34. Hefner, B. T., Jackson, D. R., Attenuation in sand sediments due to porosity fluctuations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 136(2), 583–595, 2014.
35. Lurton X., *An introduction to Underwater Acoustics, Principles and Applications*, Berlin – New York – Paris: Springer 2002.
36. Urick, R. J., *Principles of Underwater Sound*, New York: McGraw–Hill, 1983, s. 246.
37. Moustier de, C. P., Alexandrou, D., Angular dependence of 12 kHz seafloor acoustic backscatter. *Journal of the Acoustical Society of America*, 522–531, 1991.
38. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppins, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, New York: Wiley 1999, s. 158–160.
39. Fisher, F. H., Simmons, V. P., Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62, 558, 1977.
40. Ainslie, M. A., McColm, J. G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1670–1672, 1998.
41. Fisher, F. H., Simmons, V. P., Sound absorption in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62, 558–564, 1977.
42. Francois, R. E., Garrison, G. R., Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3), 896–907, 1982.
43. Francois, R. E., Garrison, G. R., Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879–1890, 1982.

44. Poliquen, E., Lurton X., Identification of the nature of the seabed using echo sounders. *J. Phys.*, 4(2/C1), 941–944, 1992.
45. Medwin, H., Clay, C. S., *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, New York: Academic Press 1998.
46. Lurton, X., *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, Berlin – New York – Paris: Springer 2002.
47. Sternlicht, D. D., Moustier de, C. P., Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10–100 kHz). *Journal of the Acoustical Society of America*, 114, 2709–2725.
48. McKinney, C. M., Anderson, C. D., Measurement of backscattering of sound from the ocean bottom. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(1), 1964.
49. Kloser, R. J., Williams, A., Butler, A., *Acoustic, biological and physical data for seabed characterisation*. Report to the National Oceans Office, Progress Report 2 of Project OP2000–SE02, CSIRO Marine Research Hobart, April 2001.
50. Kloser, R. J., Bax, N. J., Ryan, T. E., Williams, A., Barker, B. A., Remote sensing of seabed types – development and application of normal incident acoustic techniques and associated ground truthing. *Marine and Freshwater Research*, 52, 475–489, 2001.
51. Foster-Smith, R. L., Sotheran, I., Mapping marine benthic biotopes using acoustic ground discrimination systems. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2761–2784, 2003.
52. Kloser, R. J., Keith, G., Ryan, T., Williams, A., Penrose, J., Seabed biotope characterisation in deep water – initial evaluation of single and multi-beam acoustics. In: A. Stepnowski (Ed.), *Proceedings of the 6th European Conference in Underwater Acoustics*, Gdańsk: 2002, 81–88.
53. Hare, R., Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding. *International Hydrographic Review (LXXII)*, 33–37, 1995.
54. Kozaczka, E., Grelowska, G., Szymczak, W., Kozaczka, S., Processing data on sea bottom structure obtained by means of the parametric sounding. *Polish Maritime Research*, 19(4), 3–10, 2012.
55. Grelowska, G., Kozaczka, E., Szymczak, W., Methods of data extraction from sub-bottom profiler signal. *Hydroacoustics*, 13, 109–110, 2010.
56. Grelowska, G., Kozaczka, E., Kozaczka, S., Szymczak, W., Gdansk Bay seabed sounding and classification of its results. *Polish Maritime Research*, 3(79/20), 45–50, 2013.

57. Kozaczka, E., Grelowska, G., Szymczak, W., Kozaczka, S., The examination of the upper layer of the seabed by means of the acoustic methods. *Acta Physica Polonica A*, 119(6A), 1091–1094, 2011.
58. Kozaczka, E., Grelowska, G., Kozaczka, S., Szymczak, W., Detection of objects buried in the sea bottom with the use of parametric echosounder. *Archives on Acoustics*, 38(1), 99–104, 2013.
59. Grelowska G., Kozaczka, E., Underwater Acoustic Imaging of the Sea. *Archives of Acoustics*, 39(4), 439–452, 2014.
60. Judd, A. G., Hovland, M., The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*, 12(10), 1081–1095, 1992.
61. Richardson, M. D., Davis, A. M., Modeling methane-rich sediments from Eckernforde Bay. *Continental Shelf Research*, 18(14–15), 1671–1688, 1988.
62. Martens, C. A., Klump, J. V., Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin I. Methane sediment-water exchange processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 471–490, 1980.
63. Lyons, A. P., Duncan, M. E., Anderson, A. L., Hawkins, J. A., Predictions of the acoustic scattering response of free-methane bubbles in muddy sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 163–172, 1996.
64. Tang, D., Modeling high-frequency acoustic backscattering from gas voids buried in sediments. *Geo-Marine Letters*, 16, 261–265, 1996.
65. Wilkens, R. H., Richardson, M. D., The influence of gas bubbles on sediment properties: insitu, laboratory and theoretical results from Eckernfoerde Bay, Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 18(14–15), 1859–1992, 1988.
66. Anderson, A. L., Abegg, F., Hawkins, J. A., Duncan, M. E., Lyons, A. P., Bubble populations and acoustic interaction with the gassy seafloor of Eckernfoerde Bay. *Continental Shelf Research*, 18(14–15), 1807–1838, 1998.
67. Best, A. I., Tuffin, M. D. J., Dix, J. K., Bull, J. M., Tidal height and frequency dependence of acoustic velocity and attenuation in shallow gassy marine sediments. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109, 17, 2004.
68. Fleischer, P., Orsi, T. H., Richardson, M. D., Anderson, A. L., Distribution of free gas in marine sediments: A global overview. *Geo-Marine Letters*, 21, 103–122, 2001.



69. Abegg, F., Anderson, A. L., The acoustic turbid layer in muddy sediments of Eckernfoerde Bay, Western Baltic Sea: methane concentration, saturation, and bubble characteristics. *Marine Geology*, 137, 137–147, 1997.
70. Boudreau, B. P., Algar, C., Johnson, B. D., Croudace, I., Reed, A. H., Furukawa, Y., Dorgan, K. M., Jumars, P. A., Grader, A. S., Gardiner, B. S., Bubble growth and rise in soft sediments. *Geology* 33(6), 517–520, 2005.
71. Katsman, R., Ostrovsky, I., Makovsky, Y., Methane bubble growth in fine-grained muddy aquatic sediment: insight from modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 377–378, 336–346, 2013.
72. Regnier, R., Dale, A. W., Arndt, S., LaRowe, D. E., Mogollo'n, J., Van Cappellen, P., Quantitative analysis of anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments: A modeling perspective. *Earth-Science Reviews*, 106, 105–130, 2011.
73. Martens, C. S., Albert, D. B., Alperin, A. J., Biochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments e Part 1. A model coupling organic matter flux to gas production, oxidation and transport. *Continental Shelf Research*, 18 (14–15), 1741–1770, 1998.
74. Wever, T. F., Abegg, F., Fiedler, H. M., Fechner, G., Stender, I. H., Shallow gas in the muddy sediments of Eckernfoerde Bay, Germany. *Continental Shelf Research*, 18 (14–15), 1715–1739, 1998.
75. Mogollo'n, J. M., Dale, A. W., Heures I. L., Regnier, P., Impact of seasonal temperature and pressure changes on methane gas production, dissolution, and transport in unfractured sediments. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116, 17, 2011.
76. Jackson, D. R., Williams, K. L., Wever, T. F., Friedrichs, C. T., Wright, L. D., Sonar evidence for methane ebullition in Eckernfoerde Bay. *Continental Shelf Research*, 18, 1893–1915, 1998.
77. Anderson, A. L., Hampton, L. D., Acoustics of gas-bearing sediments I. Background. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 1865–1903, 1980.
78. Anderson, A. L., Hampton, L. D., Acoustics of gas-bearing sediments, II. Measurements and models. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 1865–1903, 1980.
79. Gardner, T. N., An acoustic study of soils that model seabed sediments that contain gas bubbles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1), 163–176, 2000.
80. Leighton, T. G., Robb, G. B. N., Preliminary mapping of void fractions and sound speeds in gassy sediments from subbottom profiles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 313–320, 2008.

81. Toth, Z., Spiess, V., Mogollon, J. M., Jensen, J. B., Estimating the free gas content in Baltic Sea sediments using compressional wave velocity from marine seismic data. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 199(12), 8577–8593, 2104.
82. Malik, M., Mayer, L., Weber, T., Calder, B., Huff, L., Challenges of defining uncertainty in multibeam sonar derived seafloor backscatter. In: Proc. UA, Corfu, Greece, 1037–1044, 2013.
83. Chivers, R., Emerson, N., Burns, D. R., Seabed classification using the backscattering of normally incident broadband acoustic pulses. *The Hydrographic Journal*, 26, 9–16, 1982.
84. Chivers, R., Emerson, N., Burns, D. R., Seabed classification using the backscattering of normally incident broadband acoustic pulses. *The Hydrographic Journal*, 26, 9–16, 1982.
85. Heald, G. J., High frequency seabed scattering and sediment discrimination. In: Acoustical Oceanography, Institute of Acoustics 23, Southampton, UK, 258–267, 2001.
86. Blondel, P., Automatic mine detection by textural analysis of COTS sidescan sonar imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 21(16), 3115–3128, 2000.
87. Huvenne, V. A. I., Blondel, P., Henriot, J.–P., Textural analyses of sidescan sonar imagery from two mound provinces in the Porcupine Seabight. *Marine Geology*, 189, 323–341, 2002.
88. Blondel, P., Gómez Sichi, O., Textural analyses of multibeam sonar imagery from Stanton Banks, Northern Ireland continental shelf. *Applied Acoustics*, 70, 1288–1297, 2009.
89. Knott, S. T., Hoskins, H., LaCasce, E. O., Estimation of the seabed acoustic impedance structure from normal-incident reflections: Somali Basin. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 86(B4), 2935–2952, 1981.
90. Walter, D. J., Lambert, D. N., Young, D. C., Stephens, K. P., Mapping sediment acoustic impedance using remote sensing acoustic techniques in a shallow-water carbonate environment. *Geo–Marine Letters*, 17, 260–267, 1997.
91. Lambert, D. N., Kalcic, M. T., Fass, R. W., Variability in the acoustic response of shallow-water marine sediments determined by normal-incident 30 kHz and 50 kHz sound. *Marine Geology*, 182, 179–208, 2002.
92. Walter, D. J., Lambert, D. N., Young, D. C., Sediment facies determination using acoustic techniques in a shallow-water carbonate environment, Dry Tortugas, Florida. *Marine Geology*, 182, 161–177, 2002.
93. Schock, S. G., A method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4), 1200–1217, 2004.



94. LeBlanc, L. R., Mayer, L., Rufino, M., Schock, S. G., King, J., Marine sediment classification using the chirp sonar. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(1), 107–115, 1992.
95. LeBlanc, L. R., Panda, S., Schock, S. G., Sonar attenuation modeling for classification of marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(1), 116–126, 1992.
96. Canepa, G., Pace, N. G., Seafloor segmentation from multibeam bathymetric sonar. In: Proc. ECUA, Lyon, France, 361–367, 2000.
97. Moustier de, C., Alexandrou, D., Angular dependence of 12 kHz seafloor acoustic backscatter. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(1), 522–531, 1991.
98. Matsumoto, H., Dziak, R. P., Fox, C. G., Estimation of seafloor microtopographic roughness through modeling of acoustic backscatter data recorded by multibeam sonarsystems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94(5), 2776–2787, 1993.
99. Haris, K., Chakraborty, B., De, C., Prabhudesai, R. G., Fernandes, W., Model-based seafloor characterization employing multi-beam angular backscatter data e Acomparative study with dual-frequency single beam. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6), 3623–3632, 2011.
100. Fonseca, L., Mayer, L., Kraft, B., Seafloor characterization through the application of AVO analysis to multibeam sonar data. In: N. Pace, P. Blondel (Eds.), *Boundary Influences in High Frequency, Shallow Water Acoustics*, Bath University, UK, 241–250, 2005.
101. Fonseca, L., Mayer, L., Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. *Marine Geophysical Research*, 28, 119–126.
102. Pouliquen, E., Lurton, X., Seabed identification using echo-sounder signals. In: Proc. European Conference on Underwater Acoustics, Luxembourg, 535–538, 1992.
103. Sternlicht, D. D., Moustier de, C. P., Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10–100 kHz). *Journal of the Acoustical Society of America*, 114(5), 2709–2725, 2003.
104. Sternlicht, D. D., Moustier de, C. P., Remote sensing of sediment characteristics by optimized echo-envelope matching. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114(5), 2727–2743, 2003.
105. De, C., Chakraborty, B., Model-based acoustic remote sensing of seafloor characteristics. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 49(10), 3868–3877, 2011.



106. Tęgowski J., Łubniewski Z., Seabed characterisation using spectral moments of the echo signal, *Acta Acustica/Acustica*, vol. 88, 6, p.623-62, 2002.
107. Eckart C., Vortices and streams caused by sound waves, *Physical Review*, 73, 68-76, 1948.
108. Zabolotskaya E. A., Khokhlov R. V., Quasi-plane waves in nonlinear acoustics of bounded beams, *Soviet physics Acoustics* ,15, 35-40, 1969.
109. Kuznetsov V. P., Equation of nonlinear acoustics, *Ak. Zurnal*, 16, 548-553, 1970.
110. Aanonsen S. I., Barkve T., Tjøtta J. N., Tjøtta S., Distortion and harmonic generation in the nearfield of a finite amplitude sound beam, *J. Acoust. Soc. Am.*, 75, 3, 749-768, 1984.
111. Rudenko O. V., Soluyan S. I., *Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics*, Plenum, New York, 1977.
112. Fenlon F. H., On the performance of a dual frequency parametric source via matched asymptotic solution of Burgers' equation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 55, 1, 35-46, 1974.
113. Jackson, D.R., Winebrenner, D.P. and Ishimaru, A., Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering. *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, pp. 1410e1422, 1986.
114. APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook, Ch. IV, Bottom. APL-UW TR 9407, 1994.
115. Jackson, D.R. and Briggs, K.B., High-frequency bottom backscattering: Roughness vs. sediment volume scattering. *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, pp. 962-977, 1992.

ERRATA

do rozprawy doktorskiej pt.

„Akustyczne zobrazowanie morskich osadów dennych”

| Jest | Powinno być |
|--|---|
| Strona 113, rysunek na górze strony jest opisany numerem 5-560 | Rysunek powinien być opisany numerem 5-60 |
| Strona 178, rysunek na górze strony jest opisany numerem 7-3 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-11 |
| Strona 178, rysunek na dole strony jest opisany numerem 7-4 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-12 |
| Strona 181, rysunek na dole strony jest opisany numerem 7-5 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-13 |
| Strona 182, rysunek na dole strony jest opisany numerem 7-6 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-14 |
| Strona 183, rysunek na górze strony jest opisany numerem 7-7 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-15 |
| Strona 184, rysunek na środku strony jest opisany numerem 7-8 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-16 |
| Strona 186, rysunek na górze strony jest opisany numerem 7-9 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-17 |
| Strona 187, rysunek na górze strony jest opisany numerem 7-10 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-18 |
| Strona 188, rysunek na dole strony jest opisany numerem 7-11 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-19 |
| Strona 189, rysunek na górze strony jest opisany numerem 7-12 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-20 |
| Strona 189, rysunek na dole strony jest opisany numerem 7-13 | Rysunek powinien być opisany numerem 7-21 |

