

**INSTYTUT OCEANOLOGII
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Zakład Fizyki Morza
Pracownia Akustyki Morza

Praca doktorska

**SKALA ODDZIAŁYWAŃ ANTROPOGENICZNYCH NA DNO
WYBRANYCH OBSZARÓW MORZA BAŁTYCKIEGO
W ŚWIETLE BADAŃ HYDROAKUSTYCZNYCH
I OBSERWACJI WIZUALNYCH**

Miłosz Grabowski

Promotor:
Prof. dr hab. Zygmunt Klusek

Promotor pomocniczy:
Dr Aleksandra Kruss

SOPOT, 2022

**INSTITUTE OF OCEANOLOGY
OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

Marine Physics Department
Marine Acoustic Laboratory

Doctoral thesis

**THE SCALE OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE BOTTOM
OF SELECTED AREAS OF THE BALTIC SEA IN THE LIGHT
OF HYDROACOUSTIC RESEARCH AND VISUAL
OBSERVATIONS**

Miłosz Grabowski

Thesis supervisor:
Prof. dr hab. Zygmunt Klusek

Auxiliary supervisor:
Dr Aleksandra Kruss

SOPOT, 2022

Wyniki wykorzystane w niniejszej pracy pochodzą z badań finansowanych przez:

- program NATO Science for Peace and Security (projekt MODUM – *Towards the Monitoring of Dumped Munition Threat*)
- Fundusz Rozwoju Regionalnego UE – Baltic Sea Region Programme 2014-2020 (projekt numer #13 DAIMON – *Decision Aid for Marine Munitions*)
- Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego (projekt nr 3623/INTERREG BSR/2016/2)
- Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (badania statutowe: Temat II.6)
- Projekt: *Modelowanie wpływu gospodarstw rolnych i struktur użytkowania terenu zlewni na przykładzie Gminy Puck na jakość wód lądowych i morskich zlokalizowanych w strefie przybrzeżnej Morza Bałtyckiego - Zintegrowany Serwis informacyjno-predykcyjny WaterPUCK*, Koordynator projektu: Lidia Dzierzbicka-Głowacka

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania
Panu prof. dr hab. Zygmuntovi Kluskowi,
Pani dr Aleksandrze Kruss
oraz koleżankom i kolegom z Pracowni Akustyki Morza IO PAN
za pomoc i cenne wskazówki przy przygotowaniu niniejszej pracy.*

*Szczególne podziękowania kieruję do Pana prof. dr hab. Jacka Beldowskiego,
dzięki któremu z powodzeniem mogłem rozwijać swoje umiejętności zawodowe, a także
zdobywać niezbędne doświadczenie naukowe i morskie.*

*Pragnę również podziękować wszystkim współpracownikom z projektów MODUM,
DAIMON, DAIMON II, a także całego Instytutu Oceanologii PAN w Sopocie
za wsparcie przy przygotowaniu niniejszej pracy.*

*Niniejszą pracę dedykuję mojej rodzinie, najbliższym i przyjaciołom.
Bez waszej wiary we mnie, motywowania mnie i dopingu nie udałoby się...*

SPIS TREŚCI:

STRESZCZENIE	1
EXTENDED ABSTRACT	5
1. WSTĘP	11
1.1 Cel badań	12
1.2 Motywacja do badań	13
1.3 Struktura pracy	13
2. METODY DETEKCJI I OBSERWACJI ŚLADÓW DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA NA DNIĘ AKWENÓW MORSKICH – PRZEGLĄD LITERATURY	15
2.1 Hydroakustyczne metody badania powierzchni dna morza	15
2.2 Optyczne metody badania powierzchni dna morza	17
2.3 Detekcja śladów działalności człowieka na dnie na podstawie wybranych metod transformacji rastrowych mozaik sonarowych	19
3. AKUSTYCZNE METODY BADANIA POWIERZCHNI DNA MORZA: SONARY BOCZNE, ECHOSONDY JEDNOWIĄZKOWE I WIELOWIĄZKOWE ORAZ SYSTEMY INTERFEROMETRYCZNE	28
3.1 Sonar boczny holowany za statkiem – sonar niskiej rozdzielczości	29
3.2 Sonar boczny montowany w kadłubie autonomicznego pojazdu podwodnego – sonar wysokiej rozdzielczości	32
3.3 Echosonda jednowiązkowa	34
3.4 Echosonda wielowiązkowa	35
3.5 Systemy interferometryczne	37
4. BEZZAŁOGOWE, PODWODNE PLATFORMY BADAWCZE	39
4.1 Autonomiczne pojazdy podwodne AUV	40
4.2 Zdalnie sterowane pojazdy podwodne ROV	45
5. AKUSTYKA ZAGADNIEŃ ROZPRASZANIA I ODBICIA FAL AKUSTYCZNYCH NA POFAŁDOWANYM DNIEM MORZA ORAZ OBIEKTACH WYSTĘPUJĄCYCH NA NIM	50
5.1 Równanie sonaru i jego parametry	50
5.2 Zjawisko odbicia fal akustycznych od dna i obiektów występujących na nim	55
5.3 Zjawisko rozpraszania fal akustycznych na dnie i obiektach znajdujących się na nim	57
5.4 Modele zjawiska rozpraszania fal dźwiękowych na pofałdowanym dnie	59
6. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ – ZATOKA GDAŃSKA, GŁĘBIA GDAŃSKA, GŁĘBIA BORNHOLMSKA I ZATOKA KIŁOŃSKA	62
6.1 Obszar A - Zatoka Gdańska	63
6.2 Obszar B – Głębia Gdańska	65
6.3 Obszar C – Głębia Bornholmska	67
6.4 Obszar D – Zatoka Kilońska	70
7. PLANOWANIE POMIARÓW HYDROAKUSTYCZNYCH I AKWIZYCJA DANYCH ..	72
7.1 Etap I – ogólna ocena badanych obszarów dna	74
7.2 Etap II – szczegółowe mapowanie dna	77
7.3 Etap III – identyfikacja i wizualna inspekcja obiektów referencyjnych	79
7.4 Pomiaru uzupełniające	80

8. METODY OPRACOWANIA I ANALIZY DANYCH	81
8.1 Metody wstępnego przygotowania danych hydroakustycznych - mozaikowanie cyfrowych danych sonarowych.....	82
8.2 Metody transformacji obrazów sonarowych – detekcja antropogenicznych obiektów występujących na dnie badanych akwenów	89
8.2.1 Wyznaczanie statystyk pierwszego rzędu dla obrazów sonarowych.....	90
8.2.2 Wyznaczanie statystyk drugiego rzędu dla obrazów sonarowych.....	92
8.2.3 Detekcja krawędzi obiektów antropogenicznych widocznych na mozaikach sonarowych przy wykorzystaniu dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera – 2D FFT i górnoprzepustowego filtra	96
8.2.4 Półautomatyczna klasyfikacja dna morskiego na podstawie analizy tekstur obrazów sonarowych i metody 2D FFT z górnoprzepustowym filtrem – algorytm k-średnich.....	97
8.3 Opracowanie danych magnetometrycznych	100
8.4 Manualne wyznaczanie obiektów referencyjnych do wizualnej inspekcji na podstawie ich charakterystyk.....	103
8.5 Bruzdy występujące na powierzchni dna morza oraz analiza ich kierunkowości.....	105
8.5.1 Detekcja bruzd widocznych na zobrazowaniach sonarowych i wyznaczanie ich kierunkowości przy pomocy metody 2D FFT oraz momentu spektralnego niskiego rzędu	106
8.6 Wizualizacja i porządkowanie uzyskiwanych wyników.....	110
8.6.1 Analiza obiektów antropogenicznych widocznych na przetworzonych obrazach sonarowych....	110
8.6.2 Wizualizacja kierunkowości bruzd wykrywanych na analizowanych mozaikach sonarowych ...	113
9. WYNIKI: DETEKCJA OBIEKTÓW ANTROPOGENICZNYCH I DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA NA DNE W WYBRANYCH OBSZARACH MORZA BAŁTYCKIEGO ..	114
9.1 Obszar A – Zatoka Gdańska	116
9.2 Obszar B – Głębia Gdańska.....	121
9.3 Obszar C – Głębia Bornholmska	131
9.4 Obszar D – Zatoka Kilońska.....	142
9.5 Podsumowanie wyników	145
10. DYSKUSJA	146
10.1 Zastosowana metodyka badań i analizy uzyskiwanych danych.....	146
10.2 Oddziaływanie wykrytych obiektów antropogenicznych i śladów działalności człowieka na ekosystemy bentosowe badanych obszarów	153
10.2.1 Oddziaływanie dużych śmieci i odpadów przemysłowych	153
10.2.2 Wraki zatopionych jednostek, a ekosystemy bentosowe.....	155
10.2.3 Wpływ obiektów o pochodzeniu militarnym na organizmy bentosowe.....	157
10.2.4 Efekty innych śladów działalności człowieka widocznych na podłożu morskim	160
11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	171
12. LITERATURA	175
13. SPIS RYSUNKÓW I TABEL	193
14. ZAŁĄCZNIKI	201

Streszczenie

Morze Bałtyckie, podobnie jak inne akweny kuli ziemskiej, ulega silnej presji antropogenicznej, którą można obserwować na jego powierzchni, w toni wodnej, a także na podłożu morskim. Przyczyną występowania tego rodzaju oddziaływania na morskie ekosystemy bałtyckie jest stale zwiększająca się aktywność techniczna człowieka, która nieprzerwanie wzrasta od momentu rozpoczęcia rewolucji przemysłowej na przełomie XVIII i XIX wieku. Działania związane z eksploatacją zasobów naturalnych, rozwojem morskiego transportu oraz konflikty militarne prowadzone w obszarze wspomnianego akwenu skutkowały wprowadzeniem do jego wód znacznych ilości przedmiotów pochodzenia antropogenicznego. Zatapiane obiekty posiadają różne wymiary oraz kształty. Różnią się one między sobą również pod względem materiałów, które wykorzystano do ich wytworzenia. Obiekty te zalegając na dnie, ulegają zagrzebaniu w miękkich osadach budujących podłoże morskie, a także rozkładają się na skutek korozji spowodowanej przez czynniki występujące w środowisku morskim. Prowadzi to do powstawania interakcji między zatapianymi przedmiotami, a organizmami morskimi zamieszkującymi strefę przydenną oraz habitaty denne. W wielu obszarach Morza Bałtyckiego można również zaobserwować charakterystyczne zagłębienia w dnie, które powstają na skutek prowadzenia komercyjnych połowów ryb z wykorzystaniem włoków dennych. Zarówno zatapiane obiekty, jak i zmiany w morfologii wierzchniej warstwy podłoża morskiego spowodowane przez człowieka będą miały wpływ na bałtyckie organizmy bentosowe oraz ich siedliska. Literatura naukowa szeroko opisuje problematykę wykrywania i klasyfikacji przedmiotów spoczywających na dnie oraz śladów widocznych na nim w obrębie wielu różnych akwenów. Proponowane metody często koncentrują się wyłącznie na jednym typie poszukiwanych obiektów, występujących w konkretnym rejonie badań. W konsekwencji, brakuje kompleksowego opracowania tego zagadnienia dla Morza Bałtyckiego lub jego większych obszarów. Wiedza na temat źródeł oraz skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie jest kluczowa podczas planowania działań związanych z ochroną ekosystemów bałtyckich, a także zrównoważonej i bezpiecznej eksploatacji naturalnych zasobów Bałtyku. Znajomość czynników wynikających z oddziaływania antropogenicznego na ekosystem Morza Bałtyckiego umożliwi poznanie w większym stopniu procesów, które wpływają na jego ewolucję.

Celem badań zaprezentowanych w niniejszej pracy była weryfikacja hipotezy mówiącej o możliwości wykorzystania technik hydroakustycznych oraz metod obserwacji bezpośredniej do oceny skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie wybranych obszarów Morza Bałtyckiego. W celu realizacji powyższego zadania, w pierwszej kolejności wyznaczono obszary badań, w obrębie których spodziewano się znaczącego oddziaływania antropogenicznego spowodowanego przez przedmioty zalegające na dnie i/lub komercyjną aktywność rybacką. Rejony te różniły się między sobą m.in. pod względem maksymalnej głębokości, jak i rodzaju osadów budujących wierzchnie warstwy podłoża morskiego. Obszary, w których przeprowadzono badania zlokalizowane były w obrębie akwenów Zatoki Gdańskiej, Głębi Gdańskiej, Głębi Bornholmskiej oraz Zatoki Kilońskiej. Dalszy etap prac polegał na wykonaniu mapowania dna wszystkich obszarów z wykorzystaniem sonaru bocznego generującego impulsy akustyczne o częstotliwości wypełnienia 900 kHz, zainstalowanego na pokładzie autonomicznego pojazdu podwodnego oraz holowanego za nim magnetometru. Uzyskane dane zostały przetworzone w taki sposób, aby możliwe było stworzenie z nich szczegółowych mozaik sonarowych przedstawiających akustyczny obraz powierzchni badanego dna. W konsekwencji, uzyskano 11 zobrazowań podłoża morskiego o wysokiej rozdzielczości, których całkowita powierzchnia wynosiła 2,09 km². Przed przeprowadzeniem akwizycji danych hydroakustycznych oraz magnetometrycznych wykonano wstępne rozpoznanie dna w obszarach Głębi Gdańskiej i Głębi Bornholmskiej przy pomocy sonaru o częstotliwości roboczej 100 kHz, holowanego za jednostką badawczą, w celu zapewnienia bezpieczeństwa nawigacji platformy autonomicznej. W rejonach Zatoki Gdańskiej i Zatoki Kilońskiej zadanie to nie było realizowane, ponieważ informacji o potencjalnych przeszkodach na dnie (np. dużych wrakach) dostarczyły szczegółowe mapy nawigacyjne. Następnie, na uzyskiwanych zobrazowaniach wyznaczono w sposób manualny obiekty referencyjne, które w późniejszych etapach prowadzonych prac były poddawane wizualnej inspekcji i identyfikacji. Selekcja tych obiektów odbywała się na podstawie ich zdolności do odbijania wstecz nadawanych impulsów akustycznych, co zobrazowane było za pomocą poziomów jasności pikseli odzwierciedlających poszczególne cele podwodne na mozaikach sonarowych, a także poprzez analizę ich kształtów i rozmiarów oraz porównanie z zapisami magnetometrycznymi. W konsekwencji, w obrębie każdej z 11 opracowanych mozaik sonarowych wyznaczono przynajmniej jeden obiekt referencyjny. W dalszych krokach realizowanych prac opracowano metodę półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych widocznych na uzyskiwanych rastrowych zobrazowaniach dna. Metoda

ta wykorzystywała techniki analizy tekstur oparte na wyznaczaniu statystyk I i II rzędu w obrębie ruchomego, kwadratowego okna przesuwne, które przemieszczało się w obrębie kolejnych pikseli tworzących zobrazenie dna. Dodatkowy deskryptor opisujący analizowane mozaiki sonarowe otrzymano przy zastosowaniu filtracji górnoprzepustowej na bazie szybkiej dwuwymiarowej transformacji Fouriera i filtru Gaussa. Procedura ta była wykonywana w obrębie każdego z fragmentów analizowanych sonogramów o wymiarach 1000 x 1000 pikseli. Deskryptory obrazów uzyskane przy pomocy wspomnianych powyżej przekształceń rastrowych zobrażeń dna zostały następnie poddane klasyfikacji z zastosowaniem algorytmu k -średnich. Na podstawie otrzymywanych wyników możliwe było wyznaczenie w sposób półautomatyczny lokalizacji poszukiwanych obiektów antropogenicznych o przyjętych wcześniej wymiarach minimalnych na mozaikach sonarowych w każdym z obszarów badań. Zobrazowania dna, na których widoczne były ślady działalności człowieka w postaci bruzd na podłożu morskim, zostały również poddane analizie pod kątem detekcji i określania kierunkowości widocznych zagłębień. Zadanie to zostało zrealizowane dla odpowiednich mozaik przy pomocy metody dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera, przetworzeniu uzyskanych widm mocy z udziałem algorytmu Bresenham'a oraz wyznaczaniu na ich podstawie momentów spektralnych niskiego rzędu. Procedura ta była również wykonywana w obrębie kwadratowych okien przesuwnych. Wszystkie opisywane powyżej analizy mozaik sonarowych były prowadzone z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania stworzonego w środowisku MATLAB. Następnym etapem prowadzonych prac była wizualna inspekcja i identyfikacja wykrytych obiektów referencyjnych. Krok ten był realizowany z wykorzystaniem zdalnie sterowanej platformy podwodnej wyposażonej w kamery optyczne oraz aparaturę hydroakustyczną, która umożliwiła odnajdywanie i rozpoznawanie pożądaných celów w warunkach niskiej przejrzystości wody morskiej.

Na podstawie uzyskanych wyników określono skalę oddziaływania antropogenicznego w każdym z obszarów badań. Całkowite liczby wykrytych celów podwodnych pochodzenia antropogenicznego, wynosiły odpowiednio: 86 celów w Zatoce Gdańskiej, 149 w Głębi Gdańskiej, 167 w Głębi Bornholmskiej i 280 w Zatoce Kilońskiej. Gęstości powierzchniowe odnajdywanych obiektów antropogenicznych w obrębie mapowanych obszarów wynosiły odpowiednio 195,46 celów/km²; 275,93 celów/km²; 298,21 celów/km² i 509,09 celów/km². Liczba wybranych do analizy i zbadanych obiektów referencyjnych w każdym z wymienionych obszarów wynosiła kolejno 5, 10, 11 oraz ok. 99 (dwa duże klastry celów podwodnych). Obiekty te zostały poddane szczegółowej inspekcji,

a następnie przypisano je do jednej z trzech kategorii: duże śmieci i odpady przemysłowe, wraki oraz obiekty o pochodzeniu militarnym. Opisano również oddziaływania, jakie powodowały poszczególne typy obiektów referencyjnych na bałtyckie habitaty bentosowe oraz ich mieszkańców. Orientacje bruzd obserwowanych na dnie zostały przeanalizowane. Otrzymane wyniki zestawiono z danymi modelowymi dotyczącymi prędkości i kierunków wiania wiatrów w odstępach godzinnych w latach, w których prowadzona była akwizycja danych akustycznych. Kierunkowość bruzd była częściowo zbieżna z kierunkami wiania wiatrów w obszarach badań. Ponadto, na podstawie informacji dostępnych w literaturze naukowej, opisano negatywny wpływ śladów działalności człowieka powstałych na skutek prowadzenia intensywnych połowów ryb z wykorzystaniem włoków dennych na bałtyckie organizmy bentosowe i ich siedliska. Całość uzyskanych wyników pozwoliła na pozytywną weryfikację hipotezy mówiącej o możliwości określania skali oddziaływania antropogenicznego na dno wybranych obszarów Morza Bałtyckiego w oparciu o badania hydroakustyczne oraz obserwacje bezpośrednie. Na podstawie dodatkowych pomiarów wykonanych w ramach realizacji niniejszej pracy ustalono, że obiekty antropogeniczne mogą w całości ulegać zagrzebaniu w miękkich i uwodnionych osadach budujących podłoże morskie. Dowiedziono również, że obiekty antropogeniczne występujące na dnie Morza Bałtyckiego tworzą nowe habitaty dla organizmów bentosowych. Na podstawie informacji zawartych w literaturze naukowej określono, że przedmioty te mogą mieć jednak negatywny wpływ na stan oraz bioróżnorodność przydennej flory i fauny bałtyckiej.

Extended abstract

The Baltic Sea, like other reservoirs located all over the globe, is under strong anthropogenic pressure, which can be observed on its surface, in the water column, and on the seabed. The reason for the occurrence of this type of impact on the Baltic marine ecosystems is the constantly increasing human technical activity, which has been continuously developing since the beginning of the industrial revolution at the turn of the 18th and 19th centuries. Activities related to the exploitation of the natural resources, the expansion of maritime transport, and military conflicts in this area resulted in the introduction of large amounts of anthropogenic objects into its waters. Those objects have various dimensions and shapes, as well as they differ in terms of the materials from which they were made. Dumped man-made objects are frequently buried in the soft sediments which cover a large part of the basin, and are deteriorate due to corrosion caused by the chemically active marine environment. This leads release of their contents, and hence to the variety of interactions between the anthropogenic objects and marine organisms inhabiting the bottom zone. Moreover, regular scars in the sediments are observed in many parts of the Baltic Sea, resulting from commercial demersal trawl fisheries. Both the anthropogenic objects and man-made changes in the morphology of the top layer of the seabed will have an impact on the Baltic benthic organisms and their habitats. The scientific literature comprehensively describes the problems of detecting and classifying objects resting on the sea bottom and identifying trawl marks. Proposed approaches and procedures mainly focuses only on one type of the objects, occurring in a specific research area. As a consequence, there is no comprehensive study of this issue for larger areas of the Baltic Sea. Knowledge about the sources and the scale of anthropogenic impact on the marine bottom is crucial for planning activities related to the protection of the ecosystems, as well as the sustainable and safe exploitation of the natural resources of the Baltic Sea. In addition, information on conditions caused by anthropogenic impacts on the Baltic sea ecosystems will provide us a better understanding of the processes affecting their evolution.

The research presented in the dissertation aims to verify the hypothesis about the possibility of using hydroacoustic techniques and direct observation methods to assess the scale of anthropogenic impact on the bottom of selected areas of the Baltic Sea. To achieve this goal following scientific tasks were developed and conducted:

- selection of research areas located in the southern part of the Baltic Sea, where a strong anthropogenic pressure affecting the seabed was expected. These areas differ from each other in terms of depth, as well as the type of sediments forming the surface layers of the sea bottom.
- preliminary identification of the bottom objects and structure in areas intended for high-resolution mapping using a side scan sonar towed behind the research vessel
- conducting the acquisition of hydroacoustic and magnetometric data in the research areas using an autonomous underwater platform
- development of high-resolution bottom maps (sonar mosaics) based on data collected with the autonomous underwater platform
- selection of reference objects observable on the obtained seabed images of each of the areas
- development and testing of algorithms for semi-automatic detection of anthropogenic objects and analysis of characteristics of trawl marks detectable on the obtained sonar images using software created in the MATLAB and the GIS environments
- visual inspection and identification of reference objects using an underwater television system based on a remotely operated vehicle
- description of identified sources of an anthropogenic pressure on the seabed together with their potential consequences for benthic organisms inhabiting the southern Baltic Sea area
- assessment of the scale of anthropogenic impact on the seabed in each of the study areas

The research areas were located in the Gulf of Gdańsk, Gdańsk Deep, Bornholm Deep, and the Bay of Kiel. The proximity of large ports located on the shores of the Gulf of Gdańsk and the Bay of Kiel, and associated navigational routes, implicates the possibility of strong anthropogenic pressure to the seabed in the regions. A similar scale of the human impact was expected in the areas of the Gdańsk Deep and the Bornholm Deep, where weapons and ammunition produced during World War II had been dumped in the past. In each of the research areas, smaller sub-areas were selected for the hydroacoustic and magnetic survey, together with direct observation with the application of the underwater television system.

The preliminary survey was conducted with ship-towed side scan sonar to detect obstacles (e.g. wrecks) occurring on the sea bottom which, could be a threat for robotic

platforms. It was conducted in the areas of Gdańsk Deep and Bornholm Deep, where the maximum depths exceed 80 m. In the regions of the Gulf of Gdańsk and Bay of Kiel, this type of bottom recognition was not necessary due to the information contained in the navigational charts. Next, the autonomous underwater vehicle (AUV) equipped with high-resolution side scan sonar working on a frequency of 900 kHz and towed magnetometer was deployed in areas of interest to conduct a precise survey. The AUV recorded hydroacoustic and magnetic data according to the planned missions. Collected data were processed with SonarWiz software to create detailed sonar mosaics showing the surface of the examined bottom. Consequently, 11 high-resolution sonar images of the seabed were obtained. The total area of the mapped bottom was 2.09 km². In the next step of the procedure, a manual selection of the reference objects was performed on each sonogram for further visual inspection and identification. The selection of these objects was based on their ability to reflect back the transmitted acoustic pulses, which translates into the brightness of pixels forming individual underwater targets on sonar mosaics, as well as on the analysis of their shapes and sizes, and magnetic records. Within each of the 11 developed sonar mosaics, at least one reference object was identified. Also, based on conducted measurements of reference objects, minimal dimensions of anthropogenic underwater targets, which would be detected with a developed semi-automatic algorithm were established. Furthermore, an additional survey was made utilizing a sub-bottom profiler in the areas of Bornholm Deep and Gdansk Depp to confirm the hypothesis about the self-burial of the objects in the soft-bottom sediments occurring there.

Subsequent work involved developing software to enable semi-automatic detection of anthropogenic objects on the seabed in the high-resolution sonar images regarding areas of interest. Pixels of the digital sonograms consist of widespread textures of sound scattering on sediments, shapes of compact objects, with shadows accompanying them. In the first step was divided each sonogram into smaller square sectors that consisted of 1000 rows and 1000 columns of pixels. Sectors with less than 80% of the bottom coverage by the sonar data were rejected. The algorithm utilized 5 out of 14 statistic parameters proposed by Haralick (Haralick, 1979) for texture analyses. The images statistics were calculated inside a square sliding window, which moves along successive pixels of the sonograms. Different sizes of the sliding window were examined, and in results of experiments the optimal dimensions of the segments - 15 by 15 pixels were established. This size was then used in further analyses of the images. Applied first-order statistics were arithmetic mean, standard deviation, and entropy, while determined second-order statistics were contrast and angular

second moment. The combination of image statistics used in the algorithm was determined empirically by the author. Additional image descriptor was determined with two-dimensional fast Fourier transformation (2D FFT) extended by a high-pass filter. It was obtained by subtracting a low-pass Gaussian filter with a kernel of $\sigma=10$ and mask size of 1000 by 1000 pixels from computed two-dimensional power spectra of each analysed sector. Before this operation, power spectra were transformed in a way that low-frequency components were shifted from spectra corners to their centers. At the final stage, all calculated images descriptors were clustered with the k -mean method. It has been empirically established that the optimum number of classes was 20, and anthropogenic objects visible on analyzed sectors were always assigned to only one of them. Due to the randomness of the k -mean technique, it was impossible to predict in which class number the sought targets were allocated, hence the selection of the proper class was made manually. Then, results in the form of binary masks (0 for no target, 1 for target) were uploaded to the GIS software. They were overlaid on the original sonar mosaics, converted to vectors, and additionally filtered in terms of detected object dimensions. Obtained results gave information about the localization of sought anthropogenic objects (with previously assumed minimum dimensions) on the generated sonar mosaics in each of the research areas.

Images of the seabed showing traces of human activity in the form of furrows on the seabed were also analysed in terms of their detection and determination of prevailing directivity. For this purpose, a distinct algorithm was developed, which also used the sliding window technique and the 2D FFT method. It was applied for selected sonar mosaics with visible furrows left by trawl doors with accompanying 100% of sonar data coverage. The sizes of sliding windows were 15 by 15 m and 30 by 30 m (300 by 300 pixels and 600 by 600 pixels respectively) depending on the area of the sonogram. Similar to the object detection procedure, center-transformed power spectra were calculated for each step of sliding windows. Due to the axial symmetry of power spectra, only the upper half-space in frequency domain (with positive frequencies) was further considered. Next, the upper half of the 2D power spectra were divided into 180 one-dimensional “slices” with the one-degree step based on Bresenham’s algorithm (radial averaging). Then, for every one-degree slice, zero spectral moments were calculated. They were combined to form a directional function with respect to the north. The determined maximum of the function indicate the direction of the energetically dominant furrow (zero spectral moment with the highest value in the given radial direction) detectable inside of the sliding window on the sonar image. Both processing algorithms were created with the MATLAB software.

At the next stage of the work the visual inspection and identification of the reference objects was performed. It was conducted with the remotely operated vehicle (ROV), equipped with the optical camera and the multibeam sonar. All reference objects were inspected in at least two planes in relation to the seabed to perform its identification and observe possible benthic organisms on them. The multibeam sonar mounted on the ROV allowed to find reference objects when the visibility was poor.

Based on obtained results, the scale of anthropogenic impact on the sea bottom was determined in each of the research areas. The total number of detected man-made objects was 86 in the Gulf of Gdańsk, 149 in the Gdańsk Deep, 167 in the Bornholm Deep, and 280 in the Bay of Kiel. The surface densities of the found anthropogenic targets within the mapped areas were, respectively, 195.46, 275.93, 298.21, and 509.09 targets per square kilometer. The number of identified reference objects in each of the research areas was 5, 10, 11, and 99, respectively. Those targets were thoroughly inspected and then assigned to one of three categories: large garbage and industrial waste, wrecks, and objects of military origin. The impacts of particular types of reference objects on the Baltic benthic habitats and their inhabitants were described.

The orientations of the furrows observed on the seabed were also analysed. Obtained results were compared with model data on the speed and direction of winds at hourly intervals in the years in which the acoustic data was acquired. The directivity of the furrows was partially convergent with the wind directions in the research areas. The negative impact of traces of human activity on benthic organisms and their habitats was described as a result of intensive fishing with bottom trawls.

Results of investigations allowed positive verification of the hypothesis regarding the potential to determine the scale of anthropogenic impact on the bottom of selected areas of the Baltic Sea based on hydroacoustic studies and direct observations. Accordant with supplementary investigation made as part of this study, it was found that anthropogenic objects are partly or completely buried in soft sediments which makes them difficult to recognize with the use of high-frequency sonars. It has also been proven that anthropogenic objects on the bottom of the Baltic Sea create new habitats for benthic organisms. The scientific literature specifies that these objects may, however, have a negative impact on the condition and biodiversity of the Baltic bottom flora and fauna.

1. Wstęp

Morze Bałtyckie, podobnie jak inne akweny kuli ziemskiej, ulega silnej presji antropogenicznej, którą można obserwować na jego powierzchni, w toni wodnej, a także na podłożu morskim. Źródłem tego oddziaływania jest duża aktywność człowieka związana z wkroczeniem ludzkości na przełomie XVIII i XIX wieku w erę przemysłową. Wieloletnia eksploatacja naturalnych zasobów mórz i oceanów, konflikty militarne, a także ogromny rozwój globalnego transportu morskiego na przestrzeni ostatnich 100 lat odciskają swoje piętno na słonowodnych systemach ekologicznych występujących na całym świecie. Morze Bałtyckie jest również narażone na tego typu oddziaływanie. Wzrost aktywności technicznej człowieka na obszarze Bałtyku w ciągu ostatniego wieku spowodował wprowadzenie do jego ekosystemu znacznych ilości obiektów pochodzenia antropogenicznego. Zalegające na podłożu morskim przedmioty posiadają różne wymiary oraz kształty, a także ulegają procesom rozkładu oraz zagrzebywania w osadach dennych. Na dnie Morza Bałtyckiego można również zaobserwować inne ślady działalności człowieka, powstałe np. na skutek prowadzenia komercyjnych połowów ryb. Obecność obiektów antropogenicznych oraz innych działań prowadzonych na podłożu morskim Bałtyku mają bezpośredni wpływ na habitaty denne występujące w tym akwenie oraz na ich mieszkańców.

Literatura naukowa szeroko opisuje problematykę wykrywania i klasyfikacji przedmiotów spoczywających na dnie oraz widocznych na nim śladów. Proponowane metody zazwyczaj koncentrują się tylko na jednym typie poszukiwanych obiektów, występujących w konkretnym rejonie badań. W konsekwencji, brakuje kompleksowego opracowania tego zagadnienia zarówno dla Morza Bałtyckiego w całości jak i dla jego większych podobszarów. Wiedza na temat źródeł oraz skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie jest kluczowa dla opisu tego rodzaju presji na bałtycki ekosystem morski, który jest szczególnie, z uwagi na m.in. jego wiek, położenie geograficzne, batymetrię oraz warunki środowiskowe panujące w nim. Na podstawie takich informacji możliwe jest planowanie działań mających na celu ochronę m.in. bentosowych habitatów dennych. Ponadto, znajomość czynników wynikających z oddziaływania antropogenicznego na ekosystem Morza Bałtyckiego umożliwi poznanie w większym stopniu procesów, które wpływają na jego ewolucję. Badania zaprezentowane w niniejszej pracy poszerzają aktualny stan wiedzy na temat presji antropogenicznej występującej w południowych obszarach Bałtyku.

1.1 Cel badań

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy była weryfikacja przyjętej hipotezy, która zakładała, iż przy pomocy zaawansowanych metod bezkontaktowego badania dna morza, opartych na wykorzystaniu technik hydroakustycznych oraz obserwacjach bezpośrednich, możliwe jest określenie skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie wybranych obszarów Bałtyku. Na potrzeby sprawdzenia powyższego założenia opracowano szereg następujących zadań badawczych:

- wybór obszarów badań zlokalizowanych w południowej części Morza Bałtyckiego, w obrębie których oczekiwano silnej antropopresji oddziałującej na dno. Obszary te różniły się między sobą pod względem maksymalnej głębokości, a także rodzaju osadów budujących wierzchnie warstwy podłoża morskiego
- wstępne rozpoznanie dna w rejonach przeznaczonych do mapowania przy pomocy sonaru bocznego holowanego za jednostką badawczą
- przeprowadzenie akwizycji danych hydroakustycznych oraz magnetometrycznych we wspomnianych obszarach badań z wykorzystaniem autonomicznej platformy podwodnej wyposażonej w sonar boczny oraz holowany za nią magnetometr
- opracowanie map dna o wysokiej rozdzielczości (mozaik sonarowych) na podstawie danych zebranych przy pomocy autonomicznej platformy podwodnej
- wyznaczenie obiektów referencyjnych widocznych na uzyskanych zobrazeniach każdego z podobszarów. Obiekty te wybierano na podstawie ich kształtu i rozmiaru oraz zdolności do rozpraszania wstecz odbitych impulsów akustycznych
- opracowanie metodyki półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych oraz analizy śladów widocznych na uzyskiwanych zobrazeniach sonarowych przy pomocy autorskiego oprogramowania stworzonego w środowisku MATLAB oraz programu do zarządzania danymi przestrzennymi typu GIS
- przeprowadzenie wizualnej inspekcji i identyfikacji wybranych obiektów referencyjnych przy pomocy systemu telewizji podwodnej opartego na zdalnie sterowanym pojeździe wyposażonym w kamery optyczne i dodatkową aparaturę hydroakustyczną
- opis wykrytych źródeł antropopresji na podłoże morskie wraz z konsekwencjami jakie mogą one powodować dla organizmów bentosowych występujących w południowej części Morza Bałtyckiego

- ocena skali oddziaływania antropogenicznego na dno w poszczególnych obszarach badań

Wszystkie zadania badawcze opracowane w celu weryfikacji hipotezy o możliwości oceny skali oddziaływania antropogenicznego na dno przy pomocy metod hydroakustycznych i obserwacji bezpośrednich w południowych obszarach Morza Bałtyckiego udało się zrealizować.

1.2 Motywacja do badań

Głównym powodem rozpoczęcia badań prezentowanych w niniejszej rozprawie były wspomniane wcześniej niedostatki w wiedzy dotyczącej presji antropogenicznej w zróżnicowanych obszarach południowego Bałtyku. Oczekujemy, że tego typu informacje znajdą zastosowanie m.in. w zarządzaniu działaniami związanymi z ochroną środowiska naturalnego Morza Bałtyckiego, ale także mogą być przydatne podczas prowadzenia innych prac naukowych. Rezultaty mapowania dna i identyfikacji obiektów występujących na nim, które zostały zawarte w niniejszej pracy były wykorzystywane w dwóch międzynarodowych projektach badawczych. W latach 2013 – 2015 w projekcie MODUM – *Towards the Monitoring of Dumped Munition Threat* oraz w okresie 2016 – 2019 w projekcie DAIMON – *Decision Aid for Marine Munition*. Oba projekty były zorientowane na detekcję amunicji zatopionej w wodach Morza Bałtyckiego po II wojnie światowej. Autor niniejszej pracy był w nich odpowiedzialny m.in. za przeprowadzenie mapowań dna i inspekcje wykrytych obiektów o charakterze militarnym występujących na podłożu morskim. W trakcie realizacji opisywanych badań wykrywano obecność przedmiotów niezwiązanych z amunicją, deponowanych na skutek innego rodzaju aktywności człowieka na morzu. Odkrycia te stanowiły kolejną przesłankę do rozpoczęcia prac związanych z określeniem skali oddziaływania antropogenicznego na dno wybranych obszarów południowej części Morza Bałtyckiego.

1.3 Struktura pracy

W niniejszej pracy zaprezentowano metodykę wykrywania, obserwacji i identyfikacji antropogenicznych celów podwodnych o różnych wymiarach oraz kształtach, a także śladów widocznych na podłożu morskim w wybranych, zróżnicowanych obszarach południowej części Morza Bałtyckiego. Rozprawa ta składa się z 14 rozdziałów, w których

opisano m.in. kolejne kroki, które podjęto w celu zweryfikowania hipotezy badawczej oraz oceny oddziaływania człowieka na dno południowego Bałtyku. W rozdziale 2. dokonano przeglądu literatury naukowej dotyczącej aktualnego stanu wiedzy na temat metod detekcji i obserwacji śladów działalności człowieka na dnie akwenów morskich. Rozdziały 3. oraz 4. zawierają szczegółowe opisy nowoczesnej aparatury badawczej, służącej do bezinwazyjnych badań podłoża morskiego, w tym bezzałogowych, zrobotyzowanych platform podwodnych, które stanowiły główne narzędzia umożliwiające realizację niniejszych badań. W rozdziale 5. przybliżono zagadnienia związane ze zjawiskami fizycznymi odnoszonymi do rozpraszania i odbicia fal akustycznych na dnie oraz występujących na nim obiektach. Z kolei rozdział 6. stanowi opis obszarów badań z uwzględnieniem ich charakterystyk, takich jak m.in. głębokość i rodzaj osadu budujących podłoża morskie. W rozdziale 7. zaprezentowano kolejne etapy planowania pomiarów i akwizycji danych z wykorzystaniem zrobotyzowanych platform podwodnych wyposażonych w specjalistyczną aparaturę. Rozdział 8. zawiera szczegółowe opisy przetwarzania danych w celu uzyskania map dna badanych obszarów o wysokiej rozdzielczości, a także metod półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych występujących na nich oraz analizy śladów widocznych na uzyskiwanych zobrażeniach. W tej części przedstawiono również techniki przetwarzania zarejestrowanych zbiorów magnetometrycznych, a także wizualizacji i porządkowania uzyskiwanych wyników z wykorzystaniem oprogramowania typu GIS. W rozdziale 9. zaprezentowano wyniki poszukiwań obiektów antropogenicznych na dnie badanych obszarów, a także przypisano zidentyfikowane cele referencyjne do jednej z trzech kategorii: duże śmieci i odpady przemysłowe, wraki oraz obiekty o pochodzeniu militarnym. Oddzielny typ presji antropogenicznej na dno stanowiły ślady w postaci bruzd dennych, które również zostały zaprezentowane w tej części pracy. W rozdziale 10. przedyskutowano zastosowane metody badań i analiz uzyskanych danych. Ponadto, opisano prawdopodobne pochodzenie źródeł obserwowanej antropopresji i scharakteryzowano ich oddziaływanie na habitaty bentosowe badanych obszarów. Rozdział 11. stanowi podsumowanie przeprowadzonych prac i uzyskanych rezultatów, a także zawarto w nim wnioski wynikające z realizacji całości prezentowanych badań. W rozdziałach 12. i 13. przedstawiono literaturę naukową, którą posiłkowano się podczas przygotowywania niniejszej pracy, a także wymieniono listę rysunków, które posłużyły do jej zilustrowania. Ostatnią część rozprawy stanowi rozdział 14., w którym zawarto załączniki, na których prezentowane są mapy dna badanych obszarów z zaznaczonymi wykrytymi obiektami antropogenicznymi.

2. Metody detekcji i obserwacji śladów działalności człowieka na dnie akwenów morskich – przegląd literatury

Badania powierzchni dna akwenów morskich i oceanicznych od zawsze stanowiły duże wyzwanie dla człowieka. Niekorzystne dla istot ludzkich warunki panujące przy dnie, takie jak wysokie ciśnienie hydrostatyczne, brak światła, niska temperatura oraz niedostępność gazów umożliwiających oddychanie znacznie limitowały w przeszłości możliwości bezpośredniej obserwacji podłoża morskiego. Z biegiem czasu, dynamiczny rozwój technologii pozwolił na konstruowanie coraz bardziej zaawansowanej aparatury badawczej, dzięki której dno mórz i oceanów stopniowo odkrywało przed ludzkością swoje tajemnice. Równocześnie postęp w dziedzinie pozyskiwania i przetwarzania danych pozwolił na dokładniejsze analizy powierzchni podłoża dużych akwenów. Przykładem badań, które wymagają zarówno zaawansowanej aparatury badawczej, jak i wyrafinowanych metod opracowywania danych pozyskiwanych przy jej pomocy, jest detekcja śladów działalności człowieka na dnie morskim.

Literatura naukowa szeroko opisuje przykłady zastosowań bezkontaktowych metod do obserwacji powierzchni dna morskiego. Możemy w niej znaleźć liczne opisy zaawansowanych technik przetwarzania zarejestrowanych danych, stosowanych w celu pozyskania dodatkowych informacji, konkretyzujących charakterystyki badanych fragmentów dna. W niniejszym rozdziale, w oparciu o przykłady z literatury naukowej przybliżono współczesne podejście do problemu obserwacji podłoża morskiego pod kątem detekcji śladów działalności człowieka występujących na jego powierzchni. Przedstawione zostaną metody pozwalające na bezinwazyjne mapowanie dna morskiego, a także wybrane techniki opracowywania uzyskanych danych w celu detekcji śladów działalności człowieka w postaci obiektów antropogenicznych i bruzd występujących na podłożu morskim. Ponadto, omówione zostaną wady i zalety wspomnianych metod bezkontaktowych, a także procedury przetwarzania zarejestrowanych danych.

2.1 Hydroakustyczne metody badania powierzchni dna morza

Bezinwazyjne, zdalne badanie powierzchni dna morza jest bez wątpienia najszybszym i najbardziej efektywnym sposobem prowadzenia analiz wierzchniej warstwy podłoża morskiego. Techniki bezkontaktowe mogą być podzielone pod względem zjawisk

fizycznych, na jakich się opierają. Najpopularniejsze z nich, wykorzystujące aktywne metody akustyczne, pozwalają na mapowanie w krótkim czasie dużych obszarów dna, a także obiektów zlokalizowanych na nim. W literaturze naukowej można znaleźć wiele opisów zastosowań różnego rodzaju sprzętu hydroakustycznego do detekcji celów antropogenicznych występujących na powierzchni dna akwenów. Współczesne przykłady stanowią poszukiwania amunicji chemicznej zatopionej po II wojnie światowej w rejonach Hawajów (Edwards i in., 2016), Morza Śródziemnego (Alcaro i in., 2012), a także Morza Bałtyckiego (Bełdowski i in., 2016). Nieco innym przykładem tego typu operacji może być inwentaryzacja wraków w obszarze Morza Jońskiego (Geraga i in., 2020). Wykorzystanie w powyższych badaniach m.in. holowanych sonarów bocznych umożliwiło detekcję zarówno małych obiektów o pochodzeniu militarnym, jak i dużych wraków występujących na powierzchni dna rewidowanych akwenów. Urządzenia tego typu dostarczają informacji na temat kształtu oraz lokalizacji wykrywanych przedmiotów, jednak precyzyjna analiza ich geometrii może być utrudniona lub niemożliwa ze względu na zniekształcenia, które mogą powstawać w konsekwencji działania wielu czynników zakłócających podczas rejestracji takich danych, szczególnie na dużych głębokościach. Ponadto, na podstawie uzyskiwanych dwuwymiarowych zobrażeń, niejednokrotnie nie można jednoznacznie stwierdzić czym dokładnie są cele widoczne na sonogramach.

Zastosowanie sonarów bocznych o wysokiej rozdzielczości, montowanych na pokładach autonomicznych pojazdów podwodnych AUV (ang. *Autonomous Underwater Vehicle*), operując blisko dna, częściowo rozwiązuje powyższe problemy. Platformy tego typu są mniej narażone na gwałtowne przechyły w trakcie rejestracji danych, w porównaniu do systemów holowanych, zaś urządzenia hydroakustyczne pracujące na wysokich częstotliwościach (>500 kHz) zapewniają dane o wysokiej rozdzielczości (Grabowski i in., 2018). Alternatywą może być równoczesne wykorzystanie sonarów bocznych oraz echosond wielowiązkowych do prowadzenia rozpoznania powierzchni dna (Shang i in., 2019). Dane dostarczane przez systemy wielowiązkowe zawierają w sobie informacje na temat dokładnej, trójwymiarowej geometrii podłoża morskiego oraz występujących na nim obiektów, natomiast sonary boczne zapewniają zobrazenie siły rozpraszania sygnału na dnie w wysokiej rozdzielczości (Zhao i in., 2017). Zsyntetyzowane dane pochodzące z wyżej wspomnianych urządzeń, doskonale nadają się również do analiz dużych obiektów podwodnych o pochodzeniu antropogenicznym, takich jak na przykład wraki lub rurociągi (Bates i in., 2011; Xiong i in., 2018). Zastosowanie dwóch systemów pomiarowych jednocześnie wiąże się jednak ze znacznym zwiększeniem kosztów prowadzenia badań.

Kolejnym przykładem wykorzystania metod hydroakustycznych do obserwacji wpływu działalności człowieka na dno dużych akwenów wodnych jest detekcja bruzd występujących na ich powierzchni. Geneza powstawania tego typu zagłębień na podłożu morskim została opisana w 8. rozdziale niniejszej pracy. Zastosowanie metod hydroakustycznych, opartych między innymi na wykorzystaniu technik sonarowych do wykrywania bruzd dennych przynosi dobre rezultaty (Grafulla González i in., 2004; Smith i in., 2007; Diaz Mendoza i Schwarzer, 2019). Szczegółowa analiza tego rodzaju śladów antropogenicznych na powierzchni dna jest zadaniem trudnym. Przyczyną tego jest fakt, że bruzdy występują często w dużej liczbie oraz w gęstych skupiskach. Dodatkowo, zdarza się, że część z nich przecina się i nachodzi na siebie wzajemnie. W związku z tym, manualne zliczanie bruzd dennych lub wyznaczanie ich kierunkowości może być bardzo utrudnione lub nawet niemożliwe. Zastosowanie zaawansowanych technik przetwarzania obrazów dna uzyskanych przy pomocy sonarów bocznych pozwala na zautomatyzowanie powyższych procesów. Metody te będą dokładniej scharakteryzowane w dalszych częściach niniejszego rozdziału.

2.2 Optyczne metody badania powierzchni dna morza

Podobnie do metod akustycznych, metody optyczne takie jak np. systemy telewizji podwodnej znajdują zastosowania w badaniach powierzchni dna mórz i oceanów. Jednakże, metody optyczne poza zaletami jakimi są rozdzielczość i szybkość prowadzenia obserwacji, mają dużo więcej ograniczeń w porównaniu do technik hydroakustycznych m.in. ze względu na znaczne tłumienie fal elektromagnetycznych w środowisku wodnym. Skutkuje to zmniejszeniem zasięgu pracy systemów telewizji podwodnej w zestawieniu z urządzeniami hydroakustycznymi. Niemniej, jak pokazują przykłady zawarte w literaturze naukowej, metody optyczne są niezastąpione podczas weryfikacji, monitoringu i bezpośredniej obserwacji obiektów antropogenicznych wykrywanych przy użyciu aparatury akustycznej, bo pozwalają na ich trafniejszą weryfikację. Niestety ich efektywność i zasięg są zwykle małe w porównaniu do metod akustycznych. We wspomnianych wcześniej badaniach dotyczących poszukiwań zatopionej amunicji chemicznej w różnych częściach świata, wykorzystywano systemy telewizji podwodnej instalowane na zdalnie sterowanych pojazdach podwodnych ROV (ang. *Remotely Operated Vehicle*), opuszczane na dno, a także holowane nad jego

powierzchnią (Amato i in; 2006; Paka i Spiridonov, 2002; Edwards i in., 2016; Kelly i in, 2016, Bełdowski i in., 2018). Do wizualnej inspekcji wraków wykrywanych na dnie Morza Jońskiego również posłużono się systemami opartymi na metodach optycznych.

Platformy typu ROV, na których zamontowane są kamery podwodne, umożliwiają swobodne przemieszczanie się całego układu zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej w toni wodnej. Dzięki temu możliwa jest obserwacja fragmentów dna i przedmiotów spoczywających na nim z dowolnej perspektywy wybranej przez operatora sprzętu. Takie rozwiązanie umożliwia również akwizycję materiałów fotogrametrycznych, na podstawie których możliwe jest stworzenie dokładnych, trójwymiarowych modeli obiektów obserwowanych na dnie, takich jak np. wraki (Nornes i in., 2015). Kolejnym rozwiązaniem pozwalającym na długotrwałe obserwacje powierzchni dna są kamery podwodne umieszczane na dnie morskim. Tego typu podejście wymaga precyzyjnego umiejscowienia aparatury optycznej na dnie, a także wiąże się z brakiem możliwości przemieszczania sprzętu w trakcie rejestracji danych. Zaletą systemów optycznych umieszczanych na dnie jest możliwość długotrwałej obserwacji interakcji pomiędzy zwierzętami i roślinnością podwodną, a obiektami podwodnymi oraz podłożem morskim (Kita i in., 2015). Kompromisem pomiędzy pojazdami ROV, a aparaturą optyczną pozostawianą czasowo na dnie są holowane systemy telewizji podwodnej, które umożliwiają szybką inwentaryzację powierzchni dna oraz ilościową i jakościową ocenę obiektów (Jones i in., 2009). Zastosowanie tego typu sprzętu do obserwacji podłoża morskiego wiąże się jednak z ograniczoną manewrowością układu w toni wodnej. Zaletą aparatury holowanej jest natomiast znacznie niższa cena w porównaniu do platform zdalnie sterowanych.

Alternatywę dla metod hydroakustycznych w mapowaniu dna mórz i oceanów mogą stanowić optyczne urządzenia typu LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*). Sprzęt ten, wykorzystujący fale elektromagnetyczne w postaci światła laserowego, pozwala na prowadzenie mapowania powierzchni dna w płytkowodnych akwenach, o niskim objętościowym współczynniku osłabiania światła (Wang i Philpot, 2007). Powyższe czynniki znacznie limitują wykorzystanie urządzeń tego typu jedynie do badania wybranych fragmentów zbiorników wodnych, najczęściej w rejonach przybrzeżnych. Aparatura bazująca na technologii LIDAR pozwala na uzyskiwanie równie szczegółowej batymetrii badanych akwenów jak w przypadku urządzeń hydroakustycznych (Filisetti i in., 2018), a także na klasyfikację ich powierzchni (Tulldahl i in., 2007) oraz detekcję obiektów podwodnych spoczywających na dnie (Mitra i in., 2005), z uwzględnieniem wcześniej wspomnianych ograniczeń.

2.3 Detekcja śladów działalności człowieka na dnie na podstawie wybranych metod transformacji rastrowych mozaik sonarowych

Manualna detekcja śladów aktywności człowieka na dnie oraz obiektów antropogenicznych, widocznych na zobrażowaniach uzyskanych przy pomocy urządzeń hydroakustycznych, bywa często zadaniem trudnym oraz czasochłonnym. W przypadku rastrowych mozaik sonarowych utrudnienia te wynikają ze specyfiki zniekształceń geometrycznych występujących na generowanych sonogramach. Przyczynami powstawania tych zniekształceń mogą być m.in. zjawisko refrakcji fal akustycznych w wodzie, wspomniane wcześniej gwałtowne przechyły platform holowanych w toni wodnej, na których zainstalowane są przetworniki nadawczo-odbiorcze, a także nieprecyzyjne pozycjonowanie urządzeń. Ponadto, obiekty podwodne mogą być częściowo zagrzebane w miękkich osadach budujących dno, co dodatkowo utrudnia ich detekcję i prawidłową identyfikację za pomocą metod hydroakustycznych opartych na wysokich częstotliwościach. Powyższe czynniki sprawiają, że mało doświadczony operator, prowadzący analizę zbiorów obrazów sonarowych, może błędnie zinterpretować uzyskiwane dane. Współczesne algorytmy, oparte na technikach transformacji danych rastrowych, pozwalają na automatyczne lub półautomatyczne wykrywanie obiektów podwodnych oraz pozostałości po działalności człowieka na dnie, widocznych na zobrażowaniach uzyskiwanych przy pomocy sonarów bocznych.

Przed przystąpieniem do wyznaczania lokalizacji przedmiotów spoczywających na podłożu morskim badanych akwenów i analizy śladów oddziaływań antropogenicznych na dnie należy przeprowadzić wstępną obróbkę zarejestrowanych danych. Szczegółowy opis korekcji uzyskiwanych zbiorów sonarowych został przedstawiony w rozdziale 8. niniejszej pracy. Aby możliwe było wykrywanie obiektów podwodnych na powierzchni dna, muszą one charakteryzować się zdolnością do odbijania (lub rozpraszania) fal akustycznych generowanych przez aparaturę pomiarową (różnych od własności tła). Właściwości akustyczne poszukiwanych celów sonarowych, takie jak rodzaj materiałów, z których są zbudowane oraz ich kształt decydują o tym, czy będą one wyróżniać się na tle obrazów sonarowych. Przetworzone dane sonarowe są najczęściej prezentowane w postaci obrazów rastrowych o 8 bitowej dynamice. Oznacza to, że każdemu z pikseli, który tworzy zobrażowanie dna przypisana jest wartość liczbowa, mieszcząca się w przedziale od 0 do 255. Obiekty na powierzchni dna, które silnie rozpraszają fale akustyczne będą widoczne na sonogramach w postaci jasnych pikseli, których intensywność jest proporcjonalna do odbitej

energii akustycznej. Obszary o średniej jasności pikseli, będące tłem obrazów sonarowych, stanowią obraz dna. Bruzdy występujące na mozaikach sonarowych składają się najczęściej z pikseli nieco ciemniejszych niż w przypadku obiektów podwodnych i jednocześnie jaśniejszych niż pozostałe fragmenty dna, dzięki czemu możliwa jest ich detekcja. Dodatkowo, przedmioty spoczywające na podłożu morskim mogą tworzyć na jego powierzchni cienie akustyczne, wynikające z geometrii wiązki akustycznej sonarów bocznych. Analogicznie, w przypadku głębokich bruzd, cienie akustyczne będą tworzyły się w miejscach, do których nie docierały impulsy akustyczne. W związku z tym, wykrywanie celów oraz bruzd występujących na dnie możliwe jest również na podstawie analizy rzeczonych cieni.

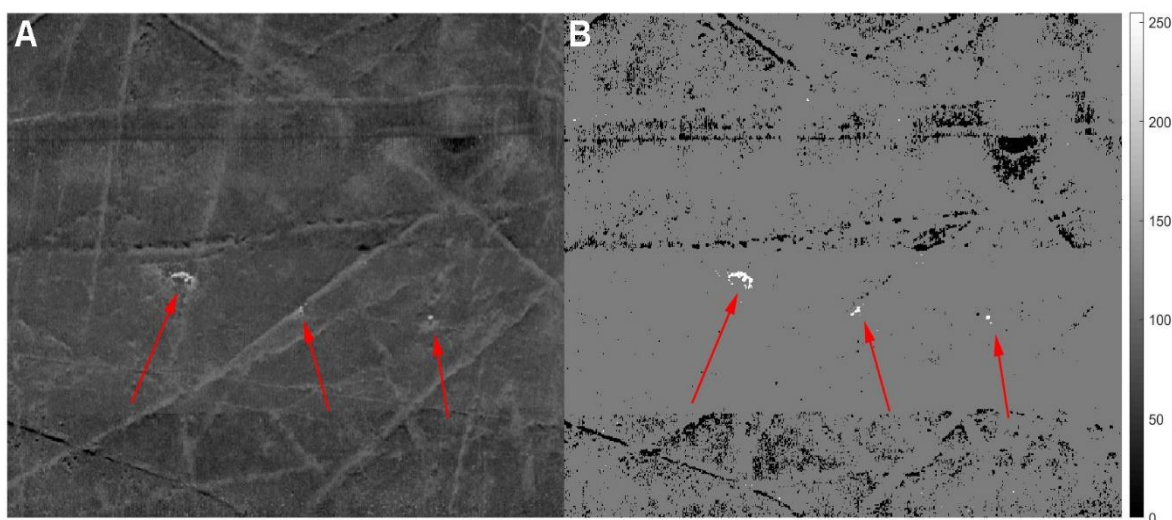
Najprostszym sposobem detekcji obiektów podwodnych i śladów działalności człowieka w postaci bruzd na rastrowych obrazach dna jest wykorzystanie filtra progowego dla obrazów sonarowych (Modalavalasa, Rao, Prasad, 2012). Zabieg ten polega na kwantyzacji rastrowych obrazów dna, tak aby w dalszych krokach analizy sonogramów możliwa była ekstrakcja celów występujących na dnie, które posiadają cień akustyczny lub wyróżniają się na tle podłoża morskiego (Wąż i in., 2013). Taki efekt uzyskuje się poprzez wprowadzenie progów intensywności pikseli, które mogą zostać wyznaczone na podstawie manualnej analizy histogramów obrazów rastrowych lub np. przy pomocy metody zaproponowanej przez Otsu (Otsu, 1979). Liczba wybranych progów, a także ich zakresy będą decydować o skuteczności działania filtra. Przykładowe założenia transformacji rastrowej mozaiki sonarowej, z wykorzystaniem potrójnego filtra progowego i ponownej kwantyzacji pikseli budujących obraz, zostały przedstawione poniżej:

- obiektom podwodnym przypisuje się piksele białe o wartości 255 - przedział intensywności pikseli przed transformacją na poziomie 131 – 255
- dno (tło mozaiki sonarowej) charakteryzować będą piksele szare o wartości 126 - przedział intensywności pikseli przed transformacją na poziomie 61 – 130
- cienie akustyczne będą reprezentowane przez piksele czarne o wartości 0 - przedział intensywności pikseli przed transformacją na poziomie 0 – 61.

Operację opisaną powyżej można przedstawić następująco:

$$g_{n,m} = \begin{cases} 255 & \text{dla } 255 \geq f_{n,m} \geq 131 \\ 126 & \text{dla } 130 \geq f_{n,m} \geq 61 \\ 0 & \text{dla } 60 \geq f_{n,m} \geq 0 \end{cases} ,$$

gdzie $g_{n,m}$ to intensywność piksela po zastosowaniu filtra progowego, $f_{n,m}$ to intensywność piksela przed progowaniem, zaś m oraz n opisują współrzędne transformowanego piksela. W konsekwencji przeprowadzonej operacji, obiekty występujące na dnie mapowanego obszaru wyróżniają się znacząco na tle podłoża morskiego, a co za tym idzie wyznaczenie ich dokładnych lokalizacji oraz wstępna identyfikacja stają się dużo prostsze (rys. 2.1). W przypadku potrzeby detekcji i analizy bruzd dennych prezentowanych na rysunku 2.1A należałoby zastosować zmodyfikowane wartości filtra progowego.



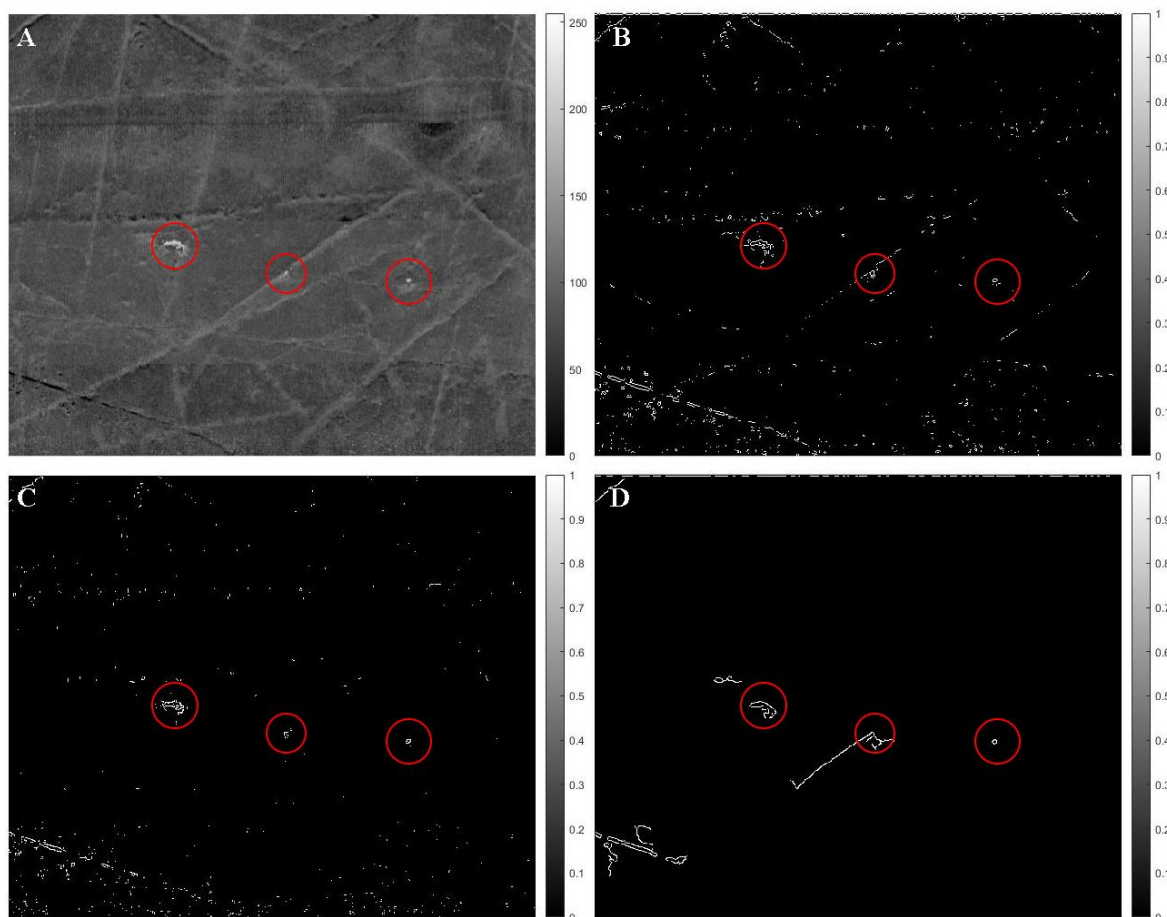
Rysunek 2.1 Przykładowe działanie filtra progowego: A – fragment przetworzonej mozaiki sonarowej przez zastosowaniem filtra progowego; B – fragment mozaiki sonarowej po zastosowaniu filtra progowego. Strzałki w kolorze czerwonym wskazują lokalizację obiektów podwodnych

Opisana metoda nie jest wolna od wad, które w praktyce znacznie limitują jej wykorzystanie w pracach związanych z analizą przetworzonych mozaik sonarowych. Zasadnicza niedoskonałość tego typu transformacji polega na uwidocznieniu wszystkich odpowiednio silnych ech zarejestrowanych w zbiorach sonarowych, nawet w przypadku, kiedy nie pochodzą one od obiektów spoczywających na powierzchni dna. Źródłem fałszywych ech mogą być np. ryby demersalne, przedmioty występujące w toni wodnej, które w chwili rejestracji danych znalazły się w zasięgu wiązki akustycznej lub artefakty związane z geometrią pracy sonaru bocznego. Dodatkowo, w przypadku analizy mozaik sonarowych pochodzących z obszarów o różnej budowie geologicznej wierzchniej warstwy dna zachodzi potrzeba każdorazowego dostosowania wartości filtrów progowych z powodu różnic we właściwościach akustycznych dna. Ponadto, obiekty częściowo zagrzebane w osadach podłoża morskiego mogą zostać niewykryte.

Kolejnym przykładem metod pozwalających na detekcję obiektów spoczywających na powierzchni dna zbiorników wodnych, widocznych na uzyskiwanych sonogramach są techniki oparte na analizie tekstur (Blondel, 2000; Karoui i in., 2009; Fakiris i in., 2016; Xinyu i in., 2017). Szczegółowy opis przebiegu działania oraz zastosowania wybranych rodzajów tego typu transformacji dla rastrowych danych sonarowych został przedstawiony w rozdziale 8. niniejszej pracy. Głównym celem analizy tekstur jest badanie stopnia jasności pikseli, a także ich wzajemnych relacji w stosunku do zadanego sąsiedztwa. Zastosowanie powyższej metody umożliwia rozpoznawanie tekstur występujących na rastrowych obrazowaniach sonarowych oraz ekstrakcję ich cech kontekstowych. Cechy te mogą być wyznaczone przy wykorzystaniu wielu różnych technik transformacji obrazów rastrowych, takich jak np. statystyk I rzędu, statystyk II rzędu obliczanych na podstawie macierzy współwystępowania poziomów szarości, metody Laws'a, dyskretnej transformacji falkowej (Kayaalti i in., 2014), czy też filtru Weiner'a (Priyadharsini i Sree Sharmila, 2019). Generowane deskryptory analizowanych obrazów są następnie wykorzystywane jako dane wejściowe dla algorytmów klasyfikacyjnych opartych na przykład na analizie skupień (metoda k-średnich lub rozmytych c-średnich) (Fakiris i in., 2016). Na podstawie wyników uzyskiwanych w procesie klasyfikacji rastrowych obrazów sonarowych możliwa jest detekcja obiektów podwodnych widocznych na obrazowaniach sonarowych, a nawet bruzd. Ogromną zaletą stosowania analizy tekstur do wykrywania celów występujących na powierzchni dna morza jest fakt, że technika ta daje dobre i porównywalne rezultaty bez względu na typ osadu budujący wierzchnią warstwę dna. Ponadto, obecność skomplikowanych form morfologicznych, czy też roślinności i zwierząt morskich na dnie nie wpływa negatywnie na proces detekcji obiektów antropogenicznych. Z drugiej strony należy pamiętać, że zastosowanie tego typu metody dla dużych mozaik sonarowych charakteryzujących się wysoką rozdzielczością może wiązać się z długim czasem obliczeń potrzebnym na wyznaczenie pożądaných deskryptorów obrazów rastrowych.

Szczególnie przydatne podczas wykrywania podłużnych celów, takich jak bruzdy denne oraz większe obiekty antropogeniczne mogą okazać się metody polegające na detekcji krawędzi. Przykładami tego typu przekształceń mogą być filtr Gabor'a (Xie i in., 2012) czy też filtry typu *Canny*, *Sobel*, *Prewitt* lub *Roberts* (Shrivakshan i Chandrasekar, 2012).

W przypadku drugiej grupy filtrów, ich ogólna zasada działania polega na poszukiwaniu fragmentów obrazów rastrowych, w których wartość gradientu intensywności pikseli jest większa niż przyjęta wartość progowa (Bogdan, 2010). Uzyskiwane wyniki transformacji będą różnić się w zależności od wybranej metody przetwarzania zbiorów, kształtu i geometrii poszukiwanych celów, a także od jakości danych sonarowych oraz ich wstępnego przygotowania (rys. 2.2).



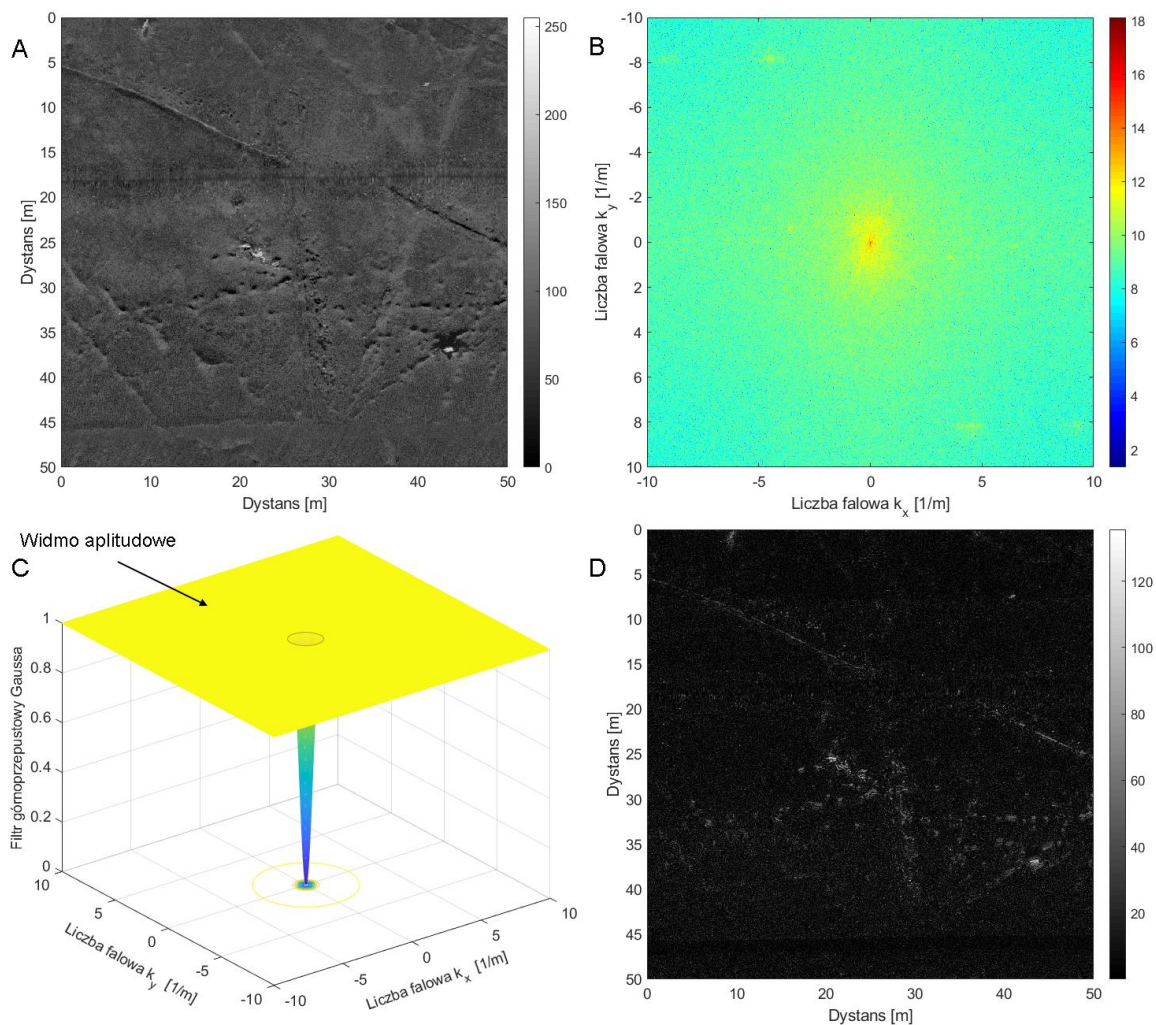
Rysunek 2.2 Przykładowe działanie algorytmu detekcji krawędzi na fragmencie mozaiki sonarowej. A – fragment mozaiki sonarowej przed wykrywaniem krawędzi; B, C i D - fragmenty przetworzonej mozaiki sonarowej po zastosowaniu algorytmu detekcji krawędzi przy pomocy metod *Sobel*, *Roberts* i *Canny* (przyjęta wartości progowe dla metody *Canny*: min = 0,01 i max = 0,3);. Czerwone okręgi wskazują lokalizację obiektów podwodnych na uzyskiwanych zobrazeniach

Poza wspomnianymi powyżej sposobami przetwarzania danych rastrowych, w literaturze napotkać można jeszcze kilka innych metod pozwalających na automatyczne wykrywanie krawędzi dużych, podłużnych celów, takich jak np. bruzdy lub podwodne rurociągi. Jedną z technik umożliwiających przeprowadzenie tego typu operacji jest transformacja Hough'a (Fatan i in., 2016). Alternatywną propozycją może być metoda wykorzystująca cechy Haar'a

(Gournia i in., 2019). Podejście to polega na zaprojektowaniu filtrów wykorzystujących zestawy prostych masek zero-jedynkowych, które są nakładane na obraz wejściowy (sonogram) pod różnymi kątami. W obszarze działania rzeczonych masek oblicza się różnice między sumą wartości pikseli położonych w części białej oraz czarnej. Wyznaczone w ten sposób wariancje kontrastu pozwalają na wykrywanie krawędzi bruzd na analizowanych mozaikach sonarowych. Bardzo przydatną właściwością filtrów opartych na cechach Haar'a jest możliwość zmieniania rozmiaru i orientacji zadawanych czarno-białych masek (Lienhart i Maydt, 2002), dzięki czemu możliwa jest detekcja śladów na dnie o różnym rozmiarze i kierunkowości.

Inną metodą, pozwalającą na wyznaczenie kolejnych parametrów klasyfikacyjnych użytecznych podczas przeprowadzania detekcji obiektów i śladów antropogenicznych na rastrowych zobrazowaniach dna, może być dwuwymiarowa szybka transformacja Fouriera - 2D FFT (ang. *Two Dimensional Fast Fourier Transformation*) (Fatan i in., 2016). Przyjmując, że każdy sonogram to w rzeczywistości dwuwymiarowa macierz zbudowana z pikseli o określonej wartości sygnału, istnieje możliwość zastosowania jednowymiarowej szybkiej transformacji Fouriera względem najpierw kolumn, a następnie wierszy tej macierzy. Otrzymuje się w ten sposób macierz widma amplitudowego przetwarzanego obrazu, która zbudowana jest ze składowych stałych oraz współczynników transformacji Fouriera w postaci liczb zespolonych. W przypadku wykorzystania tego typu operacji do przetwarzania rastrowych zobrazowań dna, uzyskuje się nie tylko dodatkowy deskryptor analizowanego obrazu, ale także po implementacji odpowiednich filtrów na wygenerowanym widmie amplitudowym, możliwa jest detekcja krawędzi obiektów oraz form morfologicznych występujących na tym obrazie (rys. 2.3). Rozszerzony opis działania i zastosowania dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera do przetwarzania obrazów sonarowych został przedstawiony w rozdziale 8. niniejszej pracy.

Należy pamiętać, że zastosowanie kombinacji zbyt wielu parametrów wejściowych (deskryptorów obrazów sonarowych) dla algorytmów klasyfikacyjnych może prowadzić do wydłużenia czasu potrzebnego na realizację operacji wykrywania śladów działalności człowieka na dnie, a w skrajnych przypadkach uzyskania błędnych wyników. Powodem tego jest możliwość występowania znacznej korelacji między parametrami wybranymi do przeprowadzania klasyfikacji uzyskiwanych zobrazowań dna. W przypadku silnej korelacji między wykorzystywanymi danymi wejściowymi lub ich redundancji otrzymane wyniki mogą być zafałszowane.



Rysunek 2.3 Detekcja krawędzi obiektów podwodnych i form morfologicznych dna na fragmencie mozaiki sonarowej przy pomocy 2D FFT oraz górnoprzepustowego filtra. A – fragment mozaiki sonarowej; B – widmo amplitudowe fragmentu mozaiki sonarowej A uzyskane przy pomocy 2D FFT; C – widmo amplitudowe mozaiki sonarowej A z zaimplementowanym dolnoprzepustowym filtrem Gaussa; D – fragment mozaiki sonarowej A po wykrywaniu krawędzi obiektów podwodnych i form morfologicznych (bruzd dennych) występujących na dnie

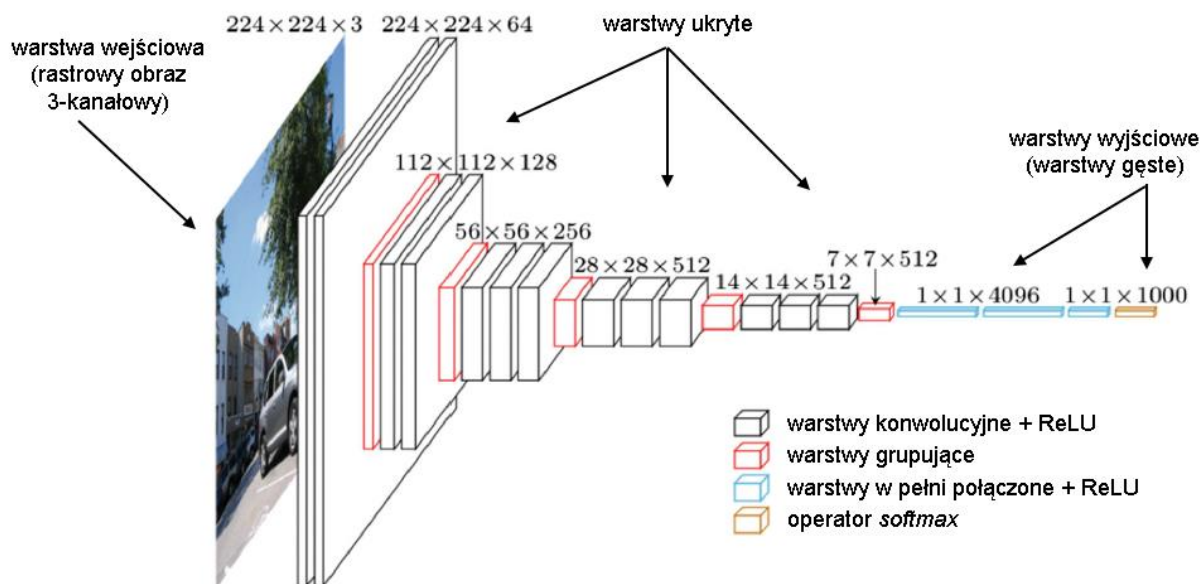
Zastosowanie metod polegających na redukcji parametrów, które nie będą miały znaczącego wpływu na uzyskiwane rezultaty klasyfikacji stanowi rozwiązanie powyższych problemów. Popularnym przykładem metody umożliwiającej tego typu operacje jest analiza składowych głównych PCA (ang. *Principal Component Analysis*) (Chen i in., 2000; Preston, 2009; Celik i Tjahjadi, 2011; Stepnowski i Łubniewski, 2011), która zostanie szczegółowo opisana w dalszych rozdziałach niniejszej pracy.

Jedną z najbardziej zaawansowanych i skutecznych technik, pozwalających na automatyczną detekcję śladów działalności człowieka na dnie, a także obiektów naturalnych widocznych na rastrowych zobrazowaniach sonarowych jest metoda wykorzystująca

konwolucyjne sieci neuronowe CNN (ang. *Convolution Neural Network*) (Einsidler i in., 2018; Jiao i in., 2018; Feldens i in., 2019; Song i in., 2019). Sieci te składają się z neuronów, które tworzą wzajemnie łączące się ze sobą warstwy. Wyróżnić można trzy typy warstw: wejściowe, ukryte i wyjściowe. Jednocześnie, sieci neuronowe mogą mieć wiele wejść i wyjść. Początkową warstwą wejściową dla CNN mogą być rastrowe obrazy dna uzyskiwane przy pomocy sonarów bocznych. Warstwy konwolucyjne, należące do grupy warstw ukrytych, umożliwiają efektywną ekstrakcję cech przy pomocy zestawów filtrów wykorzystujących technikę okna przesuwnego, o określonych rozmiarach, symetrycznych w stosunku do wysokości i szerokości, ustalonych w procesie projektowania sieci.

Po przeprowadzeniu operacji filtracji na wszystkich pikselach obrazu wejściowego na poziomie pojedynczych neuronów (jednemu neuronowi odpowiada jeden filtr) otrzymuje się wartości liczbowe dla każdego elementu filtru, które są przemnażane przez losowo przyjętą wagę tego filtru (współczynnik maski konwolucji). Uzyskane iloczyny sumuje się, a otrzymana wartość stanowi pojedynczy piksel nowo wygenerowanej mapy cech. Liczba zastosowanych filtrów odpowiada liczbie otrzymanych map cech. Następnie, mapy cech są poddawane działaniu funkcji aktywacji w celu zapobiegania zanikania gradientu (np. funkcja rektyfikowanej jednostki liniowej ReLu) (Krizhevsky i in., 2012). Przetworzone w ten sposób mapy cech tworzą warstwę konwolucyjną, którą można potraktować jako obraz n -kanałowy, gdzie n to liczba zastosowanych filtrów. Wygenerowana warstwa konwolucyjna staje się wejściem dla kolejnej warstwy. W procesie uczenia CNN, przez wsteczną propagację gradientu, współczynniki masek konwolucji oraz wartości progowe neuronów są automatycznie korygowane, tak aby osiągnąć jak najlepszą skuteczność klasyfikacji obrazów wejściowych. Kolejnym typem warstw w grupie warstw ukrytych CNN są warstwy grupujące (ang. *pooling*), których zadaniem jest zmniejszenie przestrzennego rozmiaru parametrów generowanych przez warstwy konwolucyjne w celu zapobiegania przeuczenia sieci. Ostatnimi elementami architektury CNN są warstwy wyjściowe (warstwy gęste), w których każdy neuron warstwy wyjściowej jest połączony z każdym neuronem poprzedniej warstwy ukrytej w danej sieci. Najczęściej ostatnią warstwę wyjściową stanowi operator klasyfikacyjny typu *softmax*, który transformuje wektor wartości rzeczywistych wygenerowany przez CNN na wektor wartości w zakresie $\langle 0,1 \rangle$, przy czym suma tych wartości wynosi 1. Uzyskane w ten sposób wyniki można interpretować jako prawdopodobieństwo przynależności do danej klasy. Przed wykorzystaniem CNN do klasyfikacji mozaik sonarowych i detekcji śladów działalności

człowieka na dnie na ich podstawie należy wyznaczyć odpowiednie klasy, do których przyporządkowane zostaną dane, np. zagłębienie w dnie, obiekt na dnie, cień akustyczny, dno. Architektura przykładowej konwulucyjnej sieci neuronowej została przedstawiona na rysunku 2.4.



Rysunek 2.4 Architektura konwulucyjnej sieci neuronowej na przykładzie sieci VGG-16 – detekcja i klasyfikacja obiektów na obrazie do 1000 klas (na podstawie Nash i in., 2018)

Pomimo dużej skuteczności CNN w klasyfikacji oraz segmentacji rastrowych obrazów cyfrowych, a także detekcji obiektów występujących na nich, metoda ta ma kilka wad. Główną z nich jest konieczność wykorzystania dużych zbiorów danych (od kilkuset do nawet kilkunastu tysięcy obrazów) w celu wytrenowania sieci, tak, aby uzyskać zadowalające wyniki. Zbiory te są dzielone w proporcji np. 50/30/20% na dane treningowe, dane walidacyjne i dane analizowane. Istnieje również możliwość wykorzystania wcześniej wytrenowanych CNN, jednak takie rozwiązanie nie gwarantuje otrzymania pożądaných rezultatów. Ponadto, prowadzenie analizy danych rastrowych z wykorzystaniem konwulucyjnych sieci neuronowych wymaga wysokiej klasy sprzętu komputerowego, wyposażonego w zaawansowane akceleratory graficzne. Powodem tego jest fakt, że zastosowanie CNN do analizy zwłaszcza dużych obrazów rastrowych, wiąże się z koniecznością wykonania setek tysięcy operacji matematycznych na etapie treningu sieci, jak również w trakcie przetwarzania pozostałych części zbiorów.

3. Akustyczne metody badania powierzchni dna morza: sonary boczne, echosondy jednowiązkowe i wielowiązkowe oraz systemy interferometryczne

Współcześnie wykorzystujemy wiele technik pozwalających na obserwację i badanie powierzchni dna morza, jak i struktur występujących pod nim. Metody te dzielą się na inwazyjne oraz nieinwazyjne. Ze względu na wielkość obszaru z jakiego można uzyskać pożądane informacje, dużo bardziej preferowane są techniki nieinwazyjne zwane zdalnymi lub bezkontaktowymi. Dodatkową zaletą stosowania takich bezkontaktowych metod jest fakt, że nie wpływają one na przedmiot badań, np. podczas prowadzenia oceny stanu habitatów dennych.

Współczesne, bezinwazyjne metody badania dna opierają się na wykorzystaniu fal elektromagnetycznych (światło) oraz fal sprężystych (sygnały akustyczne). Ze względu na znaczne tłumienie krótkich fal elektromagnetycznych w wodzie, napotykamy na trudności związane z ich zastosowaniem zwłaszcza w głębszych zbiornikach wodnych. Ponadto, zasięg podwodnych kamer wideo, nawet z dodatkowym oświetleniem, bywa znacznie ograniczony, czego powodem jest m.in. mętność wody morskiej. Takie warunki panują zwłaszcza w Morzu Bałtyckim, gdzie w zależności od głębokości i stopnia eutrofizacji, maksymalny zasięg widzenia wynosi od 15 do 20 metrów (Dera, 2003; Pryputniewicz i Wojtasiewicz, 2008). Powyższe właściwości wody morskiej sprawiają, że metody bezkontaktowe wykorzystujące fale elektromagnetyczne w postaci światła, znajdują zastosowanie tylko w wybranych akwenach.

Bardziej skutecznym i uzasadnionym sposobem badania powierzchni dna morza oraz struktur występujących na nim są metody hydroakustyczne. Toń wodna jest transparentna dla impulsów akustycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Zastosowanie tego rodzaju fal sprężystych pozwala na szybkie zbadanie dużych obszarów dna. W poniższym rozdziale opisane zostały wybrane typy urządzeń hydroakustycznych, które są najczęściej wykorzystywane do prowadzenia badań powierzchni dna mórz i oceanów: dwa sonary boczne o różnej rozdzielczości, echosonda jednowiązkowa, echosonda wielowiązkowa oraz systemy interferometryczne.

3.1 Sonar boczny holowany za statkiem – sonar niskiej rozdzielczości

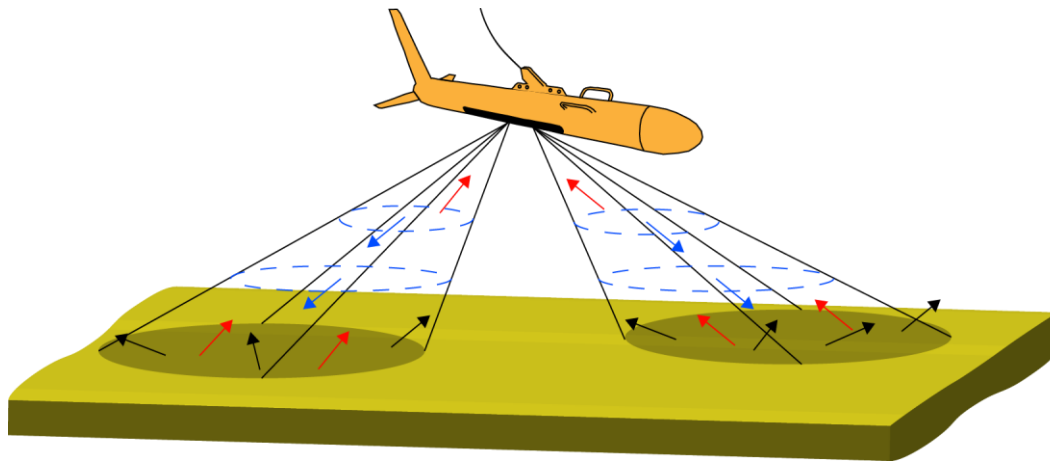
Sonary boczne (ang. *side scan sonar*) stanowią jeden z typów urządzeń pozwalających na mapowanie powierzchni dna zbiorników wodnych przy wykorzystaniu fal akustycznych. Popularnym rozwiązaniem jest stosowanie w tego rodzaju aparaturze przetworników dwukanałowych, co pozwala na równoczesną akwizycję danych na dwóch częstotliwościach. Generują one impulsy akustyczne propagujące w toni wodnej, które następnie ulegają odbiciu i rozproszeniu na powierzchni dna akwenu (rys. 3.1). Sonar rejestruje czas przebiegu nadawanych sygnałów, a także ich amplitudę po odbiciu od przeszkody i na ich podstawie tworzony jest dwuwymiarowy obraz powierzchni dna. Charakterystyka nadawanych impulsów i ich częstotliwość, mają bezpośredni wpływ na rozdzielczość przestrzenną uzyskiwanych danych, która rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości generowanych sygnałów. Należy tu jednak zaznaczyć, że wzrost rozdzielczości skutkuje zmniejszonym zasięgiem pracy sonaru. W pracy z sonarem bocznym wyróżniamy dwa rodzaje rozdzielczości: rozdzielczość wzdłużną (Δx) (ang. *along track resolution*), która maleje wraz ze wzrostem odległości od sonaru, oraz rozdzielczość poprzeczną (Δy) (ang. *across track resolution*), która rośnie ze wzrostem tej odległości. Zależności te opisują wzory [3.1.1] i [3.1.2] (Blondel,2009):

$$\Delta x = R \times \sin \theta_h \quad [3.1.1]$$

oraz

$$\Delta y = \frac{c \tau}{2} \times \frac{1}{\cos \beta}, \quad [3.1.2]$$

gdzie θ_h oznacza szerokość kątową wiązki w płaszczyźnie poziomej, R opisuje odległość od sonaru, c odpowiada prędkości dźwięku w wodzie, zaś τ to czas trwania impulsu i β - kąt poślizgu nadawanego impulsu akustycznego względem uśrednionej powierzchni dna.

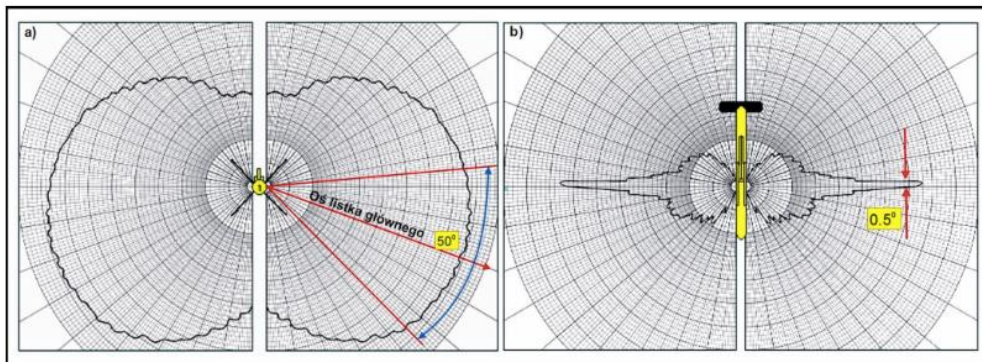


Rysunek 3.1 Geometria wiązek akustycznych sonaru bocznego. Niebieskie strzałki oznaczają kierunek propagacji impulsów nadawanych, czarne to kierunki fal rozproszonych na dnie, zaś czerwone strzałki symbolizują echo odbite od dna powracające do przetwornika

Sonary boczne można podzielić na trzy kategorie, ze względu na ich autonomię: sonary holowane za jednostką pomiarową, sonary montowane w kadłubach statków – sonary boczne kadłubowe, a także sonary opuszczane pionowo na zadaną głębokość – sonary typu VDS (ang. *Variable Depth Sonar*) (Felski, 2017). Dobór odpowiedniego typu urządzenia do realizacji badań zależy między innymi od głębokości akwenu, w którym prowadzone jest rozpoznanie dna, a także od rodzaju jednostki pływającej, która będzie wykorzystywana do akwizycji danych.

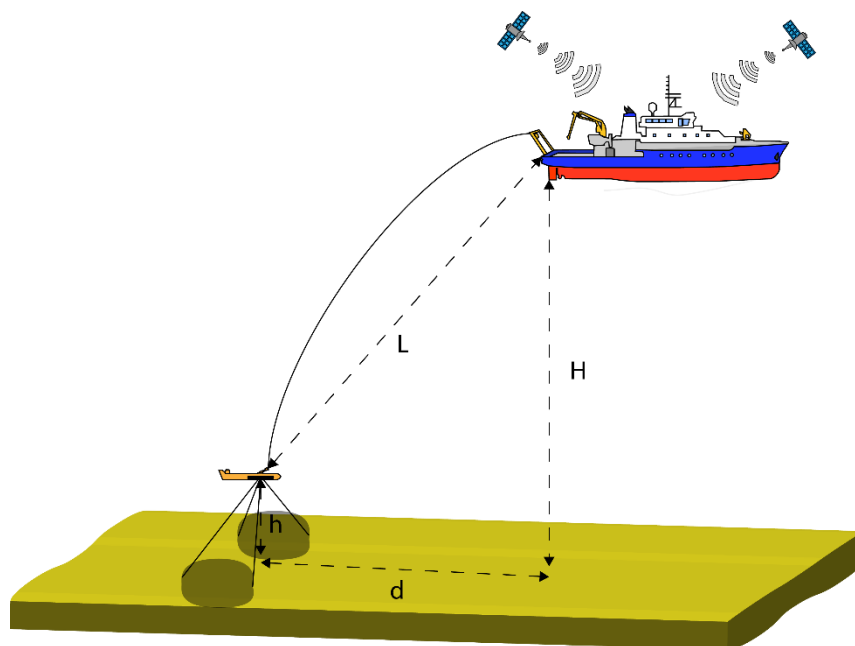
Przykładem sonaru bocznego holowanego za statkiem jest Edgetech DF-1000, którego częstotliwości robocze wynoszą odpowiednio 100 kHz i 390 kHz (± 20 kHz). Maksymalny zasięg pracy tej aparatury wynosi ok. 200 – 300 metrów dla każdego z przetworników, co w praktyce daje przy wykorzystaniu niższej częstotliwości generowanych sygnałów pokrycie dna pasem do szerokości 600 metrów w odległości prostopadłej do transektu sonarowego (Grządziel, 2007). Czasy trwania impulsów nadawanych przez przetworniki sonaru Edgetech DF-1000 wynoszą odpowiednio 0,1 ms dla częstotliwości 100 kHz i 0,05 ms dla częstotliwości 390 kHz. Przy zachowaniu odpowiedniej prędkości jednostki holującej (3 - 4 węzły) i przy szerokości kątowej wiązki w płaszczyźnie poziomej wynoszącej $0,5^\circ$ dla sonaru bocznego Edgetech DF-1000 wysyłającego impulsy akustyczne o wysokiej częstotliwości (rys. 3.2), możliwa jest detekcja obiektów o rozmiarach od 0,5 m do 1 m występujących na powierzchni dna.

W przedstawianych tu badaniach, wykorzystano między innymi sonar boczny Edgetech DF – 1000, którego nastawy były dobierane tak, aby uzyskać zasięg rzędu 100 m dla każdego z przetworników. Dodatkowo, przebiegi transektów sonarowych były projektowane w taki sposób, aby obrazy z sąsiednich transektów nachodziły na siebie wzajemnie osiągając 150% pokrycia badanego wycinku dna. Tego typu redundantne działania podejmuje się w celu zminimalizowania efektów związanych z refrakcją fal akustycznych w toni wodnej.



Rysunek 3.2 Charakterystyka kierunkowa przetworników hydroakustycznych w sonarze bocznym Edgetech DF-1000: a) w płaszczyźnie pionowej, b) w płaszczyźnie poziomej (za Grządziel, 2007)

Kolejnym z ważnych aspektów, który należy uwzględnić podczas mapowania dna akwenów morskich przy pomocy holowanego sonaru bocznego jest określenie położenia opływownika sonaru względem jednostki holującej (rys. 3.3).



Rysunek 3.3 Schemat holowania sonaru bocznego nad dnem morskim

Jest to niezwykle istotne, gdyż dopiero po wyznaczeniu odległości w poziomie pomiędzy statkiem, a holowanym sonarem, zakładając, że sonar znajduje się pod śladem torowym jednostki nawodnej, możliwe jest przypisanie zebranych danym hydroakustycznym rzeczywistych współrzędnych geograficznych. Jeżeli nie przeprowadzi się tej korekcji, mozaiki sonarowe będą przesunięte o wartość odległości d (ang. *layback*).

Podczas rejestracji danych, jednostka holująca otrzymuje informacje dotyczące jej położenia, np. dzięki różnicowemu systemowi globalnego pozycjonowania DGPS. W trakcie pomiaru, sonar opuszczany jest na odpowiednią głębokość, tak aby uzyskać wcześniej założone pokrycie dna. Choć kształt kabloliny holowniczej posiada postać krzywej łańcuchowej, to popularną metodą wyznaczenia pozycji sonaru względem jednostki holującej jest obliczenie wartości *layback'u* za pomocą przybliżonego wzoru [3.1.3] (Blondel, 2009):

$$d = \sqrt{L^2 - (H - h)^2}, \quad [3.1.3]$$

gdzie d oznacza odległość sonaru od jednostki holującej (*layback*), L opisuje długość wydanej kabloliny łączącej opływnik ze statkiem, zaś H oraz h odpowiadają kolejno: głębokości poniżej statku i wysokości sonaru nad dnem. Wszystkie wyżej wspomniane wartości wyrażane są w metrach.

W trakcie obróbki zarejestrowanych danych dodaje się wartość wyliczonego *layback'u* do współrzędnych geograficznych rejestrowanych przez jednostkę holującą. Pomimo zastosowania tej korekcji, zebrane dane mogą nadal być obarczone błędem wynikającym na przykład z gwałtownie zmieniającego się ukształtowania dna. Współcześnie stosuje się alternatywną, dokładniejszą metodę wyznaczania odległości pomiędzy statkiem holującym, a sonarem. Zostanie ona scharakteryzowana w dalszych rozdziałach tej pracy.

3.2 Sonar boczny montowany w kadłubie autonomicznego pojazdu podwodnego – sonar wysokiej rozdzielczości

W ostatnich dekadach znacznie wzrosła popularność autonomicznych pojazdów podwodnych AUV jako narzędzi służących do mapowania dna morskiego, wykonujących zadania w szerokim zakresie – zarówno o charakterze cywilnym jak i militarnym,

w akwenach płytkich oraz głębokich (Grabowski i in., 2018; Wynn i in., 2014; Grasmueck i in., 2006). Rozwój technologii sprawił, że pojazdy typu AUV stają się coraz lżejsze i bardziej intuicyjne w obsłudze. Skutkiem tego jest powolne wypieranie systemów holowanych na rzecz platform opartych na pojazdach bezzałogowych. Jednym z przykładów tego typu urządzeń jest autonomiczny pojazd podwodny AUV IVER 2 wyposażony w sonar boczny Klein UUV-3500, który był głównym narzędziem służącym do akwizycji danych hydroakustycznych przedstawionych w tej pracy. W rozdziale 4. platforma ta zostanie dokładnie opisana.

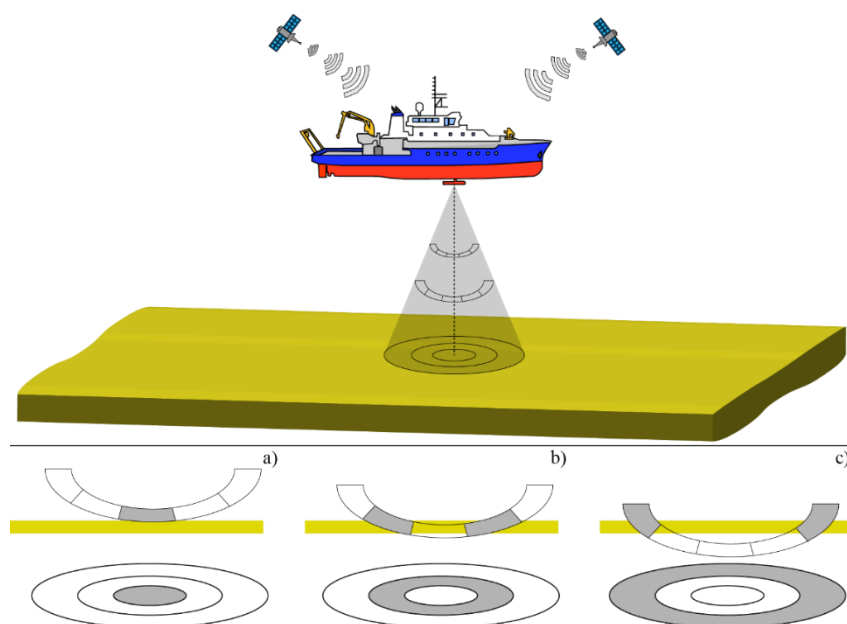
Sonar boczny Klein UUV-3500 zainstalowany w kadłubie pojazdu podwodnego AUV IVER 2 jest urządzeniem dwukanałowym, wykorzystującym częstotliwości robocze: niższą - 455 kHz i wyższą - 900 kHz. W porównaniu do urządzenia Edgetech DF-1000, sonar Klein UUV-3500 charakteryzuje się węższymi rozmiarami kątowymi wiązki nadawanych impulsów, które wynoszą 45° w płaszczyźnie pionowej i $0,34^\circ$ w płaszczyźnie poziomej. Przetworniki sonaru UUV-3500 generują szerokopasmowe sygnały „świergotowe” (ang. *chirp*), czyli o liniowo modulowanej częstotliwości, zaś czas trwania pojedynczego impulsu wynosić może od 1 do 8 ms (1). Dzięki takiej charakterystyce nadawanych sygnałów oraz przy zastosowaniu odpowiednich metod jego obróbki, możliwe jest uzyskanie rozdzielczości poprzecznej wynoszącej 2,4 cm. W praktyce oznacza to, że otrzymywane zobrazowanie dna charakteryzuje się jakością porównywaną ze zdjęciami wykonywanymi metodami klasycznej fotografii cyfrowej, zwłaszcza przy wykorzystaniu wyższej częstotliwości 900 kHz. Pozyskiwanie danych o tak wysokiej rozdzielczości odbywa się jednak kosztem maksymalnych zasięgów bocznych sonaru. W zależności od wybranej częstotliwości generowanych impulsów, zasięgi te wynoszą 150 m dla 455 kHz i 75 m dla 900 kHz.

Ogromną zaletą pracy z sonarami zamontowanymi w kadłubach autonomicznych pojazdów podwodnych jest fakt, że zarejestrowane przez nie dane nie wymagają dodatkowych korekcyj współrzędnych geograficznych (np. wyznaczenie *layback'u*). Platformy typu AUV posiadają wewnętrzne systemy nawigacji GPS oraz żyrokomпасы, a także szereg innych czujników ułatwiających nawigację pod powierzchnią wody. Oczywiście nie ma możliwości nawiązania łączności z satelitami systemu GPS, kiedy pojazd jest pod wodą, jednak problem ustalania dokładnej pozycji platform rozwiązano dzięki zastosowaniu w nich takich urządzeń jak akustyczny log dopplerowski DVL (ang. *Doppler Velocity Log*), czy inercyjna jednostka pomiarowa IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*).

Dokładny opis działania powyższych czujników oraz sposobu prowadzenia nawigacji przy ich pomocy znajduje się w rozdziale 4. niniejszej pracy.

3.3 Echosonda jednowiązkowa

Najpopularniejszym urządzeniem pozwalającym na obserwację powierzchni dna morskiego jest echosonda jednowiązkowa. Aparatura tego rodzaju jest powszechnie wykorzystywana na wszelkiego typu jednostkach pływających w celu określania głębokości akwenu. W związku z tym, echosondy jednowiązkowe są najczęściej montowane w kadłubach statków i łodzi w taki sposób, aby oś akustyczna przetworników była skierowana prostopadle do powierzchni dna. Urządzenia te generują krótkie (0,1 – 1 ms), impulsy akustyczne z sinusoidalnym wypełnieniem, o kulistym kształcie czoła fali, które przemierzają ton wodną, a następnie ulegają rozproszeniu i tłumieniu na niejednorodnościach osadów budujących dno. Echa odbite od dna lub obiektów występujących w toni wodnej są rejestrowane przez odwracalne przetworniki piezoceramiczne, które najczęściej pełnią rolę jednocześnie nadajnika i odbiornika. Kulisty kształt czoła nadawanej fali akustycznej ma wpływ na sposób akwizycji danych. W praktyce oznacza to, że generowane impulsy, po dotarciu do dna „nadźwiękawiają” je stopniowo zgodnie z geometrią padającej i rozproszonej fali (rys. 3.4).



Rysunek 3.4 Schemat akwizycji danych z użyciem echosondy jednowiązkowej: a), b) i c) - kolejne momenty docierania nadanej fali akustycznej do dna morskiego

Rozwartość kątowna wiązki nadawanych sygnałów akustycznych w echosondzie jednowiązkowej jest zazwyczaj wąska i waha się od kilku do kilkunastu stopni w zależności od wykorzystywanego systemu. Ma to bezpośrednie przełożenie na rozdzielczość kątową rejestrowanych danych. Również częstotliwość emitowanych impulsów może przyjmować różne wartości w przedziale od kilkunastu do kilkuset kiloherców. Sygnały charakteryzujące się niskimi częstotliwościami nie tylko penetrują toń wodną, ale również mogą wnikać w dno oraz odbijać i rozpraszać się na jego kolejnych warstwach. Jest to jednak zależne między innymi od właściwości fizycznych osadów budujących dno, jak i od obecności gazu uwięzionego w nim (Brodecka i in., 2013; Majewski i Klusek, 2014). Wykorzystanie sygnałów akustycznych o wyższych częstotliwościach pozwala na dokładne określanie głębokości badanego akwenu, jak również na szczegółową inspekcję kolumny wody znajdującej się pod przetwornikiem w trakcie trwania sondowania (Trudnowska i in., 2012; Szczucka i in., 2013).

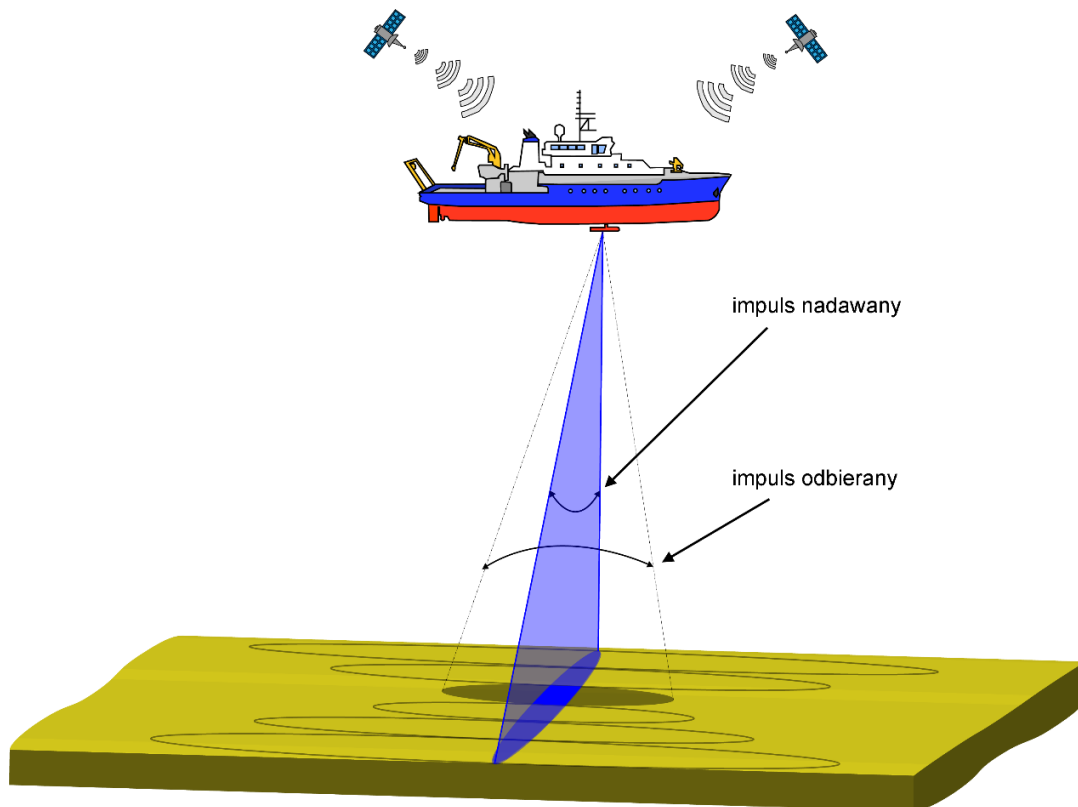
Ze względu na swoje właściwości, echosonda jednowiązkowa doskonale nadaje się do badania toni wodnej. Zastosowanie tego typu aparatury nie sprawdza się natomiast przy mapowaniu dużych obszarów dna morskiego. Wynika to z geometrii pracy echosond jednowiązkowych, a także z faktu, że nawet przy wykorzystaniu szerokiej wiązki nadawanych impulsów, nadźwiękawiana powierzchnia dna jest znacznie mniejsza w porównaniu do na przykład sonarów bocznych.

W trakcie przygotowywania tej pracy, przeprowadzono kilka prób rozpoznania antropopresji na dno morskie z użyciem echosondy jednowiązkowej Odom Echotrac MK III w obszarach Zatoki Gdańskiej. Analiza zarejestrowanych danych nie dała pożądanych wyników, w związku z tym, dane te nie zostały tu przedstawione.

3.4 Echosonda wielowiązkowa

Echosonda wielowiązkowa jest systemem o wysokiej rozdzielczości, służącym do tworzenia map batymetrycznych badanych obszarów. Urządzenia tego typu, podobnie jak echosondy jednowiązkowe, pozwalają na dokładne wyznaczenie głębokości sondowanego akwenu na podstawie pomiarów czasu jaki upłynął od momentu nadania impulsu akustycznego do momentu rejestracji ech odbitych od dna, z uwzględnieniem prędkości rozchodzenia się dźwięku w kolumnie wody. Istotną różnicą pomiędzy powyższymi systemami jest sposób w jaki przebiega sondowanie dna. Echosonda wielowiązkowa jest

najczęściej wyposażona w dwa złożone z wielu elementów przetworniki – nadawczy i odbiorczy. Matryca nadawcza generuje impulsy akustyczne, które są emitowane w pojedynczej wiązce typu wachlarzowego o bardzo wąskiej szerokości kątowej ($0,5^\circ$ do 3°) wzdłuż urządzenia i szerokiej w poprzek. Następnie, propagujące w toni wodnej impulsy odbijają się od dna i trafiają do przetwornika odbiorczego, który dzieli zarejestrowany impuls na wąskie wiązki. Liczba zarejestrowanych wiązek waha się od kilkudziesięciu do kilkuset, a ich sumaryczny kształt nadal jest zbliżony do wachlarza. Taka geometria, a także zastosowanie algorytmu łączącego fazową i amplitudową detekcję dna pozwalają na uzyskiwanie bardzo dokładnych danych batymetrycznych z obszaru o dużej powierzchni w relatywnie krótkim czasie (rys. 3.5).



Rysunek 3.5 Uproszczony schemat akwizycji danych batymetrycznych przy użyciu echosondy wielowiązkowej

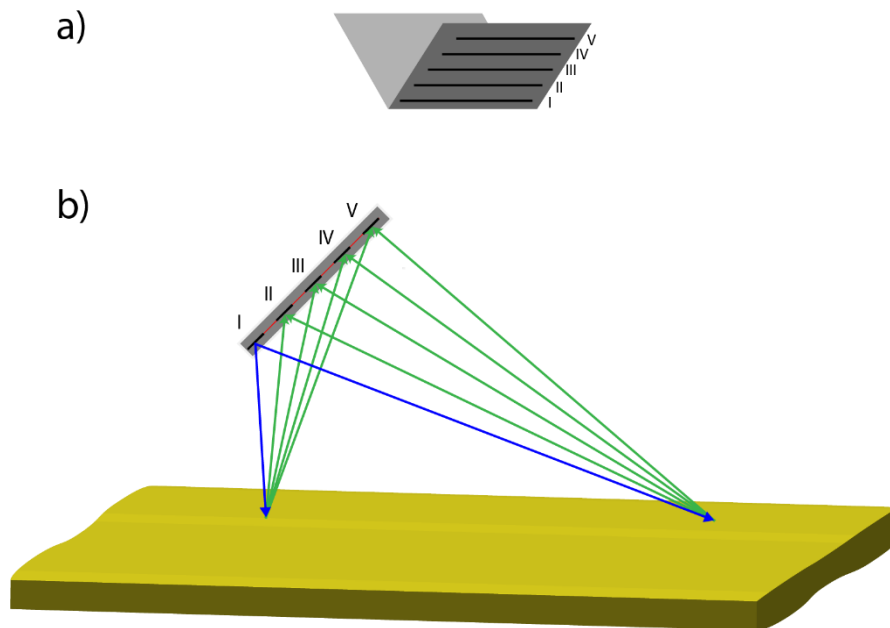
Echosondy wielowiązkowe, wykorzystywane na akwenach płytkowodnych, charakteryzują się częstotliwościami roboczymi mieszczącymi się w zakresie od 200 kHz do 700 kHz, zaś sumaryczna szerokość kątowa rejestrowanych impulsów akustycznych w kształcie wachlarza wynosić może od 60° do nawet ponad 210° w zależności od zadania lub doboru parametrów pracy urządzenia. Maksymalna głębokość, która limituje zasięg

pracy standardowych echosond wielowiązkowych może wynosić do 300 m (Grządziel i Wąż, 2014), ale jest to zależne od częstotliwości i parametrów środowiskowych. Na rynku są także dostępne urządzenia pozwalające na pracę w warunkach oceanicznych, na głębokościach powyżej 1000 m. Wówczas, aparatura tego typu wykorzystuje częstotliwości robocze mieszczące się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu kHz. Echosondy wielowiązkowe są najczęściej montowane na stałe w kadłubach jednostek pływających, choć istnieją również mobilne wersje sprzętu. W związku z geometrią akwizycji danych przez echosondę wielowiązkową, urządzenie to jest bardzo czułe na wszelkie przechyły jednostki, na której jest ono zamontowane. Fakt ten wymusza konieczność instalacji dodatkowych czujników na pokładzie statku, które kompensują jego przechyły w trzech stopniach swobody – kiwanie, kołysanie i myszkowanie (ang. *pitch*, *roll*, *yaw*). Dzięki zastosowaniu powyższej korekcji, wraz z uwzględnieniem profili prędkości dźwięku w badanym akwenu, na podstawie uzyskanych danych możliwe jest stworzenie bardzo szczegółowego, trójwymiarowego modelu ukształtowania dna morskiego, a także prowadzenie poszukiwań obiektów spoczywających na dnie.

3.5 Systemy interferometryczne

Systemy interferometryczne stanowią swojego rodzaju hybrydę sonarów bocznych oraz echosond wielowiązkowych. Urządzenia tego typu pozwalają na uzyskanie zobrazowania powierzchni dna w wysokiej rozdzielczości oraz dostarczają informacji o głębokościach badanego akwenu. Sonary interferometryczne generują sygnały akustyczne w sposób podobny do tradycyjnych sonarów bocznych. Impulsy te są rejestrowane przez wieloelementowe matryce przetworników odbiorczych, które przylegają do siebie tworząc układ w kształcie litery V. Matryce przetworników nadawczych w takiej konfiguracji znajdują się pod matrycami przetworników odbiorczych (rys. 3.6). Systemy interferometryczne, podobnie jak sonary boczne, rejestrują czas przebiegu nadawanych impulsów akustycznych i amplitudę ech odbitych. Dodatkowy, wykonywany na bieżąco pomiar różnicy faz tych impulsów dostarcza informacji o kierunku, z którego docierały sygnały odbite (Stateczny i Włodarczyk – Sielicka, 2012). Uzyskiwane w ten sposób dane mają formę szeregów czasowych kątów i amplitud. Oznacza to, że każdy zarejestrowany impuls ma przypisaną informację z jakiego kąta pochodzi oraz jaki zasięg do dna mu odpowiadał (2). Na podstawie zebranych danych możliwe jest przygotowanie

trójwymiarowego modelu dna morza, który będzie składał się z danych batymetrycznych oraz zobrazowania jego powierzchni.



Rysunek 3.6 Uproszczony schemat działania systemów interferometrycznych: a) głowica systemu w kształcie litery V. Rzymską cyfrą I oznaczono matrycę przetworników nadawczych, pozostałe cyfry rzymskie odpowiadają kolejnym matrycom przetworników odbiorczych; b) sposób rejestracji sygnałów akustycznych generowanych przez systemy interferometryczne – kolorem niebieskim oznaczono impulsy nadawane, kolorem zielonym impulsy rejestrowane, odbite od dna (na podstawie (2))

Systemy interferometryczne w przeciwieństwie do sonarów bocznych nie mogą być holowane za jednostką. Zmiany położenia urządzenia w płaszczyźnie poziomej lub pionowej w toni wodnej spowodowane np. turbulentnymi ruchami mas wody będą skutkować błędną rejestracją głębokości sondowanego akwenu. W związku z powyższym, w celu uzyskiwania wiarygodnych danych, systemy interferometryczne powinny być instalowane na specjalnych rampach przytwierdzonych do kadłubów jednostek pomiarowych, które są wyposażone w urządzenia kompensujące ruchy wywołane m.in. przez zafalowanie powierzchni morza (Felski, 2017). Dodatkowo, zmiany prędkości dźwięku w głębszych zbiornikach wodnych będą zwiększały błędy w pomiarach głębokości. W praktyce czynniki te limitują możliwość wykorzystania systemów interferometrycznych do detekcji obiektów antropogenicznych, a także do pomiarów głębokościowych jedynie w obszarach płytkich akwenów, takich jak np. porty.

4. Bezzałogowe, podwodne platformy badawcze

Współcześnie panującym trendem w dziedzinie badania zarówno powierzchni dna mórz i oceanów, jak i struktur, które je budują jest wykorzystanie bezzałogowych pojazdów podwodnych UUV (ang. *Unmanned Underwater Vehicles*). Urządzenia tego typu początkowo użytkowane w celach militarnych, znalazły szerokie zastosowania zarówno w przemyśle, jak i w dziedzinach nauki związanych z badaniami środowiska morskiego. Podwodne pojazdy bezzałogowe mogą służyć jako doskonałe platformy badawcze w związku z możliwością instalacji na ich pokładach wielu typów aparatury pomiarowej: wszelkiego rodzaju urządzeń hydroakustycznych, magnetometrów, czujników mierzących parametry środowiska morskiego, próbników wody i osadów, czy systemów telewizji podwodnej (Yun, 2000). Dodatkowym atutem pojazdów podwodnych jest fakt, iż mogą one być wykorzystywane w obszarach gdzie klasyczne techniki pomiarowe zawodzą ze względu na zbyt dużą lub zbyt małą głębokość akwenu, czy występowanie warunków niebezpiecznych, na przykład dla prac nurkowych. Ponadto, w przypadku wielu prac podwodnych istnieje możliwość jednoczesnej obsługi kilku pojazdów bezzałogowych z pokładu jednego statku, co bezpośrednio przekłada się na oszczędność czasu rejsowego i funduszy.

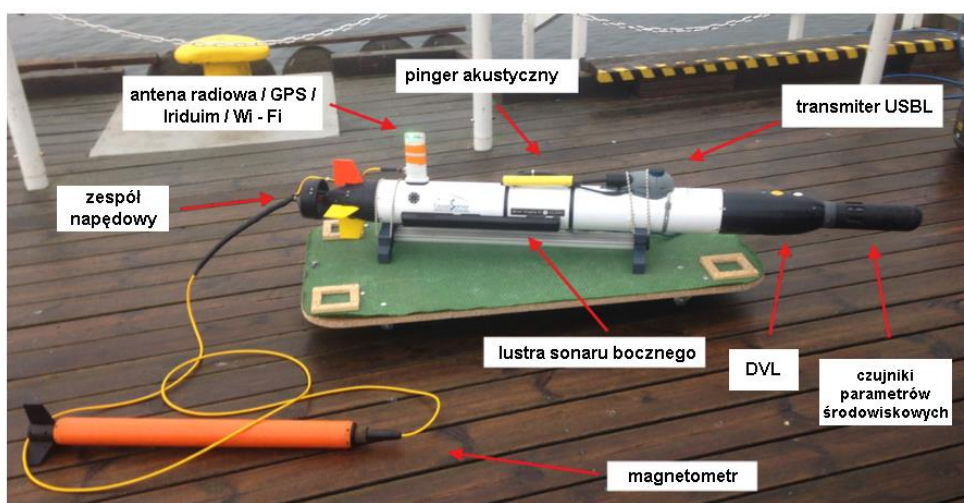
Pojazdy typu UUV można podzielić na trzy kategorie: pojazdy autonomiczne (AUV) - charakteryzujące się własnym zasilaniem, które nie wymagają stałego połączenia z jednostką, z której są obsługiwane; pojazdy zdalnie sterowane ROV - bez własnego źródła zasilania, podczas prowadzenia prac podwodnych połączone na stałe przy pomocy kabloliny (pępowiny) ze statkiem – bazą; pojazdy hybrydowe H-ROV (ang. *Hybrid Remotely Operated Vehicle*) - wyposażone we własne źródło zasilania i jednocześnie komunikujące się z jednostką znajdującą się na powierzchni badanego akwenu dzięki kablolinie.

W dalszych częściach tego rozdziału, opisane zostaną dwa z trzech przedstawionych powyżej rodzajów pojazdów bezzałogowych - AUV i ROV, które posłużyły jako główne platformy rejestrujące dane prezentowanych w tej pracy.

4.1 Autonomiczne pojazdy podwodne AUV

Rozwój technologii pozwalającej na konstruowanie autonomicznych pojazdów podwodnych zrewolucjonizował wiele dziedzin badań mórz i oceanów. Pierwsze urządzenia tego typu były budowane już w latach 50. XX wieku (Gafurov i Klochkov, 2015). Z uwagi na dynamiczny i nieliniowy charakter środowiska, w którym pojazdy AUV są wykorzystywane, dopiero współcześnie udało się rozwiązać niektóre problemy dotyczące podwodnej nawigacji, komunikacji, zasilania, kontrolowania i sposobu przemieszczania się tego typu sprzętu pod powierzchnią wody (Ylidiz i in., 2009). Obecnie na rynku komercyjnym dostępnych jest kilkanaście modeli autonomicznych pojazdów podwodnych, które różnią się zarówno rozmiarami, zastosowaniem, napędem, jak i maksymalnymi zasięgami głębokości, na których mogą pracować. Przykładem pojazdu AUV, który został wykorzystany do gromadzenia danych przedstawionych w dalszych rozdziałach pracy jest IVER 2 produkowany przez firmę L3 OceanServer Ltd.

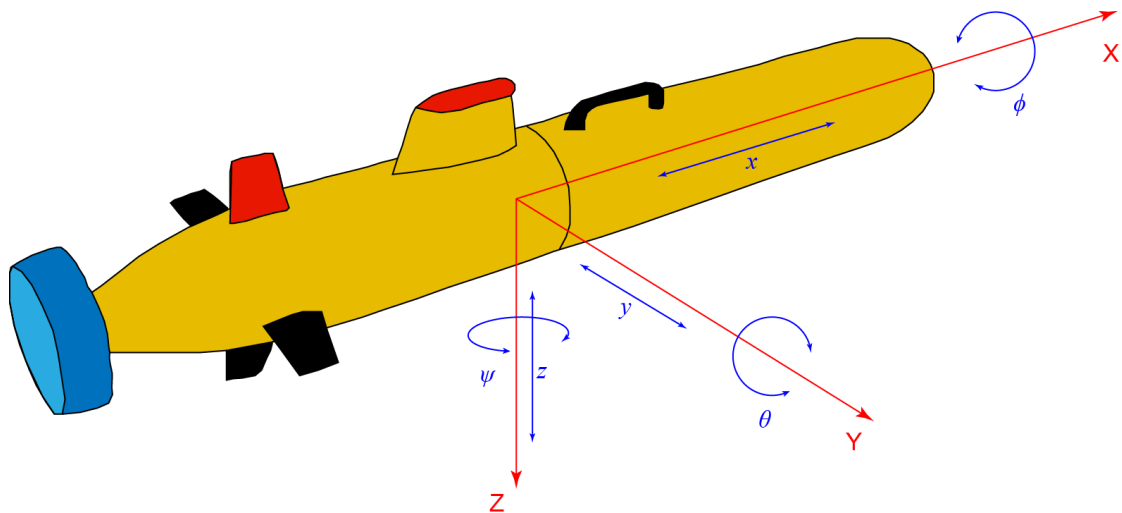
AUV IVER 2 jest lekkim pojazdem o napędzie elektrycznym, wyposażonym w pojedynczy pędnik, który może wykonywać misje w akwenach o głębokości do 150 m. Urządzenie to nie wymaga zaawansowanej infrastruktury, w związku z tym może być obsługiwane praktycznie z każdej jednostki pływającej, jak również z brzegu, przez dwuosobowy zespół operatorów. Pojazd jest wyposażony w szereg czujników umożliwiających prawidłowe przeprowadzenie wcześniej zaplanowanych misji oraz akwizycję danych, zarówno środowiskowych jak i hydroakustycznych (rys. 4.1).



Rysunek 4.1 AUV IVER 2 z zaznaczonymi najważniejszymi podzespołami

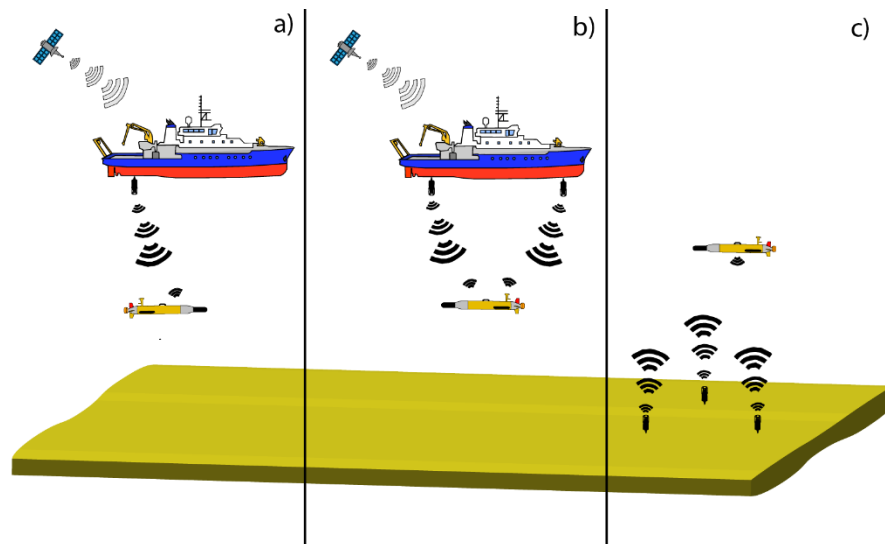
Sonar zamontowany na pokładzie AUV IVER 2 został scharakteryzowany w rozdziale 3. Czujniki znajdujące się w dziobowej części pojazdu pozwalają na dokonywanie pomiarów takich parametrów wody morskiej jak: temperatura, zasolenie, przewodnictwo wody, pH, stopień jej zmętnienia oraz natlenienia. Dodatkowo, za pojazdem holowany jest magnetometr, który mierzy odchylenia pola magnetycznego w badanym obszarze względem naturalnego tła magnetycznego Ziemi. Oznacza to, że możliwa jest detekcja obiektów ferromagnetycznych, które mogą występować na powierzchni dna w rejonie badań, z dokładnością do 0.1 nT przy odpowiednio zaprojektowanej misji. Ogromną zaletą pojazdów AUV jest fakt, że czujniki zamontowane na pokładzie tych urządzeń mogą rejestrować dane jednocześnie, co przekłada się na oszczędność czasu podczas prowadzenia pomiarów. Zarejestrowane dane środowiskowe niosą ze sobą cenne informacje o warunkach panujących w badanym akwenu, jak również są pomocne przy obróbce i interpretacji danych hydroakustycznych.

Istotną kwestią podczas prowadzenia kampanii pomiarowych z wykorzystaniem pojazdów podwodnych jest dokładne wyznaczenie ich pozycji, kiedy te znajdują się pod powierzchnią wody. Autonomiczne pojazdy podwodne wykonują swoje zadania zgodnie z wcześniej zaplanowaną misją, która jest projektowana przy pomocy specjalnego oprogramowania opartego na elektronicznych mapach nawigacyjnych ENC (ang. *Electronic Navigational Charts*) i systemie GPS. Sygnał GPS jest transmitowany za pomocą fal elektromagnetycznych radiowych (Rychlicki i Miskiewicz, 2013), które bardzo słabo propagują w ośrodku wodnym. Oznacza to, że aby możliwe było zarejestrowanie położenia pojazdu podwodnego przy pomocy systemu GPS, musi on znajdować się na powierzchni badanego akwenu. W sytuacji kiedy pojazd wykonuje misję pod wodą, szereg czujników rejestruje dodatkowe informacje na podstawie których, wraz z informacjami dostarczonymi przez system GPS, wyznaczana jest jego pozycja. Zestawy powyższych sensorów różnią się w zależności od klasy sprzętu, na pokładzie którego są instalowane i jednocześnie z odpowiednim oprogramowaniem oraz jednostkami obliczeniowymi tworzą wieloelementowe systemy nawigacyjne. Zaawansowane technicznie urządzenia typu AUV są obecnie wyposażane w inercyjne jednostki pomiarowe IMU (Yun i in., 1999; Kaniewski, 2005). Układy IMU składają się najczęściej z żyroskopu, akcelerometru i kompasu. IMU rejestruje ruchy pojazdu podwodnego w sześciu stopniach swobody: oscylacja wzdłużna x (ang. *surge*), oscylacja poprzeczna y (ang. *sway*), nurzanie z (ang. *heave*), kołysanie ϕ (ang. *roll*), kiwanie θ (ang. *pitch*) i myszowanie ψ (ang. *yaw*) (Yildiz i in. 2009) (rys. 4.2).



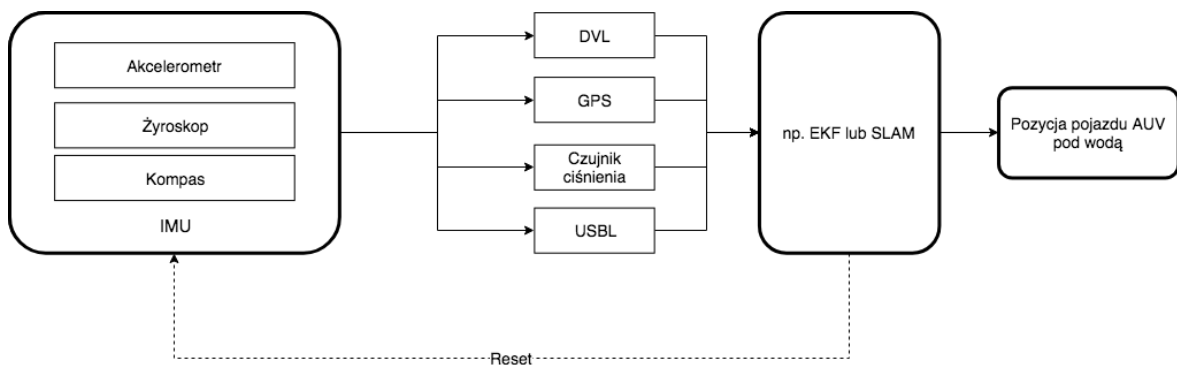
Rysunek 4.2 Ruch pojazdu AUV w sześciu stopniach swobody. Kolorem czerwonym oznaczono układ odniesienia

Zazwyczaj w kadłubie urządzeń typu AUV montowane są również akustyczne czujniki, które zliczają dystans pokonany przez platformę względem dna morskiego. Sensory te wykorzystujące efekt Dopplera, noszą nazwę DVL, a zasada ich działania jest zbliżona do akustycznych dopplerowskich przepływomierzy profilujących ADCP (ang. *Acoustic Doppler Current Profiler*). Dodatkowo na pokładzie pojazdów AUV montowane są również czujniki ciśnienia, na podstawie których mierzona jest głębokość, na której znajduje się aktualnie pojazd. Ogromnie pomocnymi narzędziami w wyznaczaniu położenia aparatury badawczej, która znajduje się pod powierzchnią wody są urządzenia typu USBL (ang. *Ultra Short Base Line*) lub ich inne wersje – SBL (ang. *Short Base Line*) i LBL (ang. *Long Base Line*) (Mallios i in. 2009). Systemy te składają się z nadajników (1 dla USBL, 2 dla SBL, 3 lub więcej dla LBL), które są zanurzone w wodzie oraz z odbiorników aktywnych, które są instalowane na aparaturze badawczej. Nadajniki są sprzężone z urządzeniami GPS dostępnymi na pokładzie statku, z którego prowadzone są badania i komunikują się z odbiornikami przy pomocy impulsów akustycznych. Znając prędkość dźwięku w toni wodnej możliwe jest wyznaczenie czasu jaki był potrzebny do przebycia impulsu dźwiękowego od nadajnika do odbiornika i na tej podstawie wyliczenie odległości i kierunkowości między nimi. Systemy typu LBL i SBL pozwalają na dokładniejsze określanie tych wartości poprzez przeprowadzenie triangulacji w układzie nadajnik – nadajnik – odbiornik. Przybliżony schemat działania urządzeń do prowadzenia tego typu nawigacji podwodnej został przedstawiony na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3 Schemat prowadzenia nawigacji podwodnej z wykorzystaniem systemów: a) USBL, b) SBL i c) LBL

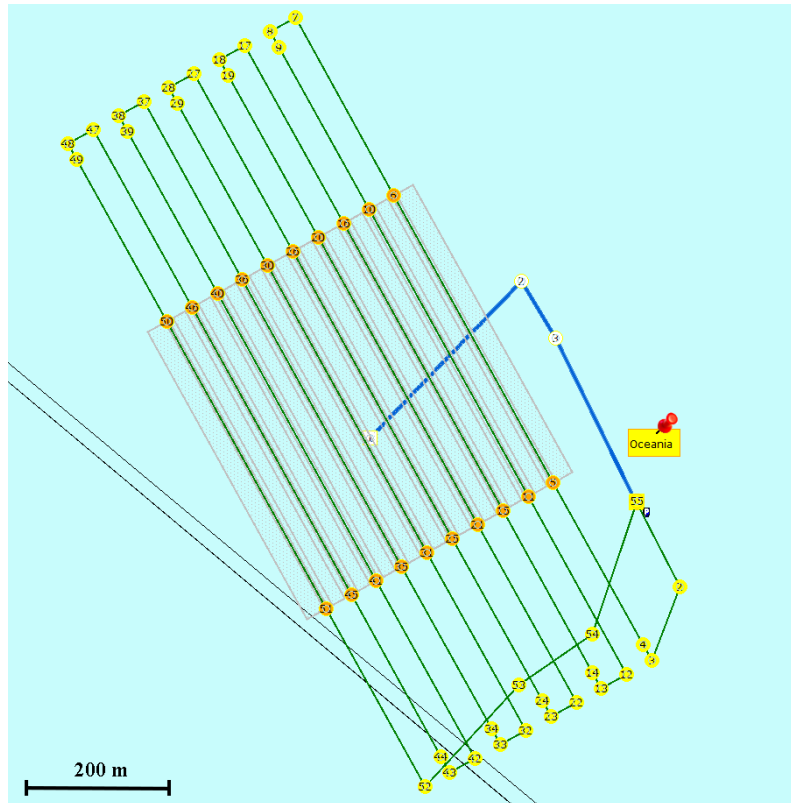
Wszystkie dane nawigacyjne zebrane przy pomocy czujników zainstalowanych na pokładzie autonomicznych pojazdów podwodnych są na bieżąco filtrowane, ponieważ nadal mogą one być obarczone licznymi błędami. Popularnymi technikami przetwarzania tego typu informacji są rozszerzony filtr Kalmana EKL (ang. *Extended Kalman Filter*) lub algorytm SLAM (ang. *Simultaneous Localization And Mapping*), które dobrze sprawdzają się w warunkach dynamicznie zmieniającego się środowiska jakim jest toń wodna (Paull i in., 2014). Dane pochodzące z IMU, DVL, systemów USBL oraz GPS (kiedy pojazd znajduje się na powierzchni), a także czujnika ciśnienia, po przetworzeniu przez wcześniej wspomniane algorytmy pozwalają w dokładny sposób wyznaczyć pozycję pojazdu AUV pod powierzchnią wody. Rysunek 4.4 przedstawia uproszczony, przykładowy schemat powyżej opisanej architektury systemu pozycjonowania podwodnego tego typu platform.



Rysunek 4.4 Przykładowy schemat architektury systemu pozycjonowania podwodnego pojazdów typu AUV

Kolejnym wyzwaniem, z jakim należy się zmierzyć podczas wykorzystywania pojazdów autonomicznych do prowadzenia badań oceanograficznych jest sposób wymiany informacji między statkiem – bazą, a pojazdem, kiedy ten znajduje się pod powierzchnią wody lub komunikacji między sprzężonymi pojazdami, które pracują w jednym obszarze. W praktyce problem ten dotyczy transferu zarejestrowanych danych, kontrolowania aparatury w celu na przykład zmian parametrów wcześniej zaplanowanej misji w trakcie jej wykonywania i koordynacji poczynań kilku pojazdów w tym samym czasie (Akyildiz i in., 2005). Komunikacja przy pomocy fal radiowych o niskiej częstotliwości nośnej jest możliwa w ośrodku wodnym, jednak wymaga anten o dużych gabarytach. Rozwiązanie to nie sprawdza się w przypadku małych pojazdów AUV (Yildiz i in., 2009). Efektywniejszą alternatywą są modemy akustyczne, które pozwalają przesyłać dane na dużo większych dystansach przy pomocy fal akustycznych o odpowiednich częstotliwościach, zaś ich rozmiary są zdecydowanie mniejsze w porównaniu do anten radiowych. Rozwiązanie to nie jest jednak wolne od wad takich jak na przykład niska prędkość transferu pakietów, częsta utrata połączenia czy znaczny pobór energii elektrycznej z akumulatorów autonomicznych platform podwodnych. W praktyce, kiedy w badaniach wykorzystywany jest tylko jeden pojazd, rezygnuje się z możliwości przesyłania informacji pomiędzy platformą autonomiczną, a statkiem – bazą. Dane rejestrowane przez czujniki zainstalowane na pokładzie pojazdu są zapisywane na jego wewnętrznym dysku twardym, a następnie po wydobyciu urządzenia z wody, zgrywane i dalej przetwarzane.

Jak podano powyżej, misje pojazdów AUV są projektowane przy pomocy dedykowanego oprogramowania opartego najczęściej na mapach ENC. Zaplanowanie działań autonomicznej platformy bezałogowej polega na wyznaczeniu obszaru w jakim ta ma się poruszać w trzech wymiarach: długości geograficznej, szerokości geograficznej i głębokości, jak również inicjacji rejestracji danych przez czujniki (np. sonar boczny) w konkretnych miejscach badanego akwenu. Istotnym elementem podczas planowania każdej misji jest wskazanie punktów jej początku oraz końca (rys. 4.5). Jest również ważne, aby pojazd nie wykonywał swoich zadań w bliskim sąsiedztwie jednostki, z której był wodowany, gdyż tego typu działanie może skutkować kolizją, a co za tym idzie uszkodzeniem platformy autonomicznej.



Rysunek 4.5 Przykładowa misja platformy AUV IVER 2. Czerwona „pinezka” oznacza pozycję jednostki, z której pojazd był obsługiwany. Pomarańczowe punkty wyznaczają rejon, w którym pojazd znajdował się pod wodą, zaś żółte to kolejne punkty drogi. Kolorem granatowym oznaczona została trasa misji awaryjnej

Podczas planowania każdej misji przygotowuje się również odpowiednie protokoły bezpieczeństwa, które regulują zachowanie pojazdu w sytuacjach awaryjnych, kiedy na przykład dojdzie do rozszczelnienia kadłuba lub niewłaściwego funkcjonowania czujników. W tej sytuacji, platforma przerywa pierwotnie zaplanowane działania i wykonuje alternatywną misję awaryjną, której celem jest dotarcie do punktu, w którym możliwe będzie bezpieczne wydobycie go z wody i naprawienie usterek.

4.2 Zdalnie sterowane pojazdy podwodne ROV

Zdalnie sterowane pojazdy podwodne podobnie jak pojazdy typu AUV, wykorzystywane są między innymi w górnictwie podwodnym, przy pracach związanych z układaniem i obsługą rurociągów, jako platformy wspierające lub zastępujące nurków w warunkach niebezpiecznych, jak również w badaniach naukowych. Pojazdy ROV można klasyfikować pod względem ich wielkości, maksymalnej głębokości na jakiej mogą

pracować, sposobu zasilania ich poszczególnych komponentów, czy mocy jaką dysponują (Azis i in., 2012). W Tabeli 4.1 została przedstawiona przykładowa kategoryzacja tego typu urządzeń.

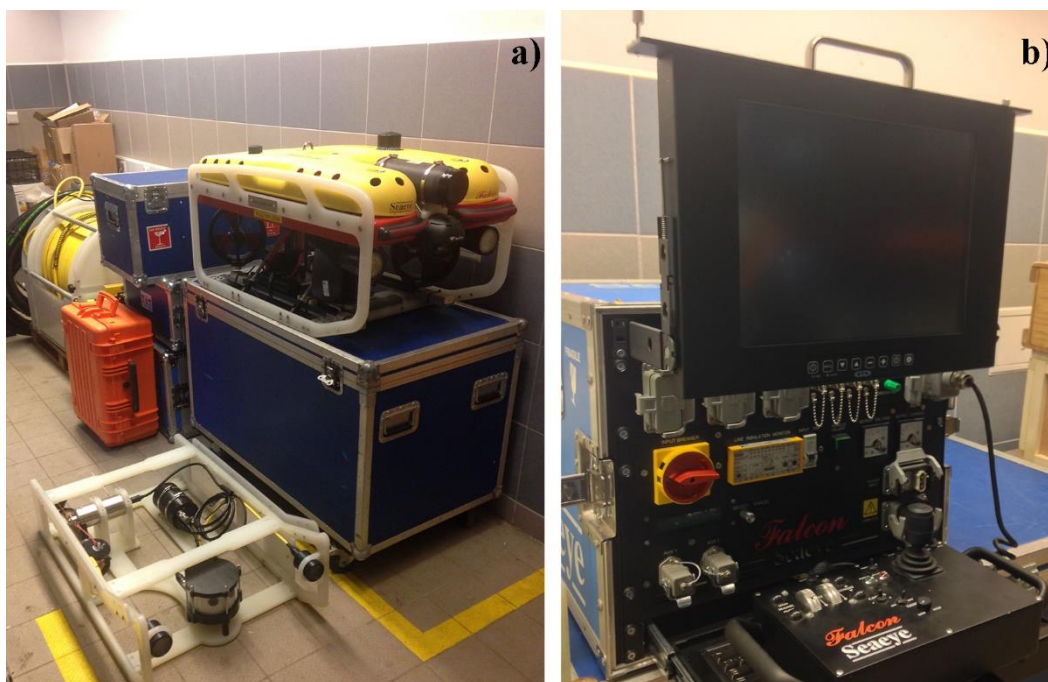
Tabela 4.1 Przykładowa klasyfikacja pojazdów ROV (za: Azis i in., 2012)

Klasa	Zastosowanie i zasięg	Moc (KM)
Mini i mikro ROV	Obserwacje podwodne (<100 m)	<5
Małe pojazdy ROV o napędzie elektrycznym	Obserwacje podwodne (<300 m)	<10
Średnie pojazdy ROV elektro - hydrauliczne	Lekkie i średnie prace podwodne (<2000 m)	<100
Pojazdy ROV o wysokiej wydajności	Obserwacje i lekkie prace podwodne (<3000 m)	<20
Pojazdy ROV elektro – hydrauliczne o wysokiej wydajności	Ciężkie prace podwodne, transport dużych ładunków (<3000 m)	<300
Pojazdy ROV mogące wykonywać zadania w bardzo głębokich akwenach	Obserwacje podwodne i akwizycja danych (>3000 m)	<25
Elektro – hydrauliczne pojazdy ROV mogące wykonywać zadania w bardzo głębokich akwenach	Ciężkie prace podwodne i transport dużych ładunków (>3000 m)	<120

W trakcie realizacji badań opisanych w niniejszej pracy wykorzystano ROV Falcon produkowany przez firmę Saab Seaeye w celu przeprowadzenia wizualnej inspekcji obiektów wykrytych przy pomocy sonaru bocznego zamontowanego na pokładzie AUV IVER 2. Tego typu zdalnie sterowaną platformę można opisać jako mały pojazd ROV o napędzie elektrycznym według klasyfikacji przedstawionej w tabeli 4.1.

ROV Falcon (rys. 4.6a) charakteryzuje się masą własną wynoszącą ok. 60 kg w powietrzu oraz maksymalnym zasięgiem pracy na głębokościach dochodzących do 300 m. Pojazd jest wyposażony w pięć pędników – cztery zapewniające przemieszczanie się w poziomie oraz jeden pionowy, zaś maksymalna masa ładunku przytwierdzonego do niego nie może przekroczyć 14 kg, aby utrzymać dodatnią pływalność. Obsługa pojazdu może być prowadzona z wszelkiego typu jednostek, które posiadają twarde pokłady oraz są w stanie dostarczyć prąd elektryczny okresowo zmienny o napięciu od 100 do 230 woltów (3). Zasilanie platformy zdalnie sterowanej odbywa się poprzez kablolinę o długości 450 m, która zapewnia także transfer danych telemetrycznych oraz sygnałów z kamery optycznej

i urządzeń hydroakustycznych na drodze między jednostką sterującą (rys. 4.6b), a pojazdem ROV.

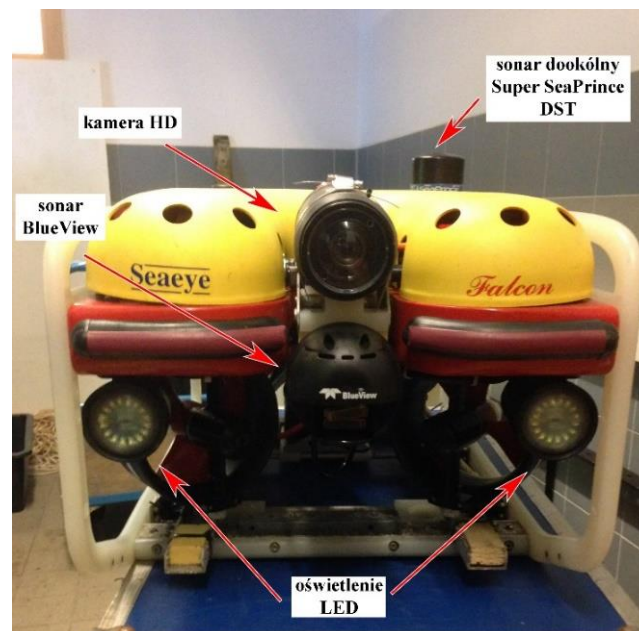


Rysunek 4.6 a) zdalnie sterowany pojazd podwodny Saab Seaeeye Falcon wraz z dodatkowymi akcesoriami i kabloliną w tle, b) jednostka sterująca pojazdem Falcon

Obsługa pojazdów podwodnych typu ROV jest łatwiejsza w porównaniu do pojazdów AUV, z uwagi na fakt stałego połączenia platformy z jednostką, z której są wodowane. Nawet w przypadku awarii lub całkowitej utraty łączności pomiędzy urządzeniem, a statkiem istnieje możliwość wydobycia pojazdu spod powierzchni wody przy pomocy kabloliny. Z drugiej jednak strony, stałe połączenie pomiędzy jednostką nawodną, a platformy ROV może prowadzić do zaplątania pępowiny na przykład o łańcuch kotwiczny.

Pozycjonowanie pojazdów ROV pod powierzchnią wody odbywa się przy pomocy systemów nawigacji podwodnej USBL, SBL lub LBL. Dodatkowo na pokładach tego typu platform montowane są często altymetry lub czujniki ciśnienia, a także urządzenia DVL. Pojazdy ROV są również standardowo wyposażane w żyrokompasy. Dane z powyższych czujników są wyświetlane na ekranie jednostki sterującej platformą ROV. W oparciu o informacje dostarczane z systemów podwodnej nawigacji i z sensorów zainstalowanych na pokładzie pojazdu, operator aparatury (pilot ROV) może ustalić jego pozycję względem statku – bazy, a następnie dotrzeć do wcześniej wyznaczonego celu podwodnego.

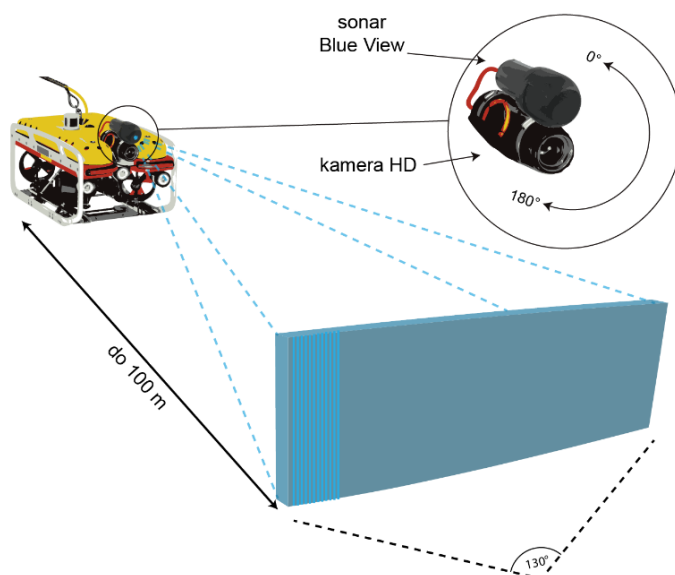
Lokalizacja i identyfikacja obiektów na dnie przy pomocy platform typu ROV nie byłaby możliwa bez wykorzystania metod hydroakustycznych. Nawet przy użyciu bardzo dokładnych systemów nawigacji podwodnej, dotarcie do celów występujących na powierzchni dna oraz ich rozpoznanie przy pomocy tylko kamer optycznych może być niemożliwe w wodach o dużej mętności. Wykorzystanie systemów hydroakustycznych, które wytwarzają obrazy poprzez rejestrację odbitych impulsów akustycznych od obiektów lub dna, pozwala na prowadzenie obserwacji w trudnych warunkach (Song i Choi, 2016). Wspomniany wcześniej pojazd ROV Seaeye Falcon jest wyposażony w kamerę optyczną, oświetlenie typu LED oraz dwa sonary umożliwiające lokalizację obiektów na dnie w warunkach złej widoczności (rys. 4.7).



Rysunek 4.7 Zdalnie sterowany pojazd podwodny ROV Seaeye Falcon z zaznaczonymi najważniejszymi podzespołami do obserwacji i identyfikacji wykrytych celów

Pierwsze ze wspomnianych wyżej urządzeń hydroakustycznych to dookólny sonar nawigacyjny Super SeaPrince wyprodukowany przez firmę Tritech International Ltd. Urządzenie to jest zamontowane w górnej części pojazdu ROV i generuje impulsy akustyczne o częstotliwości od 500 kHz do 900 kHz. Sonar ten pozwala na obserwację toni wodnej w okręgu o promieniu do 100 m (4), dzięki czemu możliwe jest wykrywanie dużych obiektów, takich jak np. wraki, które mogą stanowić zagrożenie dla platformy. Drugim z sonarów zamontowanych na pokładzie pojazdu Falcon jest sonar wielowiązkowy Teledyne BlueView M900 – 2250 wykorzystujący częstotliwości robocze 900 kHz i 2250 kHz. Urządzenie umożliwia detekcję i przeprowadzenie inspekcji nawet bardzo małych obiektów

(1,3 cm @ 900 kHz i 0.6 cm @ 2250 kHz) znajdujących się na powierzchni dna dzięki obrazom, które są generowane w czasie rzeczywistym przy pomocy impulsów akustycznych. Maksymalny zasięg roboczy sonaru BlueView wynosi 100 m dla częstotliwości 900 kHz i 10 m dla częstotliwości 2250 kHz. Kształt emitowanej fali dźwiękowej, podobnie jak w przypadku echosond wielowiązkowych, przypomina wachlarz o rozwarości 130°, który tworzony jest z 768 wiązek (5). Głowica sonaru BlueView jest zainstalowana na tej samej wychylnej platformie co kamera optyczna. W praktyce oznacza to, że operator pojazdu ma swobodę dostosowywania kąta widzenia kamery, oraz obszaru nadźwiękowania przez sonar w płaszczyźnie prostopadłej do dna, w zakresie od 0° (kamera i głowica sonaru skierowane ku powierzchni wody) do 180° (kamera i głowica sonaru skierowane pionowo w kierunku dna) (rys. 4.8).



Rysunek 4.8 Geometria prowadzenia obserwacji podwodnych przy użyciu sonaru BlueView zainstalowanego na pokładzie pojazdu ROV Falcon

Wykorzystanie bezzałogowych pojazdów podwodnych do akwizycji materiału faktograficznego przedstawionego w dalszych częściach pracy, w postaci danych hydroakustycznych, magnetometrycznych oraz zdjęć podwodnych przyniosło wymierny efekt. Zebrane dane wymagały odpowiedniej obróbki, jak również sama obsługa pojazdów musiała być prowadzona przez wykwalifikowanych operatorów. Jednak, w porównaniu do tradycyjnych metod badania dna morskiego z wykorzystaniem na przykład holowanych sonarów bocznych, płetwonurków, czy kamer zanurzanych w toni wodnej, metody oparte na użyciu bezzałogowych pojazdów podwodnych są dużo bardziej efektywne i bezpieczne.

5. Akustyka zagadnień rozpraszania i odbicia fal akustycznych na pofałdowanym dnie morza oraz obiektach występujących na nim

Urządzenia wykorzystujące metody akustyczne są najefektywniejszymi narzędziami pozwalającymi na mapowanie podłoża morskiego. Dzięki tego typu aparaturze, możemy uzyskiwać dokładne informacje na temat głębokości sondowanego akwenu, ukształtowania dna, a także możliwe jest badanie właściwości fizycznych osadów budujących dno. Urządzenia akustyczne umożliwiają również rozpoznawanie obiektów, zarówno antropogenicznych, jak i naturalnych, występujących na dnie. Z drugiej jednak strony, dokładna charakterystyka zjawisk fizycznych skupiających się wokół oddziaływania fal akustycznych z podłożem morskim przysparza wielu trudności. Powodem tego są problemy występujące przy teoretycznym opisie rozpraszania impulsów akustycznych na pofałdowanych powierzchniach dna. Przykładami form morfologicznych obserwowanych na dnie, mających wpływ na procesy odbicia i rozpraszania sygnałów akustycznych od podłoża morskiego, mogą być ripplemarki, zagłębienia, kratery, a także podwodne wzniesienia (Jackson i Richardson, 2007). Dodatkowo, działalność organizmów bentosowych nie jest bez znaczenia dla tych procesów. Zarówno samo występowanie bentosu, jak i pozostałości po jego aktywności (na przykład muszle lub rafy koralowe) wpływają w znaczący sposób na rozpraszanie impulsów akustycznych, co umożliwia jego detekcję i klasyfikację (Rettray i in., 2009; Ierodiaconou i in., 2011). Rodzaj osadów budujących dno morskie, a także stopień ich konsolidacji, również mają bezpośredni wpływ na wyżej wspomniane procesy fizyczne (Osadczyk, 2007).

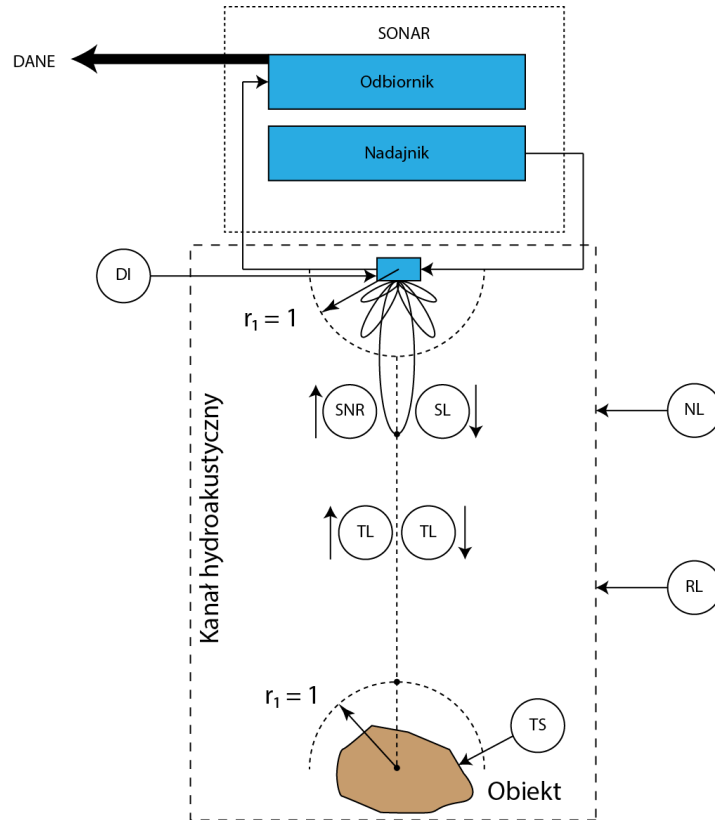
5.1 Równanie sonaru i jego parametry

Fale akustyczne propagujące w ośrodku wodnym na drodze nadajnik – dno (obiekt na dnie) – odbiornik ulegają absorpcji, tłumieniu, a także rozpraszaniu, którego szczególnym przypadkiem jest odbicie wstecz. Związki pomiędzy tymi zjawiskami, systemem hydroakustycznym używanym do generowania impulsów akustycznych i rejestracji ech odbitych, ośrodkiem, w którym propaguje dźwięk, a obiektem lub powierzchnią dna morza, reprezentuje równanie sonaru (Urlick, 2013). Zależności te zostały zobrazowane w formie graficznej na rysunku 5.1. W najprostszym przypadku ośrodka jednorodnego ($c=const$),

równanie sonaru dla pojedynczego celu można zapisać w następującej postaci logarytmicznej (6):

$$SNR = SL - 2TL - (NL - DI) + TS, \quad [5.1]$$

gdzie kolejne jego składniki wyrażane są w decybelach [dB].



Rysunek 5.1 Schemat aktywnego systemu hydrolokacyjnego z widocznymi elementami równania sonaru. Na podstawie Bikonis, 2007

Pierwsza składowa równania sonaru, zapisana jako SL (ang. *source level*), reprezentuje potencjał nadawczy przetwornika sonarowego i jest nazywana poziomem źródła. Poziom źródła, z definicji wyrażony jest poprzez logarytm ze stosunku natężenia dźwięku I generowanego przez przetwornik urządzenia hydroakustycznego na jego osi akustycznej w jednostkowej odległości $r=1$ m, do natężenia odniesienia I_0 :

$$SL = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}, \quad [5.1a]$$

gdzie $I_0 = 0.667 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2$ i reprezentuje natężenie odniesienia (lub referencyjne) w wodzie przy akustycznym ciśnieniu jednostkowym równym $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$.

Kolejnym składnikiem równania 5.1, oznaczonym jako TL (ang. *transmission loss*), są straty propagacji. Element ten opisuje straty energii generowanych fal akustycznych w trakcie rozszerzania się ich frontów falowych oraz absorpcji w ośrodku wodnym, w którym propagują. Straty propagacji w równaniu sonaru wyrażone są jako logarytm ze stosunku natężenia dźwięku zmierzonego w odległości r od jego źródła, do natężenia dźwięku w odległości jednostkowej $r_0 = 1m$:

$$TL_1 = 10 \log \frac{I(r)}{I(r_0)}. \quad [5.1b]$$

Należy pamiętać, że zarówno fale akustyczne wygenerowane przez przetwornik aparatury, jak i fale odbite od obiektu, powracające do nadajnika, ulegają tłumieniu w kanale hydroakustycznym w tym samym stopniu. W konsekwencji, skutkuje to podwojeniem wartości TL_1 . W przypadku szczególnym, w nieograniczonym, jednorodnym akwenie, gdy fale akustyczne propagują w sposób sferyczny, natężenie dźwięku maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości r . Straty propagacji powiązane z rozszerzaniem frontu falowego można zapisać w postaci równania:

$$TL_1 = 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad [5.1.b.1]$$

Ponadto, towarzyszą im straty propagacyjne związane z absorpcją energii fal akustycznych w wodzie morskiej, są proporcjonalne do drogi r . Zależność tę można zapisać w postaci:

$$TL_2 = \alpha r, \quad [5.1.b.2]$$

gdzie α reprezentuje współczynnik absorpcji energii akustycznej wyrażony w neperach na metr [$Np \cdot m^{-1}$] lub decybelach na metr [$dB \cdot m^{-1}$]. Związek między neperami, a decybelami prezentuje się następująco: $1Np = (20 \log_{10} e) dB \approx 8,686 dB$ oraz $1dB = (0,05 \ln(10)) Np \approx 0,115 Np$. Współczynnik absorpcji α , zależy od częstotliwości nadawanych sygnałów akustycznych, lepkości wody morskiej oraz stopnia relaksacji molekuł siarczanu magnezu ($MgSO_4$) i zdysocjowanego kwasu ortobornego ($B(OH)_3$) (Lurton, 2010; Dera, 2003). Reasumując, straty propagacji nadawanych impulsów akustycznych w toni wodnej, z uwzględnieniem absorpcji energii fal akustycznych i rozszerzania się frontu falowego, przyjmują postać:

$$TL = 20 \log r + \alpha r. \quad [5.1.b.3]$$

Składnik równania sonaru, oznaczany jako NL , opisuje poziom szumów (ang. *noise level*). Element ten, razem ze stratami propagacji (TL) i poziomem rewerberacji (RL), który będzie sformułowany w dalszej części niniejszego rozdziału, wpływają na rejestrowany sygnał echa i jakości uzyskiwanych zobrażeń dna morskiego.

Szumy akustyczne występujące w toni wodnej mają pochodzenie zarówno naturalne, wynikające z procesów dynamicznych lub biologicznych zachodzących w morzu, jak i antropogeniczne. Zakres częstotliwości szumów w ośrodku wodnym zawiera się w przedziale od kilku/kilkunastu Hz do kilkuset kHz, co odpowiada częstotliwościom roboczym standardowych urządzeń hydroakustycznych. Oznacza to, że szумы mogą bezpośrednio wpływać na jakość rejestrowanych danych. Szумы niskoczęstotliwościowe są generowane przez układy napędowe statków, prace konstrukcyjne prowadzone na morzu oraz urządzenia sejsmoakustyczne wykorzystywane na przykład do poszukiwania węglowodorów w dnie morskim. Szумы o średniej częstotliwości (zakres do ok. 50 kHz), powstają głównie na skutek procesów fizycznych zachodzących na powierzchni morza, takich jak załamywanie się fal, powstawanie i oscylacje pęcherzyków gazowych w toni czy opady deszczu, jak również w efekcie aktywności organizmów morskich. Hałas wytwarzany przez silniki i śruby mniejszych jednostek, także może być zakwalifikowany do tej grupy. Trzecią grupę tworzą szумы wysokoczęstotliwościowe, których jedną ze składowych stanowią szумы termiczne. Szумы termiczne zazwyczaj przeważają powyżej częstotliwości 100 kHz. Są one konsekwencją ruchów Browna, cząsteczek wody i zawiesiny występującej w niej, wraz ze wzrostem temperatury zgodnie z prawem Stefana – Boltzmanna (Hildebrand, 2009). Składnik NL można zapisać jako logarytmiczny stosunek natężenia szumu zmierzonego na wejściu odbiornika I_n do natężenia jednostkowego I_1 :

$$NL = 10 \log \frac{I_n}{I_1}. \quad [5.1.c]$$

Rewerberacje, zwane również pogłosem, są niepożądanym zjawiskiem polegającym na rozproszeniu nadawanych impulsów akustycznych na niejednorodnościach ośrodka (ryby, pęcherzyki gazowe, plankton) lub powierzchni dna morza. W pierwszym przypadku mówimy o rozpraszaniu objętościowym – RL_V , zaś w drugim o rozpraszaniu powierzchniowym – RL_S (Urick, 2013). Poziom rewerberacji RL (ang. *reverberation level*), przedstawić można w postaci logarytmicznego stosunku natężenia rewerberacji I_R , zmierzonego na wejściu odbiornika, do natężenia jednostkowego I_1 :

$$RL = 10 \log \frac{I_R}{I_1}. \quad [5.1.d]$$

Wypadkowa rewerberacji jest sumą składowych rewerberacji RL_V i RL_S zapisywanych za pomocą wzorów:

$$RL_V = SL - (20 \log r + 2\alpha r) + 10 \log \left(\frac{cL_S}{2} \right) + 10 \log \psi + S_v, \quad [5.1.d.1]$$

$$RL_S = SL - (30 \log r + 2\alpha r) + 10 \log \left(\frac{cL_S}{2} \right) + 10 \log \Phi + S_s, \quad [5.1.d.2]$$

gdzie S_V i S_s opisują kolejno siłę rozpraszania wstecznego objętościowego i powierzchniowego, Ψ oraz Φ reprezentują całkowitą równoważną wiązkę stożkową przetwornika systemu hydroakustycznego dla rewerberacji objętościowych i powierzchniowych, zaś parametr L_S to czas nadawanego impulsu. Całkowite zakłócenia występujące w kanale hydroakustycznym są sumą szumów otoczenia i rewerberacji. Kolejnym czynnikiem wpływającym na jakość uzyskiwanych danych są opisywane wcześniej straty propagacji. Wszystkie z wymienionych składników powinny być brane pod uwagę w trakcie projektowania systemów hydroakustycznych, a także podczas opracowywania i analizy zarejestrowanych danych w celu uniknięcia ich błędnej interpretacji.

Element równania 5.1, oznaczony jako DI nosi nazwę wskaźnika kierunkowości (ang. *directivity index*) i opisuje kierunkowość przetwornika. Składową tą można przedstawić za pomocą logarytmu ze stosunku natężenia kierunkowego dźwięku I_D do natężenia dookólnego I_O :

$$DI = 10 \log \frac{I_D}{I_O}. \quad [5.1.e]$$

W praktyce aktywne urządzenia hydroakustyczne projektuje się w taki sposób, aby nadawane przez nie impulsy propagowały w toni wodnej zgodnie z wynikającą z zastosowań charakterystyką kierunkową. Oznacza to, że większość energii generowanych sygnałów akustycznych propaguje w wiązce o wyznaczonej wcześniej geometrii. W takim wypadku składową DI dla przetwornika płaskiego można zapisać za pomocą wzoru (Caruthers, 1977):

$$DI = 10 \log \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi b^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}, \quad [5.1.e.1]$$

gdzie $b(\theta, \varphi)$ opisuje bryłę charakterystyki kierunkowej dla kątów θ i φ w sferycznym układzie współrzędnych.

Ostatni z elementów równania sonaru, oznaczony jako TS (ang. *target strength*), jest miarą zdolności obiektów do odbicia wstecz sygnałów akustycznych. Wyrazić go można jako logarytmiczny stosunek natężenia dźwięku rozproszonego wstecz od obiektu w kierunku źródła dźwięku, zmierzonego w odległości jednostkowej od obiektu I_{bs} do natężenia fali padającej w tym samym punkcie I_i :

$$TS = 10 \log \frac{I_{bs}}{I_i} = 10 \log \frac{\sigma}{4\pi}, \quad [5.1.f]$$

gdzie σ opisuje równoważną powierzchnię przekroju poprzecznego obiektu, od którego nastąpiło odbicie wstecz, wyrażoną w $[m^2]$. Rozwiązaniem równania sonaru, po uwzględnieniu wszystkich składowych występujących po jego prawej stronie, jest logarytmiczna miara siły odebranego echa od obiektu (SNR) w odległości r od sonaru. Oznacza to, że przy prawidłowo dobranych parametrach sonaru, sprzyjających warunkach panujących w kanale hydroakustycznym i odpowiedniej zdolności obiektu do odbijania wstecz impulsów akustycznych padających na niego, możliwa jest jego detekcja.

5.2 Zjawisko odbicia fal akustycznych od dna i obiektów występujących na nim

Proces odbicia sygnałów akustycznych propagujących w toni wodnej, od dna morskiego lub obiektów występujących na nim, zachodzi na skutek różnic impedancji akustycznych tych ośrodków. W praktyce oznacza to, że jeżeli nadawane sygnały propagujące w wodzie morskiej o określonej gęstości (ρ_1) i z daną prędkością (c_1), natrafiają na dno (lub obiekt na dnie), którego gęstość (ρ_2) i prędkość rozchodzenia się dźwięku (c_2) jest różna od tych parametrów wody, wtedy następuje odbicie. W przypadku fali płaskiej, kiedy powierzchnia rozdziału jest idealnie gładka, fala odbita różni się od fali padającej przesunięciem fazy, a kąt padania sygnałów akustycznych (θ_i) jest równy kątowi ich odbicia (θ_r). Dla prostopadłego padania płaskich fal akustycznych możliwe jest przedstawienie współczynnika odbicia na granicy dwóch nieograniczonych ośrodków wyraża się za pomocą wzoru:

$$V = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad [5.2]$$

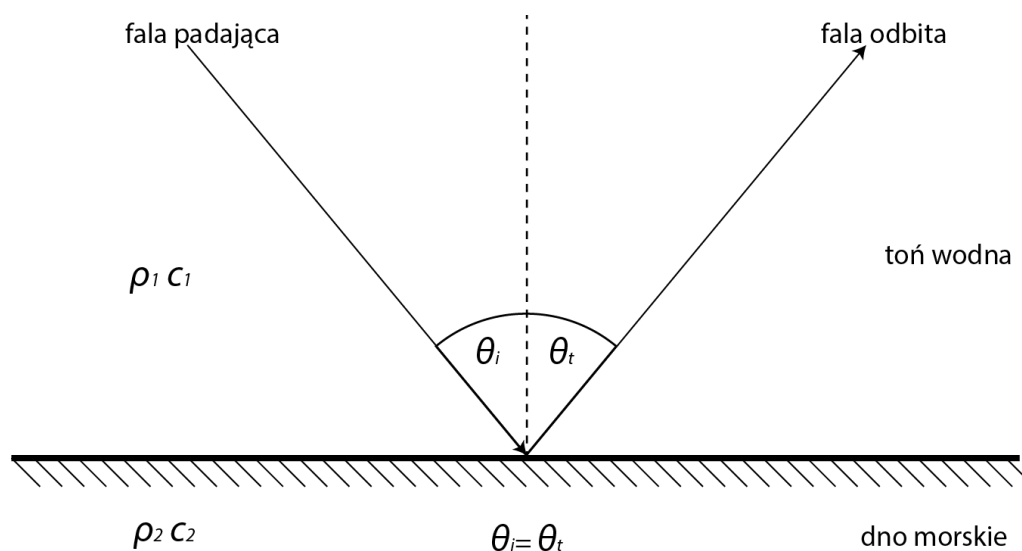
gdzie impedancje akustyczne dwóch ośrodków zapisano jako $Z_1 = \rho_1 c_1$ i $Z_2 = \rho_2 c_2$.

Współczynnik V może przyjmować wartości od -1 do 1, w zależności od różnicy impedancji ośrodków. W przypadku gdy sygnały akustyczne będą padały na dno morskie zbudowane z silnie uwodnionych osadów drobnoziarnistych (np. muł), wówczas współczynnik ten będzie znacznie niższy, niż w sytuacji kiedy dno będzie składało się ze skał lub gęsto upakowanych osadów gruboziarnistych (np. piasek gruboziarnisty). Na podstawie wartości współczynnika odbicia możliwe jest określenie, czy na granicy dwóch ośrodków przeważa odbicie fal akustycznych, czy też ich transmisja w głąb dna.

Przy padaniu fal pod innymi niż prostopadły kątami, równanie 5.2, z uwzględnieniem kątów padania i odbicia oraz przy założeniu idealnie płaskiej powierzchni dna, należy zapisać w postaci:

$$V(\theta) = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}, \quad [5.2.1]$$

gdzie θ_i reprezentuje kąt padania, zaś θ_t kąt odbicia. W takim wypadku, współczynnik odbicia zależy nie tylko od różnicy impedancji ośrodków, ale także od kątów padania i odbicia propagującej fali akustycznej.



Rysunek 5.2 Schemat zjawiska odbicia fali dźwiękowej na granicy dwóch ośrodków (toń wodna, dno morskie) przy założeniu idealnie płaskiej powierzchni dna

5.3 Zjawisko rozpraszania fal akustycznych na dnie i obiektach znajdujących się na nim

Dno morskie praktycznie nigdy nie jest idealnie gładkie i płaskie. Jego powierzchnia zbudowana jest z różnego rodzaju form morfologicznych, a także występują na niej obiekty pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. W konsekwencji, impulsy generowane przez nadajniki urządzeń hydroakustycznych ulegają znacznie częściej zjawisku rozproszenia na nierównościach dna i obiektach występujących na nim, niż odbiciu w kierunku przetworników odbiorczych tych urządzeń. Stopień pofałdowania dna, zwany szorstkością, ma bezpośredni wpływ na procesy związane z interakcją fal akustycznych z podłożem morskim. W przypadku powierzchni o niskiej i umiarkowanej szorstkości, dominującym zjawiskiem będzie odbicie wstecz fal akustycznych, zaś w sytuacji kiedy dno charakteryzuje się dużą zmiennością i znacznym pofałdowaniem, wówczas przeważać będzie rozproszenie impulsów w wielu kierunkach względem przetwornika nadawczego (Weber i Lurton, 2015). Podczas analizy procesów rozpraszania fal akustycznych na podłożu morskim, należy również pamiętać o wspomnianym wcześniej wpływie osadów budujących dno oraz o organizmach bentosowych występujących na jego powierzchni.

Zjawiska odbicia i rozpraszania fal akustycznych na obiektach spoczywających na dnie, mogą być rozpatrywane podobnie jak w przypadku nierówności powierzchni dna. Określenie stopnia szorstkości akustycznej powierzchni wiąże się bezpośrednio z długością fali (λ) propagującej na tę powierzchnię. Długość fali akustycznej zależy od jej częstotliwości (f) i prędkości jaką dźwięk osiąga w ośrodku, w którym propaguje (c). Zależność tą można przedstawić za pomocą równania:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad [5.3]$$

Porównując długość fali akustycznej (λ) z geometryczną szorstkością dna, którą można przedstawić jako odchylenie standardowe zmienności powierzchni (h), możliwe jest określenie akustycznej szorstkości dna dla wybranej częstotliwości fali propagującej na nie, w domenie dno gładkie lub dno szorstkie (Weber i Lurton, 2015):

- Dno gładkie akustycznie ($h < \lambda$): nierówności dna są mniejsze niż długości fal padających, przez co powierzchnia dna tylko nieznacznie będzie zaburzać proces odbicia. W takim układzie, dominować będzie zjawisko odbicia, zaś sygnały akustyczne na takiej powierzchni będą rozpraszane w małym stopniu.

- Dno szorstkie akustycznie ($h > \lambda/2$): nierówności podłoża morskiego przewyższają swoimi rozmiarami długości fal akustycznych padających na dno. Sygnały po dotarciu do tego typu powierzchni są rozpraszane w wielu kierunkach (również w kierunku ich źródła). Zjawisko odbicia jest w tym wypadku zminimalizowane.

Powyższe zależności są prawdziwe również w przypadku padania fal akustycznych na obiekty występujące na dnie. Akustyczna szorstkość powierzchni dna zależy zatem od częstotliwości sygnałów. Im niższa częstotliwość, a co za tym idzie większa długość fali, tym większy stosunek odbicia do rozpraszania. Z kolei sygnały charakteryzujące się wysokimi częstotliwościami i krótkimi impulsami głównie będą rozpraszane na małych obiektach lub nierównościach dna, a w przypadku bardzo wysokich częstotliwości nawet na grubych ziarnach osadów budujących powierzchnię podłoża morskiego.

Występowanie obiektów i nierówności na powierzchni dna jest źródłem zmiany amplitud i faz odbieranych sygnałów echa oraz powodują rozpraszanie. Długości dróg jakie muszą pokonać rozproszone fale powracające od pofałdowanego dna będą różne od długości dróg tych samych fal odbitych od idealnie gładkiej powierzchni. Powoduje to powstawanie przesunięć fazowych ($\Delta\phi$) rozproszonych fal akustycznych w postaci (Weber i Lurton, 2015):

$$\Delta\phi = \frac{2\xi\cos\theta}{\lambda}2\pi = 2k\xi\cos\theta, \quad [5.4]$$

gdzie ξ reprezentuje zmiany wysokości powierzchni dna morza względem jej średniej wysokości, λ to długość nadawanej fali akustycznej, zaś θ to kąt padania sygnału. Impulsy akustyczne rozproszone na nierównościach powierzchni dna morza oraz na obiektach występujących na nim, charakteryzujące się fluktuującymi fazami i amplitudami ulegają losowym interferencjom. Skutkuje to spadkiem natężenia rejestrowanych fal przez odbiorniki przetworników hydroakustycznych. Znając statystyki ukształtowania podłoża morskiego i przyrównując je do powierzchni płaskiej, możliwe jest wyliczenie średniego obserwowanego ciśnienia odbicia od nierówności lub dużych obiektów (w porównaniu do λ) występujących na dnie. Przy założeniu, że koherentny współczynnik odbicia jest równy współczynnikowi odbicia od idealnie płaskiej powierzchni ($\xi = 0$), dla szorstkiej powierzchni z odchyleniem standardowym h , średnie obserwowane ciśnienie odbicia można wyznaczyć poprzez współczynnika V oraz parametr Rayleigh'a, która przyjmuje postać:

$$\eta = 2kh\cos\theta, \quad [5.5]$$

wówczas obserwowane ciśnienie odbicia można przedstawić w formie równania (Medwin i Clay, 1998):

$$\langle p \rangle = p_i V e^{-\eta^2/2}. \quad [5.6]$$

5.4 Modele zjawiska rozpraszania fal dźwiękowych na pofałdowanym dnie

Jak wynika z informacji przedstawionych w podrozdziale 5.3, proces rozpraszania fal akustycznych na pofałdowanym dnie jest zjawiskiem złożonym. Ilość energii powracającej do odbiorników urządzeń hydroakustycznych w postaci siły rozpraszania wstecznego, która jest funkcją częstotliwości fali nadanej, kątów padania, parametrów opisujących nierówności powierzchni dna oraz parametrów geoakustycznych podłoża morskiego, można wyznaczyć na podstawie modeli (Jackson i in., 1986). Popularnym przykładem modelu, który pozwala obliczyć siłę rozpraszania wstecznego na podstawie zależności przekroju czynnego na rozpraszanie wsteczne σ_s od kąta padania, kąta rozproszenia i stałej wynikającej z rodzaju dna, jest uproszczony, empiryczny model Lamberta zapożyczony z optyki geometrycznej, który przyjmuje postać (Tęgowski, 2006):

$$\sigma_s = \mu_L \cos\theta_i \cos\theta_s, \quad [5.7]$$

gdzie μ_L reprezentuje stałą Lamberta, θ_i jest kątem padania, zaś θ_s to kąt obserwacji fali rozproszonej (kąt rozproszenia). Zakładając, że kąt padania i rozproszenia są takie same, równanie 4.7 można zapisać w zmodyfikowanej postaci jako:

$$\sigma_s = \mu_L \cos^2\theta_i. \quad [5.7.1]$$

Model Lamberta stosunkowo dobrze przybliża kątowe rozproszenie wsteczne dla fal akustycznych propagujących na powierzchnię dna zbudowaną z osadów drobnoziarnistych o znacznym uwodnieniu (Weber i Lurton, 2015). Ma on jednak swoje ograniczenia, ponieważ sprawdza się dobrze tylko w sytuacjach, kiedy impulsy akustyczne padają na powierzchnię górnej warstwy tworzącej dno morskie pod kątami od około 50° do 80°. Dodatkowo, model ten może być stosowany tylko w przypadkach rozpraszania niekoherentnego, kiedy parametr Rayleigh'a jest dużo większy od jedności (Tęgowski, 2006). Wartości siły rozpraszania wstecznego wyrażane są w postaci logarytmicznej w decybelach, dlatego ostateczna forma modelu Lamberta przyjmuje następującą formę:

$$BS(\theta) = BS_{0L} + 20 \log(\cos\theta), \quad [5.8]$$

gdzie BS_{0L} reprezentuje stałą Lamberta wyrażoną w skali logarytmicznej. Model oparty na regule Lamberta doczekał się licznych modyfikacji na przestrzeni lat (Mackenzie, 1961; Preston i in., 1991; Del Balzo i in., 1997), jednak podejście to nadal ma wiele niedoskonałości wynikających na przykład z niedostosowania do warunków odbicia koherentnego i występowania silnie pofałdowanego dna.

Kolejnym przykładem modelu, który umożliwia opis procesów związanych z rozproszeniem wstecz fal akustycznych na nierównościach pofałdowanego dna jest model Novariniego i Caruthera (Novarini i Caruther, 1998) w tzw. przybliżeniu Kirchoffa. W odróżnieniu od empirycznego modelu opartego na regule Lamberta, model Novariniego i Caruthera jest modelem fizycznym, który zakłada, że powierzchnia dna opisana jest przez zbiór ograniczonych powierzchni płaskich, o rozmiarach większych od długości padającej fali, a także z mikronierówności pokrywających te powierzchnie. Jego główne założenia polegają na przyjęciu rozkładu gaussowskiego dla nachyleń powierzchni odbijających, znajdujących się w zasięgu śladu wiązki akustycznej, zakładając, że dno położone jest w polu dalekim przetworników. Ponadto, autorzy modelu przyjęli, że procesy rozpraszania zachodzą na izotropowo rozłożonych niejednorodnościach osadu budującego wierzchnią warstwę dna. W takich warunkach, współczynnik rozpraszania wstecznego oznaczany jako m_{bs} , tworzony jest z trzech składowych i można go zapisać w postaci (Tęgowski, 2006):

$$m_{bs} = m_f + m_\mu + m_\nu, \quad [5.9]$$

gdzie m_f reprezentuje współczynnik rozpraszania na średnioskalowych strukturach powierzchni dna, na których występują mikronierówności, m_μ odpowiada za współczynnik rozpraszania na mikronierównościach, zaś m_ν to współczynnik rozpraszania na niejednorodnościach objętościowych dna. Składowa m_f w równaniu 5.9 jest iloczynem koherentnego współczynnika odbicia od mikronierówności M i parametru F , który opisuje udział powierzchni średnioskalowych w rozpraszaniu (Tęgowski, 2006):

$$m_f = M(k_i, \sigma_\mu)F(\delta_f, \theta_l), \quad [5.9.1]$$

gdzie k_i stanowi liczbę falową fali padającej, σ_μ i δ_f opisują kolejno odchylenia standardowe wysokości mikroskalowych nierówności i nachylenia średnioskalowych form morfologicznych powierzchni dna, zaś θ_l reprezentuje lokalny kąt padania wiązki

akustycznej mierzonej od normalnej do powierzchni w punkcie rozproszenia (Tęgowski, 2006). Kolejną ze składowych równania 5.9, m_μ , charakteryzuje pole dyfuzyjne, które powstaje na skutek rozpraszania fal akustycznych na mikronierównościach. Jej wyprowadzenie na podstawie teorii rozpraszania Bragg'a (Brekhovskikh i Lysanov, 1982), z uwzględnieniem teorii rachunku zaburzeń, przedstawia się w następujący sposób:

$$m_\mu = \pi^{-2} R_0^2 k_i^4 \cos^4 \theta_i W \left(\frac{k_i}{\pi} \sin \theta_i \right), \quad [5.9.2]$$

gdzie W reprezentuje gęstość widmową wysokości pofałdowanej powierzchni.

Ostatnią składową modelu Novariniego i Caruthera, m_ν , opisującą rozpraszanie objętościowe na niejednorodnościach występujących na dnie, może być rozwinięta w następujący sposób:

$$m_\nu = \mu_\nu V(\theta_i - \alpha_{f0}), \quad [5.9.3]$$

gdzie θ_i reprezentuje lokalny kąt padania, zaś α_{f0} to lokalne nachylenie powierzchni.

Ostatecznie, siłę rozpraszania wstecznego, na podstawie modelu Novariniego i Caruthera, wyraża się w postaci logarytmicznej w formie:

$$BBS = 10 \log_{10}(m_f + m_\mu + m_\nu) \quad [5.10]$$

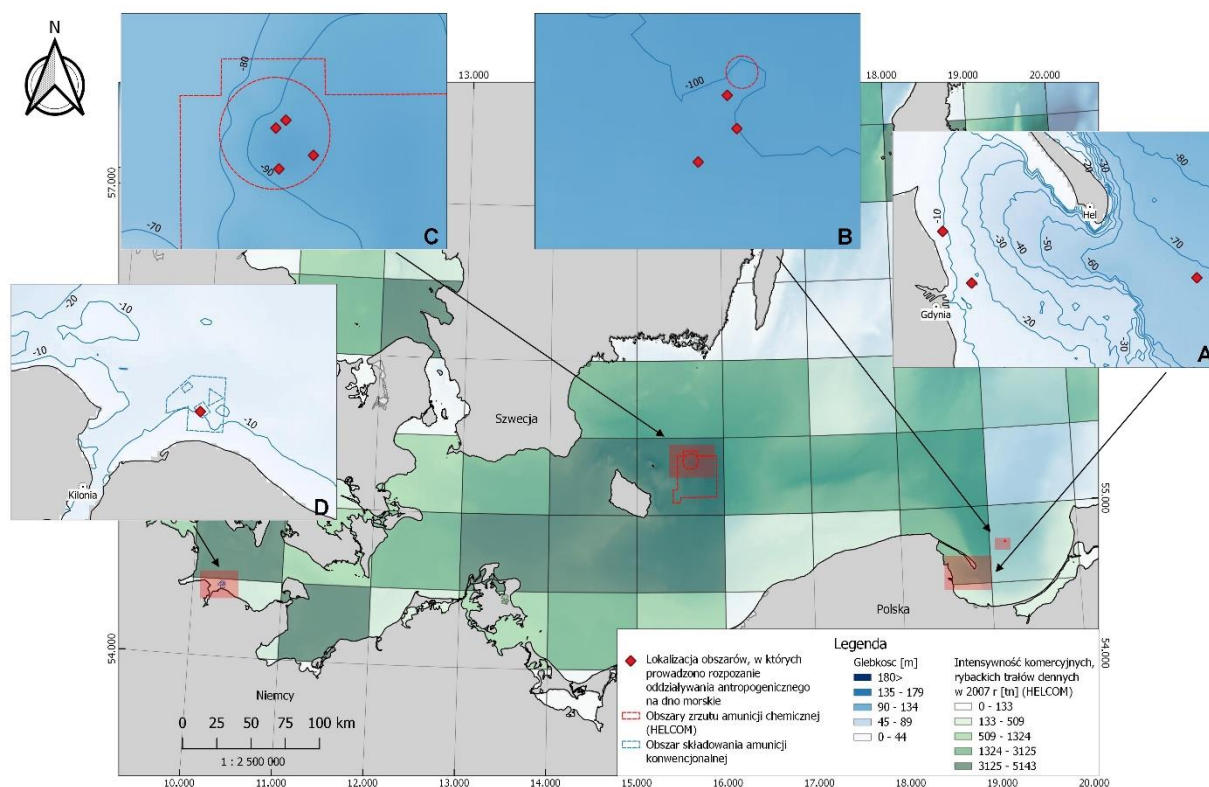
W literaturze znaleźć można opisy licznych modeli, zarówno empirycznych jak i fizycznych, wraz z ich modyfikacjami dostosowywanymi do konkretnych układów pomiarowych i warunków środowiskowych. Wiele z nich dobrze sprawdza się w wybranych przypadkach. Z uwagi na takie czynniki jak: zmienny charakter dna morskiego w różnych akwenach, działalność organizmów bentosowych, zmienne parametry geoakustyczne osadów budujących wierzchnią warstwę dna, a nawet dynamicznie zmieniające się warunki termohalinowe panujące w zbiornikach wodnych, zaproponowanie rozwiązania uniwersalnego stanowi ogromne wyzwanie dla teoretyków i praktyków. Pomimo tych trudności rozwój współczesnych metod numerycznych oraz technologii pozwala na coraz dokładniejsze obserwacje i interpretacje procesów rozpraszania fal akustycznych na pofałdowanym dnie i obiektach występujących na nim.

6. Charakterystyka obszaru badań – Zatoka Gdańska, Głębia Gdańska, Głębia Bornholmska i Zatoka Kilońska

Morze Bałtyckie jest płytkim akwenem śródlądowym o średniej głębokości 52 m i powierzchni około 415 240 km². Jest ono położone w północnej części Europy, przy czym powierzchnia jego zlewiska stanowi czterokrotność obszaru całego morza. Bałtyk jest połączony z Morzem Północnym poprzez cieśniny Kattegat i Skagerrak, które umożliwiają wlewy słonej i natlenionej wody do jego najgłębszych części. Dzięki temu, wody Bałtyku zachowują morski charakter, pomimo stałego dopływów wody słodkiej z licznych rzek występujących na terenie jego zlewni. Skutkuje to wahaniami poziomu zasolenia w przedziale od 1 do 20 PSU, przy jego średnich wartościach oscylujących w okolicach 7 PSU (ang. *Practical Salinity Units*) (Czub i in., 2018).

Morze Bałtyckie pod względem morfologicznym można podzielić na cztery mniejsze obszary, z czego trzy stanowią wielkie baseny: Basen Botnicki; Basen Gotlandzki, którego częścią jest Basen Gdański; oraz Basen Bornholmski (Majewski 1989). Pozostały rejon to Morze Bełtów. Badania przedstawione w dalszych rozdziałach tej pracy prowadzone były w następujących rejonach opisanych obszarów: Basen Gdański – Zatoka Gdańska oraz Głębia Gdańska, Basen Bornholmski – Głębia Bornholmska, Morze Bełtów – Zatoka Kilońska. Ich dokładna lokalizacja została przedstawiona na rysunku 6.1.

Każdy z wybranych obszarów badań charakteryzuje się wysokim poziomem antropopresji oddziaływującej zarówno na toń wodną, jak i na dno morskie. Główne źródła antropopresji w tych regionach stanowią: w przypadku Zatoki Kilońskiej i Zatoki Gdańskiej, bliskość dużych ośrodków portowych (Kilonia oraz Gdańsk i Gdynia), zaś w przypadku Głębi Gdańskiej i Bornholmskiej występowanie największych bałtyckich łowisk i często uczęszczanych tras morskich, a także obszarów, w których prowadzono zrzuty amunicji chemicznej produkowanej w trakcie II wojny światowej (7). Przykładami oddziaływania antropogenicznego na dno w powyższych rejonach jest obecność na jego powierzchni różnego rodzaju odpadów w postaci zużytego sprzętu pokładowego, wraków oraz amunicji konwencjonalnej i chemicznej, a także bruzd powstałych na podłożu morskim w skutek prowadzenia trałowania przez jednostki rybackie z wykorzystaniem sprzętu demersalnego (rys. 6.1). W dalszych częściach niniejszego rozdziału, wymienione obszary badań zostaną scharakteryzowane pod kątem następujących cech: średnich głębokości, rodzajów osadów budujących dno oraz warunków hydrodynamicznych.



Rysunek 6.1 Mapa Południowego Bałtyku z zaznaczonymi obszarami badań: A – Zatoka Gdańska, B – Głębia Gdańska, C – Głębia Bornholmska i D – Zatoka Kilońska. Dodatkowo na mapie przedstawiono intensywność komercyjnych, rybackich trałów dennych, a także zaznaczono rejony, w których dochodziło do zatopień amunicji (na podstawie HELCOM)

6.1 Obszar A - Zatoka Gdańska

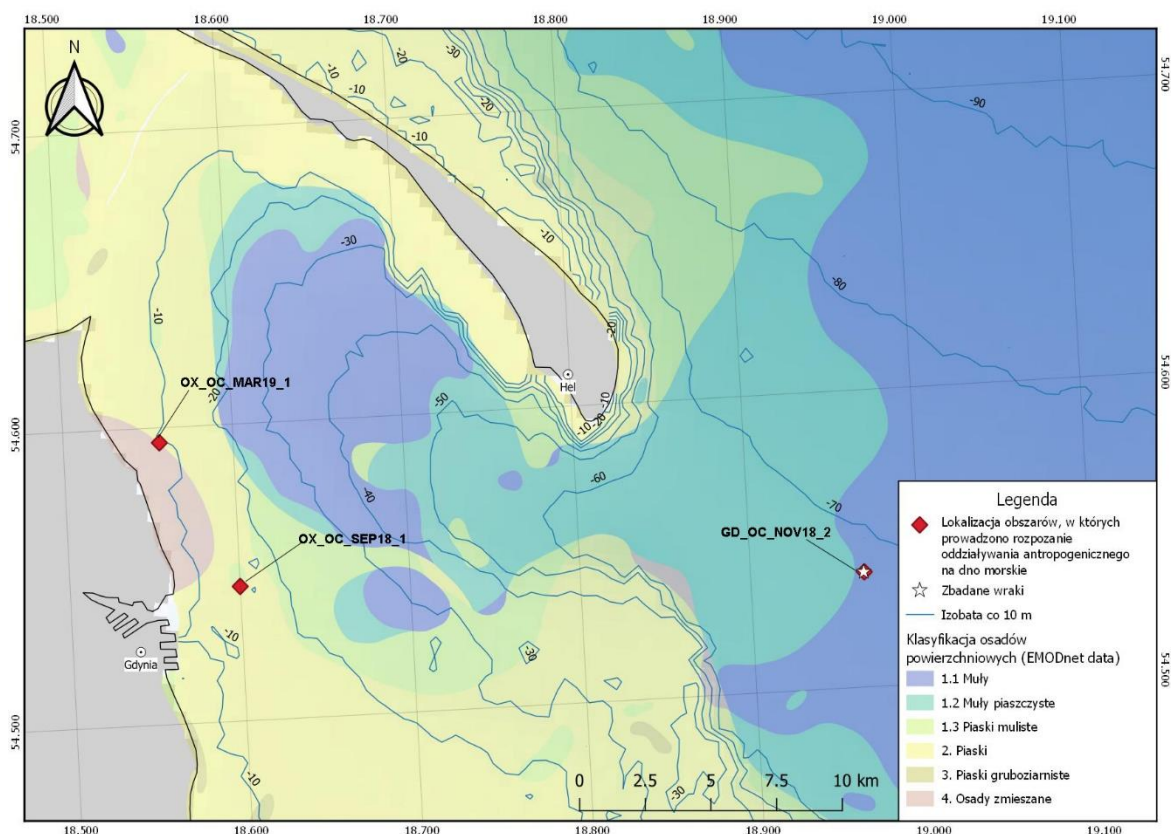
Zatoka Gdańska jest częścią Basenu Gdańskiego, który został ukształtowany, podobnie jak cały Bałtyk, w plejstocenie. Akwen ten osiąga wartości średniej głębokości na poziomie około 50 m (Saniewski i Zalewska, 2018). W obszarze wewnętrznej Zatoki Gdańskiej, gdzie dominują mniejsze głębokości, powierzchnia dna kształtowana jest przez procesy hydrodynamiczne związane z falowaniem i sztormami, zaś w częściach głębszych przez fale wewnętrzne okresowo powstające na granicy termokliny, która formuje się na głębokościach od 10 m w maju i do 40 m w listopadzie (Uścińowicz, 1997). Napotykanne tu są również słabe prądy gradientowe związane z różnicami gęstości mas wodnych oraz zmiennymi układami barycznymi. Skutkuje to zróżnicowaną budową dna w rejonach płytkowodnych – występują tu zarówno formy równinne, jak i faliste, z deniwelacjami sięgającymi od 0,5 m do lokalnie 8 m (Uścińowicz, 1997) (rys. 6.2). Osady tworzące wierzchnią warstwę dna w płytszych rejonach Zatoki Gdańskiej to głównie piaski o różnym

stopniu wysortowania, które następnie przechodzą w osady piaszczysto – muliste wraz ze wzrostem głębokości, zaś w obszarach najgłębszych dominują muły, a także osady mulisto – ilaste (Mojski, 1995), (rys. 6.3). Prędkości prądów przydennych w płytszych obszarach Zatoki Gdańskiej osiągają wartości maksymalne ok. $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Cieślikiewicz i in., 2017).



Rysunek 6.2 Powierzchnia dna Zatoki Gdańskiej sfotografowana przy pomocy pojazdu podwodnego ROV Seaeeye Falcon na głębokości 36 m z widocznymi formami morfologicznymi występującymi na dnie oraz roślinnością

Dno obszaru Zatoki Gdańskiej jest narażone na silną antropopresję, której źródłem jest bliskość dwóch z trzech największych polskich portów. Skutkuje to bardzo wysoką aktywnością statków, które każdego dnia zawijają do portów w Gdańsku i w Gdyni. Jednostki te przewożą różnego rodzaju ładunki oraz wyposażenie pokładowe, które może dostawać się do wód opisywanego akwenu na skutek wypadków lub celowych działań. Dodatkowo, akwen Zatoki Gdańskiej stanowił arenę operacji militarnych realizowanych w trakcie trwania I i II wojny światowej, co skutkowało deponowaniem w jego wodach znacznych ilości obiektów o pochodzeniu militarnym w postaci bomb, min, torped, a także artylerii różnego kalibru. Ponadto, w obrębie Zatoki Gdańskiej można napotkać na dnie ponad 160 wraków jednostek cywilnych oraz wojskowych o różnych wymiarach i w zróżnicowanym stanie rozkładu (8). Obszar ten jest również silnie eksploatowany przez mniejsze jednostki rybackie, jednak nie stosują one tu technik połowowych, które opierają się na wykorzystaniu sprzętu demersalnego.

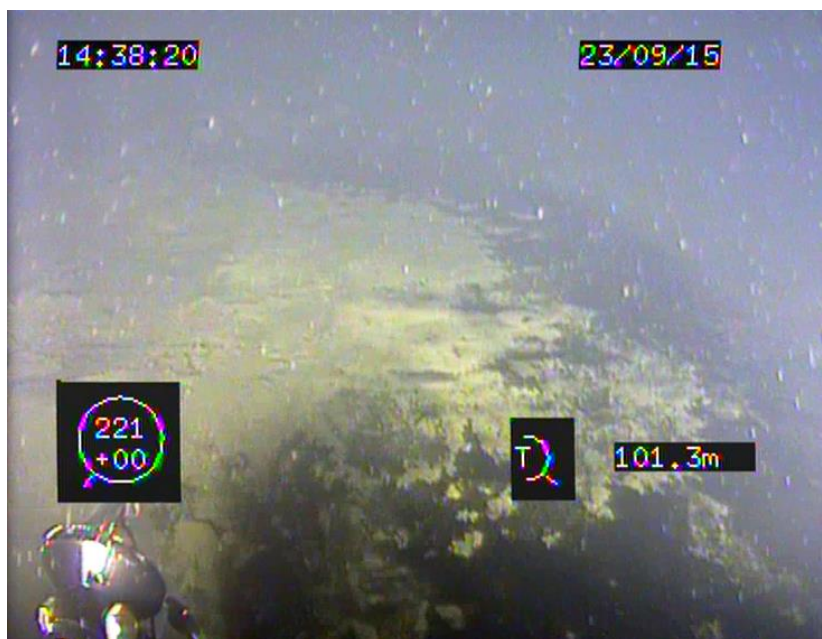


Rysunek 6.3 Szczegółowa mapa Zatoki Gdańskiej (obszar A) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także wykrytym wrakiem (GD_OC_NOV18_2). Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze (na podstawie EMODnet data)

6.2 Obszar B – Głębia Gdańska

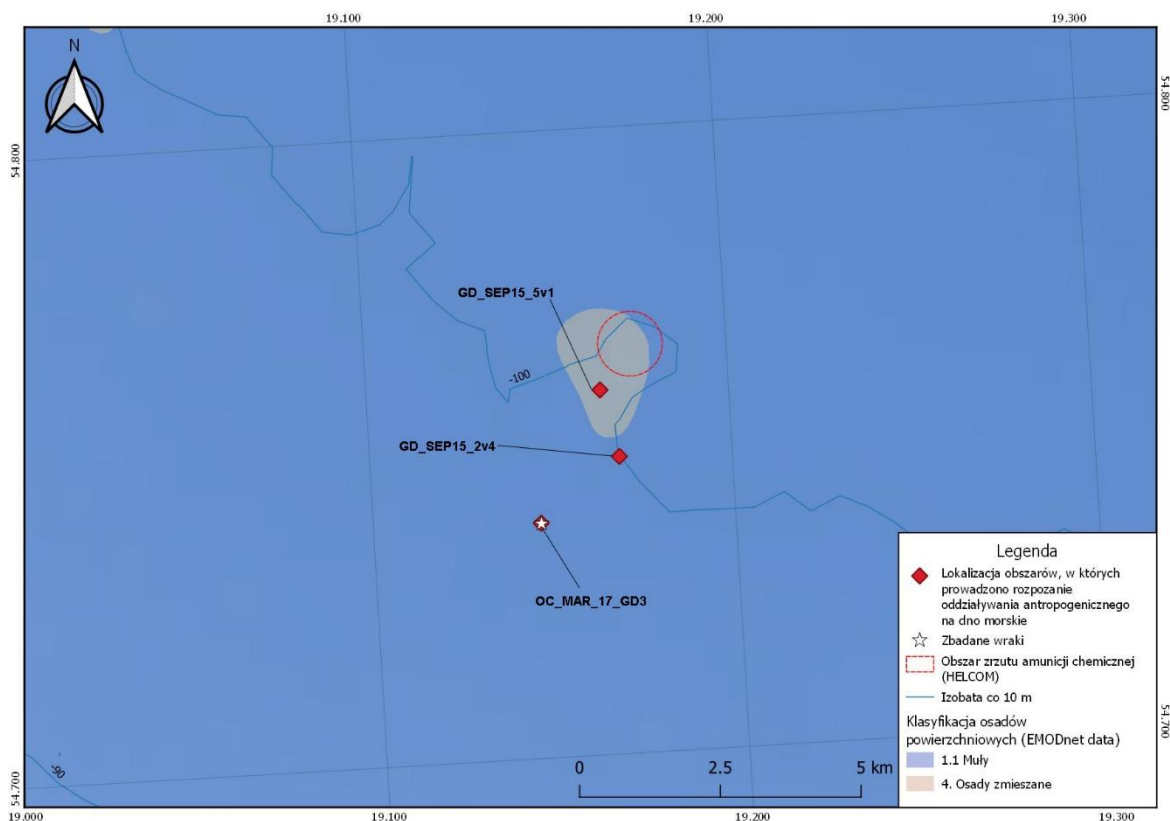
Głębia Gdańska jest zlokalizowana w środkowej części Basenu Gdańskiego, na północny wschód od Zatoki Gdańskiej. Obszar ten charakteryzuje się głębokością dochodzącą do 118 m i w związku z tym jest piątym najgłębszym miejscem na Bałtyku (Saniewski i Zalewska, 2018). Na dnie tej części Morza Bałtyckiego dominują formy równinne, które obniżają się tworząc depresję rozciągającą się od południowego zachodu w kierunku północnego wschodu. Podłoże morskie w opisywanym obszarze jest zbudowane głównie z mułów i osadów zmieszanych (Mojski, 1995). Okazjonalnie występują tu również wychodnie rzeźby glacialnej. Dno w rejonie Głębi Gdańskiej jest pokryte matami utworzonymi z plech grzybów i bakterii, które rozwijają się w środowisku beztlenowym (rys. 6.4). Warunki beztlenowe występują w tym rejonie praktycznie stale z wyjątkiem incydentów wlewów wody natlenionej pochodzącej z Morza Północnego (Czub i in., 2018).

Prędkości prądów przydennych w obszarze Głębi Gdańskiej osiągają wartości maksymalne ok. $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Cieślakiewicz i in., 2017).



Rysunek 6.4 Płaska powierzchnia dna Głębi Gdańskiej z widocznymi matami bakteryjnymi. Głębokość ok. 101 m

Głębia Gdańska jest również narażona na wysoki wpływ oddziaływania antropogenicznego na jej dno. W obszarze tym położone jest największe, nieoficjalne składowisko broni chemicznej na Bałtyku (rys. 6.5). Co ciekawe, w trakcie prowadzenia badań zorientowanych na detekcję tego rodzaju zanieczyszczeń na dnie nie udało się odnaleźć i zidentyfikować obiektów o pochodzeniu militarnym na powierzchni podłoża morskiego opisywanego akwenu. Wykrywano natomiast podwyższone koncentracje arsenu w lokalnych osadach, który stanowi jeden z podstawowych składników substancji trujących wykorzystywanych do produkcji amunicji chemicznej (Bełdowski, 2016). Głębia Gdańska nie jest również wolna od wraków zalegających na jej dnie. Jak wynika z danych Urzędu Morskiego w Gdyni w okolicach tych znajduje się ok. 10 zatopionych jednostek (8). Obszar Głębi Gdańskiej jest również intensywnie wykorzystywany do połowu ryb przez większe jednostki rybackie, które stosują w tym celu m.in. włoki demersalne. Sprzęt tego typu tworzy na powierzchni dna regularne zagłębienia w postaci bruzd. Bruzdy te były licznie obserwowane na podłożu morskim w trakcie prowadzenia badań na potrzeby niniejszej pracy w obszarze Głębi Gdańskiej.



Rysunek 6.5 Szczegółowa mapa Głębi Gdańskiej (obszar B) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także wykrytym wrakiem. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której dochodziło do zrzutów amunicji chemicznej (na podstawie EMODnet data i HELCOM)

6.3 Obszar C – Głębia Bornholmska

Głębia Bornholmska, położona w środkowej części Basenu Bornholmskiego, stanowi jeden z jego najgłębszych fragmentów. Głębokości jakie występują w tym rejonie wahają się w przedziale od 92 m do 96 m (Missiaen i Noppe, 2009). Przez Basen Bornholmski przepływająca natleniona woda oceaniczna, pochodząca z Morza Północnego trafia następnie do pozostałych akwenów Morza Bałtyckiego. W obszarze Basenu Bornholmskiego zaobserwowano formowanie się stałej halokliny występującej na głębokości około 50 m (Rak i Wieczorek 2012). Skutkiem tego jest stratyfikacja kolumny wody, gdzie w warstwach powierzchniowych położonych nad halokliną, zasolenie przyjmuje wartości około 7 PSU, zaś poniżej halokliny wartości te dochodzą nawet do 21 PSU podczas wlewów wody oceanicznej z Morza Północnego (Czub i in., 2018). Powierzchnia dna w rejonie Głębi Bornholmskiej jest regularna i płaska z lokalnie

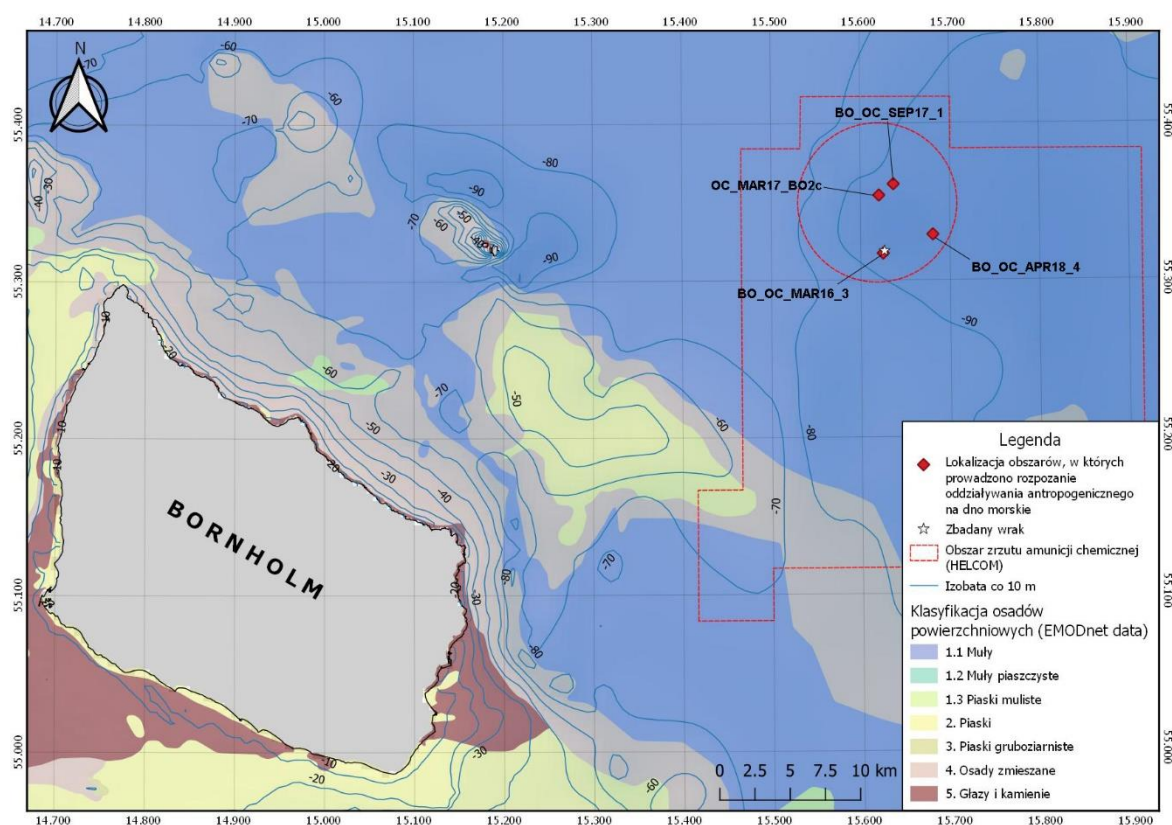
występującymi formami morfologicznymi przypominającymi zagłębienia (rys. 6.6). Przepuszcza się, że niektóre z nich powstawały na skutek prowadzenia operacji zatapiania amunicji chemicznej w tym rejonie. Dodatkowo, jak wynika z badań geofizycznych wykonanych w latach 2006 i 2007 (Missiaen i Noppe, 2009), w obszarze tym występują liczne obiekty zagrzebane w osadach dennych, jak również napotymano tu osady gazonośne, z których uwalniany jest gaz do toni wodnej, co ma bezpośredni wpływ na ukształtowanie podłoża morskiego. Powierzchnia dna Głębi Bornholmskiej jest zbudowana z warstwy (0 – 6 m) słabo skompaktowanych mułów morskich (Christoffersen i in. 2007; HELCOM, 2013). Na podstawie materiałów wideo zarejestrowanych przy pomocy pojazdu typu ROV, zaobserwowano erozję tych osadów spowodowaną występowaniem prądów przydennych (Paka i Spiridonov, 2002). Prądy przydenne powstają w tym rejonie na skutek procesów hydrodynamicznych generowanych przez wiatr i sztormy, zaś ich prędkości są porównywalne z prędkościami prądów przydennych występujących w obszarze Głębi Gdańskiej i wynoszą średnio $2,14 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Czub i in., 2018).



Rysunek 6.6 Powierzchnia dna Głębi Bornholmskiej z wyraźnie widocznym zagłębieniem, w którym spoczywa obiekt pochodzenia antropogenicznego. Głębokość ok. 93 m

Poligon znajdujący się w obszarze Głębi Bornholmskiej, zaznaczony na rysunku 6.7 czerwoną, przerywaną linią, jest obok Głębi Gotlandzkiej największym, oficjalnym miejscem zrzutów amunicji chemicznej pochodzącej z czasów II wojny światowej na Morzu Bałtyckim (Bełdowski i in., 2018). W latach 1945 – 1965 zatopiono ponad 32 000 ton tego

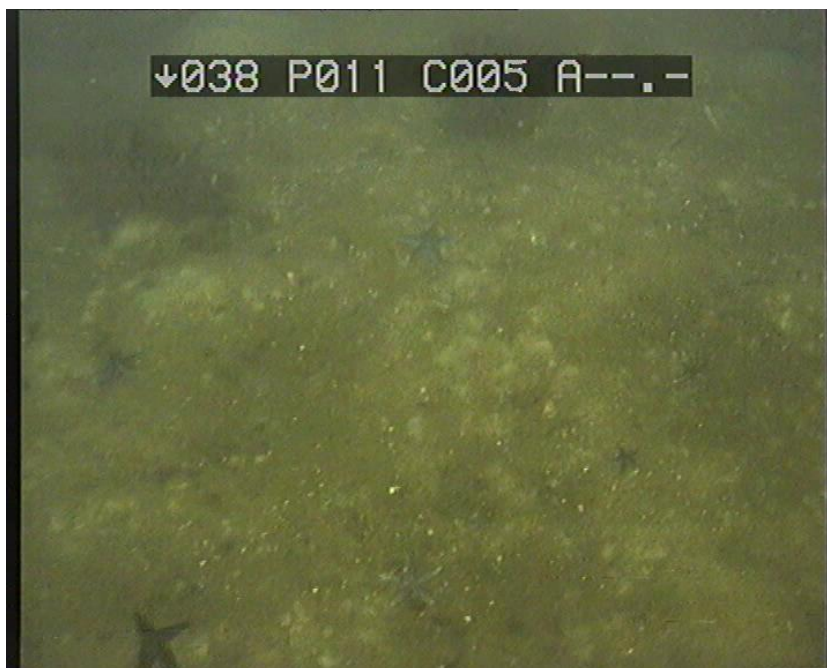
typu obiektów w rejonie Głębi Bornholmskiej (HELCOM, 2013). Część z nich, jak wspomniano wcześniej, uległa prawdopodobnie zagrzebaniu w miękkich osadach budujących dno, jednak badania przedstawione w dalszych częściach tej pracy pokazują, że na powierzchni dna dalej napotkać można pozostałości zatopianej amunicji chemicznej. Obiekty te nadal stanowią niebezpieczeństwo dla załóg kutrów rybackich, które prowadzą połowy w obrębie Głębi Bornholmskiej pomimo zakazów, które obowiązują w tym rejonie. W trakcie realizacji badań, przy użyciu aparatury opisanej w rozdziale 4., w obszarze tym natrafiono na liczne bruzdy denne, których występowanie jest powodowane aktywnością jednostek rybackich. Ponadto, w rejonie badań wykryto również wrak, który poddano wizualnej inspekcji.



Rysunek 6.7 Szczegółowa mapa Głębi Bornholmskiej (obszar C) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także wykrytym wrakiem. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której dochodziło do zrzutów amunicji chemicznej (na podstawie EMODnet data i HELCOM)

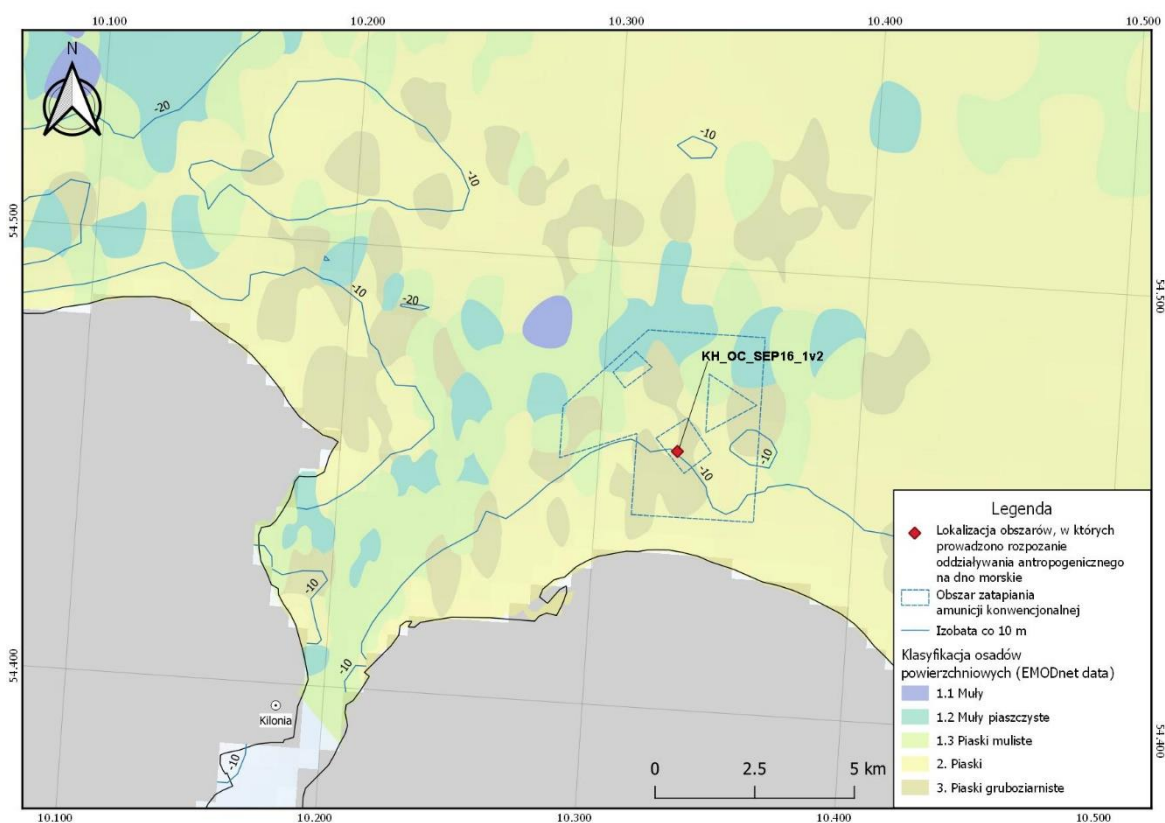
6.4 Obszar D – Zatoka Kilońska

Zatoka Kilońska położona jest w zachodniej części Morza Bałtyckiego, na południe od cieśniny Kattegat, która łączy Bałtyk z Morzem Północnym. Obszar badań oznaczony identyfikatorem D znajduje się w bliskim sąsiedztwie lądu, w odległości ok. 4,5 km od linii brzegowej. Głębokość w tym rejonie waha się w przedziale od 5 do 17 m, zaś na powierzchni dna zaobserwować można ślady bytowania licznych organizmów bentosowych (rys. 6.8). Podłoże morskie w wybranej do badań części Zatoki Kilońskiej charakteryzuje się równinnym ukształtowaniem, z epizodycznie występującymi zagłębieniami, które powstały na skutek kontrolowanych detonacji materiałów wybuchowych w tym rejonie (Appel i in., 2018). Powierzchnia dna w opisywanym obszarze zbudowana jest z piasków i piasków mulistych pochodzenia terygenicznego (Kunde i in., 2018) (rys. 6.9). Średnie roczne zasolenie w rejonie Zatoki Kilońskiej wynosi ok. 19 PSU. Powyższe dane pochodzą z walidowanego modelu opracowanego w Instytucie Oceanologii PAN (Jakacki i in., 2017; Jakacki i Meler, 2018). Średnia prędkość prądów przydennych w tym rejonie wynosi $2,4 \pm 0,05 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (Kampmeier i in., 2020). Prądy przydenne występujące w obszarze Zatoki Kilońskiej, podobnie jak w wypadku Głębi Bornholmskiej, Zatoki Gdańskiej i Głębi Gdańskiej powstają głównie na skutek falowania.



Rysunek 6.8 Dno morskie w rejonie Zatoki Kilońskiej – obszar D z widocznymi przedstawicielami organizmów bentosowych. Głębokość ok. 11 m

Obszar Zatoki Kilońskiej jest stale poddany silnej antropopresji, której przyczyną jest bliskość dużego portu w Kilonii. Podobnie jak w przypadku Zatoki Gdańskiej, w sąsiedztwie wspomnianego portu można zaobserwować dużą aktywność różnego rodzaju jednostek. Dodatkowo, w obrębie akwenu Zatoki Kilońskiej zlokalizowana jest strefa składowania amunicji konwencjonalnej pochodzącej z czasów II wojny światowej, którą wydobyto, przetransportowano i ponownie zatopiono w trakcie prac związanych z pogłębieniem i zabezpieczeniem toru wodnego prowadzącego do portu w Kilonii (rys. 6.9). Strefa ta jest aktualnie całkowicie wyłączona z eksploatacji dla wszystkich jednostek. W opisywanym obszarze dochodziło również do wspomnianych wcześniej celowych detonacji obiektów militarynych. Celem tych działań była neutralizacja niewybuchów. Pod względem aktywności rybackiej rejon Zatoki Kilońskiej, podobnie jak w przypadku Zatoki Gdańskiej, jest eksploatowany głównie przez małe jednostki rybackie, które nie wykorzystują włoków dennych podczas połowów.

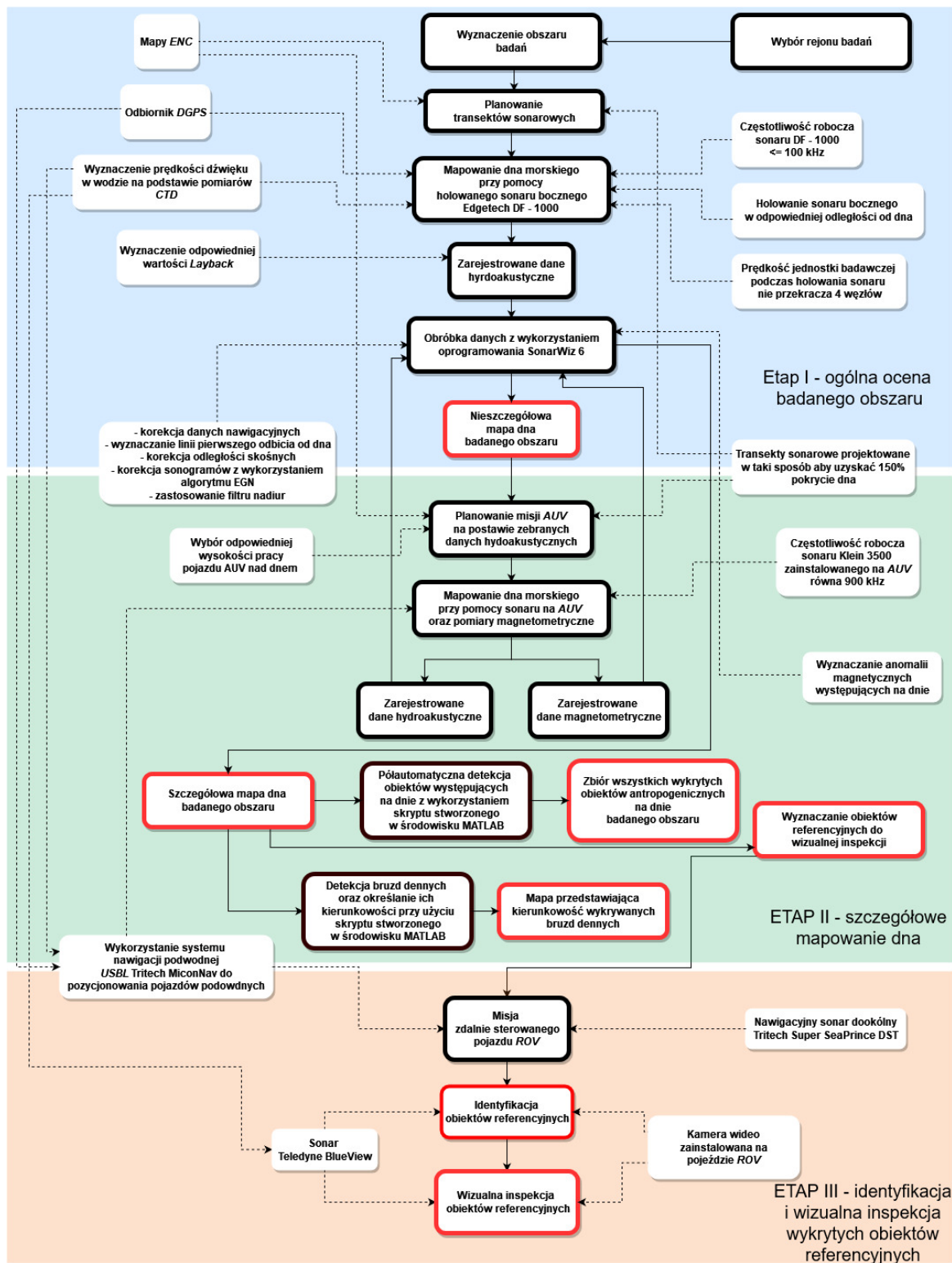


Rysunek 6.9 Szczegółowa mapa Zatoki Kilońskiej (obszar D) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której składowana jest amunicja konwencjonalna (na podstawie EMODnet data i HELCOM)

7. Planowanie pomiarów hydroakustycznych i akwizycja danych

Wysokiej jakości dane hydroakustyczne są niezbędne w celu przeprowadzenia rozpoznania skali oddziaływania antropogenicznego na dno morza, zarówno w rejonach południowego Bałtyku, jak również na obszarach innych akwenów. Dzięki precyzyjnym pomiarom, które były realizowane zgodnie z metodyką przedstawioną w niniejszym rozdziale, możliwe było wyznaczenie dokładnych lokalizacji obiektów antropogenicznych spoczywających na dnie, a także obserwacja śladów, które powstały na jego powierzchni w wyniku działalności człowieka. Uzyskiwanie danych hydroakustycznych o wysokiej jakości jest procesem żmudnym i trudnym, gdyż na ostateczny wynik mają wpływ liczne czynniki, również te, których operatorzy sprzętu pomiarowego nie mogą kontrolować. Przykładami takich czynników mogą być pogoda w trakcie prowadzenia pomiarów, warunki hydrologiczne panujące w obrębie badanego rejonu, czy ukształtowanie dna mapowanego akwenu. Kluczem do sukcesu, jakim jest uzyskanie danych o wysokiej jakości, jest szczegółowe zaplanowanie pomiarów z uwzględnieniem warunków hydrometeorologicznych występujących w wyznaczonym obszarze badań w momencie ich prowadzenia, organizacja akwizycji danych zgodnie z metodyką przyjętą dla danego rodzaju aparatury oraz w końcowej fazie, opracowanie zarejestrowanych zbiorów z wykorzystaniem odpowiednich metod i algorytmów.

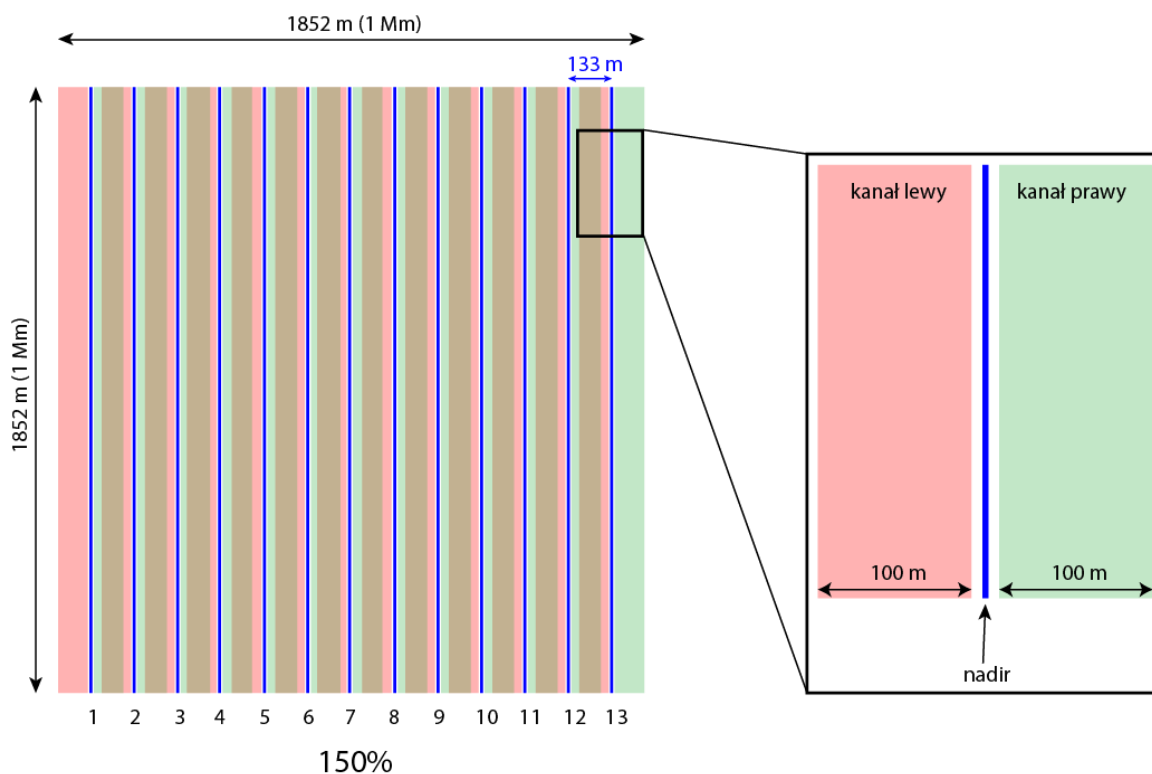
Proces detekcji, weryfikacji i identyfikacji obiektów antropogenicznych spoczywających na powierzchni dna morza w rejonach opisanych w rozdziale 6., składał się z trzech etapów, które opierały się na wykorzystaniu metod aktywnej akustyki podwodnej, magnetometrii oraz oględzin wizualnych przy pomocy kamery wideo. Kolejne zadania niezbędne do realizacji poszczególnych etapów oraz działania jakie wykonano w celu pomyślnej finalizacji wspomnianych przedsięwzięć zostały przedstawione na rysunku 7.1 w formie szczegółowego diagramu. Procedura wykrywania śladów działalności człowieka na powierzchni dna, w postaci bruzd, była realizowana tylko w dwóch pierwszych etapach prac przedstawionych na rysunku 7.1.



Rysunek 7.1 Diagram przedstawiający etapy prowadzenia poszukiwań obiektów i śladów antropogenicznych występujących na powierzchni dna morskiego. Bloki z czerwoną obwódką oznaczają kluczowe produkty kolejnych etapów badań, bloki z czarną obwódką reprezentują realizowane zadania oraz produkty pośrednie poszczególnych etapów, zaś bloki bez obwódką to niezbędne kroki, które należy podjąć w celu uzyskania wyników wysokiej jakości

7.1 Etap I – ogólna ocena badanych obszarów dna

Celem pierwszego etapu pomiarów było wstępne rozpoznanie badanych obszarów dna przy pomocy sonaru bocznego pracującego na częstotliwości 100 kHz. Po dotarciu do rejonu badań wyznaczano poligon o powierzchni ok. 1 Mm² (ok. 1852 m x 1852 m), w obrębie którego projektowano transekty, wzdłuż których poruszała się jednostka badawcza holująca sonar. Czynność ta była realizowana przy pomocy oprogramowania hydrograficznego HYPACK lub QINSy w oparciu o cyfrowe morskie mapy nawigacyjne ENC. Ustawienia zasięgu pracy sonaru dobierano w taki sposób, aby uzyskać pokrycie dna wynoszące 100 m dla każdego z przetworników sonaru bocznego. Ponadto, w celu osiągnięcia 150% pokrycia dna, sąsiadujące transekty nachodziły na siebie. W praktyce oznaczało to zaplanowanie przebiegu 13 transektów o długości ok. 1852 m, które rozmieszczone były w odległości ok. 133 m od siebie. Schemat przykładowego planu akwizycji danych przy pomocy sonaru holowanego został przedstawiony na rysunku 7.2.



Rysunek 7.2 Przykładowy przebieg transektów sonarowych wpisanych w poligon o powierzchni 1 Mm². Zasięg kanału lewego i prawego wynosi 100 m, zaś odstępy między kolejnymi transektami to 133 m przy 150% pokryciu dna wiązką sonaru

Minimalne pokrycie dna wiązkami akustycznymi podczas prowadzenia pomiarów sonarowych musi wynosić 100%. Z uwagi na geometrię pomiarową sonaru bocznego, zobrazowanie dna przy skrajnych krawędziach każdego z kanałów, a także przy nadirze może ulec zniekształceniu. W celu minimalizacji tych błędów, zaleca się takie projektowanie przebiegu transektów sonarowych, aby uzyskać 200% pokrycia dna (NOAA, 2014). Niestety metoda ta nie gwarantuje pełnej eliminacji powstawania zniekształceń. W związku z tym, zdecydowano o przeprowadzeniu wstępnego mapowania dna z pokryciem 150%. Takie podejście pozwoliło uniknąć zniekształceń obrazu w skrajnych odcinkach każdego z kanałów, jednak obszary przy nadirze nadal mogą być obciążone błędem. Niemniej, kompromis ten pozwala na znaczne zaoszczędzenie czasu potrzebnego na wykonanie pomiarów, w porównaniu do stosowania 200% pokrycia dna, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości rejestrowanych danych. Zobrazowania dna uzyskiwane na tym etapie badań wykorzystywano jedynie w celu zabezpieczenia nawigacji autonomicznego pojazdu podwodnego i nie prowadzono na ich podstawie analizy skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie.

Kolejnym krokiem przed przystąpieniem do rozpoczęcia mapowania powierzchni dna morza było wyznaczenie prędkości dźwięku w toni wodnej. Wartość ta jest funkcją temperatury, zasolenia i gęstości wody morskiej i wyznaczamy ją za pomocą wzorów empirycznych. Przykładem jednej z wielu propozycji jest równanie 7.1 zaproponowane przez UNESCO w 1983 roku, które opiera się na pracy Chen i Millero z 1977 roku (Fofonoff i Millard, 1983):

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{\frac{3}{2}} + D(T, P)S^2, \quad [7.1]$$

gdzie c to prędkość dźwięku w wodzie morskiej, S reprezentuje zasolenie wyrażone w jednostkach PSU, T to temperatura wody przedstawiana w stopniach Celsiusa, zaś P wyraża ciśnienie w barach. Wartości C_w , A , B oraz D to określone empirycznie wielomiany wyższego rzędu. Równanie 7.1 pozwala na wyznaczenie prędkości dźwięku w wodzie z uwzględnieniem następujących przedziałów poszczególnych jej parametrów: temperatura $0^\circ - 40^\circ\text{C}$, zasolenie $0 - 40$ PSU, ciśnienie $0 - 1000$ bar. Znając prędkość dźwięku można obliczyć odległość od jego źródła do dna lub obiektu znajdującego się na dnie. Pomiar prędkości dźwięku akwizycji danych należy wykonywać z interwałami co ok. 6 godzin dla całej kolumny wody. Dobowe zmiany temperatury wody, zwłaszcza

w miesiącach letnich, mają największy wpływ na zmiany prędkości dźwięku w toni morskiej (Wilson, 1960; Del Grosso i Mader, 1972; Mackenzie, 1981). Dlatego też, zaleca się tak częste pomiary temperatury i zasolenia z wykorzystaniem np. sondy CTD (ang. *Conductivity, Temperature, Depth*).

W trakcie prowadzenia pomiarów hydroakustycznych z użyciem sonaru holowanego jednostka badawcza była pozycjonowana przy pomocy różnicowego systemu DGPS (ang. *Differential Global Positioning System*). Tradycyjny system nawigacji satelitarnej GPS składa się z sieci satelit krążących na orbicie okołoziemskiej, wyposażonych w zegary atomowe. Satelity te, transmitują między innymi informacje o dokładnym czasie, zmierzonym przez wspomniane wcześniej zegary do odbiorników naziemnych za pomocą fal elektromagnetycznych. Znając różnice w czasie docierania do odbiornika danych, możliwe jest wyznaczenie odległości od nadajników, a co za tym idzie obliczenie pozycji odbiornika przy pomocy zestawów danych odebranych od minimum trzech niezależnych satelit. System DGPS porównuje znane dokładne pozycje naziemnych stacji odniesienia z pozycją odbiornika wyznaczoną metodą triangulacji. Następnie różnica ta jest transmitowana za pomocą fal radiowych do odbiornika, w którym następuje korekcja pomiaru (Witte i Wilson, 2004). Uzyskana w ten sposób poprawka pozwala na wyznaczenie położenia odbiornika z dokładnością od 2 do 5 metrów (Dziewicki i Specht, 1996). Stacje odniesienia zlokalizowane w Rozewiu, Dziwnowie, Hamerodde i Wustrow (Dziewicki i in., 1998) zapewniają pokrycie poprawką DGPS wszystkich obszarów opisanych w rozdziale 6.

Jednostka badawcza po obraniu kursu, który przebiegał wzdłuż kolejnych, zaprojektowanych wcześniej profili hydroakustycznych (transektów) rozpoczynała sondaż przy użyciu holowanego sonaru bocznego Edgetech DF - 1000. Aparatura zapewniała zasięg 100 m pokrycia dna wiązką akustyczną dla kanałów lewego i prawego. Podczas prowadzenia pomiarów, prędkość jednostki badawczej wynosiła ok. 3 - 4 węzły w celu uzyskania niezniekształconego obrazu dna. Prędkość statku za którym holowany był sonar została dobrana empirycznie i wartość ta daje dobre rezultaty dla wyżej wspomnianego modelu urządzenia. Kolejnym z istotnych czynników, który został wzięty pod uwagę w trakcie realizacji I etapu akwizycji danych hydroakustycznych było prowadzenie sonaru na określonej wysokości nad dnem. Przyjmuje się, że wysokość ta powinna wynosić ok. 10% wybranego zasięgu pracy sonaru, czyli przy zasięgu 100 m sonar winien być holowany na wysokości ok. 10 m nad dnem.

Po zakończeniu mapowania dna przy pomocy urządzenia DF – 1000 zebrane dane zostały poddane wstępnemu przetworzeniu z korekcją położenia sonaru względem jednostki holującej dla wyznaczenia jego przybliżonej pozycji geograficznej. Zarejestrowane dane, wzbogacone o poprawki nawigacyjne, były poddawane dalszej obróbce przy użyciu oprogramowania SonarWiz 6. Finalnym produktem etapu I były nieszczegółowe mapy dna badanych akwenów dla realizacji kolejnego etapu badań z wykorzystaniem pojazdu AUV. Dane zebrane przy pomocy sonaru holowanego pozwalały na planowanie misji urządzenia AUV w sposób bezpieczny, tak aby nie doszło do kolizji platformy z dużymi obiektami, takimi jak np. wraki. Zobrazowania podłoża morskiego uzyskane w I etapie prowadzonych badań nie będą prezentowane w dalszych rozdziałach niniejszej pracy, ponieważ nie wykorzystywano ich do wnioskowania na temat presji antropogenicznej oddziaływującej na dno badanych obszarów. Ponadto, etap I nie był realizowany w obrębie obszarów A oraz D, ponieważ autor dysponował szczegółowymi mapami nawigacyjnymi tych obszarów.

7.2 Etap II – szczegółowe mapowanie dna

Etap II polegał na przeprowadzeniu szczegółowych mapowań dna przy pomocy sonaru bocznego generującego impulsy akustyczne o wysokiej częstotliwości, a następnie wyznaczeniu lokalizacji obiektów i detekcji śladów działalności człowieka na dnie w postaci bruzd. Obserwowane bruzdy były analizowane pod kątem określenia ich orientacji, natomiast wybrane wykryte cele referencyjne były poddawane identyfikacji i wizualnej inspekcji w III etapie prac.

Pierwszym krokiem prowadzącym do realizacji II etapu badań było zaplanowanie misji pojazdu AUV. Powierzchnie obszarów, które mapowano przy użyciu powyższego urządzenia były mniejsze niż w przypadku zastosowania tradycyjnego sonaru holowanego. Przyczyną tego są ograniczenia związane z pojemnością akumulatorów zasilających pojazd AUV. W praktyce, wykorzystany autonomiczny pojazd podwodny może realizować misje, które trwają do 8 godzin przy sprzyjających warunkach hydrometeorologicznych. Dla zminimalizowania ryzyka utraty sprzętu, w przypadku konieczności powtórzenia pomiarów lub nagłego pogorszenia pogody, misje pojazdu AUV były planowane w taki sposób, aby ich czas trwania nie przekraczał 3 godzin. Transekty, wzdłuż których poruszała się platforma AUV, były planowane podobnie jak w przypadku sonaru holowanego i przebiegały równoległe do siebie. Zasięg sonaru podczas prowadzenia szczegółowego mapowania dna

wynosił po 30 metrów dla kanałów lewego i prawego przy zachowaniu 150% pokrycia dna. Pojazd AUV poruszał się z prędkością ok. 2 węzły, na wysokości 2 - 3 m nad powierzchnią dna w trakcie rejestracji danych hydroakustycznych i magnetometrycznych. Z uwzględnieniem powyższych parametrów pracy sonaru oraz wspomnianego kryterium czasowego, powierzchnia obszaru jaką można było zmapować podczas pojedynczej misji, wynosiła w przybliżeniu ok. 0,07 Mm² (ok. 500 m x 500 m), dla akwenów o głębokości nie większej niż 90 m. Głębokość badanego rejonu miała istotny wpływ na czas potrzebny do realizacji zadania, ponieważ pojazd AUV wynurzał się na powierzchnię po zakończeniu rejestracji danych wzdłuż każdego kolejnego transektu.

Po odpowiednim zaprojektowaniu misji i przegraniu jej do pamięci platformy AUV, urządzenie było przygotowywane do jej realizacji. Działania te polegały na skomunikowaniu się odbiornika zainstalowanego na pokładzie pojazdu z systemem GPS i nawiązaniu łączności radiowej między pojazdem, a urządzeniem sterującym, odpowiadającym za manualną kontrolę platformy, gdy ta znajdowała się na powierzchni wody. Ponadto sprawdzano poprawność działania czujników odpowiedzialnych za nawigację i pomiary środowiskowe. Następnie, pojazd był wodowany i rozpoczął realizację zadań zgodnie z zaplanowaną misją. W trakcie pracy, platforma była monitorowana przez trzy niezależne systemy: GPS, USBL oraz radio w celu obserwacji przebiegu misji.

Sonar zainstalowany na pokładzie autonomicznego pojazdu podwodnego IVER2 został scharakteryzowany w rozdziale 3. Do akwizycji danych hydroakustycznych przedstawionych w dalszych częściach pracy wykorzystywano wyłącznie jego wyższą częstotliwość roboczą – 900 kHz. Przy doborze zasięgu kanałów wynoszącym po 30 m i szerokości wiązki nadawanych impulsów w płaszczyźnie poziomej równej 0,34°, sonar Klein UUV - 3500 zapewniał bardzo dobrą rozróżnialność obiektów występujących na dnie. Ponadto, w trakcie realizacji wybranych misji, pojazd AUV holował za sobą magnetometr dostarczający dane przedstawiające zmiany indukcji pola magnetycznego w badanym obszarze względem naturalnego tła magnetycznego Ziemi. Zbiory te umożliwiły detekcję obiektów ferromagnetycznych na powierzchni dna. Komplet danych hydroakustycznych, magnetometrycznych oraz pochodzących z czujników środowiska zainstalowanych w dziobowej części pojazdu był zgrywany na zewnętrzne dyski twarde po wydobyciu platformy z wody.

Ostatnim krokiem podczas realizacji II etapu badań było przetworzenie zarejestrowanych danych hydroakustycznych i magnetometrycznych przy pomocy oprogramowania SonarWiz 6 oraz autorskich skryptów stworzonych w środowisku

MATLAB zgodnie z procedurami opisanymi w rozdziale 8. niniejszej pracy. Uzyskane wyniki były poddawane szczegółowej analizie, której celem była detekcja obiektów antropogenicznych zajmujących określoną powierzchnię na dnie badanych obszarów. Równocześnie, na podstawie uzyskiwanych zobrażeń podłoża morskiego wybierano cele referencyjne, które rozpoznawano i identyfikowano przy pomocy metod bezpośredniej obserwacji w III etapie prac. Na podstawie otrzymywanych rezultatów, prowadzono również wnioskowanie na temat śladów działalności człowieka występujących na dnie. Ślady te, w postaci bruzd powstałych na skutek m.in. działalności jednostek rybackich nie były obserwowane przy pomocy aparatury opisanej w podrozdziale 4.2 ze względu na ich wielkoskalowe wymiary. Przetworzone i przeanalizowane dane były importowane do bazy danych stworzonej w środowisku GIS (ang. *Geographic Information System*) w postaci plików Geotiff oraz Shapefile.

7.3 Etap III – identyfikacja i wizualna inspekcja obiektów referencyjnych

Etap III rozpoczynał się od wyznaczenia pozycji kotwiczenia jednostki badawczej, z której prowadzone były badania w taki sposób, aby dystans od niej do obiektu lub obszaru, który miał być poddany identyfikacji i wizualnej inspekcji był jak najmniejszy. Następnie przeprowadzano procedurę testową przed zanurzeniem pojazdu ROV, która polegała na sprawdzeniu łączności pomiędzy platformą bezzałogową, a jednostką sterującą znajdującą się na pokładzie statku. Platforma ROV Falcon, wykorzystywana w III etapie badań, była obsługiwana przez zespół co najmniej trzech operatorów: pierwszy z nich zajmował się pilotażem platformy oraz obsługą sonarów zainstalowanych na pokładzie pojazdu, natomiast pozostała dwójka była odpowiedzialna za prawidłową eksploatację kabloliny. Śledzenie pozycji zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego Falcon pod powierzchnią wody odbywało się, podobnie jak w przypadku urządzenia AUV, przy pomocy systemu podwodnej nawigacji USBL Tritech Micronnav. Dodatkowo informacji na temat głębokości, na której znajdowała się w danej chwili platforma ROV oraz kierunku, w którym się poruszała, dostarczały czujniki wspomniane w rozdziale 4.

Zdalnie sterowany pojazd podwodny był zanurzany do głębokości dna, a następnie na podstawie szczegółowej mapy dna badanego obszaru, uzyskanej dzięki platformie autonomicznej, wyznaczano namiar, zgodnie z którym pilot prowadził urządzenie do wybranego obiektu referencyjnego. Pojazd przemieszczał się kilkadziesiąt centymetrów nad

dnem, prowadząc obserwację jego powierzchni oraz toni wodnej przed sobą, przy pomocy sonaru dookólnego, urządzenia BlueView oraz kamery wideo, do momentu dopłynięcia do wyznaczonego celu. Następnie, wcześniej wybrany obiekt lub zgrupowanie celów podwodnych były poddawane identyfikacji i wizualnej inspekcji. Obraz rejestrowany przez kamerę, a także dane pochodzące z sonaru BlueView były zapisywane na dysku twardym komputera połączonego z jednostką sterującą pojazdem ROV. O ile było to możliwe, wizualna inspekcja wyznaczonego obiektu lub zgrupowania celów podwodnych, odbywała się w co najmniej dwóch płaszczyznach w celu przeprowadzenia dokładnych oględzin.

Całość danych zebranych przy pomocy platform AUV i ROV posłużyła jako materiał faktograficzny, na podstawie którego, po odpowiednim opracowaniu i analizie, dokonano charakterystyki skali oddziaływania antropogenicznego na dno morskie w obszarach opisanych w rozdziale 6. niniejszej pracy.

7.4 Pomiary uzupełniające

W trakcie prowadzenia kampanii pomiarowych, które odbywały się w latach 2016 – 2020, przeprowadzono dodatkowe pomiary z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowego profilomierza osadów Edgetech SB-216S. Urządzenie to nadawało impulsy akustyczne o modulowanej częstotliwości w przedziale od 2 do 15 kHz. Dzięki zastosowaniu niskich częstotliwości możliwe było zobrazowanie struktur geologicznych występujących pod powierzchnią dna oraz detekcję obiektów występujących w nich. Badania te były realizowane w obszarach Głębi Gdańskiej i Głębi Bornholmskiej, gdzie występują miękkie, uwodnione osady budujące wierzchnią warstwę podłoża morskiego. Uzyskiwane dane umożliwiły weryfikację hipotezy o możliwości zagrzebywania obiektów antropogenicznych w powierzchniowych osadach dennych wybranych obszarów. Przykłady zarejestrowanych zbiorów prezentujących budowę dna we wspomnianych wcześniej wybranych rejonach oraz ich krótka interpretacja będą przedstawione w dalszych częściach niniejszej pracy.

8. Metody opracowania i analizy danych

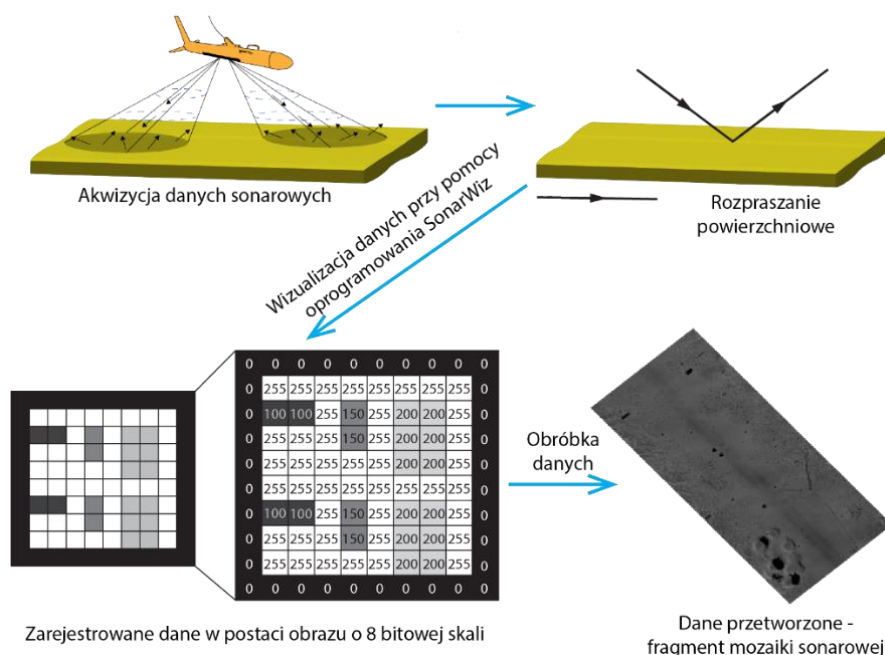
Prawidłowo zaplanowana i przeprowadzona akwizycja danych hydroakustycznych i magnetometrycznych, a także materiałów faktograficznych w postaci filmów podwodnych stanowią wstęp do osiągnięcia postawionego celu, jakim jest rozpoznanie skali oddziaływania antropogenicznego na dno morskie. Następnym krokiem jest dobór odpowiednich metod katalogowania, selekcji i obróbki uzyskanych danych. Opracowywanie i późniejsza interpretacja danych hydroakustycznych, wymuszają zastosowanie zaawansowanych metod matematycznych do obróbki sygnałów oraz przetwarzania i analizy obrazu. Stosowana tu analiza obrazu (ang. *image analysis*) dotyczy zarówno metod poprawy jakości obrazu, jak i późniejszego wykorzystania technik rozpoznawania i klasyfikacji zwizualizowanych obszarów dna w celu zautomatyzowania interpretacji uzyskiwanych wyników. Opracowania tego typu winny być wsparte ingerencją doświadczonego operatora, ponieważ w trakcie kolejnych etapów ich prowadzenia, istnieje możliwość utraty lub pominięcia części istotnych informacji zawartych w zarejestrowanych zbiorach. Na klasyczny schemat analizy danych sonarowych składają się: przetwarzanie wstępne, które polega na przygotowaniu mozaik sonarowych; segmentacja, podczas której dokonuje się selekcji fragmentów obrazu charakteryzujących się specyficznymi cechami (np. obszary jaśniejsze i ciemniejsze) lub wymiarami (podział mozaik sonarowych na mniejsze części o określonej powierzchni); identyfikacja i analiza cech zakończona klasyfikacją i interpretacją wyników.

W niniejszym rozdziale opisane zostaną metody wstępnego przygotowania danych hydroakustycznych do postaci mozaik sonarowych. Ponadto, zaprezentowane będą techniki transformacji uzyskiwanych sonogramów przy wykorzystaniu m.in. analizy tekstur, 2D FFT oraz algorytmu k-średnich. W kolejnych podrozdziałach przybliżone zostaną również metody opracowania danych magnetometrycznych, a także procesy detekcji, selekcji i identyfikacji obiektów antropogenicznych występujących na dnie na podstawie uzyskiwanych wyników. Scharakteryzowane zostaną też procedury wykrywania i analizy kierunkowości bruzd występujących na powierzchni dna. Ostatnia część niniejszego rozdziału dotyczyć będzie organizacji i wizualizacji zebranych danych w bazach danych opartych na środowisku GIS (ang. *Geographics Information System*).

8.1 Metody wstępnego przygotowania danych hydroakustycznych - mozaikowanie cyfrowych danych sonarowych

Rastrowe mapy dna morza, w postaci mozaik sonarowych, są bardzo powszechnym sposobem przedstawienia danych hydroakustycznych zarejestrowanych przy pomocy sonaru bocznego (Chavez Jr. i in., 2002; Reed i in., 2006; Kaberow i Szatan, 2008). Taka metoda wizualizacji danych umożliwia przedstawienie całego sondowanego obszaru na jednym planszecie. Mozaikowanie danych sonarowych polega na tworzeniu jednego wspólnego, rastrowego zobrazowania powierzchni dna morza z kilku lub kilkunastu zbiorów uzyskanych w trakcie prowadzenia pomiarów, zgodnie z przyjętym podczas akwizycji danych geograficznym układem odniesienia. W procesie przygotowania mozaik sonarowych usuwa się błędy i artefakty powstałe podczas rejestracji danych. W trakcie opracowywania mozaiki sonarowej wykonuje się również szereg procedur mających na celu niwelację zniekształceń wynikających z geometrii pracy sonaru. Ostatecznymi produktami mozaikowania danych sonarowych są obrazy rastrowe z dowiązanymi informacjami geograficznymi, zapisywane najczęściej w plikach o formacie GeoTiff.

Mozaiki sonarowe, składają się z pikseli, których poziom jasności zależy od odbicia impulsów akustycznych. Uzyskiwane obrazy dna morskiego są w rzeczywistości wizualizacją zmian ciśnienia akustycznego rozproszonego wstecz od powierzchni dna i obiektów spoczywających na nim. Uproszczony schemat powstawania mozaik sonarowych został przedstawiony na rysunku 8.1. Do analizy danych hydroakustycznych oraz magnetometrycznych prezentowanych w niniejszej pracy wykorzystywano komercyjne oprogramowanie SonarWiz w wersji 6. firmy Chesapeake Technology Inc. oraz własne skrypty przygotowane w środowisku MATLAB.

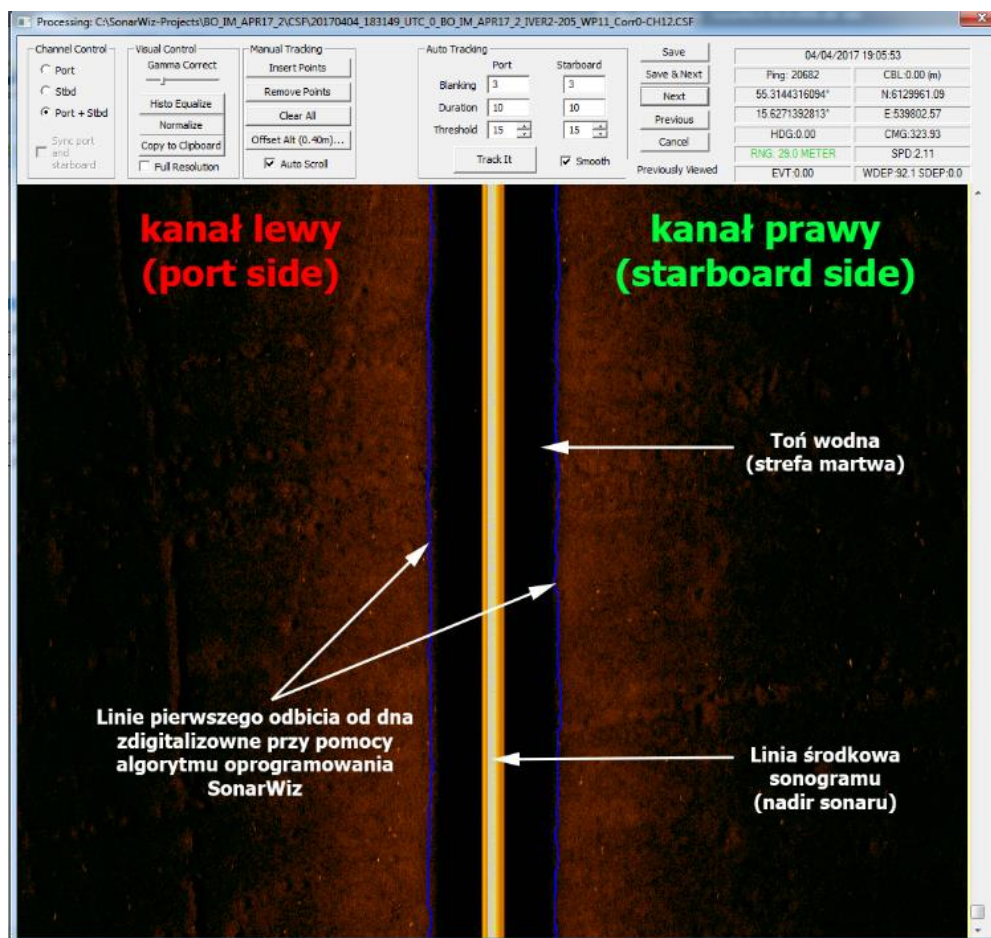


Rysunek 8.1 Uproszczony schemat powstawania mozaik sonarowych

Pierwszym krokiem prowadzącym do uzyskania zobrazowania powierzchni dna, w postaci mozaiki sonarowej, jest import surowych danych zarejestrowanych przy pomocy sonaru bocznego do nowego projektu utworzonego w oprogramowaniu SonarWiz. Większość z dostępnych na rynku systemów sonarowych zapisuje zbiory w postaci plików o swoistym dla producenta rozszerzeniu. W przypadku danych prezentowanych w niniejszej pracy są to pliki z rozszerzeniem **.sdf* dla systemu Klein UUV – 3500. Oprogramowanie SonarWiz automatycznie tworzy pliki robocze z rozszerzeniem **.csf*, które są następnie wykorzystywane do dalszych analiz. Surowe dane hydroakustyczne pozostają niezmienione i możliwa jest ich ponowna obróbka przy wykorzystaniu innych parametrów. Na etapie importu zarejestrowanych zbiorów przeprowadzana jest korekcja danych nawigacyjnych zawartych w zarejestrowanych pakietach poprzez zastosowanie filtra, który usuwa wartości odstające, spowodowane na przykład błędnymi odczytami z odbiorników GPS i żyrokompasów sprzężonych z układami pomiarowymi (CTI, 2016). Filtr działa na zasadzie okna przesuwanego (Koç, 1995), zaś jego rozmiar został ustawiony na 300 kolejno następujących po sobie impulsów.

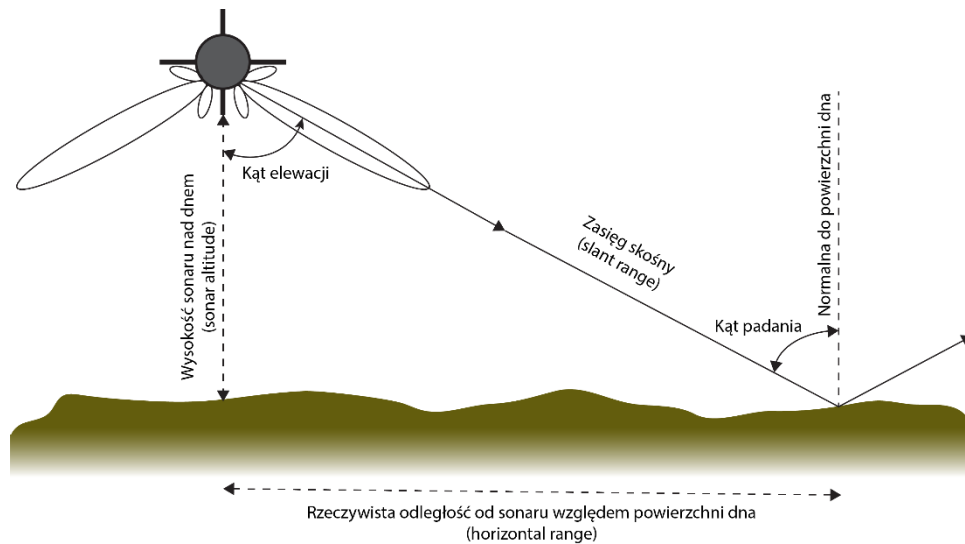
Następnym krokiem jest przeprowadzenie korekcji odległości skośnych SRC (ang. *Slant Range Correction*). Odległość pikseli od linii środkowej sonogramu (nadiru sonaru) jest funkcją czasu, w której wygenerowane fale pokonują dystans od przetwornika nadawczo-odbiorczego do dna (lub obiektu zlokalizowanego na dnie) i z powrotem.

Przeprowadzenie korekcji odległości skośnych odbywa się na zasadzie wtórnego próbkowania zarejestrowanych danych w funkcji czasu przy uwzględnieniu prędkości dźwięku w toni wodnej oraz pożądanego zasięgu dla lewego i prawego kanału sonaru (Chorzewska, 2013). W celu uzyskania rzeczywistej odległości od przetwornika względem powierzchni dna (ang. *horizontal range*), należy zdeterminować dodatkową wielkość, jaką jest wysokość prowadzenia sonaru nad dnem (ang. *sonar altitude*). Aby uzyskać dokładne dane na temat wysokości sonaru nad dnem, niezbędne jest wyznaczenie linii pierwszego odbicia od dna poprzez jej ręczną digitalizację lub za pomocą algorytmów zawartych w oprogramowaniu przeznaczonym do obróbki danych hydroakustycznych (rys. 8.2).



Rysunek 8.2 Wyznaczanie linii pierwszego odbicia od dna przy wykorzystaniu algorytmu „*Bottom Tracking*” zawartego w oprogramowaniu SonarWiz 6

Znając wysokość sonaru nad dnem oraz zasięg skośny do jakiego docierają wygenerowane impulsy akustyczne, można w łatwy sposób wyznaczyć odległość horyzontalną od przetwornika względem powierzchni dna przy pomocy prostych przekształceń, opartych na geometrii euklidesowej, dotyczących trójkątów prostokątnych (rys. 8.3).



Rysunek 8.3 Schemat wyznaczania rzeczywistych odległości od sonaru względem powierzchni dna

Przyjmując, że powierzchnia dna jest płaska, rzeczywista odległość kolejnych pikseli sonogramu od jego linii środkowej względem dna może być wyznaczona przy pomocy następującego wzoru:

$$D_i = \sqrt{\left(\frac{cT_i}{2}\right)^2 - h^2}, \quad [8.1]$$

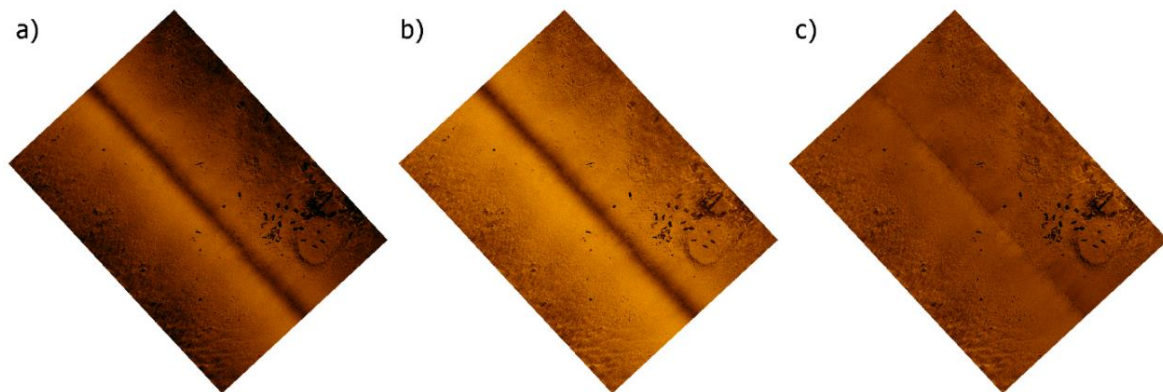
gdzie D_i reprezentuje rzeczywistą odległość względem dna od linii środkowej sonogramu do i -tej próbki echa, człon $cT_i/2$ opisuje dystans zasięgu skośnego od źródła do piksela i na sonogramie w czasie T_i ; c to lokalna prędkość dźwięku w toni wodnej, zaś h to chwilowa wysokość sonaru nad dnem.

W celu niwelacji efektu osłabiania fal akustycznych, wynikających ze strat geometrycznych oraz absorpcyjnych i ułatwienia interpretacji sonogramów, stosuje się korekcję wzmocnienia sygnału zwaną zasięgową regulacją wzmocnienia ZRW (ang. *Time Varied Gain*). Jest to analogowa bądź cyfrowa metoda kompensacji strat poziomu odebranego sygnału, która polega na płynnym podwyższaniu wzmocnienia w torze odbiorczym w miarę upływu czasu, od momentu nadania impulsu sondującego, czyli w miarę wzrostu zasięgu, z którego powracają echa. Korekcję zasięgową regulacji wzmocnienia ZRW w funkcji czasu można przedstawić za pomocą następującego wzoru (MacLennan, 1986; Moszyński i Stepnowski, 2002):

$$g(t) = \left(\frac{ct}{2}\right)^2 e^{\alpha(f)\left(\frac{ct}{2}\right)}, \quad [8.2]$$

gdzie c to prędkość dźwięku w toni wodnej, t reprezentuje czas trwania impulsu akustycznego, skutkiem czego człon $(ct/2)$ opisuje dystans od źródła impulsu do miejsca jego docierania, zaś a to energetyczny współczynnik absorpcji wyrażany w neperach na metr.

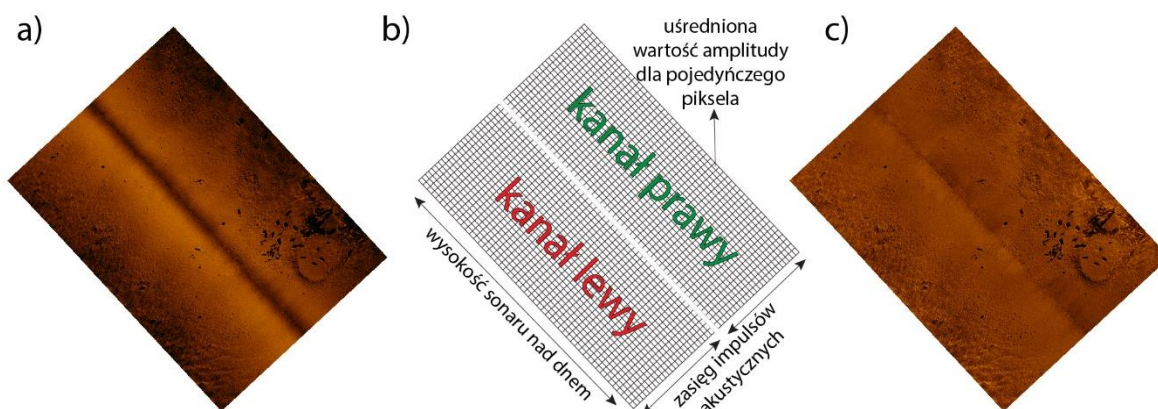
Korekcje niejednorodności nasycenia barwą sonogramów przedstawionych w niniejszej pracy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem algorytmu EGN (ang. *Empirical Gain Normalization*) dostępnego w oprogramowaniu SonarWiz 6. Zastosowanie tej funkcji przynosi dużo lepsze efekty w porównaniu do tradycyjnej zasięgowej regulacji wzmocnienia ZRW, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie czytelności i przejrzystości uzyskiwanych sonogramów (rys. 8.4).



Rysunek 8.4 Korekcja niejednorodności nasycenia barwą sonogramów z wykorzystaniem funkcji ZRW oraz algorytmu EGN. a) sonogram nieprzetworzony, b) sonogram poddany działaniu funkcji ZRW ($20\log(R) + 0.01(R) - 10$ [dB]), c) sonogram przetworzony przy pomocy algorytmu EGN

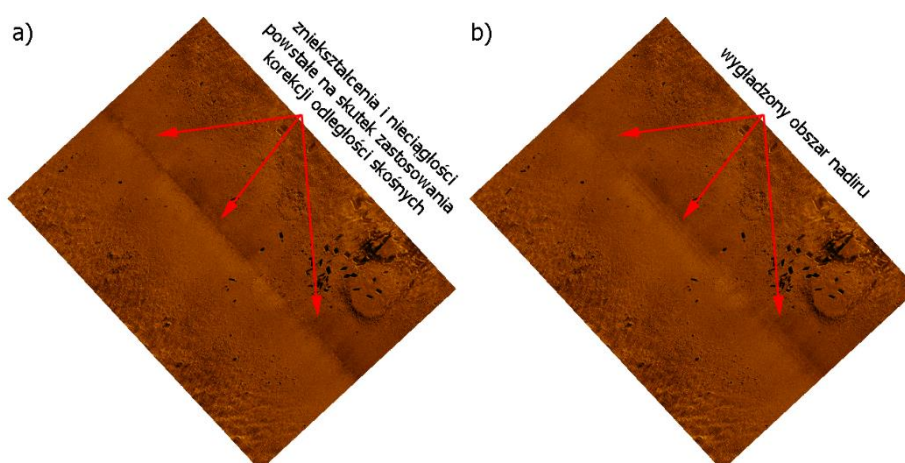
Algorytm EGN, opracowany przez producenta oprogramowania SonarWiz, sumuje i uśrednia amplitudy zarejestrowanych impulsów akustycznych dla wybranego zbioru danych, w funkcji wysokości sonaru nad dnem i zasięgów. Zabieg ten jest przeprowadzany dla prawego i lewego kanału sonaru oddzielnie. Następnie, każda uśredniona próbka zostaje przyporządkowana do tabeli normalizacyjnej, z uwzględnieniem jej parametrów geometrycznych (wysokości sonaru nad dnem i zasięgu, do którego dotarł wygenerowany sygnał akustyczny) (rys. 8.5). Ostatecznie obraz wejściowy jest poddawany korekcji przy wykorzystaniu uzyskanej tabeli normalizacyjnej w taki sposób, aby zniwelować efekt

większej intensywności pikseli znajdujących się bliżej linii środkowej. Jednocześnie usuwane są zniekształcenia wynikające z naturalnej zmienności dna morskiego (CTI, 2016).



Rysunek 8.5 Proces korekcji niejednorodności nasycenia barwą sonogramów z wykorzystaniem algorytmu EGN: a) obraz wejściowy; b) schemat budowy tabeli normalizacyjnej; c) sonogram po korekcji

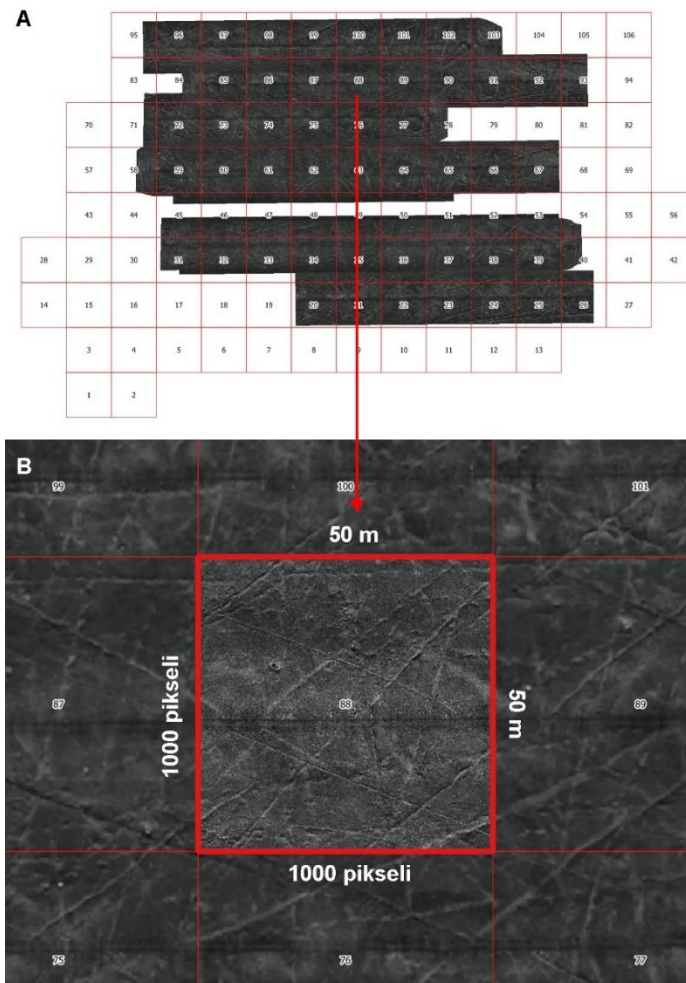
Ostatnia korekcja, jaką stosowano do zwiększania czytelności uzyskiwanych obrazów, dotyczyła obszaru łączenia danych rejestrowanych przez prawy i lewy przetwornik systemu. W obszarze tym, nazywanym nadirem sonaru, powstają często zniekształcenia i nieciągłości wynikające z przeprowadzonej na wcześniejszych etapach obróbki danych korekcji odległości skośnych. Oprogramowanie SonarWiz 6 pozwala na zminimalizowanie tego efektu poprzez zastosowanie filtru nadiru (ang. *Nadir Filter*), który wygładza krawędzie łączących się ze sobą zbiorów danych w każdym z transektów sonarowych, w taki sposób, aby nieciągłość była jak najmniej zauważalna (rys. 8.6).



Rysunek 8.6 Efekt działania filtru nadiru dostępnego w oprogramowaniu SonarWiz 6: a) fragment sonogramu poddany działaniu tylko algorytmu EGN; b) fragment sonogramu poddany działaniu algorytmu EGN i filtru nadiru

W celu prawidłowego zastosowania niniejszego filtra należy wprowadzić wartość kątową pod jaką powierzchnie przetworników sonaru są skierowane do normalnej względem powierzchni dna morza. W przypadku sonaru UUV-3500, wykorzystywanego do akwizycji danych przedstawionych w niniejszej pracy, parametr ten wynosił 20° dla kanałów lewego i prawego systemu pomiarowego. Zastosowanie filtra nadiru nie ma realnego wpływu na zarejestrowane dane i jest to zabieg poprawiający wygląd uzyskiwanych sonogramów (CTI, 2016). Ostatecznie poszczególne linie sonarowe są łączone w spójny obraz poprzez zastosowanie algorytmu mozaikowania, który uśrednia wartości pikseli w obrębie transektów nachodzących na siebie.

Ostatnim etapem przygotowania mozaik sonarowych jest eksport gotowych cyfrowych map powierzchni dna do plików graficznych, zawierających dowiązane informacje geograficzne, a także wybraną paletę barw, odpowiadającą występującym na sonogramie poziomom szarości pikseli. Zarejestrowane i przetworzone dane sonarowe tworzą mozaikę linia po linii zgodnie z przyjętym geograficznym układem odniesienia (Kaberow i Szatan, 2008). Na etapie eksportu danych należy ustalić w jakim układzie odniesienia oraz z jakim odwzorowaniem generowane będą pożądane pliki. Mozaiki prezentowane w dalszych częściach pracy były opracowywane w układzie odniesienia WGS-84 (ang. *World Geodetic System 1984*), z odwzorowaniem UTM (ang. *Universal Transverse Mercator*) dla stref 32., 33. i 34. półkuli północnej. Segmentacja gotowych mozaik sonarowych odbywała się poprzez ich podział na mniejsze sektory kwadratowe, które posiadały unikalne identyfikatory (rys. 8.7A). Ponadto, konieczne było zdefiniowanie rozdzielczości uzyskiwanych sektorów, z których składały się mozaiki. W tym celu określono jakiemu rzeczywistemu wymiarowi na powierzchni dna odpowiadać będzie pojedynczy piksel mozaiki sonarowej. Dla danych prezentowanych w niniejszej pracy rozmiar pojedynczego piksela odpowiadał fragmentowi dna o wymiarach 0,05 m x 0,05 m. Sektory budujące mozaiki sonarowe składały się z 1000 kolumn oraz 1000 wierszy pikseli. Oznacza to, że rzeczywiste wymiary pojedynczego sektora wynosiły po 50 m dla każdej z jego krawędzi (rys. 8.7B). Gotowe mapy dna były zapisywane w postaci zbiorów odpowiednio numerowanych plików GeoTiff (sektorów), które służyły jako materiał wejściowy do dalszych analiz, a także były archiwizowane w bazie danych. W przypadku, kiedy w sektorze pokrycie danymi sonarowymi było mniejsze niż 20%, wówczas sektor ten nie był brany pod uwagę w procesie półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych występujących na powierzchni dna.



Rysunek 8.7 Sposób dzielenia przetworzonych mozaik sonarowych na mniejsze sektory kwadratowe: A – przykładowa mozaika podzielona na 108 sektorów; B – pojedynczy sektor kwadratowy o wymiarach 50 m x 50 m (1000 pikseli x 1000 pikseli)

8.2 Metody transformacji obrazów sonarowych – detekcja antropogenicznych obiektów występujących na dnie badanych akwenów

Dane zapisywane przy pomocy sonaru bocznego po odpowiedniej obróbce opisanej we wcześniejszym podrozdziale tworzą cyfrowe odwzorowania rozpraszania sygnału akustycznego na dnie. Uzyskiwane w ten sposób rastrowe obrazy sonarowe składają się z pikseli, których nasycenie tonalne przyjmuje wartości od 0 (odcienie ciemne) do 255 (odcienie jasne), proporcjonalnie do zarejestrowanych zmian ciśnienia akustycznego rozproszonego wstecz na elementach budujących powierzchnię dna (rys. 8.1). Oznacza to, że takie obrazy są zapisywane w 8 bitowej skali barw. Oczywiście możliwe jest tworzenie mozaik sonarowych o bardziej rozbudowanej dynamice, jednak w celu przyspieszenia obróbki i przetwarzania danych zawartych w niniejszej pracy, zdecydowano

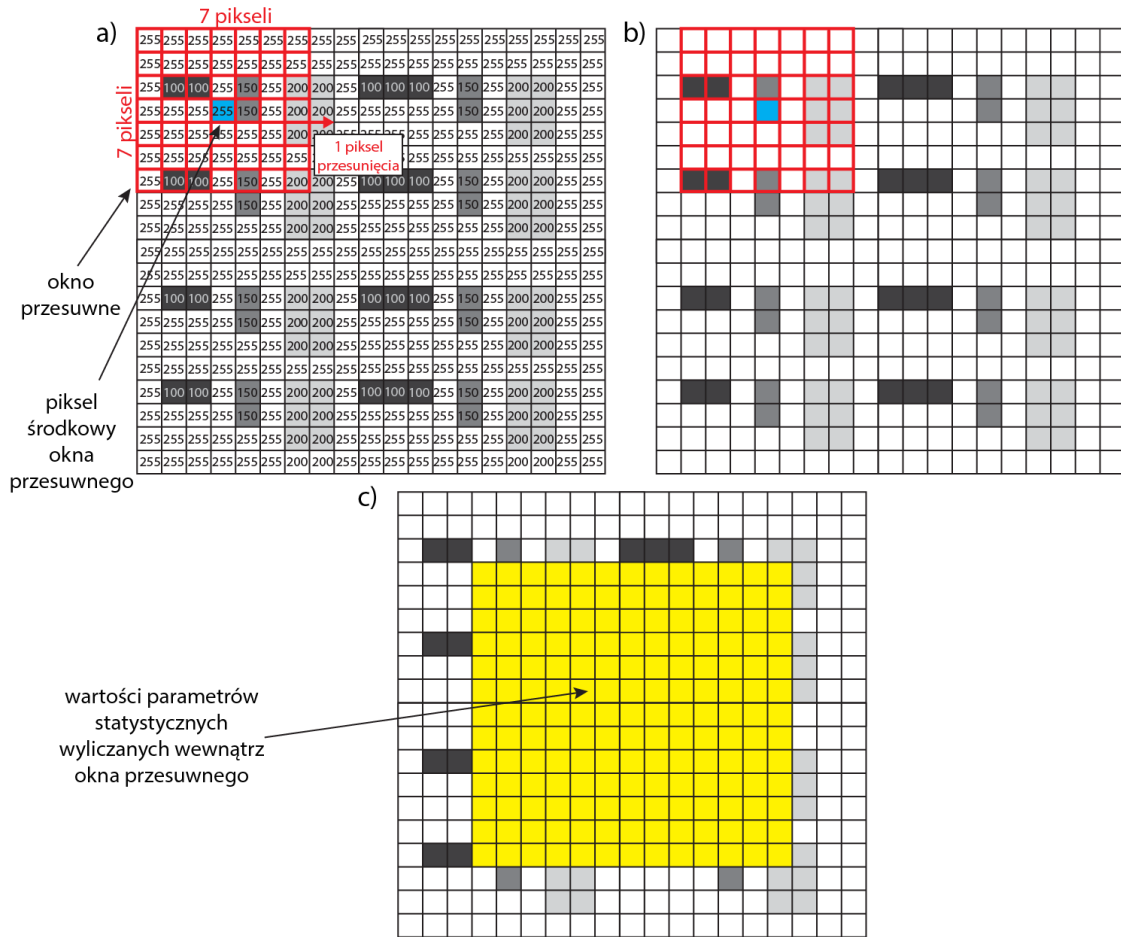
o wykorzystaniu 8 bitowej palety kolorów. Piksele budujące mozaiki sonarowe, w zależności od ich wartości tonalnych, tworzą na sonogramach tekstury, które mogą występować globalnie dla całości obrazu oraz lokalnie w wybranych jego fragmentach. Tekstury te odzwierciedlają powierzchnie dna (formy morfologiczne, typy osadów, habitaty bentosowe). Analiza tekstur polegająca na badaniu stopnia nasycenia barwą pikseli oraz rozpatrywaniu przestrzennych relacji pomiędzy nimi pozwala na uzyskanie informacji na temat cech morfologicznych i właściwości osadów tworzących powierzchnię dna morza (Huvenne i in., 2002). Ponadto, dzięki analizie tekstur oraz wykorzystaniu innych technik przetwarzania obrazu możliwe jest klasyfikowanie dna morskiego (Reed i in., 2006), również pod kątem detekcji obiektów występujących na nim (Feldens i in., 2019). Tego typu automatyczna klasyfikacja dna nie jest wolna od wad, dlatego też konieczna jest jej walidacja polegająca na przykład na poborze prób osadów, manualnym oznaczaniu obiektów widocznych na przetwarzanych sonogramach lub przeprowadzeniu wizualnej inspekcji powierzchni przy pomocy systemów telewizji podwodnej bądź z udziałem nurków (de Barros Pereira i in., 2017).

Przygotowane mozaiki sonarowe, utworzone na podstawie danych zarejestrowanych przy pomocy sonaru bocznego Klein UUV – 3500 poddano analizie tekstur. Procedura ta polegała na obliczeniu parametrów statystycznych pierwszego i drugiego rzędu dla uzyskanych obrazów rastrowych. Dodatkowo wyznaczono jeszcze jeden deskryptor analizowanych zobrazowań za pomocą metody 2D FFT z zaimplementowanym górnoprzepustowym filtrem. Na podstawie uzyskanych cech dokonano klasyfikacji powierzchni dna przy pomocy analizy skupień w celu detekcji obiektów występujących na nim. Powyższe operacje wykonano przy pomocy oprogramowania stworzonego w środowisku obliczeniowym MATLAB.

8.2.1 Wyznaczanie statystyk pierwszego rzędu dla obrazów sonarowych

Obliczanie parametrów statystycznych pierwszego rzędu dla segmentów budujących mozaiki sonarowe odbywało się przy wykorzystaniu dwuwymiarowego, kwadratowego okna przesuwnego o wcześniej zadanym rozmiarze. Autor empirycznie wyznaczył pożądany rozmiar okna przesuwnego, badając jego różne warianty w przedziale od 7 pikseli do 31 pikseli na krawędź. Optymalny rozmiar okna przesuwnego, który został przyjęty do dalszych analiz wynosił 15x15 pikseli. Stwierdzono, że okno przesuwne o takich parametrach dawało dobre rezultaty podczas wykrywania obiektów występujących na dnie, których powierzchnia była większa niż 0,375 m². Wartości statystyczne wyliczane na podstawie

wybranego sąsiedztwa były przyporządkowywane pikselowi znajdującemu się w środku okna przesunego, które przemieszczało się co 1 piksel w płaszczyźnie poziomej, a następnie ustawiane było na kolejny wiersz pikseli tworzących obraz (rys. 8.8).



Rysunek 8.8 Mechanizm działania okna przesunego. Czerwona strzałka wskazuje kierunek przesunięcia zadanego sąsiedztwa w płaszczyźnie poziomej. Kolorem niebieskim oznaczono piksel centralny w oknie przesunym. a) okno przesunne w pozycji startowej; b) okno przesunne przemieszczone o 1 piksel w płaszczyźnie poziomej; c) mozaika po wyznaczeniu parametrów statystycznych z wykorzystaniem okna przesunego

W swojej pracy z 1979 roku Haralick zaproponował 14 rodzajów miar statystycznych, które mogą być wykorzystane do prowadzenia analizy tekstur (Haralick, 1979). Zastosowanie wszystkich z nich w procesie klasyfikacji obrazów rastrowych jest redundantne, ponieważ wiele powyższych cech statystycznych znacznie ze sobą koreluje (Hall-Bayer, 2017). Dobór odpowiednich statystyk jest zatem kluczowy w celu skutecznego przeprowadzenia półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych widocznych na dnie na podstawie analizy tekstur obrazów sonarowych. Pierwszym z parametrów statystycznych pierwszego rzędu jakie wykorzystano była średnia arytmetyczna:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i, \quad [8.3]$$

gdzie x_i reprezentuje stopień nasycenia barwą i -tego piksela, zaś N to całkowita liczba pikseli wewnątrz okna przesuwne. Parametr ten pozwala na wyodrębnienie jaśniejszych i ciemniejszych obszarów sonogramu. Następnie, obliczono kolejną statystykę pierwszego rzędu jaką było odchylenie standardowe:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2}. \quad [8.4]$$

Odchylenie standardowe jest miarą zmienności wartości pikseli względem średniej wewnątrz okna przesuwne. Ostatnim z parametrów statystycznych pierwszego rzędu wykorzystanych do przeprowadzenia półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych była entropia. Zakładając, że wartość piksela obrazu jest zmienną losową przyjmującą wartość $n=1, 2, \dots, N$, entropię jest definiowana przy pomocy wzoru:

$$s = - \sum_{n=1}^N H(n) \log_2 H(n), \quad [8.5]$$

gdzie $H(n)$ odpowiada prawdopodobieństwu wystąpienia piksela o wartości n i jest wartością n -tego słupka histogramu unormowanego do jedności. Entropia jest miarą uporządkowania wartości pikseli sonogramu w obszarze zadanego sąsiedztwa. W sytuacji gdy większość pikseli przyjmuje wartości środkowe dla wybranego przedziału intensywności nasycenia barwą, można mówić o niskiej entropii w obszarze działania okna przesuwne. Wysoka entropia jest efektem występowania pikseli o skrajnych stopniach nasycenia barwą wewnątrz zadanego sąsiedztwa.

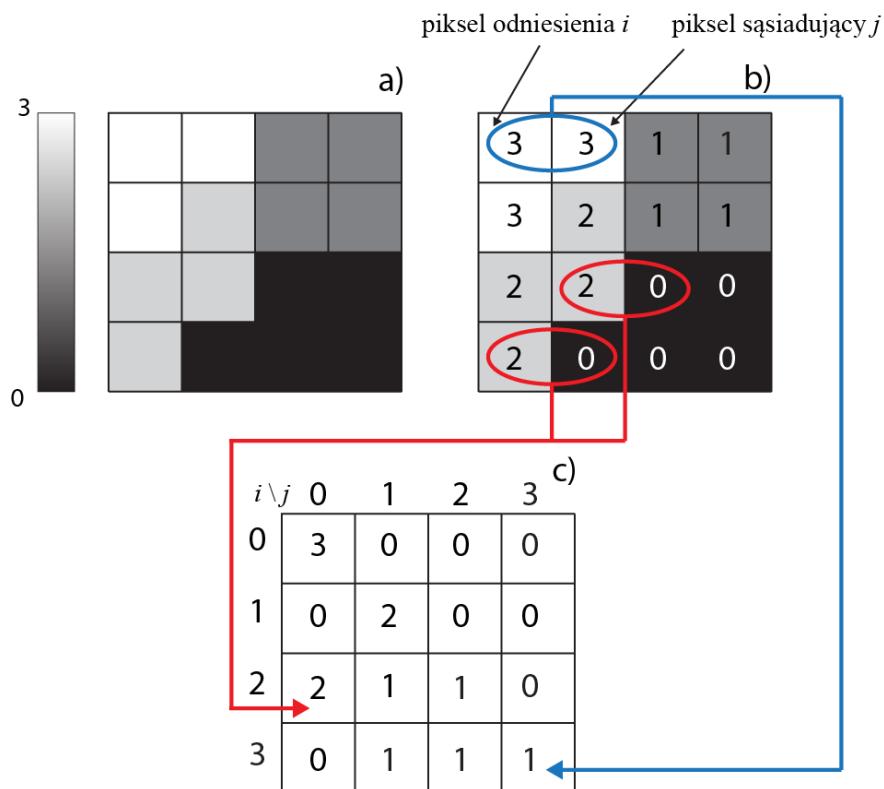
8.2.2 Wyznaczanie statystyk drugiego rzędu dla obrazów sonarowych

Statystyki pierwszego rzędu wykorzystywane do analizy obrazów rastrowych dostarczają informacji jedynie na temat rozkładu intensywności szarości pikseli tworzących dany obraz. Określenie wzajemnych relacji pomiędzy pikselami w teksturach możliwe jest dopiero dzięki wykorzystaniu macierzy współwystępowania poziomów szarości GLCM (ang. *gray level co-occurrence matrices*). Literatura naukowa podaje wiele przykładów zastosowania tej techniki do analizy i klasyfikacji obrazów rastrowych (Haralick, 1973; Haralick i in., 1979; Suresh i Shunmuganathan, 2012; Zulpe i Pawar, 2012), również tworzonych na podstawie danych rejestrowanych przez sonar boczny (Blondel, 2000; Majewski, 2014). Macierze typu GLCM opisują wzajemny kontekst pikseli położonych w przyjętym sąsiedztwie. Dzięki temu możliwa jest przestrzenna analiza tekstur.

Pierwszym krokiem do obliczenia statystyk drugiego rzędu obrazów sonarowych jest wyznaczenie rozmiaru macierzy współwystępowania $P_{(i,j)}$. Dwuwymiarowe macierze typu GLCM składają się z wierszy i kolumn, których liczba jest równa liczbie indywidualnych wartości stopnia nasycenia barwą pikseli. W praktyce oznacza to, że dla obrazów o 8 bitowej skali barw, macierz współwystępowania składałaby się z 256 wierszy i 256 kolumn. Prowadzenie operacji na tak dużych zbiorach nawet dla współczesnych komputerów jest zadaniem czasochłonnym. Ponadto, budowanie macierzy współwystępowania o wymiarach 256 x 256 skutkowałoby wypełnieniem wielu jej komórek wartością 0, ponieważ prawdopodobieństwo występowania par pikseli o identycznych wartościach w wierszu i i kolumnie j jest niskie (Hall-Beyer, 2017). Taka sytuacja jest niekorzystna dla wyliczanych na podstawie macierzy GLCM parametrów statystycznych drugiego rzędu. W związku z tym, wiele algorytmów komputerowych stosuje zabieg kompresji skali barw obrazów rastrowych przed rozpoczęciem procesu budowania macierzy współwystępowania poziomów szarości. Najczęściej wykorzystuje się kompresję rozdzielczości bitowej do skali 4, 5 lub 6. Po zastosowaniu transformacji tego typu, rozmiary macierzy współwystępowania wynoszą odpowiednio 16x16, 32x32 i 64x64 pikseli (Anys i He, 1995). Zredukowana w ten sposób ilość poziomów szarości danego obrazu rastrowego przyspiesza proces budowania macierzy typu GLCM oraz zwiększa dokładność klasyfikacji (Clausi, 2002).

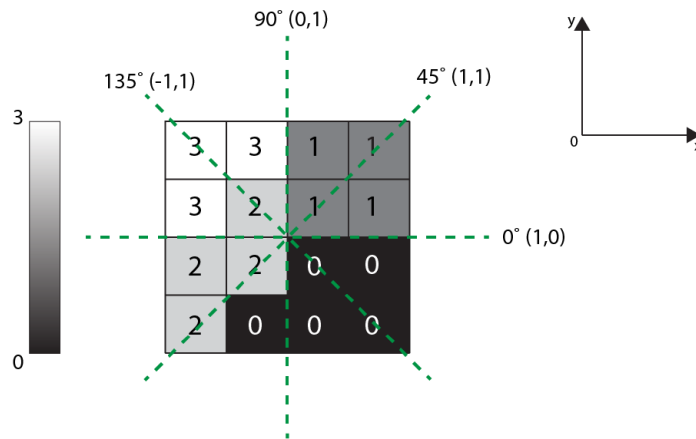
Macierze współwystępowania $P_{(i,j)}$ są tworzone na podstawie par pikseli położonych obok siebie na obrazie rastrowym. Każdemu pikselowi odniesienia i towarzyszy piksel sąsiadujący j . W trakcie badania wzajemnych relacji między nimi, sprawdza się jak często piksel przyjmujący wartość i występuje w parze z pikselem j dla części obrazu rastrowego analizowanego wewnątrz okna przesuwne. Częstości te zapisuje się w nowej macierzy, odpowiednio w wierszu i oraz kolumnie j (Hall-Beyer, 2017). W ten sposób powstaje macierz współwystępowania poziomów szarości $P_{(i,j)}$. W przypadku, gdy para pikseli o danych wartościach nie występuje ani razu na badanym obrazie rastrowym, do odpowiedniej komórki macierzy współwystępowania wpisywana jest wartość 0 (rys. 8.9). Docelowo macierze typu GLCM budowane są na podstawie kontekstu dwóch pikseli położonych w płaszczyźnie poziomej (0° , (1,0)). Istnieje również możliwość przeprowadzania tej operacji w płaszczyznach pionowej (90° , (0,1)), a także przekątnych (45° , (1,1)) oraz 135° , (-1,1) (9) (rys. 8.10). W takiej sytuacji uzyskuje się kilka macierzy współwystępowania, które uśrednia się przed wyliczaniem na ich podstawie statystyk drugiego rzędu (Haralick i in., 1979). Ponadto, dopuszczalne jest przyjęcie większego

odstępu między położonymi blisko siebie pikselami, jednak przyjęcie zbyt dużych odstępów między pikselami powoduje mniejszą liczbę kombinacji par pikseli (Hall-Beyer, 2017).

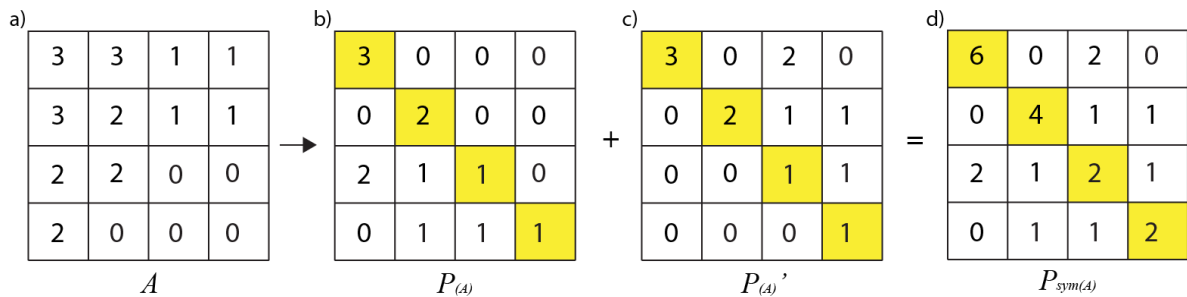


Rysunek 8.9 Kolejne etapy powstawania macierzy współwystępowania poziomów szarości na przykładzie 2 bitowego obrazu rastrowego (4 odcienie szarości). a) obraz wejściowy; b) i c) proces obliczania macierzy współwystępowania poziomów szarości w płaszczyźnie poziomej (0°, (1,0); na podstawie (9)

Istotną właściwością macierzy współwystępowania poziomów szarości jest również ich symetryczność. Macierze typu GLCM są symetryczne w sytuacji, gdy wartości w komórkach położonych po obu stronach względem przekątnej tej macierzy są identyczne. W celu osiągnięcia takiego efektu, należy dodać do wyliczonej macierzy współwystępowania tą samą macierz poddaną transpozycji (rys. 8.11). Zabieg ten eliminuje problem braku występowania pikseli odniesienia przy krawędziach okna przesuwnego w trakcie budowania macierzy typu GLCM, co pozwala na dokładniejsze wyliczenie statystyk drugiego rzędu (Hall-Beyer, 2017).



Rysunek 8.10 Dopuszczalne możliwości badania relacji przestrzennych między pikselami położonymi bezpośrednio obok siebie, w płaszczyznach poziomej, pionowej i przekątnych na przykładzie 2 bitowego obrazu rastrowego; na podstawie (9)



Rysunek 8.11 Proces tworzenia symetrycznej macierzy współwystępowania poziomów szarości. a) macierz wejściowa; b) niesymetryczna macierz współwystępowania poziomów szarości $P_{(A)}$ zbudowana na podstawie macierzy A; c) transponowana macierz $P_{(A)'}$; d) symetryczna macierz współwystępowania poziomów szarości $P_{sym(A)}$ uzyskana z macierzy A. Kolorem żółtym zaznaczono przekątne macierzy współwystępowania poziomów szarości

Na podstawie uzyskiwanych symetrycznych macierzy współwystępowania poziomów szarości możliwe było wyliczenie statystyk drugiego rzędu dla mozaik sonarowych. Proces ten był wykonywany w oknie przesuwającym o identycznych parametrach jak w przypadku wyznaczania miar statystycznych pierwszego rzędu. Pierwszą ze statystyk drugiego rzędu, obliczoną dla macierzy współwystępowania poziomów szarości, uzyskiwanych z mozaik sonarowych, był kontrast (CON_{GLCM}), wyrażony wzorem (Dewi i in., 2019):

$$CON_{GLCM} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}(i - j)^2. \quad [8.6]$$

W sytuacji, gdy wartości i oraz j są równe ($i=j=0$), wówczas komórki macierzy $P_{(i,j)}$ są położone na głównej przekątnej tej macierzy. Wartości w elementach macierzy

występujących przekątnie reprezentują piksele całkowicie podobne do swoich sąsiadów na obrazie wejściowym i jest to jednoznaczne z brakiem kontrastu. Wraz ze wzrostem odległości od głównej przekątnej macierzy $P_{(i,j)}$, ($i-j=1$, $i-j=2$, $i-j=3, \dots$) rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia par pikseli o większej różnicy kolorów, czyli o większym kontraście (Hall-Beyer, 2017). Ostatnią z cech statystycznych, wyznaczanych dla macierzy współwystępowania poziomów szarości i wykorzystywaną do analizy tekstur obrazów sonarowych był drugi moment rozkładu kąta ASM (ang. *Angular Second Moment*), który można obliczyć przy pomocy następującego wzoru (Dewi i in., 2019):

$$ASM_{GLCM} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \{P(i,j)\}^2. \quad [8.7]$$

Dzięki temu parametrowi możliwy jest opis stopnia jednorodności obrazu rastrowego. Obraz o wysokiej jednorodności charakteryzować się będzie niewielką liczbą dominujących poziomów szarości. W takiej sytuacji, parametr drugiego momentu kąta przyjmować będzie wysokie wartości (Albregsten, 2008). Natomiast, jeśli na obrazie rastrowym występuje wiele pikseli o wyrównanej wartości tonalnej (mała liczba dominant) wówczas powyższa cecha będzie charakteryzować się niskim wymiarem.

8.2.3 Detekcja krawędzi obiektów antropogenicznych widocznych na mozaikach sonarowych przy wykorzystaniu dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera – 2D FFT i dolnoprzepustowego filtra Gaussa

Poza opisanymi powyżej statystykami pierwszego i drugiego rzędu w procesie półautomatycznej detekcji obiektów na dnie wykorzystano również dwuwymiarową szybką transformację Fouriera dla zmiennych przestrzennych, wzmiankowaną w rozdziale 2. Głównym założeniem transformacji Fouriera jest możliwość rozłożenia funkcji okresowej w szereg funkcji harmonicznnych, tak że otrzymana transformata (wynik) opisuje wkład poszczególnych harmonik składających się na pierwotną funkcję. Procedurę tę można przedstawić w postaci następującego wzoru:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) \cdot e^{2\pi ixs} ds \quad [8.8]$$

gdzie zmienna x oznacza czas (wyrażany najczęściej w sekundach), a argument transformaty s reprezentuje częstotliwości w hercach ($\text{Hz}=1/\text{s}$). Ponieważ rejestracja pomiarów dostarcza szeregi danych dyskretnych, korzystamy z dyskretnego odpowiednika transformacji Fouriera. Dla zmiennych ciągłych wyraża się ją w postaci:

$$F(v_x, v_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-2\pi i(xv_x + yv_y)] dx dy \quad [8.9]$$

gdzie zmienne x i y oznaczają zmienne przestrzenne na płaszczyźnie, a argumenty transformaty reprezentują liczby falowe (1/m). Algorytm szybkiej transformacji Fouriera FFT (ang. *fast Fourier transformation*) zaproponowany przez Cooley'a i Turkey'a w 1965 roku (Cooley i Turkey, 1965) umożliwia szybkie wyznaczanie dyskretnej transformaty Fouriera. Pikle dwuwymiarowych sonogramów stanowią ciąg dyskretnych obserwacji, pozwalając na korzystanie z formalizmu transformacji Fouriera na przypadek przestrzeni dwuwymiarowej. W przypadku dyskretnym, jakim jest analiza obrazów sonarowych całki we wzorze 8.9 zamieniają się w sumy. Szybką, dwuwymiarową transformację Fouriera prowadzi się kolejno względem kolumn, a następnie wierszy pikseli tworzących zobrazowanie sonarowe.

W wyniku zastosowania algorytmu 2D FFT do obrazów sonarowych uzyskiwano widma amplitudowe kolejnych przetwarzanych fragmentów sonogramów (sektorów), o wymiarach 1000 x 1000 pikseli (rys. 2.3B, rozdział 2.). W kolejnym kroku składowe niskoczęstotliwościowe otrzymanych widm zostały przeniesione do ich centrów (funkcja *fftshift* będąca integralną częścią oprogramowania MATLAB). W wyniku transformacji otrzymujemy obraz, w którym składowe częstotliwości niskich (często niosące najważniejsze informacje) znajdują na rogach obrazu transformaty pogarszając wizualną czytelność i interpretację. W związku z tym, przenieśmy je do środka obraz przez odwrócenie ćwiartek widma przestrzennego. Następnie w celu uwypuklenia małych elementów obrazu wykonano dwuetapowy proces filtracji górnoprzepustowej. Na wstępie przeprowadzono filtrację dolnoprzepustową z zastosowaniem filtra Gaussa o wariancji $\sigma = 10$ i rozmiarach maski 1000 x 1000 pikseli. Filtracja górnoprzepustowa była osiągnięta poprzez odjęcie wyniku z filtracji dolnoprzepustowej od oryginalnego obrazu. Ostatnim etapem zastosowania 2D FFT do przetwarzania sonogramów był powrót do pierwotnej postaci obrazów rastrowych poprzez przejście z domeny częstotliwościowej do domeny przestrzennej (funkcje *ifftshift* oraz *ifft2* MATLAB). Operacja opisana powyżej pozwoliła na wydajniejszą detekcję krawędzi obiektów widocznych na zobrazowaniach sonarowych.

8.2.4 Półautomatyczna klasyfikacja dna morskiego na podstawie analizy tekstur obrazów sonarowych i metody 2D FFT z górnoprzepustowym filtrem – algorytm k-średnich

Procedurę półautomatycznej klasyfikacji dna na podstawie 5 parametrów statystycznych pierwszego i drugiego rzędu, wyznaczonych w trakcie analizy tekstur,

a także powyżej opisanej filtracji przestrzennej. Zabieg ten był realizowany dzięki metodzie opartej na analizie skupień, która jest szeroko stosowana w wielu wariantach do segmentacji i klasteryzacji różnych klas zbiorów, w tym obrazów rastrowych (Chen i in., 1998; Ahmad i Dey, 2007), uzyskiwanych również na podstawie danych zarejestrowanych przy pomocy urządzeń hydroakustycznych (Preston i in., 2004). Zdecydowano się na wykorzystanie jednej z popularnych technik analizy skupień, jaką jest algorytm k-średnich do prowadzenia klasyfikacji dna przedstawionego na obrazach sonarowych. Głównym założeniem powyższego algorytmu jest fakt, iż każdej zmiennej w analizowanym zbiorze przyporządkowana jest lokalizacja w przestrzeni. W przypadku obrazów sonarowych zmiennymi są wartości jakie przyjmują kolejne piksele, wyznaczone w trakcie obliczania parametrów statystycznych pierwszego i drugiego rzędu oraz deskryptorów uzyskanych przy pomocy technik opisanych w podrozdziale 8.2.3. Dodatkowo, przed przystąpieniem do klasyfikacji dna z wykorzystaniem wyżej wymienionych zmiennych, ich wartości były standaryzowane poprzez zastosowanie funkcji *zscore* dostępnej w środowisku MATLAB. Jej działanie można przedstawić w postaci wzoru:

$$z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}, \quad [8.10]$$

gdzie x to pojedyncza wartość zmiennej w zbiorze (pojedynczy piksel), μ reprezentuje średnią wartość wszystkich zmiennych, zaś σ to odchylenie standardowe zmiennych (10).

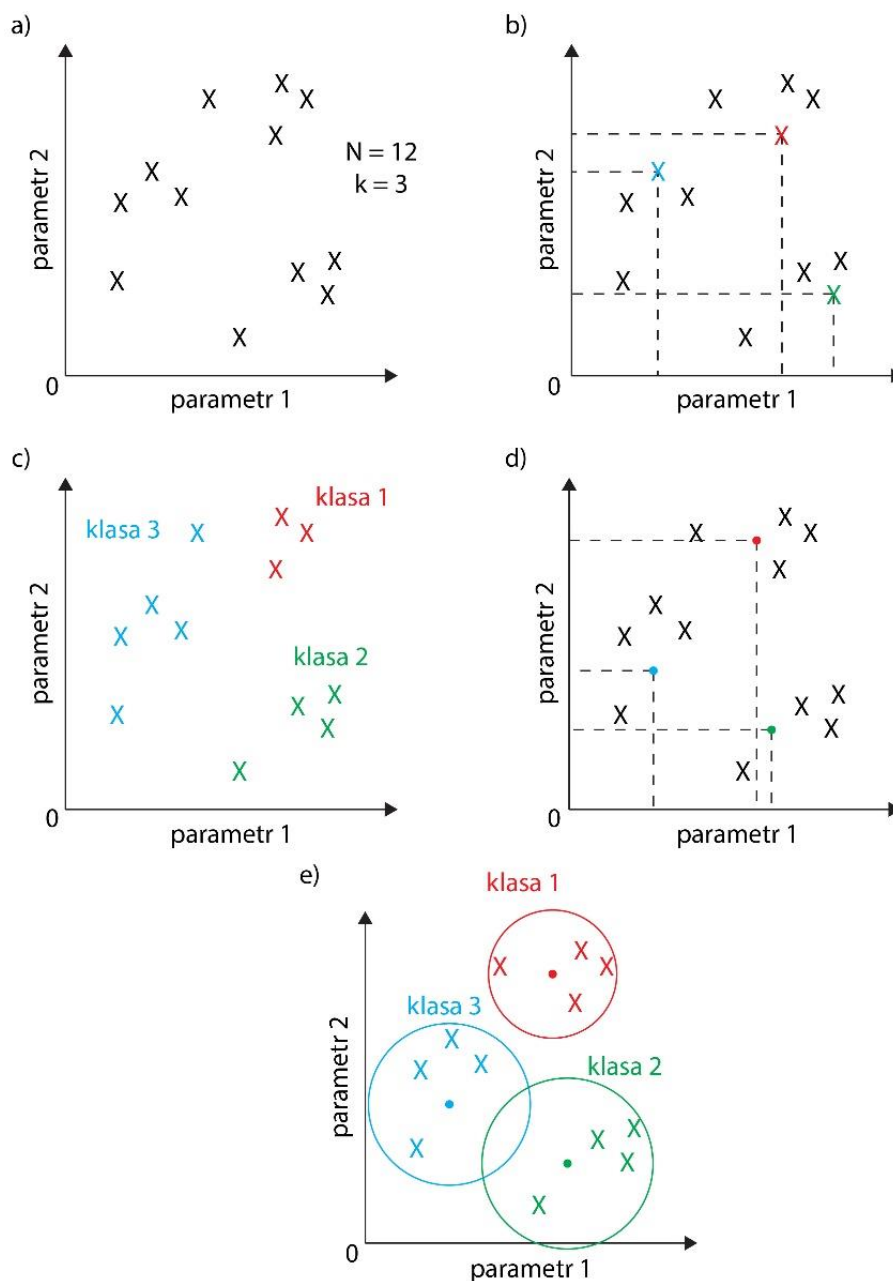
Działanie algorytmu k-średnich realizowane jest w pięciu etapach. Pierwszy z nich, polega na wyborze *a priori* liczby skupień (klas), do których przyporządkowywane będą kolejne zmienne (obiekty). Następnie ustala się środki klas, które są nazywane centroidami. W tym celu wybiera się losowe obiekty, których liczba jest równa liczbie zdefiniowanych wcześniej klas. W trzecim etapie obliczane są odległości między centroidami i pozostałymi badanymi obiektami w zbiorze, które będą poddawane klasyfikacji. Poniższy wzór przedstawia jeden ze sposobów wyliczania odległości między zmiennymi, a wybranym środkiem skupień dla przestrzeni wielowymiarowej (Vora i Oza, 2012):

$$d(x_i, m_j) = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_{i1} - m_{j1})^2} \quad [8.11]$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, k,$$

gdzie x_i reprezentuje każdy obiekt w przestrzeni, zaś m_j opisuje centroidy kolejnych klas. Etap czwarty polega na przypisywaniu obiektów, które leżą najbliżej danego centroidu do klasy, które on reprezentuje. W etapie piątym wyznaczane są nowe środki skupień na podstawie średnich odległości między poszczególnymi elementami w danej klasie, a jej pierwotnym centroidem. Ostatni krok polega na powtarzaniu czynności z etapów czwartego i piątego tak długo, aż wszystkie badane elementy nie zostaną zakwalifikowane do jednej z dostępnych klas, a lokalizacja centroidów nie ulega kolejnym zmianom. Schemat działania algorytmu k-średnich został przedstawiony na rysunku 8.12. Liczba klas przyjęta *a priori* do klasyfikacji obrazów sonarowych prezentowanych w niniejszej pracy wynosiła 20. Wartość ta została wyznaczona empirycznie i dawała zadowalające wyniki pomimo stosowania zazwyczaj mniejszej ilości klas (≤ 6). Z powodu losowego generowania centroidów przez algorytm k-średnich, poszukiwane obiekty antropogeniczne wewnątrz analizowanych sektorów trafiały za każdym razem do różnych klas. W konsekwencji wybór odpowiedniej klasy zawierającej pożądane wyniki odbywał się manualnie.

Po wykonaniu transformacji obrazów sonarowych z wykorzystaniem analizy tekstur i rozszerzonej o filtr górnoprzepustowy metody 2D FFT oraz przeprowadzeniu klasyfikacji dna przy pomocy algorytmu k-średnich, uzyskiwane wyniki w postaci binarnych masek rastrowych były eksportowane do plików w formacie GeoTiff. Pliki te składały się z pikseli przyjmujących wartości 1 w przypadku gdy tworzyły obraz poszukiwanych obiektów lub 0 w sytuacji, kiedy piksele reprezentowały pozostałą część sektora sonogramu. Ponadto, nowo wygenerowane maski rastrowe posiadały dowiązane informacje geograficzne, identyczne jak w przypadku oryginalnych sektorów sonogramów wejściowych. Uzyskiwane w ten sposób wyniki oraz nieprzetworzone mozaiki sonarowe były importowane do projektu stworzonego w oprogramowaniu QGIS (QuantumGIS), gdzie prowadzono dalsze analizy przestrzenne. W ten sposób, uzyskiwano efekt nałożenia na oryginalne mozaiki obrazów zawierających wybrane klasy otrzymane w procesie klasyfikacji, na których widoczne były obiekty spoczywające na dnie. Dodatkowych informacji o materiałach budujących wykryte obiekty dostarczały dane magnetometryczne.



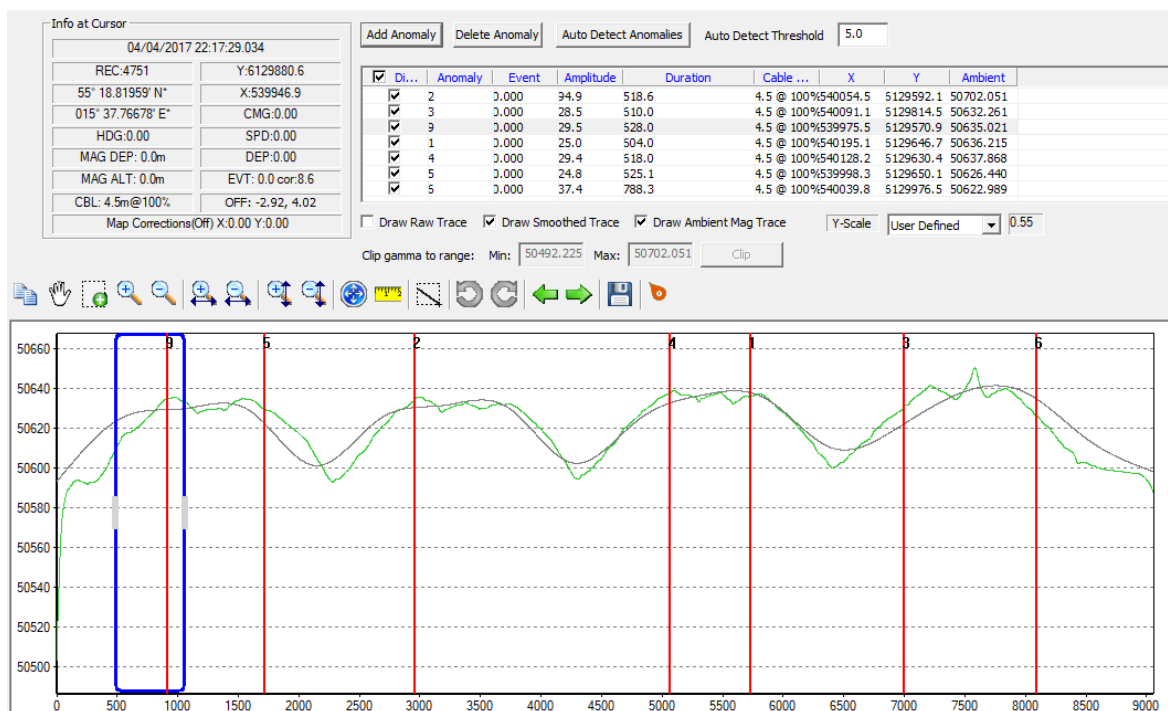
Rysunek 8.12 Etapy działania algorytmu k-średnich na przykładzie dwuwymiarowej przestrzeni klasyfikacyjnej dla 12 obiektów ($N=12$) przyporządkowanych do 3 klas ($k=3$). Linia przerywaną zaznaczono położenie centroidów poszczególnych klas. a) wybór liczby klas; b) losowy wybór obiektów, które stają się centroidami; c) obliczanie odległości między obiektami położonymi najbliżej centroidów; d) wyznaczenie nowych centroidów; e) obiekty pogrupowane w 3 klasach

8.3 Opracowanie danych magnetometrycznych

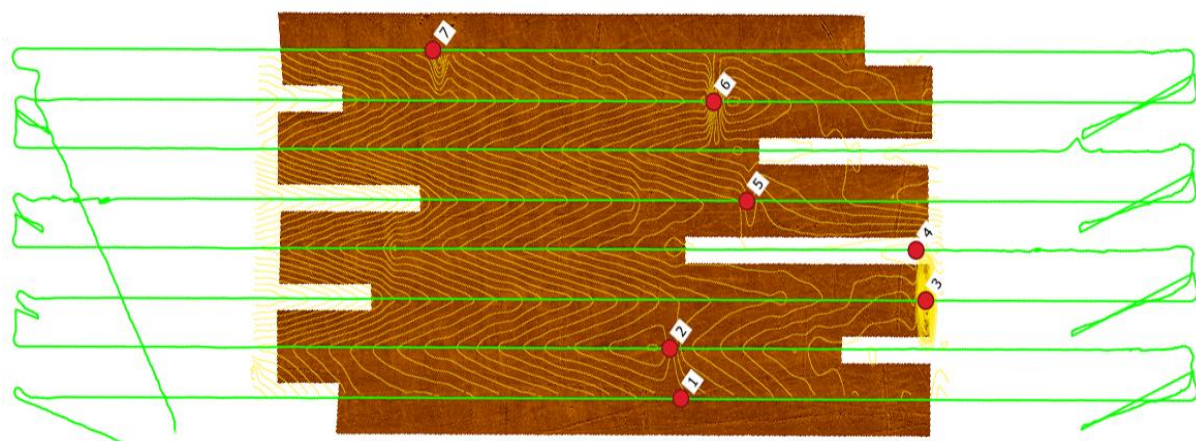
Obecność obiektów pochodzenia antropogenicznego zbudowanych z materiałów o właściwościach ferromagnetycznych (np. żelazo, nikiel, kobalt oraz wiele rodzajów stopów i związków chemicznych) zaburza naturalne, w miarę homogeniczne w małych

skalach, pole magnetyczne Ziemi (Wołoszczyn, 2008). Przykładami tego typu przedmiotów występujących na dnie morskim są wraki, kontenery, metalowe pojemniki i śmieci oraz amunicja chemiczna i konwencjonalna. W związku z wyżej wspomnianą właściwością obiektów ferromagnetycznych, możliwe jest ich wykrywanie oraz charakteryzacja przy pomocy magnetometrów. Ponadto, pomiary z wykorzystaniem tego typu aparatury stanowią doskonale uzupełnienie dla danych hydroakustycznych podczas prowadzenia detekcji obiektów antropogenicznych występujących na powierzchni dna morskiego, a także pod nim. W związku z tym, rejestracja danych magnetometrycznych oraz hydroakustycznych jest często prowadzona równocześnie (Huggett i Millard., 1992; Tian, 2008).

Akwizycja danych magnetometrycznych była realizowana przy użyciu magnetometru holowanego za pojazdem AUV IVER 2, zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 7. Zarejestrowane dane były ekstrahowane z logów autonomicznego pojazdu podwodnego do plików tekstowych, które składały się ze współrzędnych geograficznych oraz informacji o zmianach indukcji magnetycznej wyrażonych w nanoteslach (nT). W kolejnym kroku, uzyskiwane pliki były dogrywane do projektów stworzonych w oprogramowaniu SonarWiz, zawierających wcześniej przetworzone dane sonarowe, gdzie prowadzona była właściwa analiza zmian pola magnetycznego badanych obszarów. Obiekty ferromagnetyczne były wykrywane na podstawie anomalii indukcji magnetycznej względem naturalnego tła magnetycznego Ziemi. Oprogramowanie SonarWiz pozwala na automatyczne wyznaczenie położenia źródła anomalii na powierzchni dna morza w momencie, gdy przekroczy ona wcześniej ustaloną wartość progową (rys. 8.13). Próg wykrywalności został określony w sposób empiryczny na poziomie 5 nT, przy magnetometrze holowanym na wysokości ok. 3 m nad powierzchnią dna. W następnym kroku przeprowadzono analizę uzyskiwanych wyników pod kątem eliminacji błędnie wykrytych anomalii, które generowane były w momencie wynurzania się pojazdu AUV na powierzchnię morza w celu ustalenia dokładnej pozycji. Magnetometr rejestrował wówczas silne zmiany pola magnetycznego, spowodowane najczęściej obecnością w jego sąsiedztwie jednostki badawczej, z której obsługiwany był pojazd autonomiczny. Ostatnim etapem opracowania danych magnetometrycznych było przygotowanie wektorowych map konturowych, przedstawiających zmiany indukcji pola magnetycznego badanych obszarów w środowisku GIS. Mapy te były nakładane na wcześniej opracowane mozaiki sonarowe (rys. 8.14). Dzięki temu możliwe było dokładniejsze wyznaczenie rejonów, gdzie występowały ferromagnetyczne obiekty o pochodzeniu antropogenicznym.



Rysunek 8.13 Okno programu SonarWiz, w którym dokonywana była detekcja anomalii magnetycznych (po odrzuceniu błędnych zapisów z powierzchni morza; w prezentowanym przykładzie próg detekcji wynosił 5 nT @ H = 3 m). Czarną linią na wykresie zaznaczono naturalne fluktuacje pola magnetycznego Ziemi zmierzone przez magnetometr w całej kolumnie wody. Linia zielona reprezentuje zmiany indukcji magnetycznej zarejestrowane przy pomocy magnetometru. Pionowe czerwone linie wskazują położenie wykrytych anomalii magnetycznych, zaś niebieska ramka określa rozmiar pojedynczej anomalii. Na osi rzędnych zaznaczono zmiany pola magnetycznego wyrażone w nT, a oś odciętych przedstawia kolejno rejestrowane próbki

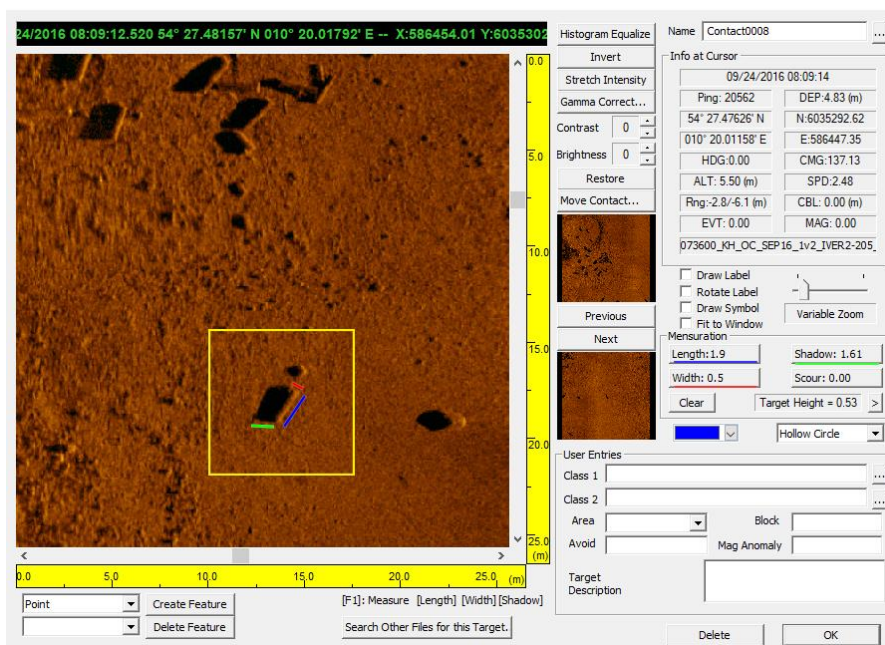


Rysunek 8.14 Przykładowa mozaika sonarowa, z nałożoną mapą konturową zmian indukcji pola magnetycznego w kolorze żółtym. Czerwone punkty oznaczają lokalizację wykrytych anomalii magnetycznych. Kolorem zielonym oznaczono trasę, wzdłuż której prowadzona była rejestracja danych magnetometrycznych. Poza obszarem mozaiki istniało ryzyko rejestracji błędnych danych, w związku z tym, próbki te zostały odrzucone w trakcie analizy

8.4 Manualne wyznaczanie obiektów referencyjnych do wizualnej inspekcji na podstawie ich charakterystyk

W oparciu o zebrane i wstępnie przetworzone do postaci mozaik sonarowych dane hydroakustyczne i zbiory magnetometryczne, możliwe było pozyskanie współrzędnych geograficznych obiektów spoczywających na dnie badanych akwenów. Najbardziej wyraźne cele podwodne były oznaczane w sposób manualny jeszcze podczas trwania kampanii terenowych. Po przeprowadzeniu ich selekcji na podstawie opisywanych poniżej analiz, traktowano je jako obiekty referencyjne.

W celu rozróżnienia oznaczonych obiektów na te, których pochodzenie było naturalne (np. głazy występujące na dnie) oraz na przedmioty antropogeniczne, niezbędne było zbadanie ich charakterystyk. Podstawowymi cechami, które pozwalały na określenie pochodzenia wykrywanych celów (przed wizualną inspekcją) były: zdolność do odbicia wstecz sygnałów akustycznych generowanych przez sonar boczny (czyli wartość *TS* – p. rozdział 5.), co przekładało się na intensywność nasycenia barwą oznaczonych przedmiotów; ich kształt, rozmiary, a także stopień w jakim zaburzały naturalne pole magnetyczne Ziemi. Pomiary długości i szerokości zlokalizowanych obiektów były dokonywane dla każdego z nich w płaszczyźnie dna przy pomocy oprogramowania SonarWiz (rys. 8.15).

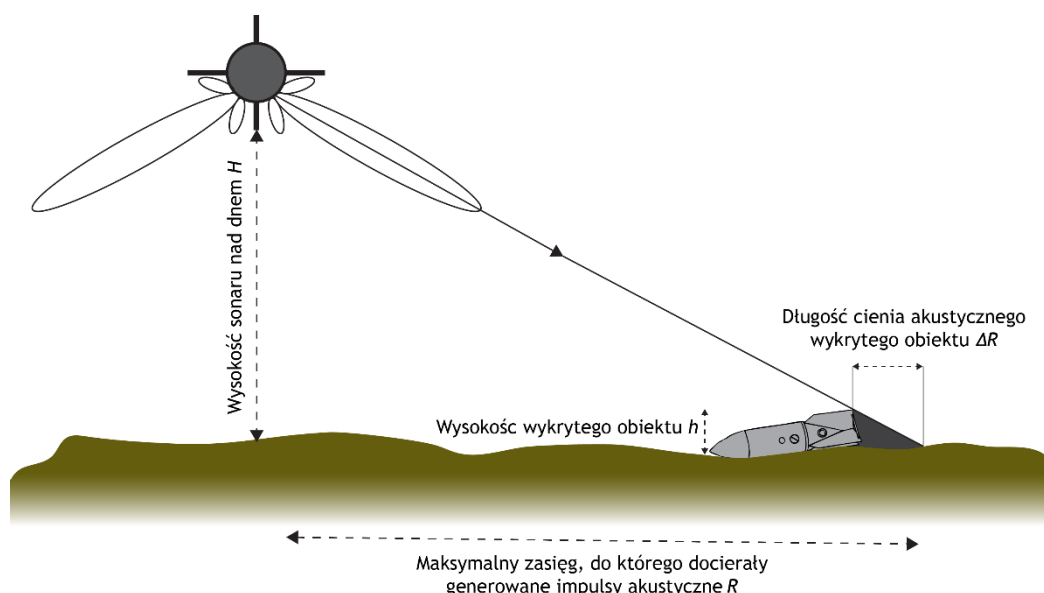


Rysunek 8.15 Okno programu SonarWiz, w którym dokonywano pomiarów parametrów wykrytych obiektów, wraz z przykładowym celem zaznaczonym żółtą ramką. Kolorami niebieskim, zielonym i czerwonym oznaczono kolejne mierzone cechy analizowanych struktur: długość, szerokość oraz długość cienia akustycznego rzucanego na dno morskie przez obiekt

W celu obliczenia wysokości wykrywanych przedmiotów, niezbędne było wykonanie pomiarów długości ich cieni akustycznych (rys. 8.16). Znając wysokość prowadzenia sonaru nad dnem H , maksymalny zasięg, do którego docierały generowane impulsy akustyczne R oraz długość cienia akustycznego rzucanego przez cel na dnie ΔR , można obliczyć wysokość h tego celu przy pomocy wzoru opartego na właściwościach trójkątów podobnych (Blondel, 2009):

$$\frac{H}{R} = \frac{h}{\Delta R} \Leftrightarrow h = \Delta R \times \frac{H}{R}. \quad [8.12]$$

Po przeprowadzonej analizie opisywanych powyżej charakterystyk wykrywanych obiektów, dokonywano subiektywnego wyboru celów referencyjnych, które cechowały się najwyższym prawdopodobieństwem zaliczenia jako pochodzenia antropogenicznego.



Rysunek 8.16 Wizualizacja parametrów niezbędnych do wyznaczenia wysokości wykrytego obiektu spoczywającego na dnie na podstawie długości jego cienia akustycznego

Następnie, przedmioty te były poddawane wizualnej inspekcji przy pomocy zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego. Liczba obiektów referencyjnych zakwalifikowanych do weryfikacji z udziałem pojazdu ROV wynosiła od jednego do pięciu dla każdej z mozaik sonarowych. Wspomniane wcześniej znaczne ilości wykrytych kontaktów sonarowych na dnie wykluczały możliwość przeprowadzenia każdorazowo ich obserwacji i identyfikacji, ze względu na ograniczenia czasu podczas kampanii pomiarowych. Zebrane materiały faktograficzne w postaci filmów podwodnych były następnie wykorzystywane do

klasyfikacji wykrywanych obiektów antropogenicznych spoczywających na dnie w obrębie pojedynczej mozaiki. Dopiero na podstawie bezpośredniej obserwacji można było stwierdzić w jaki sposób referencyjne cele mogły wchodzić w interakcję z dnem morskim badanych akwenów oraz organizmami występującymi na nim. Dodatkowo, w oparciu o manualnie wyznaczone charakterystyki obiektów antropogenicznych poddawanych wizualnej inspekcji (kształt i rozmiary), określono minimalną powierzchnię jaką zajmowały podlegające detekcji przy pomocy procedur opisanych w podrozdziałach 8.2.1. – 8.2.4, przedmioty spoczywających na dnie. Powierzchnia ta była wynosiła przynajmniej 0,375 m².

8.5 Bruzdy występujące na powierzchni dna morza oraz analiza ich kierunkowości

Bruzdy to zagłębienia, które powstają na powierzchni dna na skutek działalności człowieka, a także w konsekwencji procesów geologicznych zachodzących w przeszłości w dużych zbiornikach wodnych. Ekstremalnymi przykładami zagłębień naturalnych, występujących na wierzchniej warstwie bałtyckiego podłoża morskiego, mogą być rynny polodowcowe, które tworzyły się w konsekwencji ustępowania lądolodów przemieszczających się w obszarze tego akwenu morskiego. Bruzdy, które powstały na skutek działalności człowieka na morzu charakteryzują się znacznie mniejszymi rozmiarami i głębokościami, w porównaniu do tych, o pochodzeniu naturalnym. Dodatkowo, antropogeniczne ślady denne cechują się wyraźnymi krawędziami, które nie zostały wygładzone na skutek m.in. erozyjnej działalności prądów przydennych. Rozważania dotyczące bruzd przedstawionych w niniejszej pracy dotyczyć będą wyłącznie zagłębień, które powstały na skutek działalności człowieka.

Podczas mapowania dna w obszarach opisanych w rozdziale 6., zaobserwowano obecność antropogenicznych śladów na dnie znacznie częściej niż obiektów występujących na jego powierzchni. Główną przyczyną powstawania tego typu bruzd na wierzchniej warstwie podłoża morskiego jest duża aktywność komercyjnych jednostek rybackich (rys. 6.1, rozdział 6.). Sprzęt wykorzystywany podczas połowów trałowych, taki jak np. włók denny rozporowy, służący do odławiania ryb demersalnych (m.in. dorsz atlantycki (*Gadus morhua*)), tworzy na powierzchni dna pary równoległych zagłębień o głębokości od 0,15 m do 1 m w zależności od typu osadów budujących górną część dna (Rosenberg i in., 2003; Hopkins, 2004). Bruzdy powstałe w ten sposób charakteryzują się

regularnym kształtem i liniowym przebiegiem, zaś ich długość wynosić może od kilkunastu metrów do nawet kilku kilometrów, przy szerokości od 1 do 1,5 m. Na uzyskiwanych mozaikach sonarowych zaobserwowano również inne, mniejsze zagłębienia o wyraźnych krawędziach, co świadczyć może o ich antropogenicznym pochodzeniu. Można przypuszczać, że przyczyną ich powstawania były kotwice opuszczane na dno przez jednostki nawodne lub inna działalność techniczna człowieka w rejonach objętych mapowaniem.

Kolejne części niniejszego podrozdziału opisują etapy przetwarzania uzyskiwanych mozaik sonarowych w celu detekcji i określania orientacji śladów antropogenicznych widocznych na dnie, które najprawdopodobniej tworzone były na skutek aktywności komercyjnych jednostek rybackich. Powyższe analizy były prowadzone przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania stworzonego w środowisku MATLAB.

8.5.1 Detekcja bruzd widocznych na zobrazeniach sonarowych i wyznaczenie ich kierunkowości przy pomocy metody 2D FFT oraz momentu spektralnego niskiego rzędu

Procedura detekcji bruzd widocznych na uzyskiwanych mozaikach sonarowych oraz określania ich kierunkowości składała się z czterech etapów. Pierwszy z nich, podobnie jak w przypadku poszukiwań obiektów antropogenicznych, polegał na zaimportowaniu do środowiska MATLAB plików GeoTiff zawierających cyfrowe mozaiki sonarowe, przygotowane przy użyciu oprogramowania SonarWiz. Algorytm pozwalający na detekcję bruzd wykorzystywał technikę okna przesunego w celu wyszukiwania obszarów mozaik, gdzie występowało 100% pokrycia dna wiązkami akustycznymi. Eliminacja fragmentów sonogramów, w których nie występowały dane hydroakustyczne była niezbędnym krokiem przed przystąpieniem do określania kierunkowości wykrywanych bruzd. Rozmiar kwadratowego okna przesunego przyjmował wartości 30 m x 30 m lub 15 m x 15 m w zależności od analizowanego zobrazenia dna. W ten sposób mozaiki sonarowe były dzielone na mniejsze segmenty, analogicznie jak w przypadku poszukiwań obiektów antropogenicznych.

Drugi etap detekcji bruzd polegał na zastosowaniu filtru bilateralnego na każdym z uzyskanych segmentów. Zdecydowano się na jego wykorzystanie w związku ze sposobem, w jaki wpływa on na obrazy rastrowe. Transformacja ta, zaproponowana przez Tomasiego i Manduchiego (Tomasi i Manduchi, 1998), pozwala na „odszumianie” i wygładzanie obrazu przy jednoczesnym zachowaniu krawędzi występujących na tym obrazie. Filtr zastępuje wartości pikseli średnią ważoną z wartości otaczających go pikseli

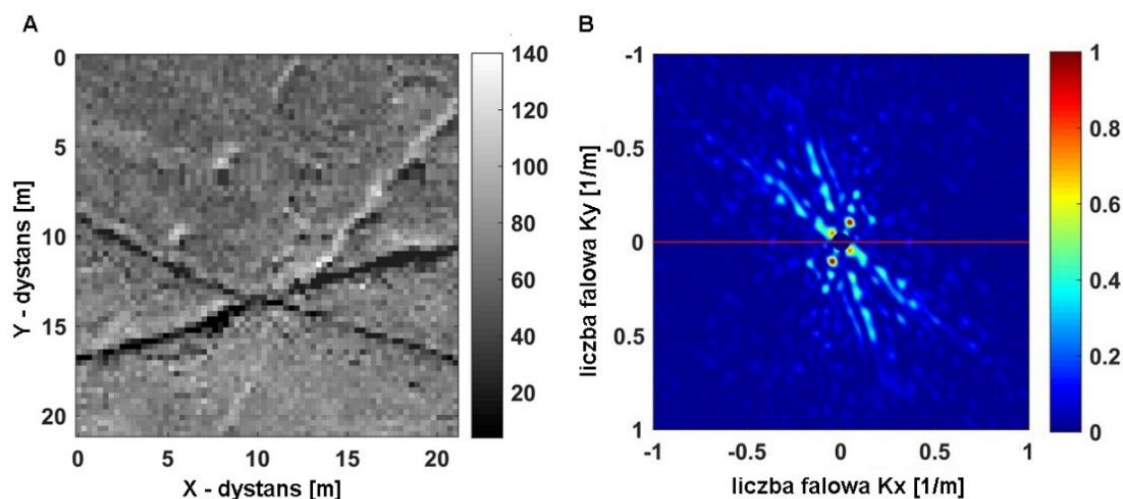
(Pallavi i Reddy, 2015). Przyjmowane wagi zależą nie tylko od odległości pikseli sąsiadujących od piksela analizowanego, ale także od różnic intensywności między pikselami z jego otoczenia – lokalnego gradientu. W konsekwencji rozmycie jest silniejsze w bardziej jednorodnych fragmentach obrazu, zaś słabsze w rejonach gdzie występują krawędzie. Filtr bilateralny jest zdefiniowany przy pomocy następującego wzoru (Tomasi i Manduchi, 1998; Banterle i in., 2011):

$$B(I, x) = \frac{1}{W_p} \sum_{x_i \in \Omega} I(x_i) f_r(|I(x_i) - I(x)|) g_s(|x_i - x|), \quad [8.13]$$

gdzie I to obraz wejściowy, x_i reprezentuje współrzędne analizowanego piksela, Ω to okno filtru, którego centralnym elementem jest analizowany piksel, f_r to wagowy współczynnik wygładzania w zakresie intensywności (0-255), g_s to wagowy współczynnik wygładzania w zakresie odległości, zaś W_p opisuje wyrażenie normalizujące, które można zapisać w postaci:

$$W_p = \sum_{x_i \in \Omega} f_r(|I(x_i) - I(x)|) g_s(|x_i - x|). \quad [8.14]$$

Kolejnym etapem w detekcji i określaniu kierunkowości bruzd było zastosowanie metody 2D FFT dla każdego fragmentu mozaiki, w którym występowało 100% pokrycie dna danymi sonarowymi. Operacja ta była realizowana po uprzednim usunięciu średniej wartości intensywności nasycenia pikseli i z usunięciem dwuwymiarowego trendu. W dalszych etapach analizy, posługiwano się tylko górną półpłaszczyzną otrzymanego widma, ze względu na jego symetrię osiową w stosunku do składowej stałej DC, przemnożoną przez 2 w celu uzyskania jednostronnego spektrum mocy. Przykładowe działanie wyżej opisanej procedury w przypadku obrazów sonarowych zawierających ślady trałowania zostało przedstawione na rysunku 8.17.



Rysunek 8.17 A – przykładowy fragment mozaiki sonarowej zawartej w oknie przesuwnym o wymiarach 21 x 21 m; B – widmo mocy analizowanego fragmentu uzyskane przy pomocy metody 2D FFT. Czerwona linia w części B symbolizuje granicę między górną i dolną półpłaszczyzną, które są symetryczne osiowo względem składowej stałej DC

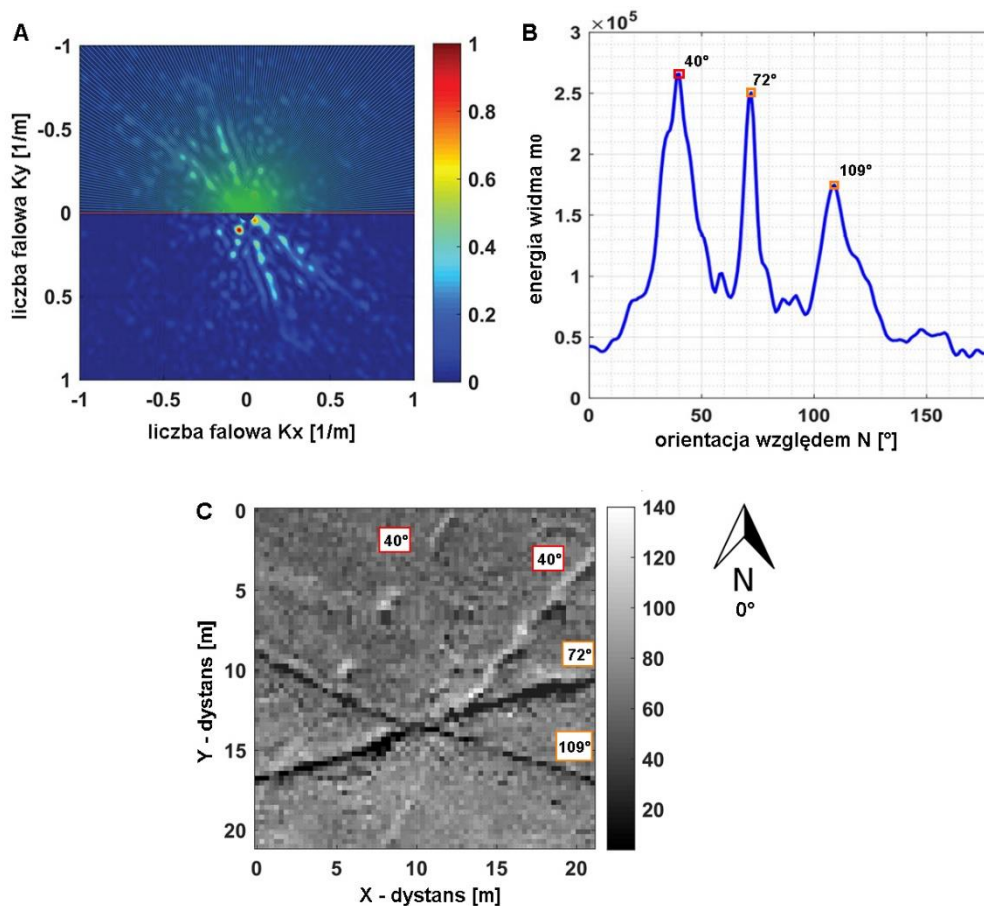
W etapie trzecim górne półpłaszczyzny uzyskiwanych widm były dzielone na zestawy 180 jednowymiarowych „półprzekrojów” z krokiem co 1° przy pomocy algorytmu Bresenham’a (Bresenham, 1965). Dla każdego z uzyskanych „półprzekrojów” obliczono zerowy moment widmowy m_0 , gdzie definicję momentów widmowych wyraża się w postaci (Massel, 2013):

$$m_r = \int_0^\infty f^r S(f) df, \quad [8.15]$$

gdzie m_r to moment widmowy r -tego rzędu, $S(f)$ to widmo mocy, zaś f to częstotliwość. Moment zerowy m_0 , reprezentujący energię sygnału w całości domeny częstotliwości widma można wyrazić jako:

$$m_0 = \int_0^\infty S(f) df = \sigma_\zeta^2. \quad [8.16]$$

Otrzymane wartości m_0 każdego z „przekrojów” były następnie łączone ze sobą tworząc funkcje zależności od kąta azymutalnego względem północy. Następnie wyznaczano maksima wspomnianych funkcji, które wskazywały kierunek dominującej energetycznie bruzdy (zerowy moment widmowy o największej wartości) widocznej wewnątrz okna przesuwnego obrazu sonarowego. Całość operacji realizowanych w etapie trzecim została zaprezentowana na rysunku 8.18



Rysunek 8.18 Detekcja i wyznaczenie kierunkowości bruzd przy pomocy widma uzyskanego metodą 2D FFT i zerowych momentów widmowych: A – widmo mocy fragmentu przykładowej mozaiki z rys. 8.17B z nałożonymi cienkimi zielonymi liniami symbolizującymi zestaw 180 „przekrojów” górnej półpłaszczyzny otrzymanych z zastosowaniem algorytmu Bresenham’a; B – wykres funkcji zerowych momentów widmowych m_0 dla każdego z „przekrojów” od kąta azymutalnego względem północy. Kolorem czerwonym oznaczono maksimum dominujących bruzd, zaś kolorem pomarańczowym dwie dodatkowe bruzdy; C – fragment mozaiki sonarowej z rys. 8.17A z zaznaczonymi kierunkami bruzd względem północy, wyznaczonymi na podstawie wartości maksymalnych jakie przyjmowały obliczone zerowe momenty widmowe

Ostatni, czwarty etap detekcji i określania kierunkowości bruzd widocznych na zobrazowaniach sonarowych polegał na eksporcie uzyskiwanych wyników do plików o rozszerzeniu *.csv. Dla każdej analizowanej mozaiki generowany był zbiór zawierający współrzędne geograficzne centrów okna przesuwne, w których realizowane były operacje opisane w podrozdziale 8.5.1 wraz z kątem azymutalnym względem północy, wskazanym przez lokalne maksima w zbiorach zerowych momentów widmowych danego okna.

8.6 Wizualizacja i porządkowanie uzyskiwanych wyników

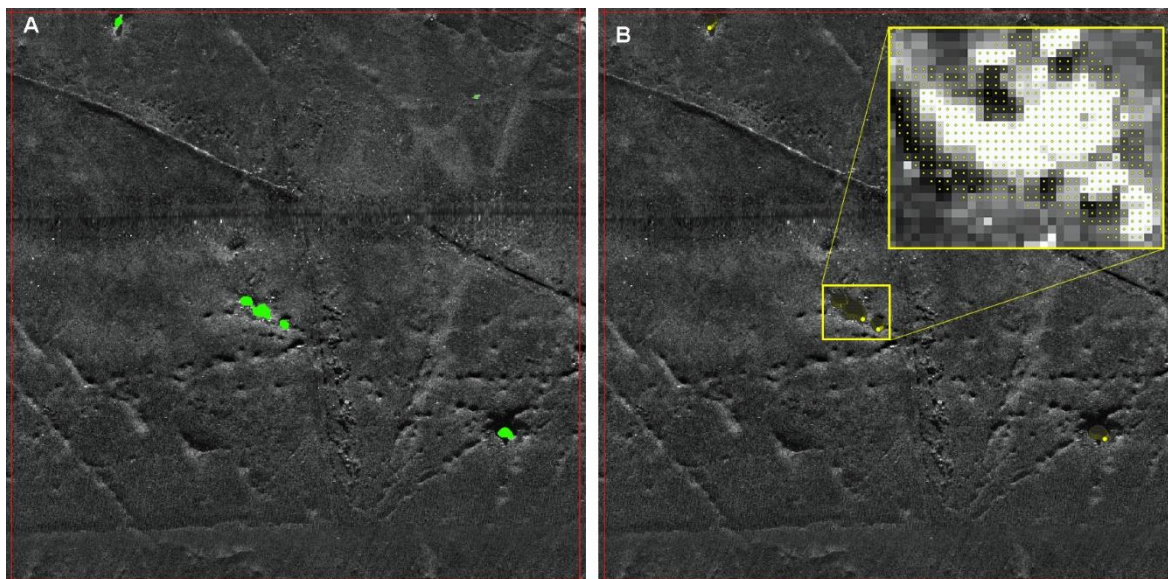
Wizualizacja oraz porządkowanie danych stanowią kolejne istotne aspekty na drodze do przeprowadzenia rozpoznania skali oddziaływania antropogenicznego na dno morskie przy wykorzystaniu metod bezinwazyjnych. Zarówno podczas akwizycji danych oraz materiału faktograficznego, a także w procesie ich obróbki, generowana jest duża liczba obszernych plików charakteryzujących się różnym typem danych. Należy również pamiętać o metadanych, które zawierają istotne informacje. Przykładami tego typu danych mogą być między innymi wyniki pomiarów geometrii wykrywanych obiektów czy zapisy daty oraz czasu, w którym rejestrowane były kolejne zbiory. W trakcie prowadzenia badań opisanych w niniejszej pracy, uzyskiwano trzy podstawowe rodzaje danych: dane hydroakustyczne, magnetometryczne oraz filmy wideo, które były archiwizowane na dyskach twardych.

Podczas realizacji procedur opisanych we wcześniejszych częściach tego rozdziału zarejestrowane dane hydroakustyczne i magnetometryczne były przetwarzane tak, aby można je było w łatwy sposób wizualizować i następnie analizować. Wynikami były cyfrowe zbiory graficzne w postaci plików rastrowych i wektorowych z dowiązanymi informacjami o położeniu geograficznym. Do stworzenia bazy danych pozwalającej na porządkowanie, wizualizację i analizę przetworzonych zbiorów wykorzystano oprogramowanie QGIS. Programy typu GIS charakteryzują się możliwością jednoczesnego wyświetlania danych rastrowych oraz wektorowych w układzie warstwowym, zgodnie z przyjętym przez użytkownika odwzorowaniem geograficznym. Dzięki temu, na podstawie uzyskiwanych zobrazowań można w łatwy sposób zarządzać zbiorami, prowadzić analizy przestrzenne, a także przygotowywać mapy sytuacyjne pożądanych obszarów.

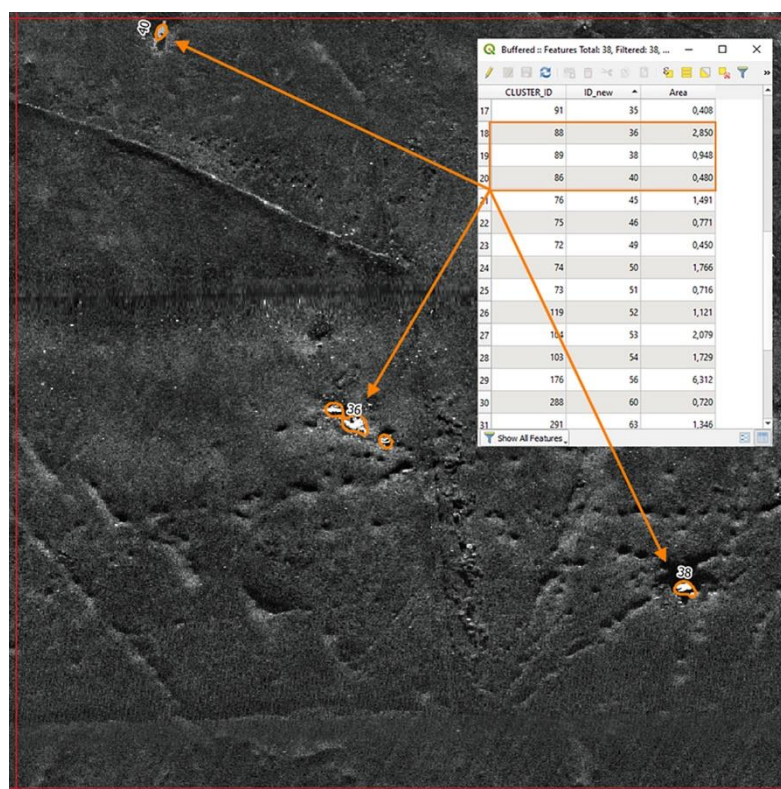
8.6.1 Analiza obiektów antropogenicznych widocznych na przetworzonych obrazach sonarowych

W celu określenia skali oddziaływania antropogenicznego w wybranych rejonach Morza Bałtyckiego niezbędne było wyznaczenie dokładnej liczby poszukiwanych obiektów występujących na dnie badanych obszarów. Binarne maski rastrowe o wymiarach 1000 pikseli x 1000 pikseli, uzyskiwane za pomocą operacji opisanych w podrozdziale 8.2, dostarczały informacji na temat lokalizacji celów położonych w ich obrębie. Aby możliwe było łatwe zliczanie i katalogowanie odnalezionych obiektów antropogenicznych konieczne było przekonwertowanie uzyskiwanych wyników do postaci danych wektorowych dla każdej z analizowanych mozaik. Zbiory tego typu składały się z listy celów wykrytych na

dnie, gdzie każdemu z obiektów przyporządkowywano unikatowy numer identyfikacyjny, a także obliczano powierzchnię jaką zajmuje na dnie. Zabieg ten przeprowadzono za pomocą narzędzi dostępnych w oprogramowaniu QGIS. Pierwszym krokiem do przygotowania warstw wektorowych o opisanych powyżej atrybutach było załadowanie binarnych masek logicznych do wcześniej przygotowanej bazy danych. Następnie sektory poszczególnych mozaik sonarowych były ze sobą łączone w celu stworzenia maski binarnej odpowiadającej wymiarom oryginalnych sonogramów. W dalszym kroku piksele, które przyjmowały wartość 0 oznaczano jako *nodata* i nie brały one udziału w kolejnych przekształceniach. Piksele, które tworzyły obiekty w obrębie wcześniejszych sektorów (wartość pikseli 1) były wektoryzowane do postaci punktów przy pomocy funkcji *Raster pixels to points* (rys. 8.19). Kolejnym krokiem było łączenie uzyskiwanych punktów w grupy, które reprezentowały pojedyncze obiekty. Osiągnano to poprzez zastosowanie gęstościowej metody klasteryzacji. Polega ona na przyporządkowaniu obserwacji do grup na podstawie informacji o stopniu zagęszczenia obserwacji w przestrzeni, tu dwuwymiarowej. W środowisku QGIS metoda ta realizowana jest za pomocą funkcji *DB scan*, w której definiuje się minimalną liczbę punktów, które powinny tworzyć grupę, a także maksymalny dystans w jakim są one położone od siebie. Parametry te zaproponowane na podstawie empirycznych obserwacji własnych wynosiły odpowiednio 15 punktów na grupę oraz 1 metr. Punkty wektorowe, które spełniały powyższe warunki były klasyfikowane jako grupa reprezentująca pojedynczy obiekt na zobrazowaniu sonarowym. Następnie wokół każdego z uzyskiwanych zbiorów tworzono kwadratowe bufory (funkcja *Buffer*) o boku równym 0,025 m w celu wygenerowania poligonów, którym nadawano unikatowy numer identyfikacyjny oraz wyznaczano ich powierzchnię (rys. 8.20). Ostatnim krokiem była selekcja otrzymywanych wyników, w taki sposób, aby widoczne pozostawały tylko dane przedstawiające obiekty o powierzchni większej bądź równej 0,375 m².



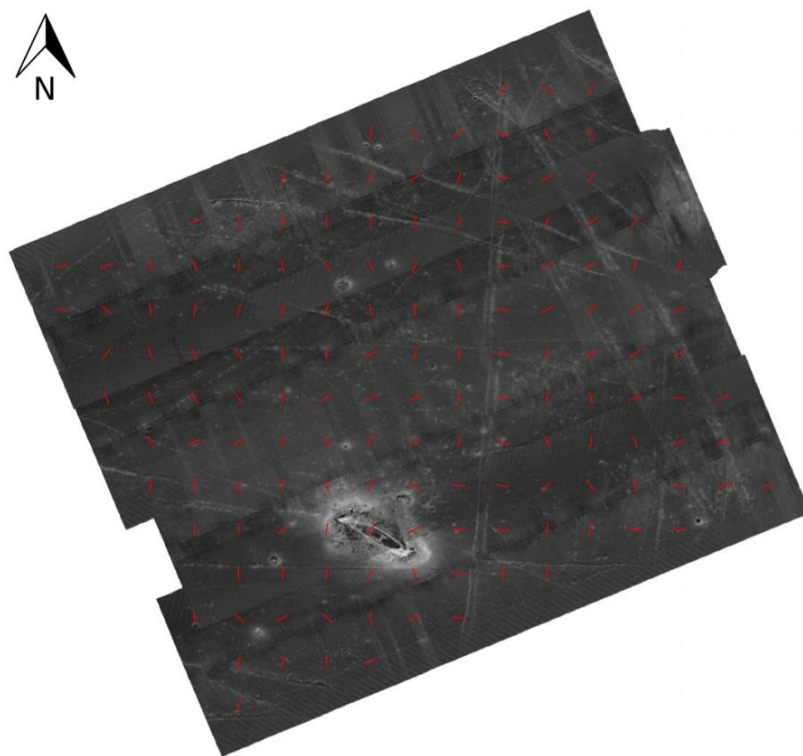
Rysunek 8.19 Proces konwersji binarnych masek rastrowych na dane wektorowe: A – wybrany sektor przykładowej mozaiki sonarowej z zaznaczonymi kolorem zielonym pikselami o wartości 1; B – piksele o wartości 1 przekonwertowane na punkty wektorowe (oznaczone kolorem żółtym)



Rysunek 8.21 Wynik wektoryzacji binarnych masek rastrowych z wykorzystaniem funkcji *Raster pixel to point*, *DB scan* i *Buffer*. Każdy wykryty obiekt antropogeniczny o pożądanych wymiarach (oznaczony kolorem pomarańczowym) posiada unikatowy identyfikator oraz obliczoną powierzchnię jaką zajmował na dnie

8.6.2 Wizualizacja kierunkowości bruzd wykrywanych na analizowanych mozaikach sonarowych

Podobnie jak w przypadku obiektów antropogenicznych, wizualizacja wyników detekcji i określania kierunkowości bruzd widocznych na przetwarzanych sonogramach odbywała się z wykorzystaniem narzędzi dostępnych w oprogramowaniu QGIS. Pliki o rozszerzeniu *.csv, generowane po wykonaniu operacji opisanych w podrozdziale 8.5.1, były importowane do bazy danych, która zawierała przygotowane wcześniej mozaiki sonarowe. Wartości wyznaczanych kątów azymutalnych wykrywanych bruzd w oknie przesuwym względem północy, zawarte we wspomnianych zbiorach były modyfikowane poprzez dodanie do nich kąta 90° . W ten sposób możliwe było generowanie wektorowych znaczników w postaci kresek prostopadle położonych do kierunku bruzd (rys. 8.22). Procedura ta odbywała się z wykorzystaniem narzędzia *Create line of bearing*. Dzięki temu zabiegowi uniknięto sytuacji, w której znacznik wektorowy przysłania bruzdę widoczną na zobrażowaniu sonarowym. Dodatkowo, dla każdej z analizowanych mozaik sonarowych przygotowano przy pomocy oprogramowania MATLAB wykresy obrazujące globalną kierunkowość i liczebność bruzd przypisanych do każdego z sonogramów. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w dalszych częściach pracy.



Rysunek 8.22 Przykładowa mozaika sonarowa z nałożonymi czerwonymi, prostopadłymi względem bruzd znacznikami wektorowymi

9. Wyniki: detekcja obiektów antropogenicznych i działalności człowieka na dnie w wybranych obszarach Morza Bałtyckiego

W poniższym rozdziale zaprezentowane zostaną wyniki przeprowadzonych badań, które uzyskano w ramach realizacji niniejszej pracy. Odnalezione i zidentyfikowane obiekty referencyjne scharakteryzowano, a także przypisano je do jednej z trzech kategorii: duże śmieci i odpady przemysłowe, wraki, obiekty o pochodzeniu militarnym. Ponadto, określono liczebność wykrytych celów dla wszystkich badanych rejonów. W niniejszym rozdziale przedstawione zostanie również zagadnienie występowania charakterystycznych zagłębień widocznych na powierzchni dna w postaci bruzd zaobserwowanych na sonogramach. W dalszych częściach pracy omówiona zostanie geneza powstawania bruzd, a także zaprezentowane zostaną wyniki analizy ich kierunkowości w zestawieniu z danymi dotyczącymi kierunków wiania wiatrów w badanych akwenach w ciągu roku, w którym prowadzona była akwizycja danych hydroakustycznych (przyjmując założenie, że kierunek wiatrów w innych latach jest zbliżony do analizowanego przedziału). Uzyskane rezultaty pozwolą na określenie w jaki sposób presja antropogeniczna w postaci obiektów oraz bruzd widocznych na powierzchni dna oddziałuje na ekosystemy bentosowe Morza Bałtyckiego badanych obszarów.

Wszystkie dane zarejestrowane przy pomocy pojazdu AUV w rejonach opisanych w rozdziale 6. zostały przetworzone z wykorzystaniem metod zaprezentowanych w rozdziale 8. W konsekwencji, uzyskano jedenaście mozaik sonarowych, na których szczegółowo zobrazowano dno badanych akwenów. Na ich podstawie wyznaczono lokalizację 682 obiektów antropogenicznych o powierzchni minimalnej $0,375\text{m}^2$, a także bruzd powstałych na wierzchniej warstwie podłoża morskiego. Tego typu regularne zagłębienia w dnie były zaobserwowane na siedmiu z jedenastu uzyskanych sonogramów. Dodatkowych informacji na temat rodzaju materiałów, z których zbudowane były odnajdywane obiekty antropogeniczne dostarczyły przetworzone dane magnetometryczne lub materiały faktograficzne w postaci zdjęć podwodnych. Należy zaznaczyć, że z uwagi na awarie magnetometru podczas prowadzonych kampanii pomiarowych zbiory magnetometryczne udało się uzyskać na terenie sześciu z jedenastu badanych rejonów. Wizualną inspekcję i identyfikację wybranych obiektów antropogenicznych przy pomocy platformy ROV przeprowadzono w obrębie wszystkich badanych obszarów. W każdym z przypadków procedura ta była realizowana przynajmniej dla jednego z wykrytych celów.

Ogólne informacje na temat danych wykorzystywanych do uzyskiwania wyników zostały zaprezentowane w tabeli 9.1. Zobrazowania dna w wysokiej rozdzielczości, utworzone na podstawie przetworzonych danych sonarowych, z zaznaczoną lokalizacją wykrytych obiektów antropogenicznych oraz mapami konturowymi zmian indukcji pola magnetycznego zaprezentowano w załącznikach do niniejszej pracy (rozdział 14.).

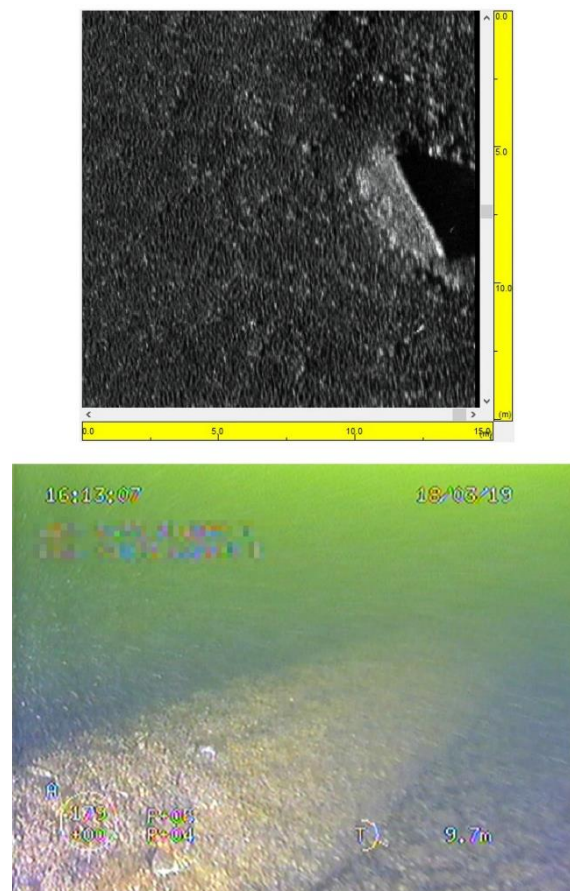
Tabela 9.1 Podsumowanie wyników mapowania dna przy pomocy platform AUV

Identyfikator mozaiki	Obszar badań: A – Zatoka Gdańska, B-Głębia Gdańska, C – Głębia Bornholmska, D – Zatoka Kilońska	Powierzchnia mozaiki [km²]	Dostępność danych magnetometrycznych (+ - dane dostępne, - - brak danych)	Numer załącznika
OX_OC_MAR19_1	A	0,21	+	1
OX_OC_SEP18_1	A	0,11	+	2
GD_OC_NOV18_2	A	0,12	+	3
OC_MAR17_GD3	B	0,11	-	4
GD_SEP15_2v4	B	0,2	+	5
GD_SEP15_5v1	B	0,23	-	6
BO_OC_APR18_4	C	0,1	+	7
BO_OC_MAR16_3	C	0,3	-	8
OC_MAR17_BO2c	C	0,03	-	9
BO_OC_SEP17_1	C	0,13	+	10
KH_OC_SEP16_1v2	D	0,55	-	11
Całkowita powierzchnia zmapowanego dna w obszarach:				
A		0,44		
B		0,54		
C		0,56		
D		0,55		

9.1 Obszar A – Zatoka Gdańska

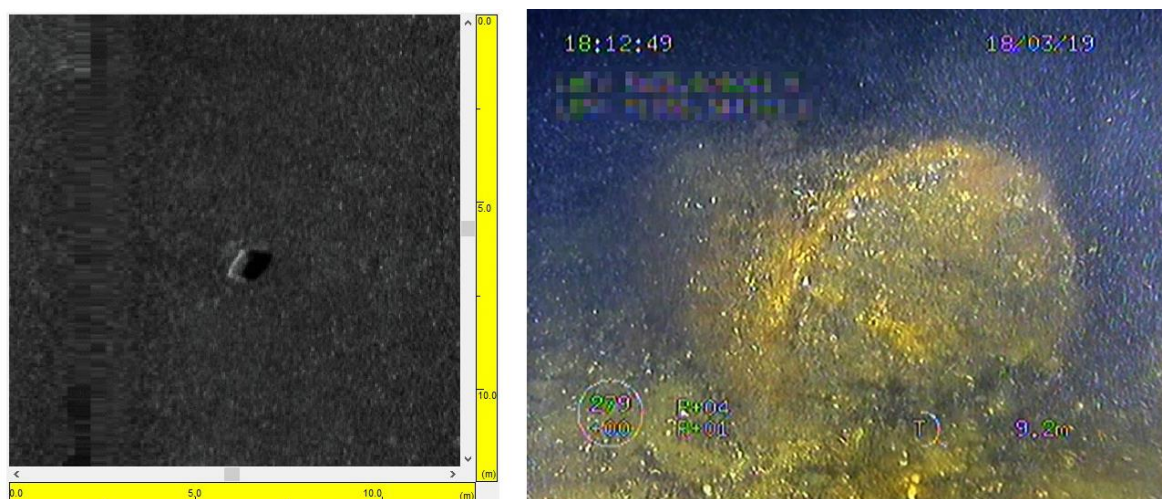
W obszarze A przeprowadzono rozpoznanie skali oddziaływania antropogenicznego na dno w trzech jego rejonach – mozaiki: OX_OC_MAR19_1, OX_OC_SEP18_1 i GD_OC_NOV18_2. Całkowita liczba wykrytych obiektów, wyznaczona na podstawie przeanalizowanych zobrazowań dna w obszarze A wynosiła 86. W oparciu o ocenę kształtu i wymiarów wszystkich odnalezionych celów, wytypowano wśród nich 5, które zostały poddane wizualnej inspekcji i identyfikacji przy pomocy platformy ROV. Na żadnym z trzech sonogramów obrazujących powierzchnię dna w obszarze A nie zaobserwowano bruzd, w związku z tym, nie prowadzono analiz dotyczących określania ich kierunkowości.

Pierwszy z badanych rejonów, oznaczony identyfikatorem OX_OC_MAR19_1, był zlokalizowany w sąsiedztwie portu Gdynia, gdzie wykryto na dnie 20 obiektów, których charakterystyka wskazywała na pochodzenie antropogeniczne. Inspekcji oraz wizualnej identyfikacji poddano dwa z nich zgodnie z wcześniej opisywaną metodyką (rys. 9.1 i rys. 9.2).



Rysunek 9.1 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_MAR19_1

Zobrazowania przedstawione na rysunku 9.1 przedstawiają cylindryczny, podłużny obiekt o wymiarach ok. 4,5 m x 0,5 m. Pomimo swoich znacznych rozmiarów cel ten nie generował anomalii w polu magnetycznym Ziemi, co oznaczało, że nie był zbudowany z materiałów ferromagnetycznych. Szczegółowe rozpoznanie obiektu było utrudnione z powodu niskiej przejrzystości wody podczas prowadzenia obserwacji przy pomocy platformy ROV. Dodatkową przeszkodą w identyfikacji celu były organizmy bentosowe, które całkowicie porastały znalezisko. Analiza zebranych materiałów oraz konsultacje z ekspertami ds. amunicji zalegającej na dnie Bałtyku z Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni pozwoliły ustalić, że wykryty obiekt to drewniana torpeda ćwiczebna. Dodatkowym potwierdzeniem dokonanego odkrycia jest fakt, iż w trakcie trwania II wojny światowej w wewnętrznej części Zatoki Gdańskiej, niedaleko portu Gdynia, funkcjonował nazistowski ośrodek *Torpedowaffenplatz Hexengrund*, którego celem był rozwój technologii związanych z produkcją torped. W obszarze tego akwenu tylko w 1944 roku przeprowadzono 695 testów torped bojowych i ćwiczebnych (Miętiewicz, 2020). Część z prób kończyła się fiaskiem, co w konsekwencji prowadziło do utraty i zagubienia na wodach Zatoki Gdańskiej testowanych torped. W związku z powyższym, pierwszy cel referencyjny zidentyfikowany na obrazowaniu OX_OC_MAR19_1 został zaklasyfikowany do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym zalegających na dnie Morza Bałtyckiego.

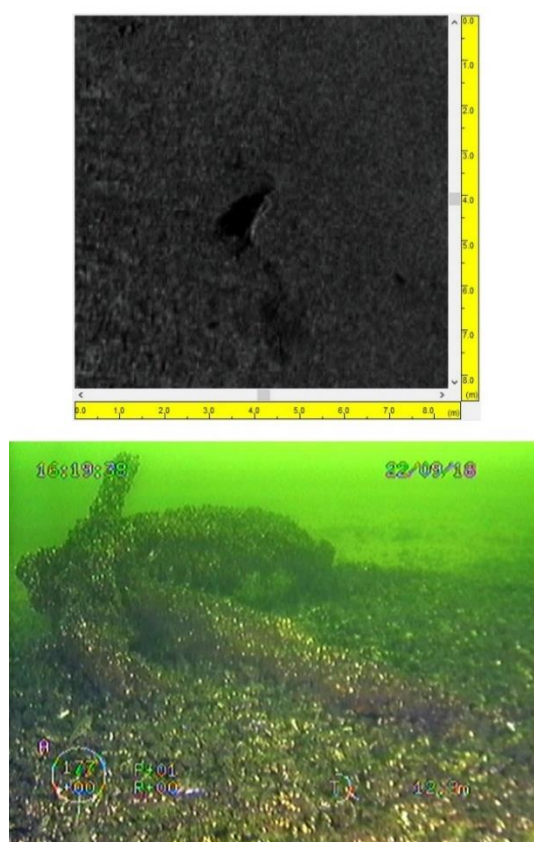


Rysunek 9.2 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_MAR19_1

Drugi z rozpoznawanych obiektów referencyjnych, który był zlokalizowany w obszarze badań oznaczonym jako OX_OC_MAR19_1 charakteryzował się wymiarami

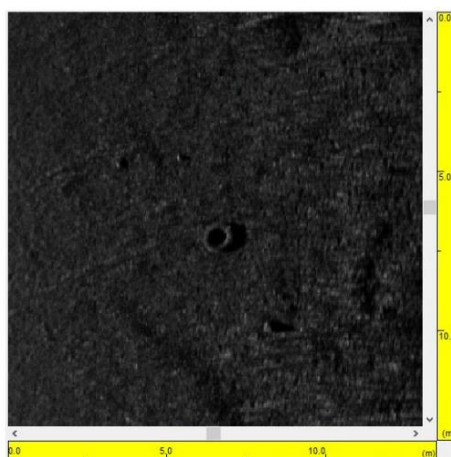
0,9 m x 0,45 m. Jego kształt był cylindryczny, zaś materiał który tworzył zewnętrzne powłoki powodował anomalie w rejestrowanym naturalnym polu magnetycznym Ziemi. Cel ten, podobnie jak w przypadku odnalezionej w tym obszarze torpedy, był w znacznym stopniu porośnięty organizmami bentosowymi. Wizualna ocena stopnia korozji wskazywała, że proces ten nie był zaawansowany. Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania opisywanego obiektu stwierdzono, że jest to najprawdopodobniej pusta metalowa beczka. Bliskość portu Gdynia, który jest jednym z największych na Morzu Bałtyckim, sprawia, że w jego sąsiedztwie przedmioty tego typu mogą występować na dnie ze zwiększoną częstotliwością. Opisywany obiekt został przyporządkowany do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych.

Drugi z rejonów mapowania dna w obszarze A, oznaczony identyfikatorem OX_OC_SEP18_1, również znajdował się niedaleko od portu Gdynia. Na podstawie danych hydroakustycznych uzyskano zobrazowanie dna, na którym wykryto 16 obiektów o wysoce prawdopodobnym pochodzeniu antropogenicznym. Dwa z nich rozpoznano i zidentyfikowano przy pomocy zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego. Wyniki przeprowadzonych inspekcji zostały przedstawione na rysunkach 9.3 i 9.4.



Rysunek 9.3 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_SEP18_1

Na podstawie analizy echa pierwszego rozpoznawanego obiektu referencyjnego określono jego wymiary, które wynosiły w przybliżeniu 1,2 m x 0,3 m. Pomimo niezbyt wyraźnego zobrazowania sonarowego cel silnie zaburzał naturalne pole magnetyczne Ziemi (anomalia ok. 20 nT), co wskazywało, że był on wykonany całkowicie z materiałów ferromagnetycznych. Oględziny obiektu wskazały, że była to kotwica porośnięta organizmami bentosowymi. Najprawdopodobniej została ona utracona przez jedną z jednostek podczas kotwiczenia. W związku z powyższym, obiekt ten przyporządkowano do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych.

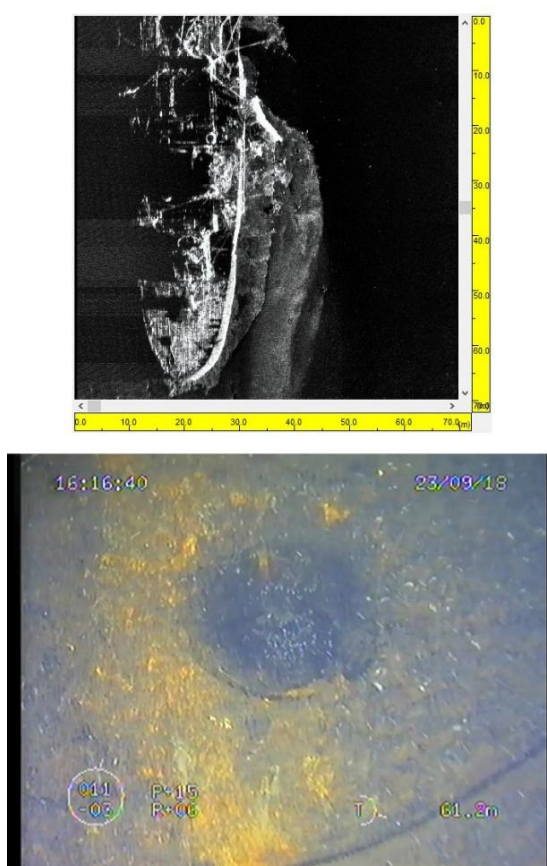


Rysunek 9.4 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_SEP18_1

Drugim z obiektów referencyjnych, który został poddany wizualnej inspekcji i identyfikacji w obszarze oznaczonym jako OX_OC_SEP18_1 okazała się być opona o średnicy ok. 0,9m. Cel ten nie wykazywał właściwości magnetycznych. Był on natomiast, podobnie jak obiekty rozpoznane w obszarach OX_OC_MAR19_1 i OX_OC_SEP18_1, silnie skolonizowany przez florę i faunę bentosową występującą w wewnętrznej części Zatoki Gdańskiej. Opony

wykorzystywane są często na mniejszych jednostkach jako tzw. odbijacze, które chronią burty statków w trakcie manewrów portowych. Wykryty obiekt najprawdopodobniej dostał się do toni wodnej i zatonął na skutek przerwania liny łączącej go z kadłubem jednostki. Cel ten trafił do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych.

Ostatni z obszarów mapowania dna w rejonie Zatoki Gdańskiej znajdował się w jej środkowej części, ok. 13 mil morskich na północny wschód od portu Gdańsk i został oznaczony identyfikatorem GD_OC_NOV18_2. W badanym rejonie wykryto 50 obiektów antropogenicznych. Największy z nich został poddany rozpoznaniu i wizualnej inspekcji (rys. 9.5).



Rysunek 9.5 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji największego obiektu w obrębie mozaiki GD_OC_NOV18_2

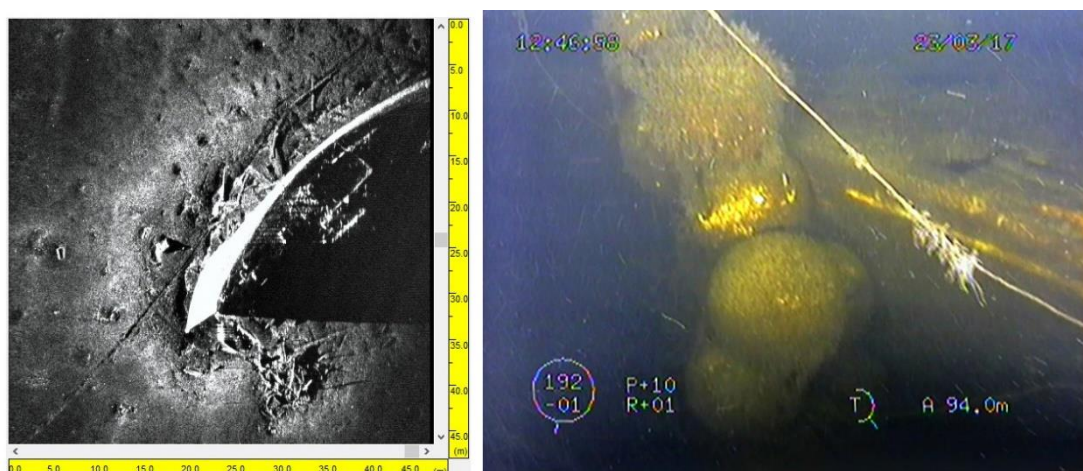
Rzeczonym obiektem referencyjnym był wrak jednostki *t/s Franken*, który został zatopiony pod koniec II wojny światowej przez radzieckie lotnictwo. W trakcie tonięcia statku odłamała się od niego część dziobowa, która spoczywa w odległości kilkudziesięciu metrów od reszty kadłuba. Wymiary fragmentu wraku, który udało się zarejestrować na zobrazowaniu sonarowym GD_OC_NOV18_2 wynosiły ok. 134 m x 20 m. Pozostałe cele, które zostały wykryte w procesie półautomatycznej detekcji obiektów na dnie badanego

obszaru stanowiły elementy kadłuba i wyposażenia statku, które zostały rozrzucone w sąsiedztwie wraku podczas jego osiadania na podłożu morskim. Zapisy magnetometru w tym rejonie wskazują na bardzo silne anomalie magnetyczne. Wrak został skolonizowany przez organizmy bentosowe, a wizualna ocena stanu korozji wskazywała na stosunkowo dobry stan zewnętrznych powłok jednostki.

9.2 Obszar B – Głębia Gdańska

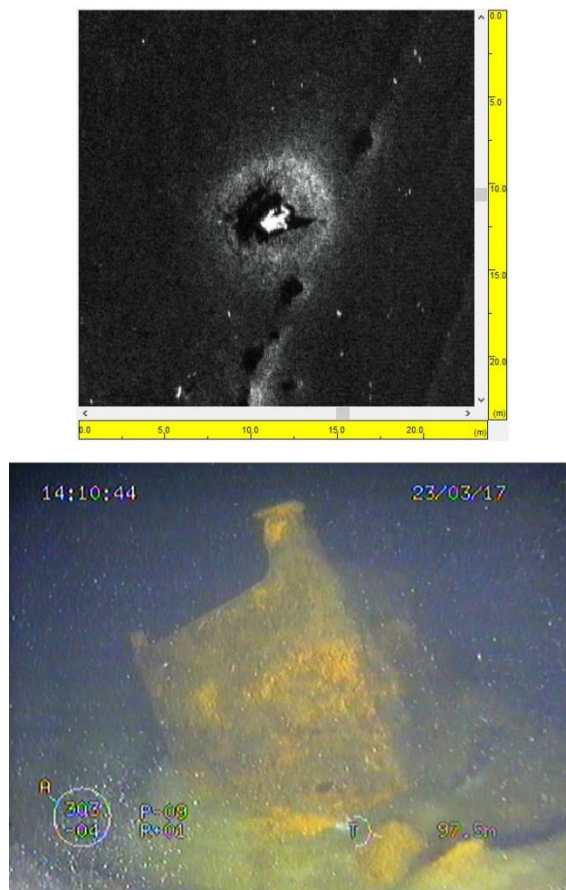
W obszarze B, podobnie jak w przypadku Zatoki Gdańskiej, wykonano trzy mapowania dna w rejonach oznaczonych identyfikatorami OC_MAR17_GD3, GD_SEP15_2v4 oraz GD_SEP15_5v1. Całkowita liczba celów wykrytych na sonogramach w obszarze Głębi Gdańskiej w drodze przeprowadzonej półautomatycznej detekcji obiektów na dnie wynosiła 149. Na podstawie analizy kształtów i wymiarów odnalezionych celów, 10 z nich poddano wizualnej inspekcji i identyfikacji. Dodatkowo, na wszystkich zobrazowaniach sonarowych uzyskanych w obszarze B zaobserwowano bruzdy widoczne na dnie. W związku z powyższym, dokonano analizy ich kierunkowości.

W obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3 wykryto 33 obiekty o pochodzeniu antropogenicznym, które spełniały wspomniane wcześniej kryterium zajmowania minimalnej powierzchni na dnie. Dwa cele referencyjne z uzyskanego zbioru zostały poddane identyfikacji i wizualnej inspekcji przy pomocy platformy ROV. Ich zobrazowania sonarowe oraz zdjęcia podwodne zostały zestawione ze sobą na rysunkach 9.6 oraz 9.7.



Rysunek 9.6 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3

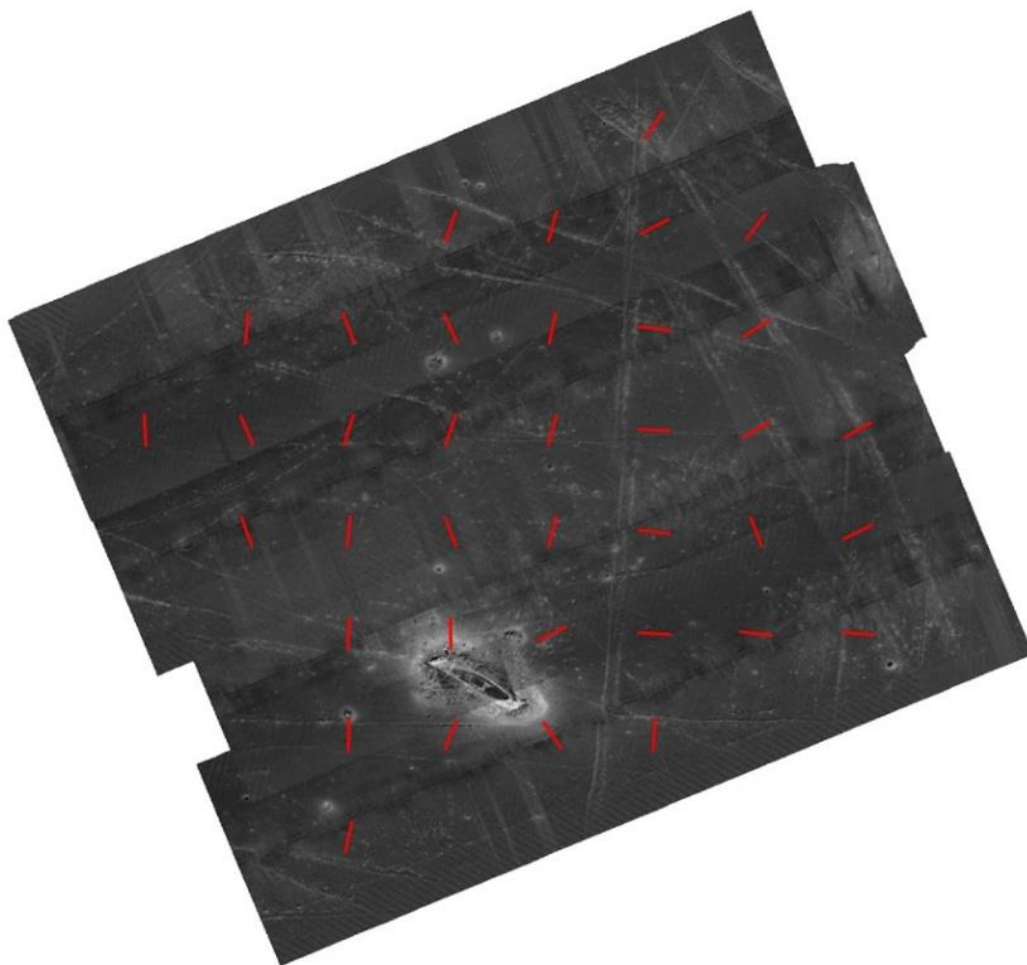
Na podstawie przetworzonych sonogramów i innych materiałów faktograficznych stwierdzono, że pierwszy ze zidentyfikowanych obiektów referencyjnych to nierozpoznany wrak o wymiarach ok. 45 m x 8,5 m. Zatopiona jednostka była częściowo pokryta sieciami widmo, które zazwyczaj występują na tego typu obiektach podwodnych. Badany wrak był dobrze zachowany, co świadczy o jego współczesnym pochodzeniu (ostatnie 100-lecie). Ponadto, na kadłubie oraz na pływakach dołączonych do sieci - widm zaobserwowano przedstawicieli flory i fauny morskiej. Dodatkowo, większość obiektów wykrytych w obszarze mozaiki OC_MAR17_GD3 znajdowała się w bliskim sąsiedztwie zidentyfikowanego wraku. Najprawdopodobniej cele te stanowiły elementy wyposażenia odnalezionej jednostki i zostały rozproszone na dnie podczas jej zatonięcia.



Rysunek 9.7 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3

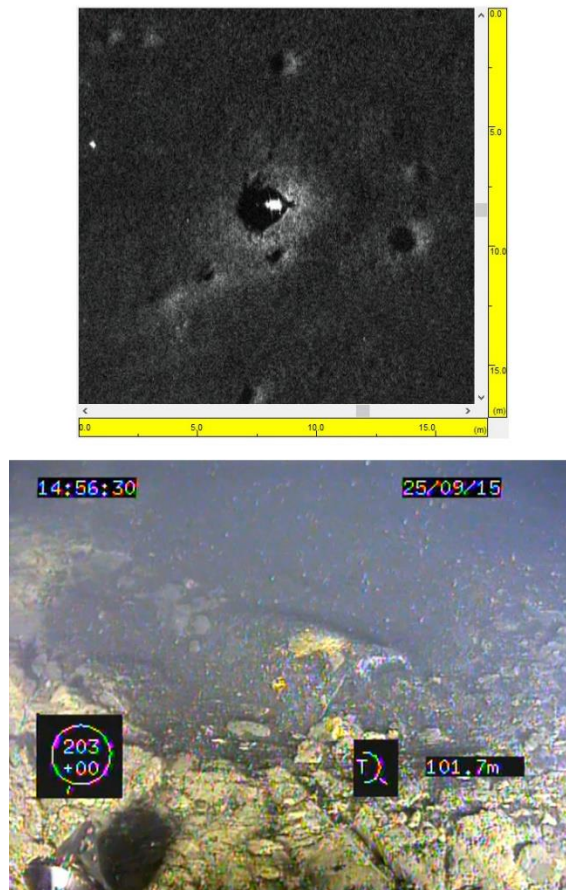
Drugim ze zidentyfikowanych celów referencyjnych w obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3 była metalowa szafka o wymiarach ok. 1,4 m x 1 m. Spoczywała ona na dnie w odległości ok. 42 m od pierwszego obiektu i podobnie jak w przypadku wraku, można było zaobserwować na niej ślady bytowania organizmów morskich. Biorąc pod uwagę stan

w jakim znajdował się ten cel i przyrównując go do obiektu pierwszego można jednoznacznie stwierdzić, że odnaleziona metalowa szafka stanowiła element wyposażenia pokładowego sąsiadującego z nią wraku. W związku z tym, drugi z wykrytych obiektów referencyjnych w obrębie analizowanej mozaiki został przypisany do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych. Na zobrażowaniu dna oznaczonym jako OC_MAR17_GD3 widoczne były również regularne zagłębienia w dnie w postaci bruzd. Ich detekcja odbywała się w oknie przesuwym o wymiarach 30 m x 30 m, zaś wyniki tej operacji zostały przedstawione na rysunku 9.8.



Rysunek 9.8 Bruzdy wykryte na zobrażowaniu OC_MAR17_GD3 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

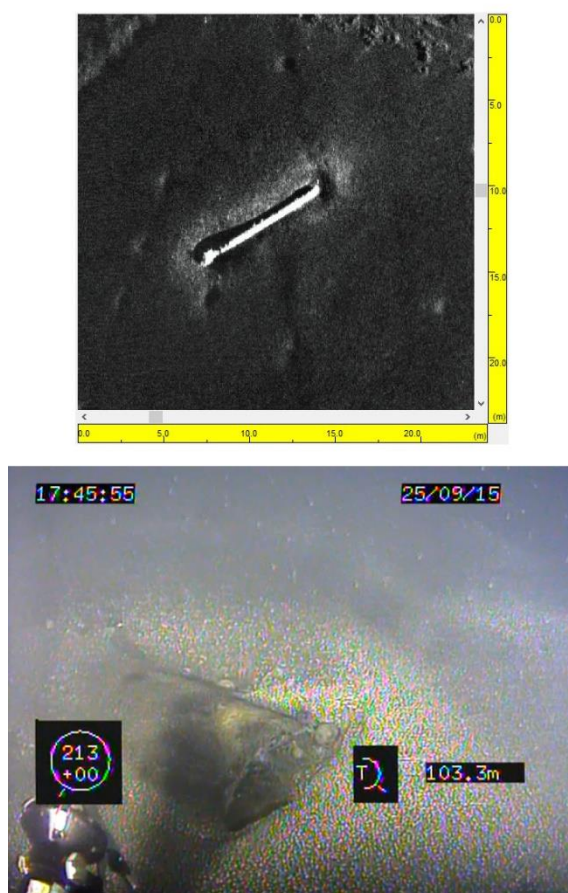
Kolejnym zobrazowaniem dna uzyskanym w obszarze Głębi Gdańskiej była mozaika GD_SEP15_2v4, w obrębie której wykryto 74 obiekty o pochodzeniu antropogenicznym. Podobnie jak w przypadku sonogramu OC_MAR17_GD3, do wizualnej inspekcji i identyfikacji wytypowano dwa cele referencyjne z całości zbioru odnalezionych obiektów. Rezultaty przeprowadzonych obserwacji wspomnianych celów zostały przedstawione na rysunkach 9.9 i 9.10.



Rysunek 9.9 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_2v4

Obiekt zaprezentowany na rysunku 9.9 był częściowo zagrzebany w osadach powierzchniowych Głębi Gdańskiej. Pomiary echa wystającego z dna fragmentu celu wskazywały, że jego wymiary wynosiły ok. 0,8 m x 0,4 m. Z uwagi na fakt, że całość obiektu nie była widoczna na uzyskanym sonogramie, jego rzeczywiste wymiary mogą być większe. Zapisy pochodzące z magnetometru wskazywały, że obiekt ten jest zbudowany z materiałów ferromagnetycznych. Na podstawie obserwacji wizualnej prowadzonej przy pomocy kamery umieszczonej na platformie ROV ustalono, że badany cel jest w stanie częściowego rozkładu spowodowanego korozją jego zewnętrznych warstw. Wykryty przedmiot został

zakwalifikowany do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym z uwagi na jego kształt, wymiary, rodzaj materiału, z którego był zbudowany i ich stopień korozji, a także fakt, że obszar mapowania dna oznaczony jako GD_SEP15_2v4 położony jest w bliskim sąsiedztwie rejonu zatapiania amunicji pochodzącej z czasów II wojny światowej. Ponadto, większość obiektów widocznych na obrazowaniu sonarowym GD_SEP15_2v4 wykazywało znaczne podobieństwo do opisywanego powyżej celu pod względem wymiarów oraz kształtu.

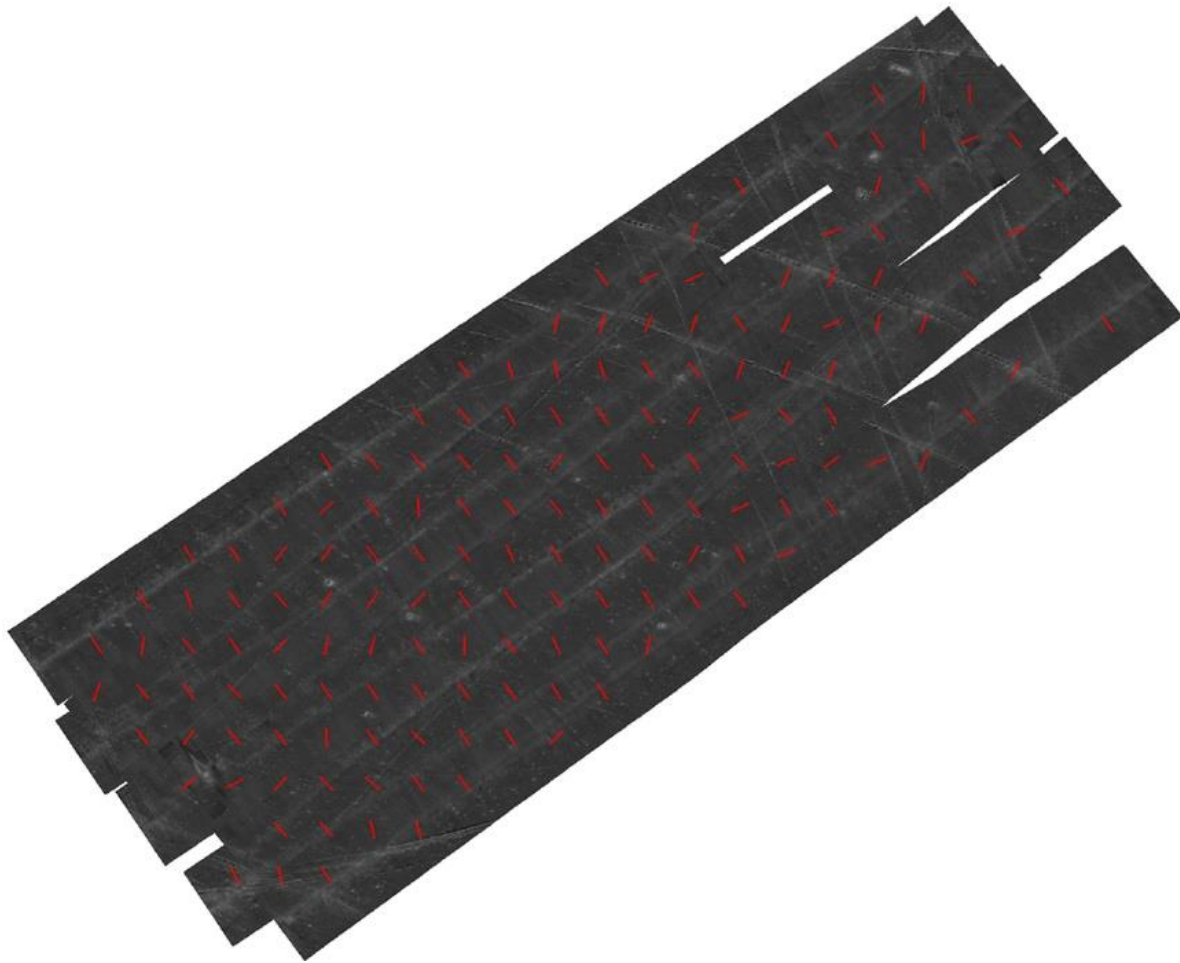


Rysunek 9.10 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_2v4

Drugi z obiektów referencyjnych, zidentyfikowany przy pomocy pojazdu ROV w obrębie mozaiki GD_SEP15_2v4 charakteryzował się wymiarami wynoszącymi ok. 8 m x 0,5 m i również był zbudowany z materiałów ferromagnetycznych. Analiza sonogramu, a także materiału wideo pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, że badany obiekt jest torpedą. Potwierdza to również fakt, że jego szerokość wynosząca ok. 0,5m jest zgodna ze średnicami torped stosowanych w XX wieku, które oscylowały w okolicach 500mm (Newpower, 2006).

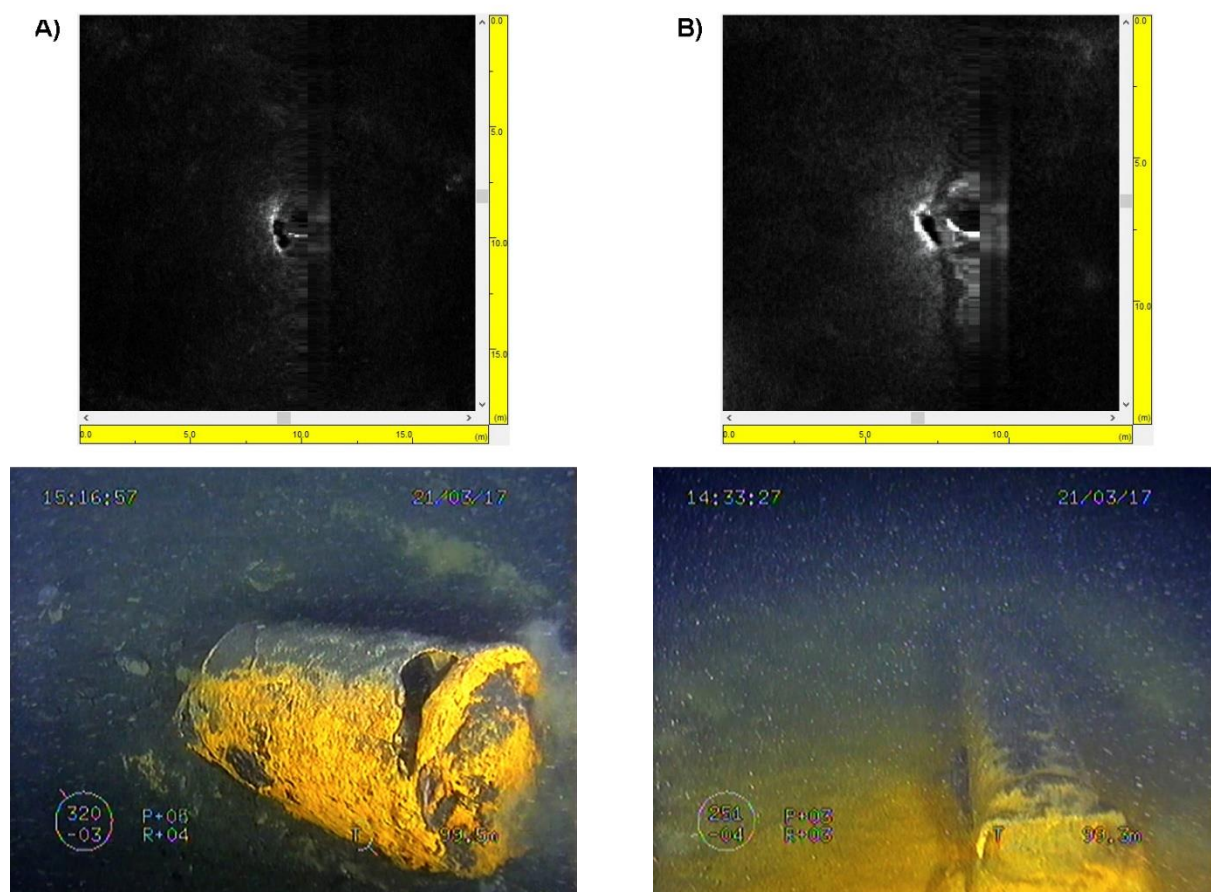
W związku z powyższymi obserwacjami cel ten został przyporządkowany do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym występujących na dnie Morza Bałtyckiego.

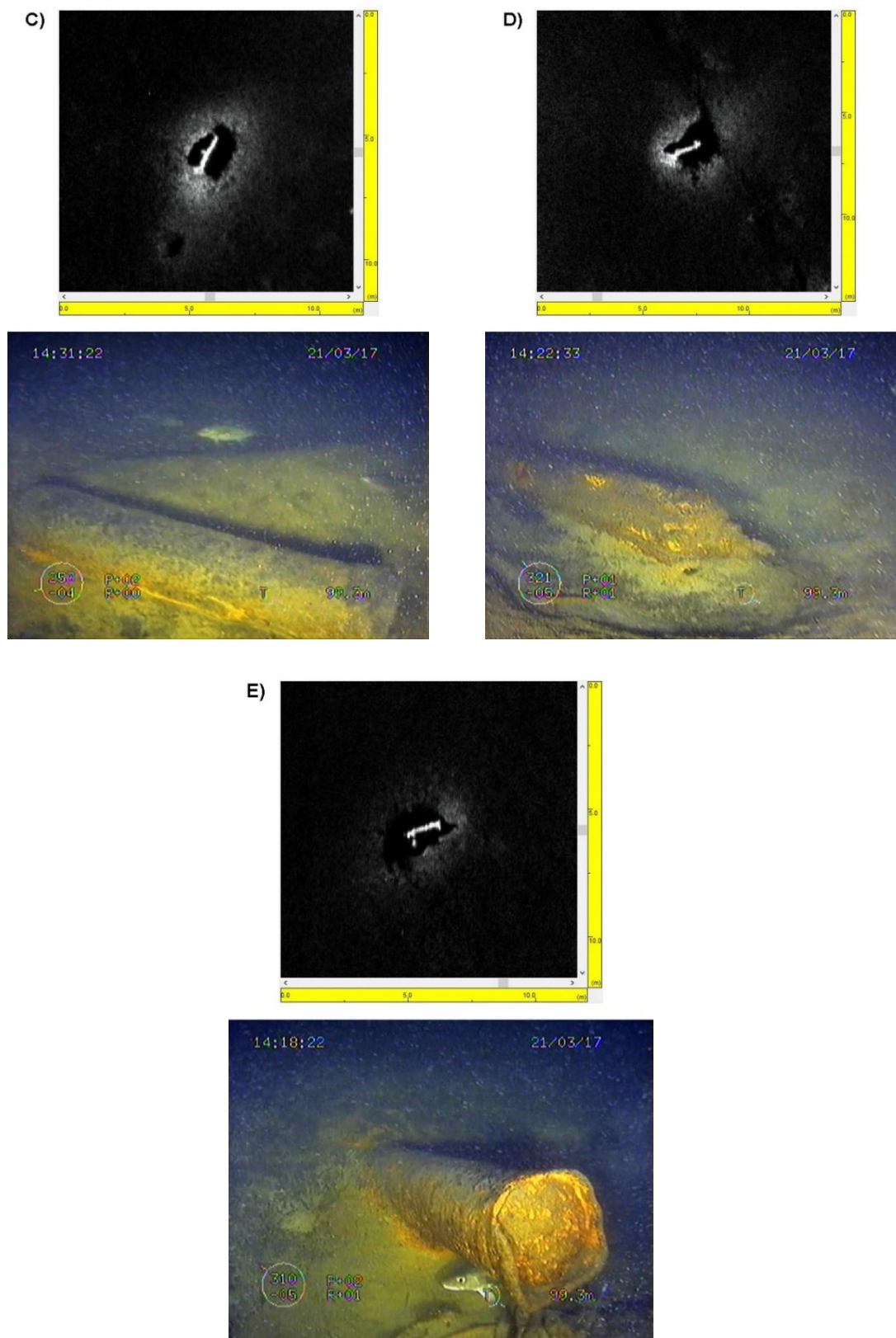
W obszarze mapowania podłoża morskiego oznaczonym jako GD_SEP15_2v4 również zaobserwowano bruzdy na dnie. Podobnie jak w przypadku mozaiki OC_MAR17_GD3 ich detekcja i określanie kierunkowości odbywały się w oknach przesuwnych o wymiarach 30 m x 30 m. Wyniki wykrywania bruzd zostały zaprezentowane na rysunku 9.11.



Rysunek 9.11 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu GD_SEP15_2v4 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

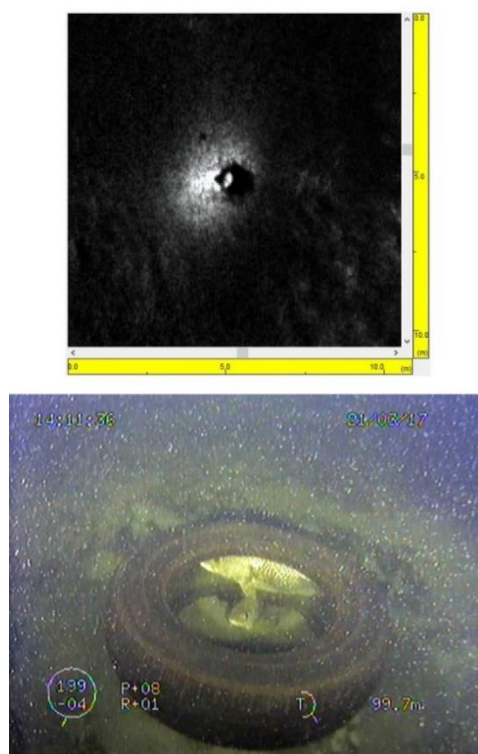
Ostatnia mozaika utworzona z danych zarejestrowanych w rejonie Głębi Gdańskiej została oznaczona identyfikatorem GD_SEP15_5v1. Na podstawie jej analizy wyznaczono na dnie lokalizację 42 obiektów antropogenicznych, z czego 5 poddano wizualnej inspekcji i identyfikacji. Należy zaznaczyć, że ponad połowa wszystkich wyznaczonych celów w obszarze mapowania GD_SEP15_5v1 znajdowała się w niedalekim sąsiedztwie od wspomnianych sześciu obiektów referencyjnych. Zestawy sonogramów i wybranych kadrów z podwodnych materiałów wideo prezentujących wygląd wspomnianych celów zostały zaprezentowane na rysunkach 9.12 i 9.13. Pięć z sześciu zidentyfikowanych obiektów były położone blisko siebie i charakteryzowały się podobnymi wymiarami i kształtami, a także zbliżonym stopniem korozji. W związku z tym zostały one uznane za klaster celów, zaś ich zobrazowania zaprezentowano na wspólnym rysunku (rys. 9.12).





Rysunek 9.12 Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji klastra celów w obrębie mozaiki GD_SEP15_5v1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci, D) – obiekt czwarty, E) – obiekt piąty

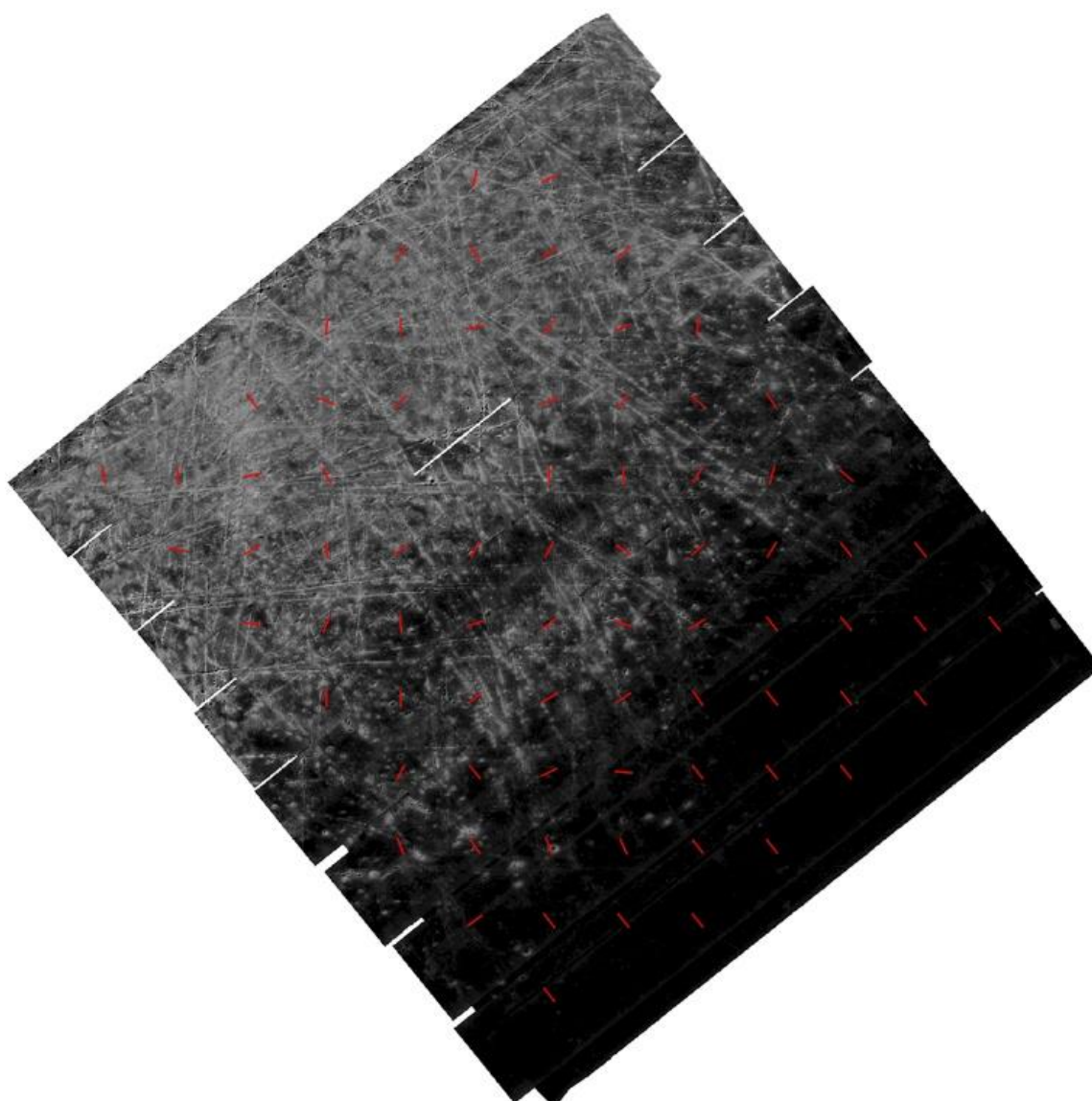
Wymiary obiektów należących do badanego klastra celów wynosiły odpowiednio 1,5 m x 0,3 m; 1,4 m x 0,35 m; 1,45 m x 0,3 m; 1,3 m x 0,3 m oraz 1,38 m x 0,3 m. Z powodu wydłużonych kształtów, zgrupowania obiektów oraz bliskości strefy, w której dochodziło do zatopień amunicji w rejonie Głębi Gdańskiej odnalezione cele referencyjne zostały wstępnie sklasyfikowane jako cele o pochodzeniu militarnym. Dopiero szczegółowe oględziny przy pomocy platformy ROV pozwoliły na identyfikację drobniejszych elementów poszczególnych obiektów i wykluczenie tego założenia. Dokładnie przeprowadzona wizualna inspekcja dostarczyła zobrazowań, na podstawie których określono, że wykryty klaster obiektów to w rzeczywistości pojemniki służące do przechowywania gazów pod wysokim ciśnieniem. Nie wiadomo czy zostały one zatopione w tym rejonie celowo bądź przypadkowo. Obiekty te zostały przypisane do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych. W przypadku mozaiki GD_SEP15_5v1 nie udało się wykonać pomiaru zmian indukcji pola magnetycznego podczas rejestracji danych sonarowych. Jednak na podstawie uzyskanych materiałów z kamery umieszczonej na zdalnie sterowanym pojeździe podwodnym można było zaobserwować postępujący proces korozji zidentyfikowanych obiektów. W związku z tym można domniemywać, że były one zbudowane z metalu lub innego rodzaju stopów. Dodatkowo, bezpośrednio przy wykrytych obiektach zaobserwowano występowanie ryb z rodziny dorszowatych.



Rysunek 9.13 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji szóstego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_5v1

Ostatnim z obiektów referencyjnych, poddanym identyfikacji w rejonie mapowania oznaczonym jako GD_SEP15_5v1, była opona o średnicy ok. 0,7 m. Cel ten spoczywał na powierzchni dna w odległości ok. 175 m od opisanego wcześniej klastra obiektów. Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji obiekt ten został zaklasyfikowany do grupy dużych śmieci i odpadów przemysłowych. Podczas inspekcji opisywanego celu referencyjnego, w jego sąsiedztwie zaobserwowano obecność ryb.

Na zobrazowaniu sonarowym dna GD_SEP15_5v1 widoczne były liczne bruzdy skierowane w różnych kierunkach. Wyniki analiz dotyczących zaobserwowanych zagłębień na powierzchni dna zostały przedstawione na rysunku 9.14.

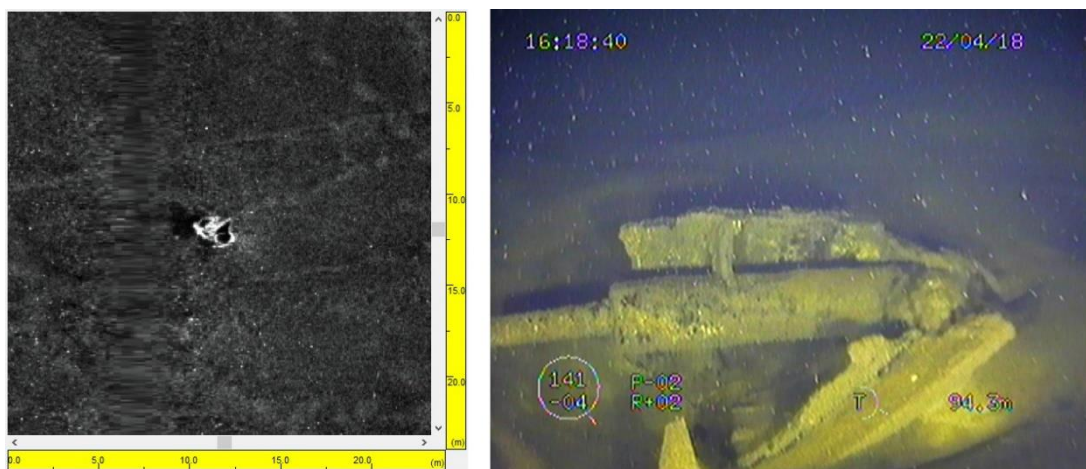


Rysunek 9.14 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu GD_SEP15_5v1 w oknach przesuwanych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

9.3 Obszar C – Głębia Bornholmska

W obszarze B zlokalizowane były cztery poligony, w obrębie których przeprowadzono mapowanie dna w celu rozpoznania skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże morskie. Poligonom tym przydzielono odpowiednie identyfikatory - BO_OC_APR18_4, BO_OC_MAR16_3, OC_MAR17_BO3c i BO_OC_SEP17_1. Na podstawie przeprowadzonej półautomatycznej detekcji obiektów na uzyskanych zobrazeniach dna wyznaczono lokalizację 167 celów o pochodzeniu antropogenicznym, z czego 11 szczegółowo rozpoznano i zidentyfikowano przy pomocy pojazdu ROV.

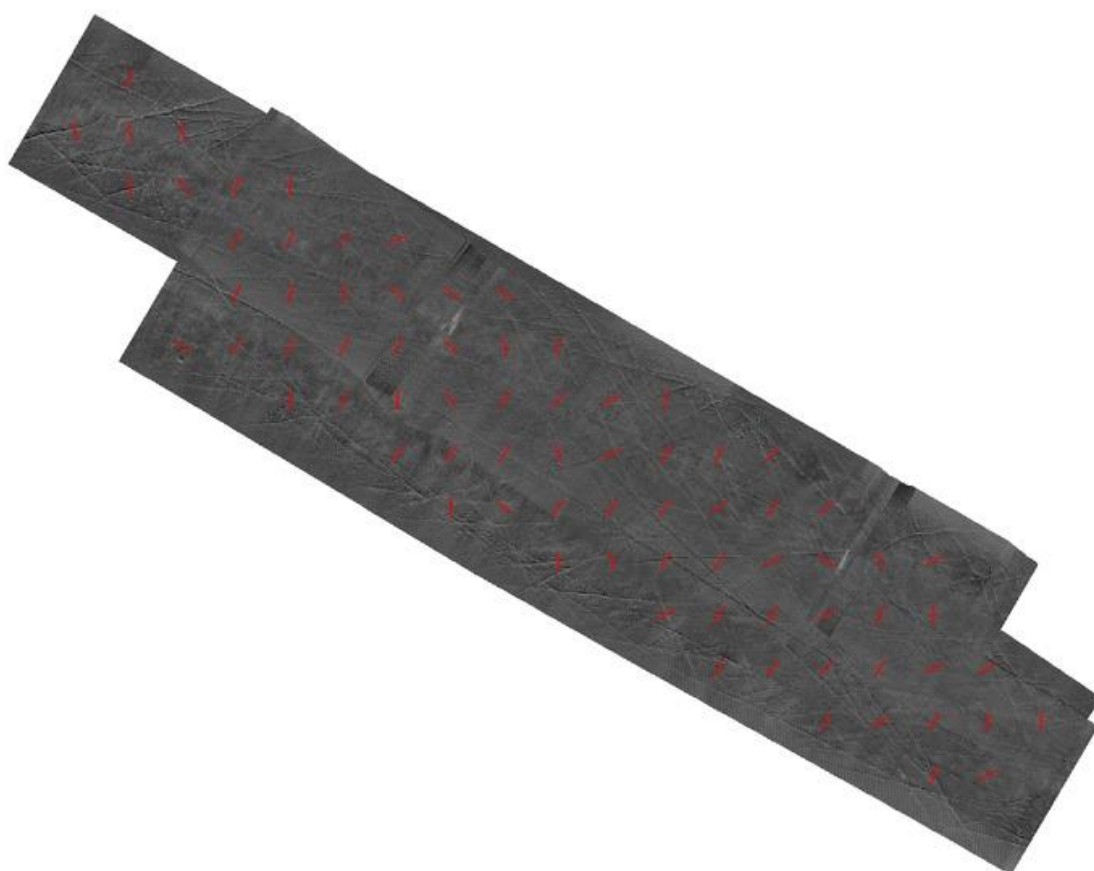
Na zobrażowaniu dna pierwszego z badanych rejonów, oznaczonym identyfikatorem BO_OC_APR18_4, wykryto 5 obiektów spełniających kryteria zajmowania minimalnej powierzchni, zaś jeden z nich został poddany wizualnej inspekcji. Wyniki detekcji w postaci fragmentu uzyskanego sonogramu oraz zdjęcia rozpoznanego celu zostały przedstawione na rysunku 9.15.



Rysunek 9.15 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_APR18_4

Pomiary zarejestrowanego echa badanego obiektu referencyjnego wskazywały, że charakteryzował się on wymiarami 2,3 m x 1,8 m. Cel wykazywał również silne właściwości wpływające na lokalne zmiany pola magnetycznego Ziemi. Bezpośrednia obserwacja przy pomocy kamery zainstalowanej na pokładzie pojazdu ROV wskazywała, że obiekt ten składał się najprawdopodobniej pierwotnie z kilku warstw, zaś jego zewnętrzna powłoka była silnie skorodowana. Obszar badań BO_OC_APR18_4 znajdował się w południowo

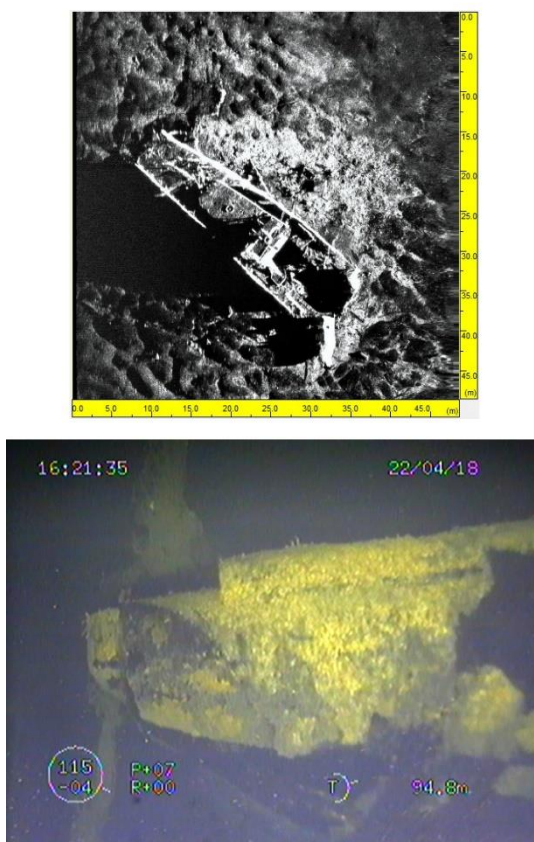
wschodniej części rejonu zatapiania amunicji chemicznej w akwenu Głębi Bornholm. W związku z powyższym, zaistniało podejrzenie, że wykryty obiekt referencyjny jest najprawdopodobniej pochodzenia militarnego. Konsultacja z ekspertami z Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni oraz analiza raportu dotyczącego zatapiania amunicji chemicznej w tym regionie, przygotowanego na potrzeby budowy rurociągu Nord Stream (Nord Stream ESPOO, 2009), potwierdziły, że cel ten to w rzeczywistości zapalnik bomby KC-250 (niem. *Kampfstoff Cylindrisch*), która mogła zawierać w sobie iperyt siarkowy. Na zobrazowaniu sonarowym BO_OC_APR18_4 widoczne były również regularne zagłębienia w dnie w postaci bruzd. Wyniki ich analiz zostały zaprezentowane na rysunku 9.16.



Rysunek 9.16 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_APR18_4 w oknach przesuwanych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

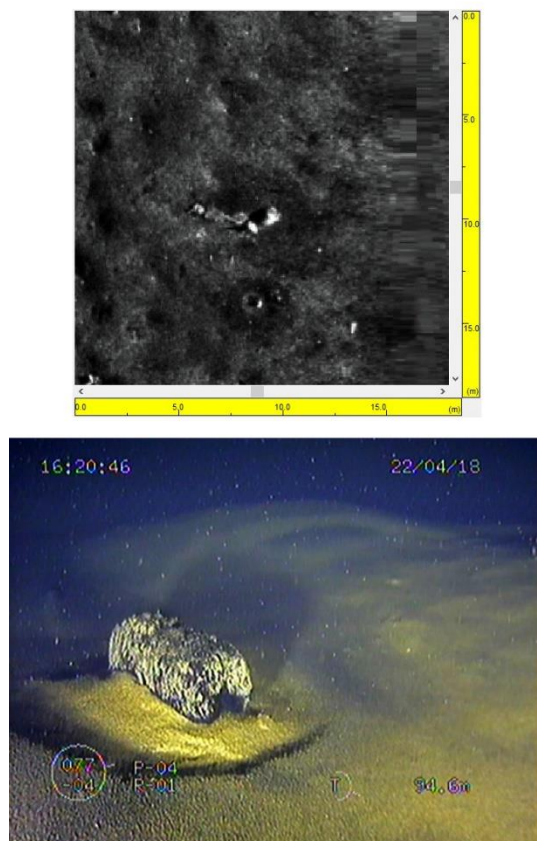
W obrębie rejonu oznaczonego identyfikatorem BO_OC_MAR16_3 wykryto na dnie 109 obiektów antropogenicznych. Dwa z nich zidentyfikowano i poddano wizualnej inspekcji z wykorzystaniem platformy ROV (rys. 9.17 oraz 9.18). Podczas rejestracji danych służących do opracowania mozaiki sonarowej BO_OC_MAR16_3 nie przeprowadzono akwizycji danych magnetometrycznych. Rozpoznanie materiałów, z których zbudowane

były identyfikowane cele odbywało się w związku z powyższym na podstawie obserwacji przeprowadzonych przy wykorzystaniu kamery pojazdu ROV.



Rysunek 9.17 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_MAR16_3

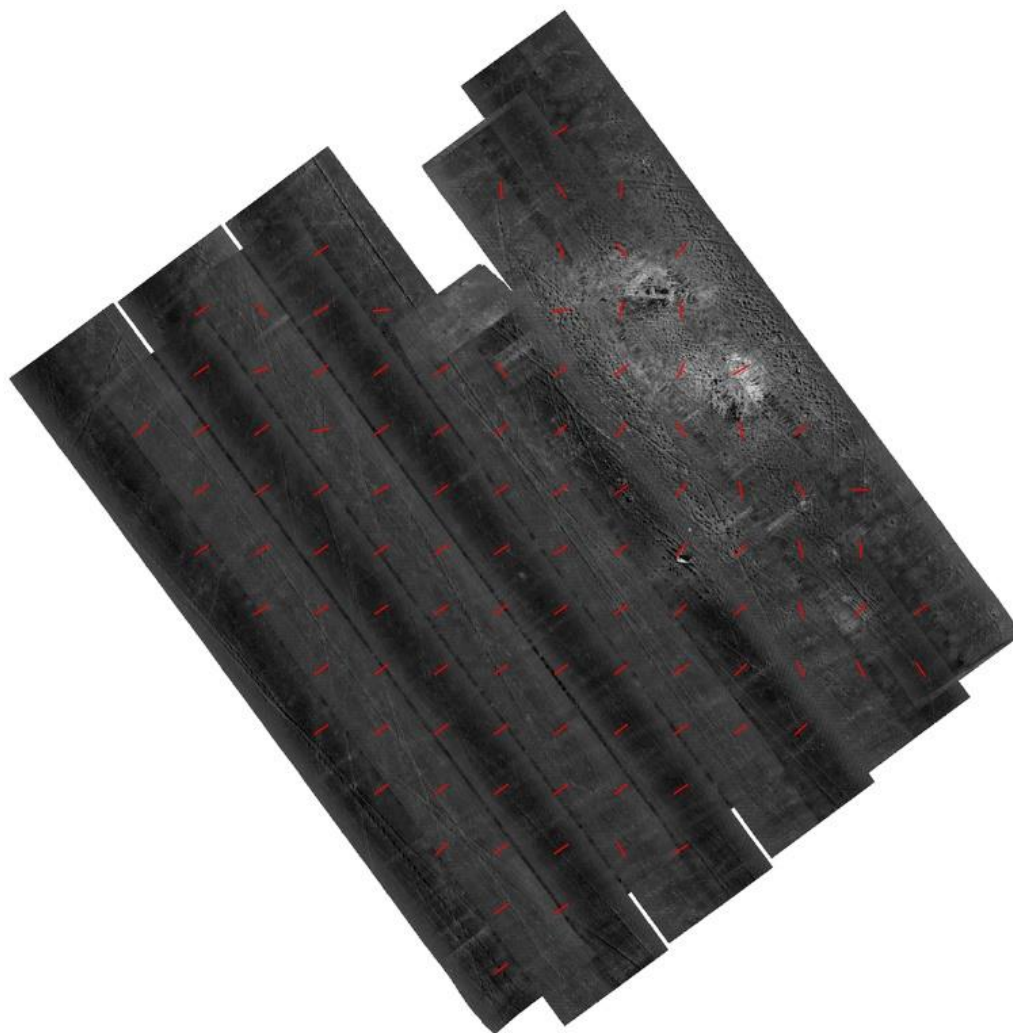
Pierwszym ze zidentyfikowanych obiektów referencyjnych był fragment nierozpoznanego wraku o wymiarach 32 m x 9 m. Widoczna na zobrazowaniu sonarowym część kadłuba wraz z nadbudówką należała do jednostki, która w trakcie zatonięcia została rozerwana, a jej pozostałe fragmenty spoczywały w odległości ok. 80 m od obserwowanego celu. Ponadto, znaczna większość obiektów wykrytych w drodze analiz sonogramu BO_OC_MAR16_3 znajdowała się w bezpośrednim sąsiedztwie wraku. Były to elementy wyposażenia i konstrukcji zniszczonej jednostki. Podobnie jak w przypadku wraku widocznego na mozaice OC_MAR17_GD3, fragment obserwowanej zatopionej jednostki był również pokryty sieciami widmo. Ostro zakończona wyrwa w burcie wraku oraz widoczne na poszyciu ogniska korozji wskazywały, że rozpoznawany obiekt był zbudowany z metalu. Nie zaobserwowano jednak na nim dużych skupisk organizmów bentosowych. Analizowany obiekt referencyjny został zaklasyfikowany do kategorii wraków występujących na dnie Morza Bałtyckiego.



Rysunek 9.18 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_MAR16_3

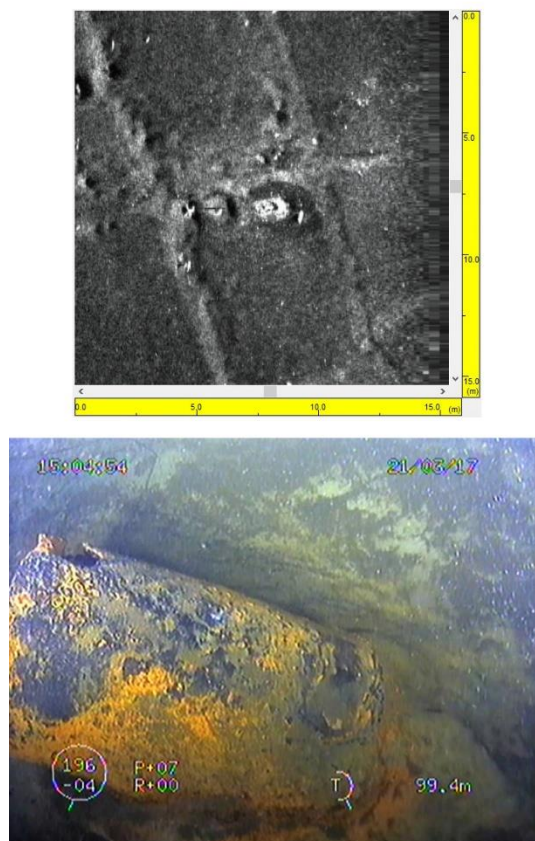
Drugim z celów referencyjnych, zlokalizowanym w obrębie mozaiki BO_OC_MAR16_3, był cylindryczny pływak wykonany najprawdopodobniej z ciasno sprasowanego tworzywa sztucznego. Pomiarzy uzyskanego echa sonarowego wskazywały, że jego wymiary wynosiły ok. 0,9 m x 0,5 m. Tego typu pływaki są wykorzystywane przez załogi jednostek rybackich podczas połowów z użyciem np. sieci stawnych. Element ten stanowił zapewne wyposażenie opisywanej powyżej zatopionej jednostki, gdyż znajdował się ok. 32 m od wykrytego wraku. Powierzchnia pływaka była w stanie rozkładu i nie zaobserwowano na niej śladów bytowania przedstawicieli flory lub fauny bentosowej Morza Bałtyckiego. Obiekt ten został przypisany do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych spoczywających na dnie Bałtyku.

Poza celami antropogenicznymi, na zobrazowaniu sonarowym BO_OC_MAR16_3 dostrzec można było również bruzdy występujące na powierzchni dna. Wyniki ich analiz zostały przedstawione na rysunku 9.19.



Rysunek 9.19 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_MAR16_3 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

Analiza zobrazowania sonarowego oznaczonego identyfikatorem OC_MAR17_BO2c dostarczyła informacji o lokalizacji 15 obiektów antropogenicznych na dnie, które spełniały przyjęte wymaganie zajmowania minimalnej powierzchni. Spośród nich wybrano jeden cel jako referencyjny, który został rozpoznany z wykorzystaniem systemu telewizji podwodnej na zdalnie sterowanym pojeździe (rys. 9.20). W rejonie tym nie przeprowadzono badań z wykorzystaniem magnetometru, dlatego identyfikacja obserwowanego obiektu odbywała się tylko na podstawie materiałów zarejestrowanych przy pomocy kamery platformy ROV.

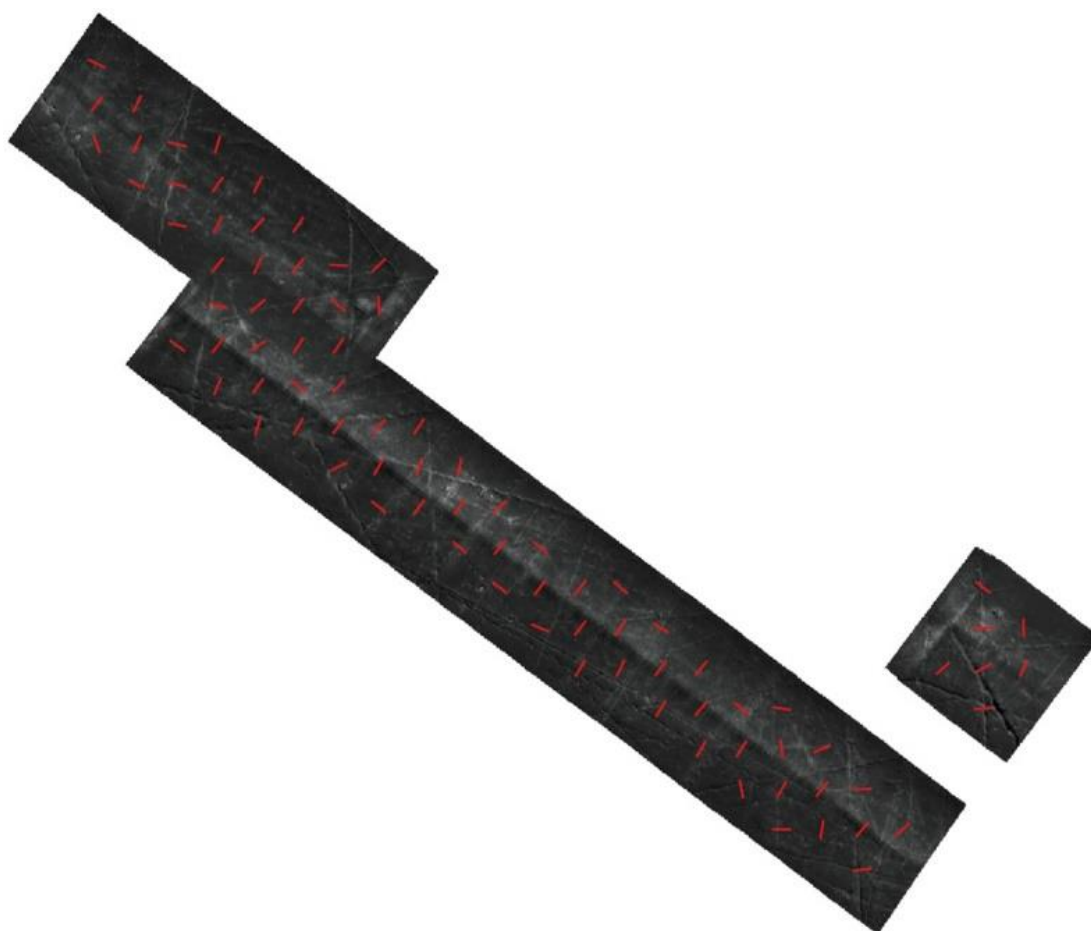


Rysunek 9.20 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_BO2c

Pomiary echa sonarowego rozpoznawanego obiektu wskazywały, że jego wymiary wynosiły w przybliżeniu 1,3 m x 0,4 m. Na podstawie analizy kształtu celu referencyjnego widocznego na fragmencie sonogramu prezentowanego na górnym panelu rysunku 9.20 można było stwierdzić, że widoczny na nim przedmiot był cylindryczny oraz rozczłonkowany. Bezpośrednia obserwacja identyfikowanego obiektu wskazywała, że był on w znacznym stopniu skorodowany, a także częściowo zagrzebany w osadach dennych Głębi Bornholm. Ponadto, w jego bliskim sąsiedztwie zlokalizowane były mniejsze fragmenty, które prawdopodobnie pierwotnie były częścią rozpoznawanego celu. W pobliżu, a także bezpośrednio na obiekcie nie zaobserwowano śladów występowania organizmów żyjących przy powierzchni dna. Warto również zaznaczyć, że 5 z 14 pozostałych celów wykrytych w obrębie mozaiki OC_MAR17_BO2c znajdowało się w niedalekiej odległości od badanego przedmiotu. Na podstawie przeprowadzonych analiz kształtu i wymiarów, wizualnej inspekcji, konsultacji z ekspertami Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, a także w związku z faktem, iż opisywany obiekt był zlokalizowany na dnie akwenu, w obrębie którego dochodziło do zrzutów amunicji chemicznej pochodzącej

z czasów II wojny światowej, cel ten został przypisany do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym zatopionych w Morzu Bałtyckim.

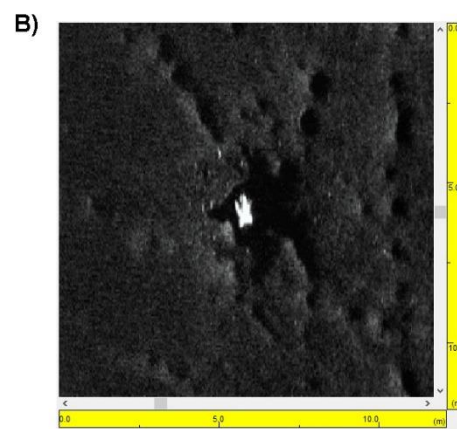
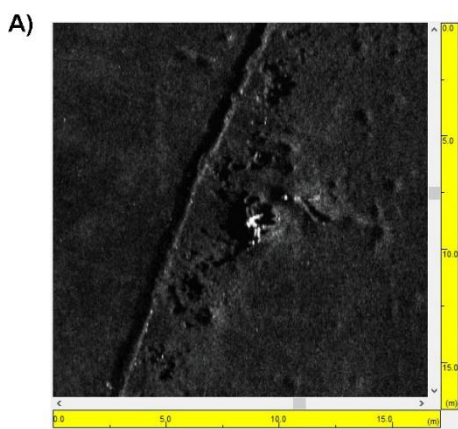
Na mozaice sonarowej OC_MAR17_BO2c można było zaobserwować również regularne linie w postaci bruzd powstałych na powierzchni dna morza. Wyniki analiz zagłębień utworzonych na skutek działalności człowieka w tym rejonie zostały zaprezentowane na rysunku 9.21. Z powodu małej powierzchni mozaiki OC_MAR17_BO2c rozmiar okien, w których obserwowano bruzdy na dnie został zmniejszony do wymiarów 15 m x 15 m.

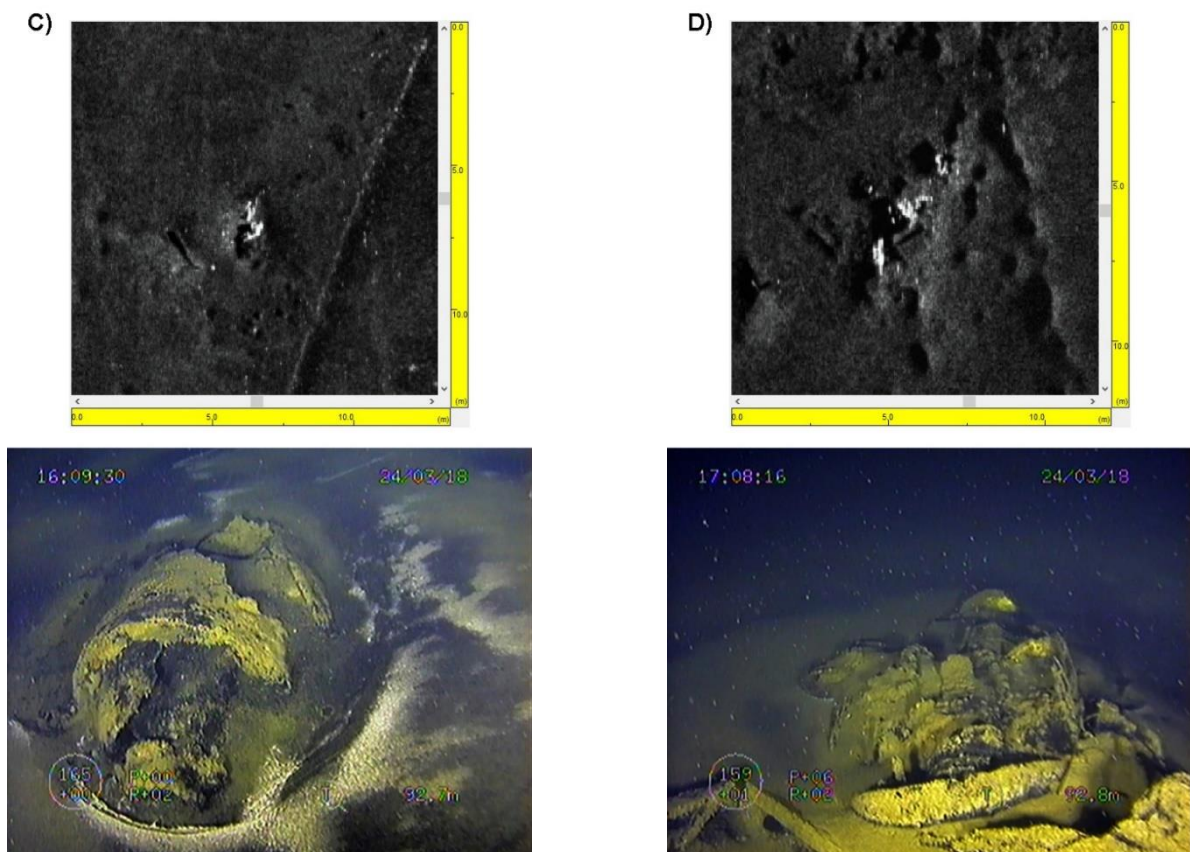


Rysunek 9.21 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu OC_MAR17_BO2c w oknach przesuwanych 15 m x 15 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

Ostatni z rejonów mapowania dna w obszarze C został oznaczony identyfikatorem BO_OC_SEP17_1. Na podstawie uzyskanego zobrazowania wyznaczono lokalizację 38 obiektów antropogenicznych spoczywających na podłożu morskim wspomnianego podobszaru. Z powodu znacznego rozproszenia wykrytych celów w obrębie badań, podjęto decyzję o przeprowadzeniu rozpoznania i wizualnej inspekcji 7 obiektów referencyjnych.

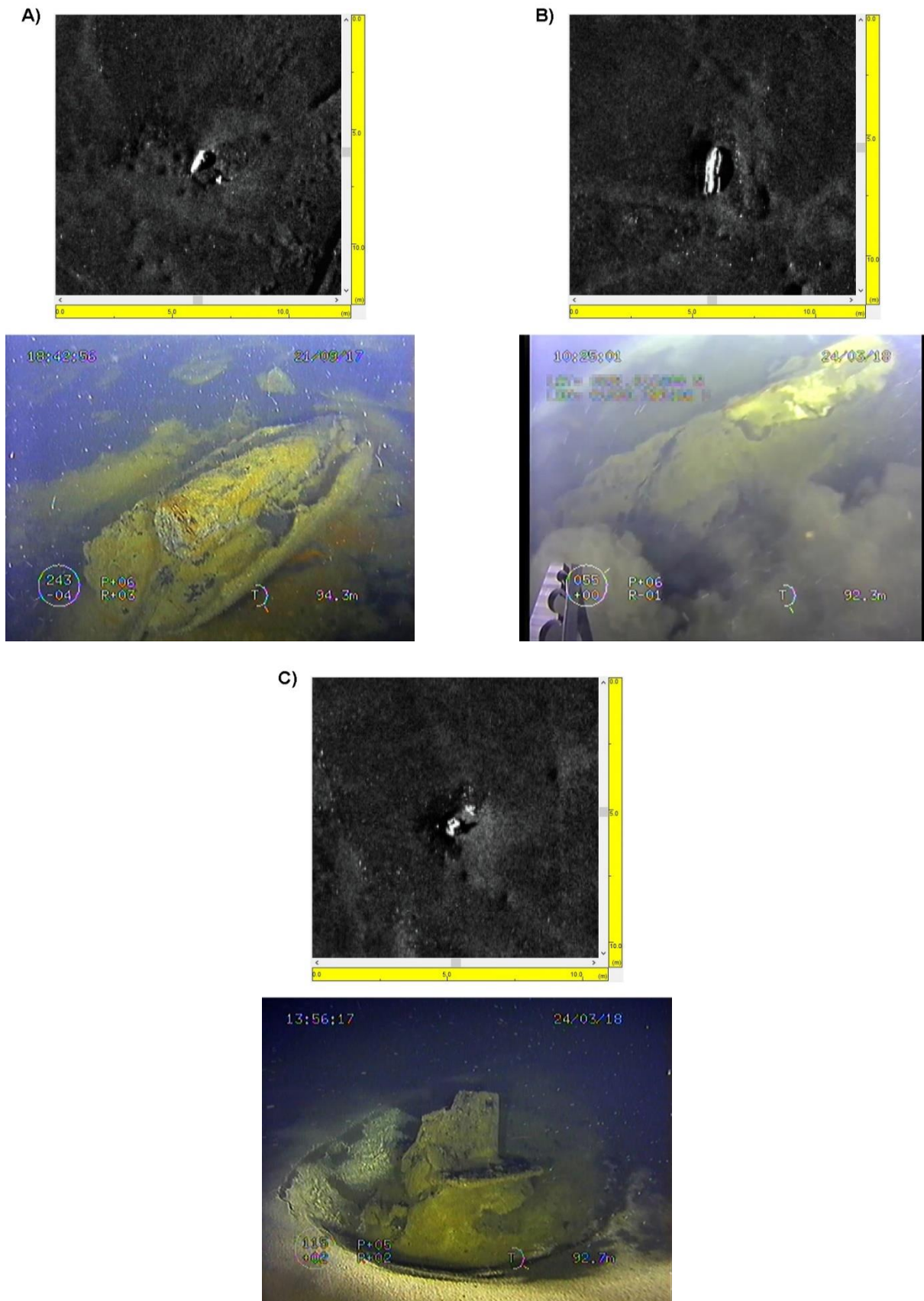
Uzyskane wyniki zostały przedstawione w postaci rysunków prezentujących obiekty podwodne zlokalizowane w północnej i południowej części mozaiki (rys. 9.22 oraz rys. 9.23). Dane zarejestrowane przy pomocy magnetometru wskazywały na występowanie silnych anomalii magnetycznych w miejscach detekcji rozpoznawanych celów. Należy zaznaczyć, że rejon badań BO_OC_SEP17_1 znajdował się w centralnej części obszaru, w którym dochodziło do celowego zatapiania amunicji chemicznej wyprodukowanej w trakcie II wojny światowej. W związku z tym, wszystkie cele referencyjne wykryte na dnie opisywanego podobszaru były klasyfikowane wstępnie jako obiekty o pochodzeniu militarnym. Ich weryfikacja przy wykorzystaniu pojazdu ROV potwierdziła to założenie.





Rysunek 9.22 Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji celów zlokalizowanych w północnej części mozaiki BO_OC_SEP17_1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci, D) – obiekt czwarty

Cztery pierwsze obiekty referencyjne, spoczywające na powierzchni dna w północnej części rejonu BO_OC_SEP17_1, charakteryzowały się następującymi wymiarami: 0,8 m x 0,5 m; 1,1 m x 0,4 m; 1,3 m x 0,5 m oraz 0,8 m x 0,5 m. Każdy z powyższych celów cechował się zaawansowanym stopniem korozji widocznej na ich powłokach zewnętrznych. Bezpośrednia obserwacja wymienionych obiektów umożliwiła ich identyfikację pomimo zaawansowanego stopnia rozkładu. Dzięki analizie kształtów i wymiarów wykrytych ech sonarowych, a także zaobserwowaniu podobnych obiektów jak w przypadku celu odnaniezonego w obrębie mozaiki BO_OC_APR18_4 (rys. 9.15), rozpoznawane przedmioty zidentyfikowano jako bomby lotnicze K.C. 250 zawierające najprawdopodobniej iperyt siarkowy. W sąsiedztwie opisywanych obiektów nie zaobserwowano śladów występowania przedstawicieli flory i fauny Morza Bałtyckiego.



Rysunek 9.23 Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji celów zlokalizowanych w południowej części mozaiki BO_OC_SEP17_1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci

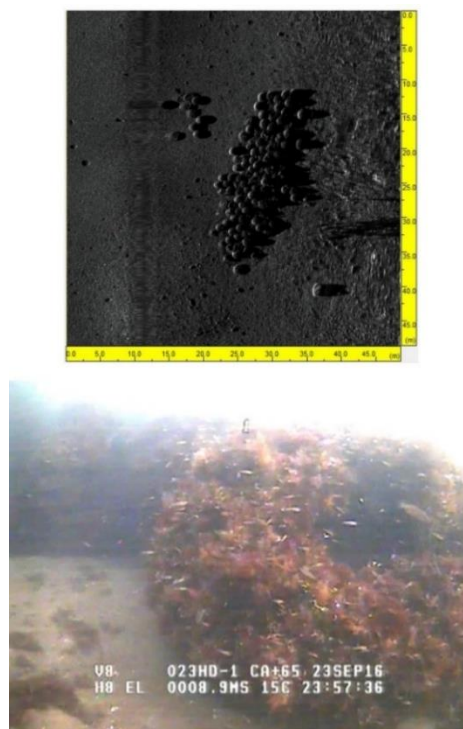
Echa rozpoznawanych obiektów referencyjnych widocznych w południowej części mozaiki BO_OC_SEP17_1 cechowały się wymiarami 1,2 m x 0,4 m; 2 m x 0,65 m i 0,8 m x 0,5 m. Podobnie jak w przypadku celów zlokalizowanych w północnym fragmencie obszaru badań, obiekty prezentowane na rysunku 9.23 charakteryzowały się znacznym stopniem korozji. Pomimo postępującemu procesowi rozkładu obiektów, na materiałach wideo zarejestrowanych przy pomocy platformy ROV można było zaobserwować elementy charakterystyczne dla bomb lotniczych K.C. 250 takie jak: stateczniki, cylindryczne skorupy oraz pojemniki na ładunki miotające. Na tej podstawie rozpoznawane przedmioty zostały przypisane do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym spoczywających na dnie Bałtyku. W bezpośrednim sąsiedztwie celów referencyjnych wykrywanych w południowej części rejonu BO_OC_SEP17_1 nie zaobserwowano organizmów bentosowych. Zobrazowanie dna BO_OC_SEP17_1 wskazywało, że na podłożu morskim w tym obszarze występowały regularne zagłębienia w wierzchniej warstwie dna, skierowane w różnych kierunkach. Wyniki ich analiz zostały zaprezentowane na rysunku 9.24. W przypadku mozaiki BO_OC_SEP17_1 bruzdy były wykrywane w oknie przesuwным o wymiarach 15 m x 15 m.



Rysunek 9.24 Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_SEP17_1 w oknach przesuwnych 15 m x 15 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami

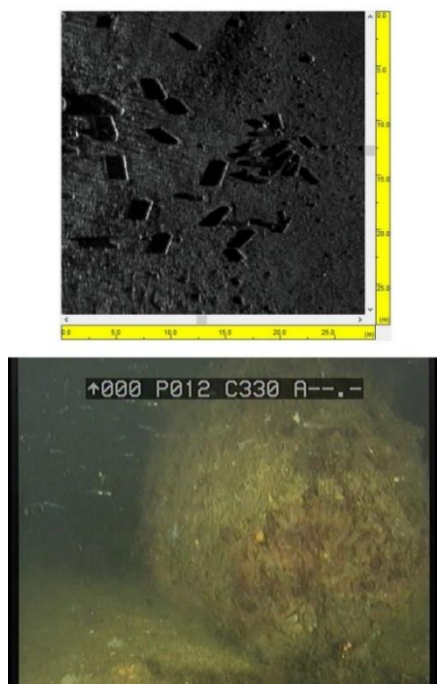
9.4 Obszar D – Zatoka Kilońska

W obszarze D, zlokalizowanym w obrębie akwenu Zatoki Kilońskiej, przeprowadzono pojedyncze mapowanie dna i rozpoznanie wykrytych na nim obiektów z wykorzystaniem platform AUV i ROV. Rejon, w którym prowadzono badania został oznaczony identyfikatorem KH_OC_SEP16_1v2, zaś w języku niemieckim strefa ta nazywana jest *Kolberger Heide*. Pomimo faktu, że mapowanie dna w obszarze D wykonano tylko w jednym jego fragmencie, powierzchnia uzyskanego zobrazowania była największa ze wszystkich badanych akwenów. Na podstawie otrzymanego sonogramu wykryto 280 obiektów o pochodzeniu antropogenicznym zalegających na podłożu morskim, które spełniały wymóg zajmowania minimalnej powierzchni na sonogramie równej $0,375\text{m}^2$. Wśród celów zaobserwowanych na dnie wyznaczono dwa klastry przedmiotów referencyjnych, które zostały rozpoznane z wykorzystaniem systemu telewizji podwodnej opartego na platformie ROV. Wyniki przeprowadzonych inspekcji zostały zaprezentowane na rysunkach 9.25 i 9.26. W rejonie KH_OC_SEP16_1v2 nie prowadzono pomiarów z wykorzystaniem magnetometru, w związku z tym rozpoznanie materiałów, z których zbudowane były obiekty w klastrach odbywało się na podstawie zebranych materiałów wideo.



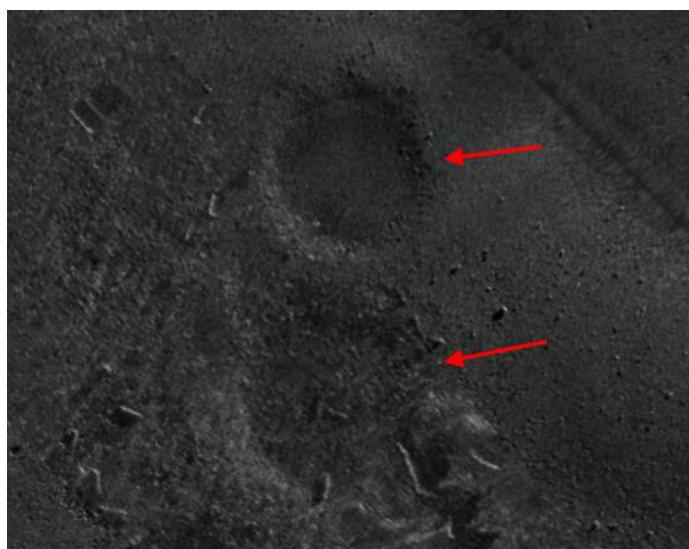
Rysunek 9.25 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu z pierwszego klastra celów w obrębie mozaiki KH_OC_SEP16_1v2

Pierwszy z dwóch klastrów celów referencyjnych zaobserwowany na sonogramie KH_OC_SEP16_1v2 składał się ze sferycznych obiektów o średnicy ok. 1 m, zaś wymiary całego zgrupowania widocznego na górnym panelu rysunku 9.25 wynosiły 28,5 m x 12 m. Na podstawie przeprowadzonego wizualnego rozpoznania grupy obiektów ustalono, że są one bogato porośnięte organizmami bentosowymi. Bezpośrednie obserwacje ujawniły również, że obiekty tworzące analizowany klaster zbudowane są najprawdopodobniej ze stali. W niektórych przypadkach zewnętrzne powłoki badanych celów były silnie skorodowane. Obiekty w analizowanym klastrze częściowo zalegały jedne na drugich, co powodowało ich wzajemne przysłanianie się. W konsekwencji wyznaczenie dokładnej liczby wykrytych celów referencyjnych w pierwszym zgrupowaniu nie było możliwe. Ich manualne zliczanie pozwoliło ustalić przybliżoną ilość obiektów wynoszącą ok. 76 sztuk. Otrzymany wynik jest bliski danym literaturowym, które szacują tę liczbę na ok. 78 celów (Kampmeier i in. 2020). Na podstawie zebranych materiałów faktograficznych ustalono, że wykryty klaster obiektów składał się z min zatopionych celowo. Badania prowadzone w ramach projektu UDEMM (ang. *Environmental Monitoring During Delaboration of Munition in the Sea*) potwierdziły to założenie (Kampmeier i in. 2020). W związku z powyższym, cele wykryte w obrębie pierwszego klastra w obszarze KH_OC_SEP16_1v2 zostały zaklasyfikowane do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym.



Rysunek 9.26 Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu z drugiego klastra celów w obrębie mozaiki KH_OC_SEP16_1v2

Drugi z klastrow celów referencyjnych, widoczny na zobrażowaniu KH_OC_SEP16_1v2, utworzony był z podłużnych, cylindrycznych obiektów rozlokowanych blisko siebie na dnie. Wymiary pojedynczego obiektu wyniosły w przybliżeniu ok. 2,5 m x 0,3 m. Podobnie jak w przypadku pierwszego klastra, cele należące do drugiego zgrupowania częściowo przysłaniały się wzajemnie oraz były silnie skolonizowane przez organizmy bentosowe. Manualne zliczanie pozwoliło określić ich przybliżoną liczebność, która wynosiła ok. 23 sztuki. Zewnętrzne powłoki wykrytych obiektów były zbudowane ze stali, która częściowo uległa procesowi korozji. Cele referencyjne należące do drugiego klastra widocznego na zobrażowaniu KH_OC_SEP16_1v2 zostały rozpoznane jako angielskie miny lądowe, które wydobyto i ponownie ulokowano na dnie rejonu *Kolberger Heide* na skutek prac związanych z oczyszczaniem dna Zatoki Kilońskiej (Kampmeier i in. 2020). W związku z powyższym, przedmioty tworzące drugie zgrupowanie celów zostały również przyporządkowane do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym. Dodatkowo, w bliskim sąsiedztwie obu klastrow zaobserwowano liczne szare bryły zalegające na podłożu morskim. Na zobrażowaniu sonarowym KH_OC_SEP16_1v2 nie wykryto regularnych zagłębień w dnie w postaci bruzd, natomiast można było na nim zaobserwować okrągłe kraterki, które powstały na skutek celowych detonacji obiektów o pochodzeniu militarnym w tym obszarze (rys. 9.27). Warto tu zauważyć, że detonacje te były prowadzone z wykorzystaniem podwodnych kurtyn powietrznych w celu ograniczenia skutków wybuchów na zwierzęta morskie. Szare bryły to najprawdopodobniej fragmenty materiałów wybuchowych wypełniających neutralizowane środki bojowe.



Rysunek 9.27 Fragment mozaiki sonarowej KH_OC_SEP16_1v2 z widocznymi kraterami powstałymi na skutek neutralizacji niewybuchów z wykorzystaniem podwodnych kurtyn powietrznych

9.5 Podsumowanie wyników

Na podstawie przeprowadzonych analiz 11 zobrażeń dna uzyskanych w obszarach badań A, B, C oraz D wykryto łącznie 682 obiekty o wysoce prawdopodobnym pochodzeniu antropogenicznym, które spoczywały na podłożu morskim. Z pośród wszystkich znalezisk wybrano 26 obiektów oraz 2 duże zgrupowania celów referencyjnych, które poddano inspekcji i identyfikacji, a następnie przyporządkowano je do jednej z trzech wymienionych w tabeli 9.2 kategorii.

Tabela 9.2 Zestawienie wyników badań skali oddziaływania antropogenicznego na dno obszarów A, B, C oraz D

Obszar badań:	Liczba wykonanych mapowań dna:	Całkowita liczba wykrytych obiektów:	Liczba rozpoznanych i sklasyfikowanych obiektów referencyjnych:	Liczba rozpoznanych obiektów referencyjnych w kategorii:			Obecność bruzd na dnie:
				duże śmieci i odpady przemysłowe	obiekty o pochodzeniu militarnym	wraki	
Zatoka Gdańska (obszar A)	3	86	5	3	1	1	-
Głębia Gdańska (obszar B)	3	149	10	7	2	1	+
Głębia Bornholmska (obszar C)	4	167	11	1	9	1	+
Zatoka Kilońska (obszar D)	1	280	2 duże klastry obiektów (łącznie ≥ 99)	0	≥ 99	0	- / inne ślady na dnie

Analizując dane zaprezentowane w tabeli 9.2 można zaobserwować, że dno każdego z obszarów badań było poddane oddziaływaniu antropogenicznemu. Głównym źródłem tego oddziaływania były obiekty spoczywające na dnie, które cechowały się różnymi wymiarami, kształtami oraz pochodzeniem. W przypadku 3 z 4 obszarów badań (B, C i D) na powierzchni podłoża morskiego wykryto również inne ślady powstałe na skutek działalności człowieka. Szczegółowe omówienie uzyskanych wyników zostanie zaprezentowane w pozostałych rozdziałach niniejszej pracy.

10. Dyskusja

W niniejszym rozdziale przedyskutowane zostaną metody wykorzystane do mapowania dna morskiego badanych obszarów oraz identyfikacji obiektów antropogenicznych występujących na nim. Oceniona będzie również skuteczność technik zastosowanych do przetwarzania uzyskiwanych danych. W dalszych częściach rozdziału 10., przedstawiono także w jaki sposób poszczególne typy wykrywanych obiektów antropogenicznych mogą oddziaływać na ekosystemy bentosowe badanych obszarów Morza Bałtyckiego. Dodatkowo, omówiony zostanie wpływ bruzd na wspomniane systemy ekologiczne.

10.1 Zastosowana metodyka badań i analizy uzyskiwanych danych

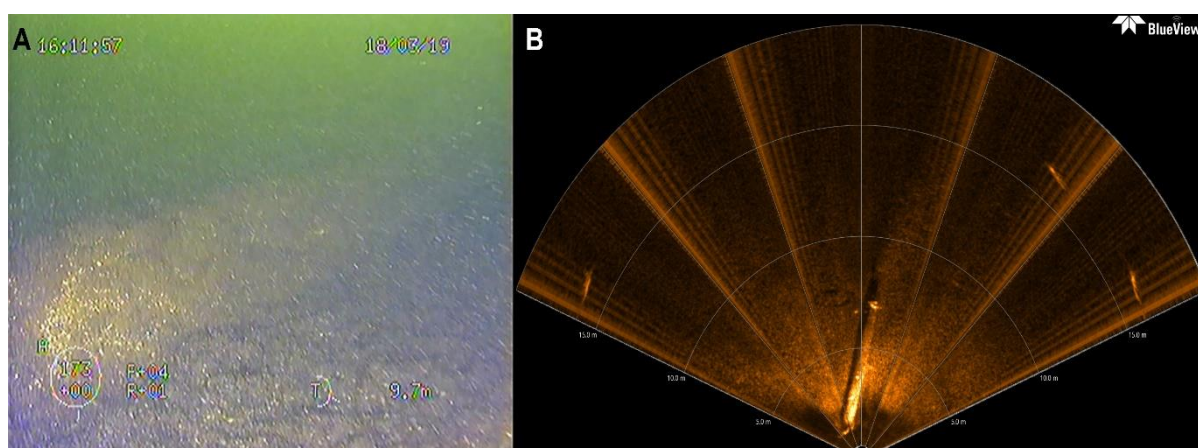
Głównymi narzędziami wykorzystywanymi w badaniach opisanych w niniejszej pracy, były zrobotyzowane platformy podwodne wyposażone w czujniki akustyczne, magnetometryczne oraz kamery optyczne. Aparatura ta pozwoliła na przeprowadzenie w stosunkowo krótkim czasie rozpoznania dużych fragmentów powierzchni dna badanych obszarów, w obrębie których spodziewane było napotkanie śladów aktywności człowieka na podłożu morskim.

Obiekty o pochodzeniu antropogenicznym oraz pozostałości po działalności ludzkiej na dnie zostały wykryte przy pomocy sonaru bocznego zainstalowanego na pojeździe AUV, który nadawał impulsy akustyczne o wysokiej częstotliwości. Uzyskiwane w ten sposób dwuwymiarowe zobrażenia dna były poddawane dalszym analizom. Alternatywę dla wysokoczęstotliwościowych sonarów bocznych podczas realizacji podobnych badań mogą stanowić współczesne echosondy wielowiązkowe. Urządzenia te również umożliwiają tworzenie dwuwymiarowych zobrażeń dna o wysokiej rozdzielczości na podstawie rejestracji ilości energii akustycznej rozproszonej wstecz od podłoża morskiego i obiektów spoczywających na nim. Z uwagi na sposób akwizycji danych akustycznych przez oba typy urządzeń, sonary boczne pozwalają na mapowanie większej powierzchni dna wzdłuż pojedynczego transektu. Z drugiej strony, echosondy wielowiązkowe umożliwiają generowanie trójwymiarowych zobrażeń dna. Precyzyjnie wyznaczony parametr wysokościowy, niemożliwy do uzyskania przy pomocy sonarów bocznych, pozwala na określenie dodatkowych cech geomorfologicznych powierzchni podłoża morskiego takich

jak jej zmienność, nachylenie, krzywizna czy szorstkość (Lecours i in., 2016). Cechy te są przydatne podczas detekcji i monitorowania stanu obiektów antropogenicznych widocznych na dnie (Kampmeier i in., 2020). Niemniej, echosondy wielowiązkowe z uwagi na ich dużą czułość na wszelkiego rodzaju przechyły i przekoszenia rama instalacyjnych na jednostkach pomiarowych wymagają każdorazowo przed przystąpieniem do akwizycji danych kilkuetapowej kalibracji, co dodatkowo wydłuża czas potrzebny na realizację badań. Ponadto, zbiory rejestrowane przy pomocy wspomnianej aparatury zajmują znacznie więcej przestrzeni dyskowej niż dane sonarowe, a także ich opracowanie jest bardziej złożone. W konsekwencji, przetworzenie danych zarejestrowanych z wykorzystaniem echosondy wielowiązkowej w obszarze o dużej powierzchni może wymagać więcej środków i czasu, a także wiązać się będzie z otrzymaniem danych o niższej rozdzielczości niż w przypadku sonarów bocznych. Nie bez znaczenia jest również cena obu typów aparatury, która w przypadku systemów wielowiązkowych jest najczęściej znacznie wyższa. Idealnym rozwiązaniem podczas realizacji badań związanych z detekcją obiektów antropogenicznych i śladów działalności człowieka na dnie jest synteza danych zarejestrowanych przy pomocy sonaru bocznego, echosondy wielowiązkowej oraz magnetometru. Takie podejście zapewnia pełne spektrum informacji nie tylko o poszukiwanych celach oraz pozostałościach po aktywności ludzkiej na dnie, ale również o podłożu morskim i jego zmienności w obrębie badanych obszarów. Niemniej, wykorzystanie sonaru bocznego jako głównego narzędzia w badaniach prezentowanych w niniejszej pracy, pomimo jego niedoskonałości wynikających z geometrii akwizycji danych, umożliwiło osiągnięcie zamierzonego celu.

Bezpośrednia obserwacja była jedyną możliwością przeprowadzenia prawidłowego rozpoznania oraz określenia stanu referencyjnych obiektów antropogenicznych występujących na dnie badanych obszarów. W przypadku Morza Bałtyckiego, gdzie przejrzystość wody morskiej jest niska zadanie to było dodatkowo utrudnione. W związku z tym, identyfikacja odnalezionych na dnie celów w badanych obszarach była realizowana przy pomocy systemu telewizji podwodnej opartego na pojeździe ROV. Rozwiązania wykorzystujące platformy holowane z zainstalowanymi kamerami optycznymi sprawdziłyby się jedynie w płytkich rejonach badań (obszary A i D), gdzie poszukiwane obiekty referencyjne spoczywały na dnie zlokalizowanym na niskiej głębokości. Ponadto, takie podejście wymagałoby również bardzo dobrych warunków hydrometeorologicznych podczas prowadzenia prac, a także jednostki badawczej wyposażonej w system dynamicznego pozycjonowania, w celu utrzymania dokładnej pozycji nad obiektem, który był poddawany inspekcji. Alternatywę dla systemów telewizji podwodnej mogą stanowić

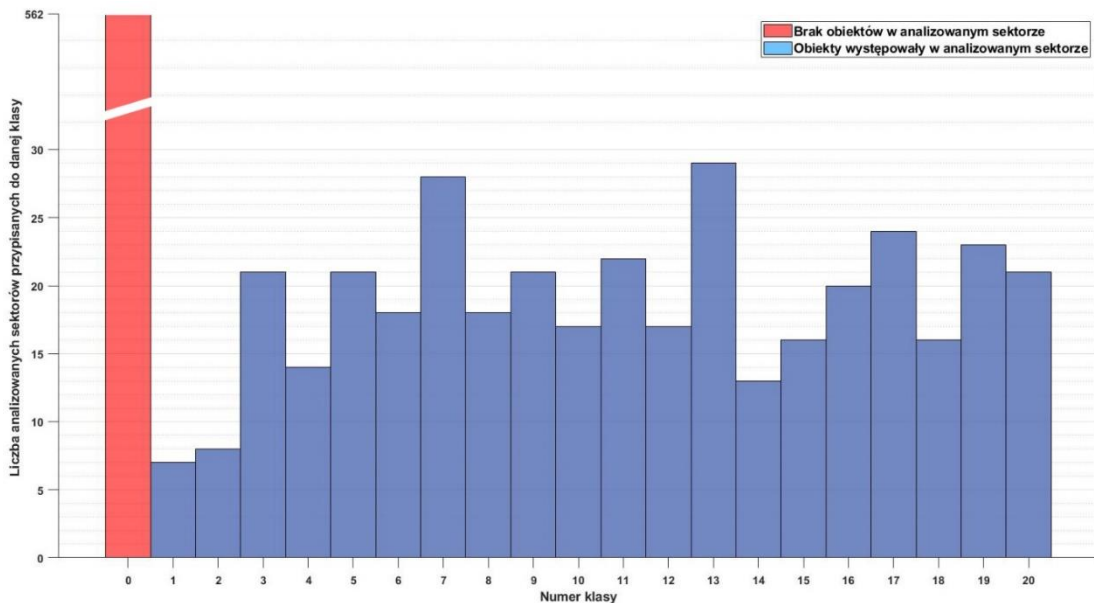
wyszkoleni pływonurkowie. Wykorzystanie ludzi do prowadzenia podwodnych prac rozpoznawczych było i jest szeroko stosowane na świecie (Brown i Wang, 2013; Malinverni i in., 2020; Kampmeier i in., 2020). Podstawowym parametrem badanego akwenu, który limituje możliwość wykorzystania pływonurków w zadaniach polegających na inspekcji i identyfikacji obiektów podwodnych jest głębokość. Na głębokościach większych niż ok. 40 m (przy ciśnieniu 500 kPa), pływonurkowie, którzy wykonują prace podwodne są zmuszeni do wykorzystywania specjalnej aparatury i odpowiednich mieszanek gazów, które pozwalają im na oddychanie w takich warunkach (Dollette, 2004). Ponadto, po zakończeniu prowadzenia prac na takich głębokościach, pływonurek musi przejść dekompresję, która jest czasochłonna. Ostatecznie, nakład czasowy potrzebny na przygotowanie i bezpieczną realizację nurkowania w głębszych akwenach (np. w obszarach B i C) jest niewspółmierny do rzeczywistego czasu pracy pływonurka przy powierzchni dna. Operacje tego typu są również bardzo kosztowne, niebezpieczne oraz wymagają zespołu specjalistycznie przeszkolonego personelu. W związku z powyższymi faktami, wykorzystanie platformy ROV do identyfikacji i inspekcji referencyjnych obiektów antropogenicznych na dnie było najlepszym rozwiązaniem, ponieważ takie podejście umożliwia przeprowadzenie zaplanowanych prac w bezpieczny sposób oraz w relatywnie krótkim czasie. Zastosowanie pojazdu podwodnego pozwoliło na oględziny poszukiwanych obiektów w wielu płaszczyznach. Dzięki dodatkowemu wyposażeniu w postaci wielowiązkowego sonaru skanującego BlueView, operator sprzętu mógł docierać do podwodnych celów nawet w warunkach ograniczonej widoczności do 1 m (rys. 10.1).



Rysunek 10.1 Inspekcja obiektu podwodnego w warunkach niskiej przejrzystości wody: obraz z kamery optycznej (A) oraz sonaru wielowiązkowego BlueView (B) zainstalowanych na platformie ROV Falcon

Ocena skali oddziaływania człowieka na dno badanych obszarów była realizowana głównie na podstawie wyników analiz mozaik sonarowych, które były przetwarzane przy pomocy metody półautomatycznej detekcji obiektów antropogenicznych na powierzchni podłoża morskiego, a także bezpośrednich obserwacji wykrytych celów referencyjnych. Procedura ta polegała na wyznaczeniu sześciu parametrów kolejnych przetwarzanych fragmentów obrazów sonarowych (sektorów) przy wykorzystaniu statystyk I i II rzędu, dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera z zaimplementowanym górnoprzepustowym filtrem oraz późniejszej klasyfikacji uzyskanych wskaźników przy pomocy niehierarchicznego algorytmu analizy skupień opartego na metodzie k -średnich. W dalszych krokach, z uzyskiwanych rezultatów klasyfikacji sonogramów ręcznie wybierano tę jedną z 20 klas, do której trafiały obiekty widoczne na zobrazowaniach sonarowych i poddawano ją dalszym transformacjom, które polegały m.in. na konwersji danych rastrowych na dane wektorowe, filtracji oraz analizie przestrzennej. Opisywana powyżej metodyka dała zadowalające rezultaty detekcji celów na dnie o określonej powierzchni, jednak tego rodzaju podejście nie jest wolne od wad. Główną niedoskonałością zastosowanej procedury była konieczność ręcznego wyboru klasy, do której przypisywane były obiekty widoczne na dnie w drodze klasyfikacji wyznaczonych parametrów obrazów sonarowych z wykorzystaniem metody k -średnich dla kolejnych sektorów tworzących mozaiki sonarowe. Przyczyną tego stanu rzeczy był fakt, iż centroidy klas w przestrzeni klasyfikacyjnej w obrębie każdego z analizowanych sektorów były generowane losowo. W praktyce oznaczało to, że obiekty widoczne na dnie trafiały do jednej z 20 klas, jednak przed zakończeniem klasyfikacji nie można było ustalić jej numeru. Całkowita liczba sektorów tworzących wszystkie mozaiki sonarowe, wewnątrz których wyznaczano parametry obrazów sonarowych wykorzystywane do ich klasyfikacji wynosiła 962. Częstość występowania obiektów antropogenicznych w odpowiednich klasach dla wszystkich przetworzonych sektorów została przedstawiona na rysunku 10.2. Analizując histogram zaprezentowany na wspomnianym rysunku można jednoznacznie stwierdzić, że cele wykrywane na dnie występowały w przybliżeniu równomiernie we wszystkich klasach. Wyjątki stanowią dwie grupy klas: 1 i 2 oraz 7 i 13, gdzie poszukiwane obiekty występowały odpowiednio najrzadziej oraz najczęściej. Należy również zaznaczyć, że w znaczącej liczbie analizowanych sektorów wszystkich mozaik sonarowych (562 z 962) nie zaobserwowano występowania celów podwodnych. Kolejną kwestią mogącą wzbudzać wątpliwości dotyczące uniwersalności zaproponowanej metody analizy uzyskiwanych zobrazowań dna

o wysokiej rozdzielczości jest dobór parametrów obrazów wykorzystanych do ich klasyfikacji i w konsekwencji wykrywania celów antropogenicznych.

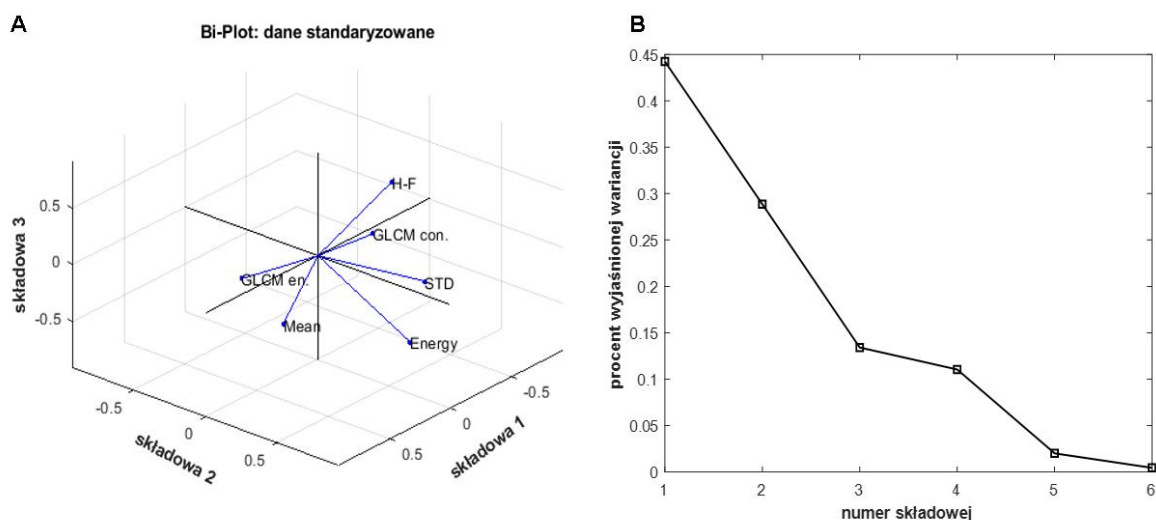


Rysunek 10.2 Częstość obserwacji obiektów antropogenicznych w poszczególnych klasach dla 926 analizowanych sektorów tworzących wszystkie przetworzone mozaiki sonarowe. Dodatkowo na rysunku przedstawiono klasę 0, do której przypisywano sektory, w obrębie których nie wykryto celów na dnie

W sposób empiryczny przetestowano kombinację 16 różnych statystyk zaproponowanych przez Haralick'a, przy pomocy których można opisywać obrazy rastrowe. Z pośród nich wybrano 5, które dawały najlepsze wyniki w procesie klasyfikacji przykładowych fragmentów sonogramu pochodzących z mozaiki sonarowej BO_OC_SEP17_1. Wybrane statystyki umożliwiły skuteczną detekcję obiektów w analizowanych fragmentach zobrazowań sonarowych. Wykrywane cele antropogenicznych były przyporządkowywane za każdym razem tylko do jednej z 20 klas. Dodatkowy deskryptor uzyskany na drodze zastosowania dwuwymiarowej szybkiej transformacji Fouriera z zaimplementowanym górnoprzepustowym filtrem pozwolił na zwiększenie skuteczności działania algorytmu. Jego wykorzystanie pozwoliło na odrzucenie błędnie sklasyfikowanych, pojedynczych pikseli i wyraźniejsze uwydatnienie krawędzi poszukiwanych obiektów.

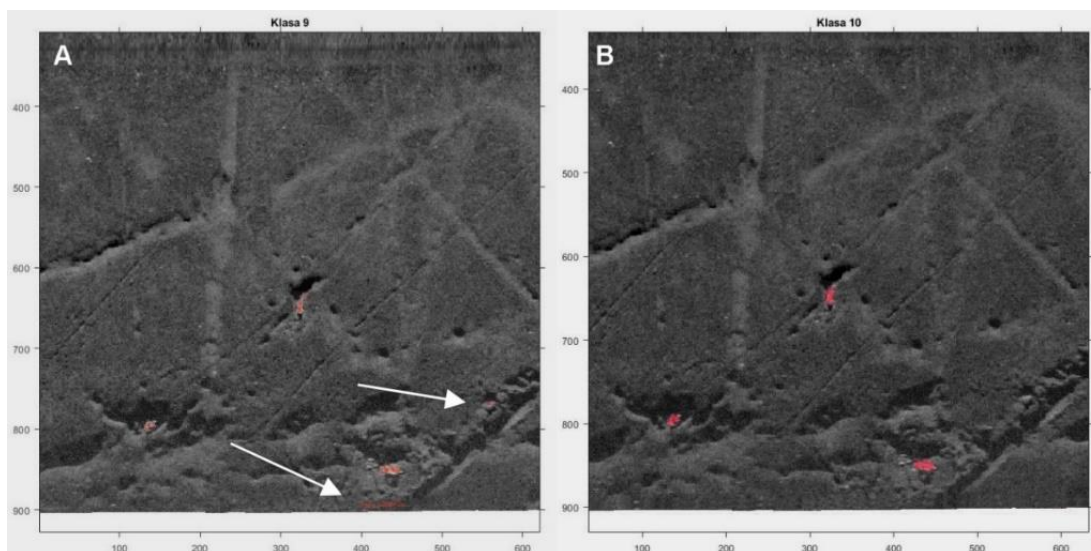
Zestaw 6 wybranych charakterystyk obrazów sonarowych został następnie poddany analizie składowych głównych (ang. *PCA - Principal Component Analysis*). Idea stosowania analizy składowych głównych służy zazwyczaj do redukcji liczby zmiennych opisujących zjawiska, czy do odkrycia prawidłowości między zmiennymi, pozwalając na usunięcie redundantnych zmiennych. Pozwala więc zarówno jakościowo jak i ilościowo ustalić

w jakiej mierze te zależności występują. Nowe składowe będące kombinacją liniową badanych zmiennych wskazują na zmienne początkowe, które wnoszą największy wkład do poszczególnych składowych głównych tworzących grupę jednorodną. Składowe główne, u których wariancja, a tym samym informatywność jest maksymalna, są wówczas reprezentantem tej grupy. Poprzez obliczanie wartości korelacji na pewnym etapie obliczeń pozwala to na odkrycie zależności łączących analizowane zmienne i usunięcie redundantnych zmiennych. Wyniki przeprowadzonej analizy PCA dla zestawu 6 wybranych parametrów charakteryzujących testowane fragmenty przykładowej mozaiki sonarowej (BO_OC_SEP17_1) zostały przedstawione na rysunku 10.3. Z wykresu w panelu lewym wynika, że składowe pierwotne nie są silnie ze sobą skorelowane.



Rysunek 10.3 Przykładowy wynik analizy składowych głównych dla 6 cech opisujących przetworzone obrazy sonarowe: A – trójwymiarowy wykres prezentujący zależności pomiędzy składowymi pierwotnymi (lokalna średnia – Mean, lokalna wariancja wyrażona poprzez odchylenie standardowe – STD, entropia – Energy, GLCM en. i GLCM con. - odpowiednio drugi moment rozkładu kąta i kontrast, H-F – wartość jasności mozaiki po operacji z wykorzystaniem metody 2D FFT z zaimplementowanym górnoprzepustowym filtrem; B – wykres osypiska jako wynik analizy PCA

Z przeprowadzonej analizy składowych głównych wynika, że 3 składowe główne opisują ok. 90 % zmienności (wariancji). Oznacza to, że teoretycznie w procesie klasyfikacji obrazów sonarowych możemy uwzględnić jedynie te trzy składowe główne. Jednak analiza empiryczna wskazała, że ta droga postępowania jakkolwiek może być przydatna dla wyróżnienia cech charakterystycznych osadów, nie pozwalała na polepszenie wyróżnienia celów pochodzenia antropogenicznego (rys. 10.4).



Rysunek 10.4 Porównanie działania algorytmu k – średnich do detekcji obiektów antropogenicznych w wybranym fragmencie mozaiki testowej : A – z wykorzystaniem 3 parametrów opisujące analizowany obraz, zredukowanych na podstawie analiz PCA; B - z wykorzystaniem wszystkich parametrów opisujących analizowany obraz. Strzałkami oznaczono artefakty, które nie są poszukiwanymi celami

Pogorszenie wyników działania algorytmu k – średnich z wykorzystaniem zredukowanych przy pomocy analiz PCA parametrów opisujących obraz mogło być spowodowane dużą zmiennością dna w obrębie badanej mozaiki, co przekładało się na zróżnicowanie intensywności nasycenia barwą pikseli tworzących analizowane zobrazowanie podłoża morskiego. Zaproponowana metodyka analizy przetwarzania danych musiała być skuteczna dla wszystkich sonogramów, które utworzono na podstawie danych zarejestrowanych w obszarach A, B, C i D. Jak wykazano w rozdziałach 6. i 9., dno w tych rejonach różniło się od siebie nie tylko z uwagi na typy osadów budujących wierzchnią warstwę podłoża morskiego, ale również działalność człowieka miała częściowy wpływ na jego cechy obserwowane na uzyskiwanych zobrazowaniach sonarowych. W konsekwencji, zdecydowano o wykorzystaniu wszystkich 6 parametrów jako dane wejściowe dla algorytmu k - średnich, co pozwoliło na uzyskanie zadowalających wyników detekcji obiektów antropogenicznych na wszystkich 11 przetwarzanych sonogramach.

10.2 Oddziaływanie wykrytych obiektów antropogenicznych i śladów działalności człowieka na ekosystemy bentosowe badanych obszarów

10.2.1 Oddziaływanie dużych śmieci i odpadów przemysłowych

Występowanie obiektów antropogenicznych na dnie, które zostały zaklasyfikowane do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych potwierdzono w 3 z 4 badanych obszarów Morza Bałtyckiego: w obrębie akwenów Zatoki Gdańskiej, Głębi Gdańskiej oraz Głębi Bornholmskiej. Z dużą pewnością można również przyjąć, że tego typu cele podwodne napotkać można także na podłożu morskim Zatoki Kilońskiej, w rejonie *Kolberger Heide*, z powodu położonego tam kłapowiska i bliskości portu w Kilonii. Obiekty tej kategorii występowały najliczniej w obszarach badań oznaczonych identyfikatorami A oraz B. Spośród 5 celów podwodnych rozpoznawanych w akwenie Zatoki Gdańskiej, 3 zostały zaklasyfikowane do grupy dużych śmieci i odpadów przemysłowych. W przypadku Głębi Gdańskiej, na 10 zidentyfikowanych celów referencyjnych spoczywających na dnie, 7 należało do tej kategorii. W obszarze Głębi Bornholmskiej tylko 1 z 11 rozpoznanych obiektów został przypisany do grupy dużych śmieci i odpadów przemysłowych. Cele wykryte w trakcie realizacji niniejszych badań, należące do tej kategorii były zbudowane z różnego typu materiałów i charakteryzowały się różnymi wymiarami.

Rodzaj materiału, z którego utworzone były obiekty należące do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych ma decydujący wpływ na sposób, w jaki oddziałują one na ekosystemy denne badanych obszarów Morza Bałtyckiego. Opisywane cele referencyjne zbudowane były w większości przypadków z metalu, jednak w trakcie prowadzonych badań wykrywano na podłożu morskim również przedmioty wykonane z gumy lub tworzywa sztucznego. Obiekty te ulegały rozkładowi w warunkach morskich bez względu na rodzaj materiału, z którego były utworzone. W przypadku podwodnych śmieci i dużych odpadów przemysłowych zbudowanych z metali lub ich stopów, można mówić o pozytywnym oddziaływaniu takich celów na ekosystemy bentosowe, o ile nie były one utworzone z materiałów zawierających metale ciężkie lub nie były pokryte farbami, w składzie których znajdowały się takie pierwiastki jak np. rtęć, arsen, ołów, kadm, cyna lub chrom. Pierwiastki te występują naturalnie w środowisku morskim, głównie w osadach dennych, jednak ich koncentracje są najczęściej niskie. W przypadku, kiedy stężenia metali ciężkich rosną lokalnie na skutek działalności człowieka, wówczas ekosystemy znajdujące się

w bezpośrednim sąsiedztwie źródła zanieczyszczenia (np. obiektu antropogenicznego zawierającego wspomniane pierwiastki) są narażone na ich niekorzystny wpływ. Jest to spowodowane faktem, iż metale ciężkie wykazują silne właściwości toksyczne oraz kancerogenne (Kaur i in., 2019). W konsekwencji, ekspozycja żywych organizmów na tego typu zanieczyszczenia będzie prowadziła do powstawania uszkodzeń w ich kodzie genetycznym. Ponadto, metale ciężkie ulegają bioakumulacji w miękkich tkankach ryb i organizmów bentosowych Morza Bałtyckiego (Partilä i in., 1982; Hendożko i in., 2010). Proces ten ma niekorzystny wpływ na kolejne ogniwa łańcucha troficznego, którego ostatnim ogniwem jest człowiek. W przypadku obiektów utworzonych z takich materiałów jak guma lub tworzywa sztuczne również można mówić o substancjach toksycznych występujących w ich składzie. Przykładem mogą być plastyfikatory, które szeroko stosuje się w procesie produkcji polimerów syntetycznych, a także opon. Ponadto, czas rozkładu obiektów utworzonych z gumy lub tworzyw sztucznych jest znacznie dłuższy niż w przypadku celów metalowych. W konsekwencji przekłada się to na wydłużoną ekspozycję ekosystemów morskich na związki toksyczne zawarte w tego typu podwodnych celach. Z drugiej strony, obiekty wytworzone przez człowieka, które są wolne od metali ciężkich lub innych toksycznych związków, mogą być wykorzystywane jako sztuczne rafy (Baine, 2001; Hylkema i in., 2021). Przedmioty o różnych wymiarach oraz kształtach, utworzone z materiałów takich jak np. beton, skały naturalne, metal, guma lub tworzywa sztuczne są celowo zatapiane w morzach i oceanach na całym świecie, w tym również na Bałtyku (Fabi i in., 2011). Głównym powodem tego typu działań jest podtrzymanie, odbudowa lub stworzenie nowych habitatów dla m.in. organizmów bentosowych, które przy sprzyjających warunkach środowiskowych kolonizują umieszczane na podłożu morskim obiekty antropogeniczne. Zjawisko to można było zaobserwować podczas inspekcji celów podwodnych wykrytych podczas realizacji badań opisywanych w niniejszej pracy. Część obiektów antropogenicznych odnajdywanych w obszarach A, B, C oraz D była silnie porośnięta przez bentosową florę i faunę bałtycką, zwłaszcza w natlenionych rejonach wód płytkich. Cele należące do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych również tworzyły tego typu siedliska. Należy jednak pamiętać, że obiekty te nie były dostarczane do wód Morza Bałtyckiego na skutek zaplanowanych działań i w związku z tym w każdym z obserwowanych przypadków nie można jednoznacznie wykluczyć ich negatywnego wpływu na środowisko morskie.

10.2.2 Wraki zatopionych jednostek, a ekosystemy bentosowe

Jedną z konsekwencji aktywności człowieka na Morzu Bałtyckich jest dostawanie się do jego wód kadłubów i dużych elementów statków, okrętów oraz innych jednostek nawodnych. Przypuszcza się, że na dnie całego Bałtyku spoczywa ponad 100 000 wraków (Bałazy i in., 2019). Są to jednostki zarówno historyczne, jak i współczesne, zbudowane z drewna lub różnego rodzaju metali oraz innych materiałów. W trakcie prowadzenia badań prezentowanych w niniejszej pracy, w obrębie obszarów A, B oraz C wykryto trzy tego typu duże obiekty antropogeniczne. Należy jednak pamiętać, że z uwagi na znaczne ilości wraków występujących na dnie Morza Bałtyckiego, ich rzeczywista liczba w rejonach Zatoki Gdańskiej, Głębi Gdańskiej, Głębi Bornholmskiej, a także Zatoki Kilońskiej jest znacznie wyższa niż wynika z powyższej oceny.

Obecność wraków silnie oddziałuje na ukształtowanie dna morskiego, jak i na ekosystemy występujące w ich pobliżu. Przyczyną takiego stanu rzeczy są znaczne rozmiary tego typu celów podwodnych, które wpływają na regionalną topografię dna, formowanie prądów przydennych oraz transport rumowiska w miejscach, w których występują. Dotyczy to także kadłubów statków umieszczanych celowo na dnie mórz i oceanów, najczęściej w ich płytkich rejonach. Tego typu działania podejmuje się na potrzeby stworzenia wspomnianych wcześniej sztucznych raf lub jako atrakcje dla płetwonurków uprawiających turystykę podwodną. Wraki przeznaczone do takich celów są odpowiednio oczyszczane z niebezpiecznych substancji oraz przygotowywane do bezpiecznego zatopienia, tak aby nie oddziaływały one negatywnie na ekosystemy morskie. Odmienny problem stanowią jednostki, które zatonęły na skutek wypadków na morzu lub działań militarnych. Nośniki energii wykorzystywane w celu napędzania silników statków to m.in. paliwa ciężkie (np. mazut), ciecze węglowe powstałe na skutek procesu uwodornienia węgla, oleje napędowe oraz inne płynne i półpłynne substancje chemiczne (Hac i Sarna, 2021). Ponadto, morskie silniki spalinowe, a także innego rodzaju wyposażenie pokładowe, w postaci np. dźwigów hydraulicznych, wymagają zastosowania znacznych ilości oleju, różnego rodzaju smarów oraz chłodziw do ich prawidłowej pracy. Wszystkie wspomniane powyżej substancje są ekstremalnie toksyczne dla środowiska morskiego oraz organizmów występujących w nim. Podczas osiadania jednostki na dnie, na skutek jej nagłego zatonięcia może dojść do uszkodzenia powłok kadłuba lub zbiorników transportowych, co zwiększa prawdopodobieństwo wycieku paliwa lub innych niebezpiecznych substancji. W przypadku powstania tego typu zdarzenia, skażeniu ulega nie tylko toń wodna, ale

również znaczne obszary podłoża morskiego. Kontaminacja osadów dennych wiąże się najczęściej w takich przypadkach z całkowitą eksterminacją organizmów bentosowych zamieszkujących zanieczyszczone rejony dna. Najbardziej znanym przykładem tego typu katastrofy ekologicznej w obrębie Polskiej Wyłącznej Strefy Ekonomicznej był wyciek paliwa z uszkodzonych zbiorników statku *s/s Stuttgart*, zatopionego w 1943 roku na obszarze Zatoki Gdańskiej. Wydarzenie to skutkowało skażeniem podłoża morskiego o powierzchni ok. 49,1 ha (Szafrńska i in., 2021). Nawet po upływie 70 lat, w osadach dennych budujących dno tego rejonu wykrywano wysokie stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, dochodzące do poziomu od 11,54 do 206,7 mg/kg suchej masy próbki (Rogowska i in., 2010). W przypadku wraku statku *t/s Franken*, odnalezionego w ramach badań prowadzonych na potrzeby niniejszej pracy w rejonie Zatoki Gdańskiej, istnieje również podwyższone prawdopodobieństwo, iż w jego zbiornikach mogą znajdować się znaczne ilości paliwa, których wyciek skaziłby podłoże morskie w tej części Bałtyku. Poza opisanymi powyżej zagrożeniami związanymi z paliwem przewożonym przez zatopione jednostki, równie duże niebezpieczeństwo dla ekosystemów morskich mogą stanowić ładunki transportowane przy pomocy różnego rodzaju jednostek. Jak wynika z dokumentów archiwalnych Ministerstwa Spraw Wewnętrznych Niemieckiej Republiki Demokratycznej, w roku 1962 w obszarze m.in. Głębi Bornholmskiej zatapiano barki wypełnione bombami oraz beczkami zawierającymi najprawdopodobniej bojowe środki trujące (Politz, 1994). Badania przeprowadzone przez niemieckich naukowców w tym rejonie potwierdziły występowanie na dnie kilku wraków o różnych rozmiarach. Analizy chemiczne prób podłoża morskiego zebranych w pobliżu wykrytych wraków wskazywały na wysokie stężenia arsenu w badanych osadach (Missiaen i Feller, 2008). Świadczy to o prawdopodobnym związku zatopionych jednostek wykrywanych w rejonie Głębi Bornholmskiej z bojowymi środkami trującymi. Wraki wykryte w obszarach B i C podczas realizacji badań opisywanych w niniejszej pracy również mogły przewozić bojowe środki trujące oraz obiekty o pochodzeniu militarnym, ponieważ występowały one w rejonach, w których wykrywano tego typu cele podwodne.

Zatopionych jednostek występujących na dnie mórz i oceanów nie należy traktować wyłącznie jako źródła potencjalnych zanieczyszczeń. Ich obecność na podłożu morskim indukuje różnego rodzaju procesy, które mogą być korzystne dla ekosystemów morskich. Jednym z nich jest zjawisko gromadzenia się materii organicznej na wrakach, przez co zwiększa się jej dostępność dla organizmów bentosowych (Svane i Petersen, 2001). Występowanie wraków na dnie może również powodować lokalne upwellingi, dzięki

którym tlen oraz substancje odżywcze będą dostarczane do wyższych warstw kolumny wody (Sheng, 2000; Falcão i in., 2009). Ponadto, twarde struktury tworzące kadłuby oraz elementy wyposażenia jednostek mogą stanowić idealne miejsca egzystencji i rozmnażania dla morskiej epifauny oraz niektórych gatunków ryb, które wymagają twardego podłoża do np. rozrodu lub żerowania. Tego typu duże obiekty antropogeniczne tworzą również schronienia dla wielu gatunków organizmów bentosowych oraz ichtiofauny. W konsekwencji, wraki spoczywające na dnie mogą przyczyniać się do powstawania złożonych habitatów, co będzie się przekładało na lokalnie zwiększoną bioróżnorodność w obszarach ich występowania (Bałazy i in., 2019). Należy również pamiętać, że zatopione jednostki mają bezpośredni

10.2.3 Wpływ obiektów o pochodzeniu militarnym na organizmy bentosowe

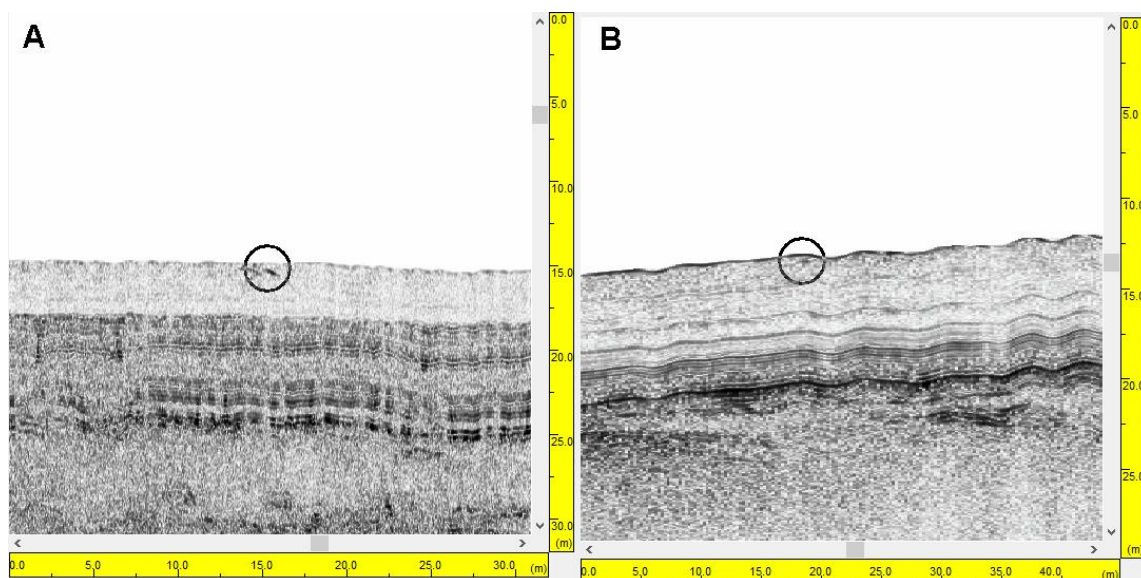
Na dnie Morza Bałtyckiego spoczywa od 360 000 do 385 000 ton amunicji (Carlton i Jagusiewicz, 2009), w tym ok. 40 000 ton to broń chemiczna, której 40 % stanowiło bojowe środki trujące (HELCOM, 2013). Skutkiem prowadzenia działań wojennych i powojennych w obrębie Morza Bałtyckiego było celowe, a także niecelowe wprowadzenie do jego środowiska ogromnych ilości obiektów o pochodzeniu militarnym. Są nimi miny morskie, bomby, torpedy, a także innego rodzaju mniejsze pociski wypełnione m.in. trotylem (TNT), hexogenem (RDX), czy dinitrobenzenem (DNB) (Beck i in., 2019). Broń chemiczna, która była nośnikiem bojowych środków trujących takich jak iperyt siarkowy, adamsyt, fosgen, luizyt, Clark I i II oraz tabun, trafiała do wód Bałtyku w postaci beczek, bomb lotniczych, pocisków artyleryjskich o średnicy 105 i 150 mm, a także innego rodzaju zbiorników (Bełdowski i in., 2014). Zewnętrzne powłoki tego typu obiektów militarnych, zbudowane ze stopów metali, ulegają rozkładowi w środowisku na skutek korozji elektrochemicznej (Miętkiewicz, 2020). Implikuje to wydostawanie się substancji zawartych w amunicji chemicznej oraz konwencjonalnej do środowiska morskiego. W trakcie prowadzenia badań realizowanych na potrzeby niniejszej pracy na dnie obszarów A, B oraz C wykryto na powierzchni dna 13 obiektów o pochodzeniu militarnym. Ich największa liczba (9 sztuk) występowała w rejonie Głębi Bornholmskiej, zaś na podstawie przeprowadzonych identyfikacji ustalono, że była to amunicja chemiczna. W przypadku akwenów Zatoki Gdańskiej oraz Głębi Gdańskiej odnajdywano na ich dnie pojedyncze obiekty, które reprezentowały morski arsenał konwencjonalny. Obiekty militarne wykryte w obszarze D stanowiły szczególny przypadek, ponieważ tworzyły one dwa duże klastry, składające się z ponad 99 celów, które rozpoznano jako amunicja konwencjonalna.

W trakcie badań realizowanych na przestrzeni ostatnich 20 lat udowodniono, że w rejonie Głębi Bornholmskiej, która jest jednym z największych składowisk broni chemicznej na Bałtyku, dochodziło do skażenia osadów dennych budujących wierzchnią warstwę dna bojowymi środkami trującymi, a także produktami ich rozkładu (Missiaen i in., 2010; Sanderson i in., 2010; Söderström i in., 2018). Uwalniające się zanieczyszczenia są włączane w struktury tworzące podłoże morskie i w związku z tym mogą podlegać resuspensji oraz transportowi na skutek działania prądów przydennych, które są wzmacniane podczas wlewów wody oceanicznej z Morza Północnego (Czub i in., 2018). Oznacza to, że skażeniu ulegać mogą również habitaty występujące nie w bezpośrednim sąsiedztwie wykrywanych celów. Na podstawie badań ustalono, że bojowe środki trujące oraz część z produktów ich rozkładu mają niekorzystny wpływ na wiele grup organizmów morskich, takich jak niektóre bakterie (Christensen i in., 2016), bezkręgowce występujące w toni wodnej oraz na podłożu morskim (Czub i in., 2020; Lastumäki i in., 2020) oraz ryby demersalne (Niemikoski i in., 2020). Szczególnie niebezpieczne dla organizmów żywych okazały się związki fosforoorganiczne wykorzystywane do produkcji np. tabunu. Powodują one dezaktywację enzymów, co prowadzi do natychmiastowej śmierci ustroju. Inne związki chemiczne występujące w bojowych środkach trujących również wykazują silne działanie toksyczne wśród organizmów morskich. Przykład mogą stanowić ryby demersalne, u których zaobserwowano zaburzenia systemu enzymatycznego, uszkodzenia DNA oraz organów wewnętrznych (Amato i in., 2006). Ekspozycja habitatów bentosowych na substancje występujące w amunicji chemicznej prowadzi do pogorszenia ich ogólnego stanu oraz napędza mikroewolucyjne zmiany w populacji ich mieszkańców, co może prowadzić do zmniejszenia bioróżnorodności (Medvedeva i in. 2009). Ponadto, są one akumulowane w tkankach zwierząt morskich, w tym ryb, mięczaków oraz skorupiaków, zamieszkujących siedliska leżące w bezpośrednim sąsiedztwie tego typu obiektów militarnych (Niemikoski i in., 2017).

Konwencjonalne materiały wybuchowe występujące w obiektach militarnych wykazują właściwości cytotoksyczne, genotoksyczne oraz kancerogenne dla organizmów morskich (Lotufo i in., 2017). Tego typu cele podwodne mogą tworzyć habitaty dla organizmów bentosowych, a także ryb demersalnych. Zjawisko to było obserwowane w przypadku amunicji konwencjonalnej wykrywanej w rejonach Zatoki Gdańskiej oraz Zatoki Kilońskiej. Długotrwała ekspozycja organizmów morskich na substancje chemiczne występujące w materiałach wybuchowych prowadzi do ich akumulacji w tkankach zwierzęcych, co w konsekwencji przełoży się na włączanie tego typu związków do sieci

troficznych (Strehse i in., 2017; Beck i in., 2019). Dodatkowo, obiekty militarne mogą być traktowane jako lokalne źródła metali ciężkich, takich jak arsen lub rtęć (Bełdowski i in., 2015; Bełdowski i in., 2019). Związki chemiczne tych pierwiastków były wykorzystywane do konstrukcji detonatorów umieszczanych zarówno w amunicji chemicznej, jak i konwencjonalnej. Ponadto, niewybuchy spoczywające na dnie Bałtyku stanowią zagrożenie dla technicznej działalności na morzu. Bezpieczeństwo żeglugi, rybołówstwa oraz konstrukcji hydrotechnicznych umieszczanych na podłożu morskim może być uzależnione od występowania obiektów militarnych na dnie akwenu, zwłaszcza w przypadku jego płytszych obszarów. Podwodne niewybuchy są najczęściej neutralizowane poprzez ich kontrolowane detonacje w środowisku morskim. Działania te powodują lokalne zniszczenia habitatów bentosowych, a także generują fale uderzeniowe, które mogą być śmiertelne dla organizmów morskich występujących w ich polu rażenia (Miętkiewicz, 2020).

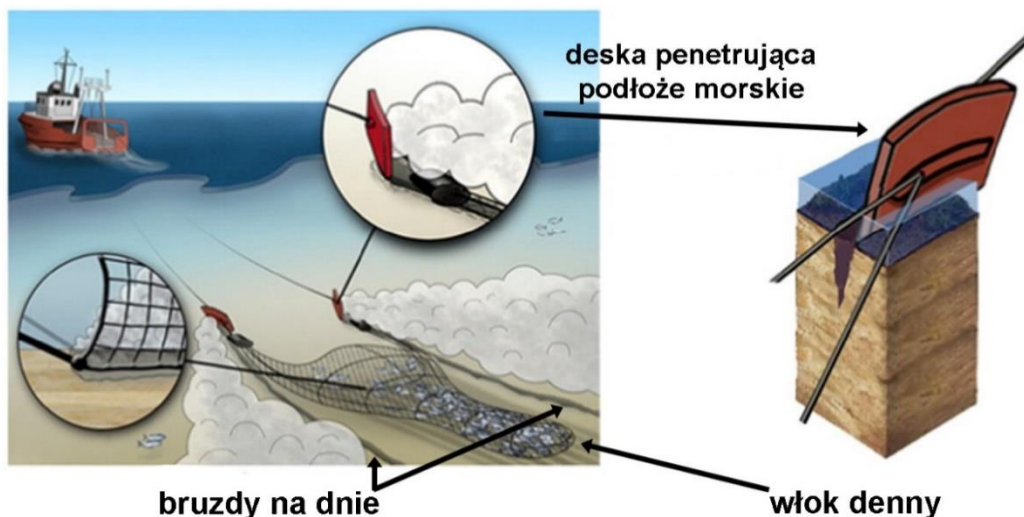
W przypadku obiektów militarnych występujących w obszarach Głębi Gdańskie i Głębi Bornholmskiej istniało podejrzenie, iż cele tego typu mogą ulegać zagrzebaniu w miękkich osadach budujących wierzchnią warstwę podłoża morskiego. W związku z tym, podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowych pomiarów we wspomnianych rejonach z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowego profilomierza osadów. W przypadku Głębi Gdańskiej wykonano sondowanie dna wzdłuż 15 transektów sejsmoakustycznych. Na ich trasie wykryto 25 ech, których źródłem były cele znajdujące się pod powierzchnią dna (rys. 10.5A). W obszarze Głębi Bornholmskiej profilowanie realizowane było wzdłuż 13 transektów. Przetworzone dane pozwoliły na detekcję 25 obiektów zagrzebanych w warstwie powierzchniowej podłoża badanego akwenu (rys. 10.5B). Wykryte cele należały najprawdopodobniej do kategorii obiektów o pochodzeniu militarnym. Alternatywnie, mogły to być również cele, które można sklasyfikować jako duże śmieci i odpady przemysłowe.



Rysunek 10.5 Przykładowe echa dwóch obiektów zagrzebanych w miękkich osadach dennych, wykrytych przy pomocy niskoczęstotliwościowego profilomierza osadów: A – obszar Głębi Gdańskiej, B - obszar Głębi Bornholmskiej

10.2.4 Efekty innych śladów działalności człowieka widocznych na podłożu morskim

Regularne zagłębienia w postaci bruzd występujących na podłożu morskim były obserwowane na sonogramach utworzonych z danych zarejestrowanych w obszarach badań oznaczonych identyfikatorami B oraz C. Powstają one na skutek prowadzenia działań związanych z połowem ryb występujących przy powierzchni dna w głębszych partiach akwenów morskich przy wykorzystaniu włoków dennych. Tego typu sprzęt rybacki składa się z sieci, w których gromadzone są złowione ryby oraz desek rozporowych, które są holowane za jednostką prowadzącą połów. Deski w postaci odpowiednio wyprofilowanych, ciężkich, metalowych płyt pełnią funkcję depresorów i zapewniają odpowiednie rozwarście sieci (rys. 10.6). Wspomniane płyty są odpowiedzialne za powstawanie regularnych zagłębień w dnie, które występowały w obszarach Głębi Gdańskiej i Głębi Bornholmskiej. Połowy z wykorzystaniem włoków dennych są szeroko stosowana nie tylko w akwenie Morza Bałtyckiego, ale również na całym świecie, głównie ze względu na ich efektywność (Watson i in., 2006).



Rysunek 10.6 Powstawanie bruzd widocznych na dnie na skutek zastosowania włóków dennych do połowu ryb demersalnych (zmodyfikowano na podstawie Oberle i in., 2016)

Wykorzystanie włóków dennych do połowów ryb ma bezpośredni wpływ na przydenne habitaty morskie, w tym także na organizmy bentosowe. Tego typu sprzęt powoduje ścieranie wierzchniej warstwy dna, powstawanie w nim zagłębień oraz resuspensję osadów. Przekłada się to na modyfikację powierzchni dna oraz czasowe zwiększenie mętności wody przydennej (Oberle i in., 2017). Stopień zachodzących zmian struktury dna oraz ilość materii podrywanej są uzależnione od rodzaju osadów budujących wierzchnie warstwy podłoża morskiego. Osady gruboziarniste, takie jak np. piasek są mniej podatne na resuspensję na skutek prowadzonych trałów dennych, podczas gdy drobne ropy i muły wykazują duży potencjał do unoszenia się w konsekwencji występowania wspomnianego czynnika antropogenicznego (O'Neill i Summerbell, 2011). Znaczna ilość drobnoziarnistej materii poderwanej z dna powodować będzie zmniejszenie zdolności filtrowania wody przez organizmy wykorzystujące tę strategię do odżywiania się (Bradshaw i in., 2012). Rozpatrując głębokości bruzd generowanych na skutek wykorzystania włóków dennych do komercyjnych połowów ryb nie można jednoznacznie wskazać ich maksymalnych wartości. W literaturze naukowej występują doniesienia o zagłębieniach sięgających od kilku centymetrów (Lokkeborg, 2005) do nawet 1 m (Andersson i Jonsson, 2003) na podłożu morskim zbudowanym z miękkich osadów. Oczywistym następstwem prowadzenia trałów dennych jest znaczne zmniejszenie populacji oraz składu gatunkowego m.in. ryb demersalnych oraz bezkręgowców bentosowych (Hopkins, 2003). Ponadto, ścieranie podłoża morskiego oraz powstawanie na nim bruzd ma negatywny wpływ na organizmy występujące w strukturach budujących dno. Konsekwencją zintensyfikowanych

trałowań dennych będzie m.in. niszczenie siedlisk oraz redukcja populacji makro i mejobentosu, co prowadzić może do znacznego zmniejszenia bioróżnorodności organizmów morskich w takich obszarach. Zagrożenie to jest szczególnie niebezpieczne dla prostych ekosystemów bałtyckich, w których dominują pojedyncze gatunki organizmów bentosowych. Tego typu sytuacja występuje w obszarach Głębi Gdańskiej i Głębi Bornholmskiej, gdzie podłoże morskie zbudowane jest z miękkich i uwodnionych osadów oraz zaobserwować można zjawisko hipoksji, które jest dodatkowym czynnikiem limitującym bioróżnorodność (Czub i in., 2018). Ponadto, wielokrotne powtarzanie połowów z wykorzystaniem włoków dennych w danym obszarze uniemożliwia organizmom morskim odbudowę ich habitatów i przywrócenie środowisku naturalnej równowagi. Zastosowanie tego typu sprzętu do wychwytywania ryb żyjących przy dnie może również prowadzić do sytuacji, w których dochodzi do nieplanowanego przemieszczania lub zakopywania celów antropogenicznych występujących na dnie. Jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku obiektów o pochodzeniu militarnym, które odnajdywano na dnie w obszarach Głębi Gdańskiej i Głębi Bornholmskiej. Zjawisko to, wraz ze wspomnianą wcześniej podwyższoną resuspencją osadów, mogą prowadzić do przyspieszonego uwalniania substancji toksycznych do środowiska oraz skażenia obszarów oddalonych od źródła zanieczyszczeń.

Analiza orientacji regularnych zagłębień na powierzchni dna w postaci bruzd wykrytych w obszarach B oraz C wskazała, że są one częściowo zbieżne z kierunkami wiania wiatrów w badanych akwenach (rys. 10.7 i 10.8). Na podstawie danych modelowych pochodzących z repozytorium ERA5 serwisu *Climate Change* (Hersbach i in., 2018) opracowano diagramy przedstawiające prędkości i kierunki wiania wiatrów w odstępach godzinnych w latach, w których prowadzona była akwizycja danych akustycznych. Rozdzielczość przestrzenna modelu wynosiła 0,25 stopnia geograficznego, zaś generowane dane modelowe były dodatkowo kalibrowane przy pomocy zbiorów archiwalnych. Porównanie zbieżności zamodelowanych kierunków wiania wiatrów z wynikami analizy orientacji bruzd dennych zostało przedstawione w tabeli 10.1.

Tabela 10.1 Zbieżność orientacji bruzd dennych widocznych na mozaikach sonarowych uzyskanych w rejonach B oraz C z zamodelowanymi kierunkami wiania wiatrów w tych obszarach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja danych hydroakustycznych (- - brak zbieżności; + - niska zbieżność; ++ - wysoka zbieżność; +++ - bardzo wysoka zbieżność)

Obszar (B – Głębia Gdańska, C – Głębia Bornholmska)	Identyfikator mozaiki	Stopień zbieżności orientacji bruzd dennych z modelowanymi kierunkami wiania wiatru
B	OC_MAR17_GD3	+
B	GD_SEP15_2v4	+
B	GD_SEP15_5v1	+
C	BO_OC_APR18_4	++
C	BO_OC_MAR16_3	-
C	OC_MAR17_BO2c	-
C	BO_OC_SEP17_1	+++

Kierunek oraz prędkość wiatru mają wpływ na skuteczność prowadzenia połowów rybackich z wykorzystaniem włoków dennych. Jednostki rybackie przyjmują najczęściej strategię odławiania ryb z wiatrem lub pod wiatr, w zależności od jego prędkości (Queirolo i in., 2012). Takie podejście zapewnia bezpieczeństwo żeglugi, a także zwiększa szanse na złapanie większej ilości ryb. Powodem tego jest fakt, iż prędkość oraz kierunek wiania wiatru podczas prowadzenia trałów mają częściowy wpływ na sposób prowadzenia desek rozporowych na dnie, co przekładać się będzie na stopień rozwarcia sieci (Weinberg i Kotwicki, 2008). Przyczyną występowania niskiej zbieżności lub jej braku w danych rejonach może być fakt, iż bruzdy zaobserwowane tam powstawały na skutek prowadzenia połowów w warunkach bezwietrznych. Na podstawie uzyskanych zobrazowań dna nie można jednoznacznie wskazać dokładnego czasu, w którym powstawały zagłębienia widoczne na dnie. Trwałość śladów włoków i oznaki ich degradacji zależą od wielu czynników, takich jak rodzaj osadów dennych, prędkości prądów przydennych, aktywności biologicznej, czy warunków początkowych ich tworzenia. Określenie wszystkich tych czynników wykracza poza zakres niniejszej pracy.

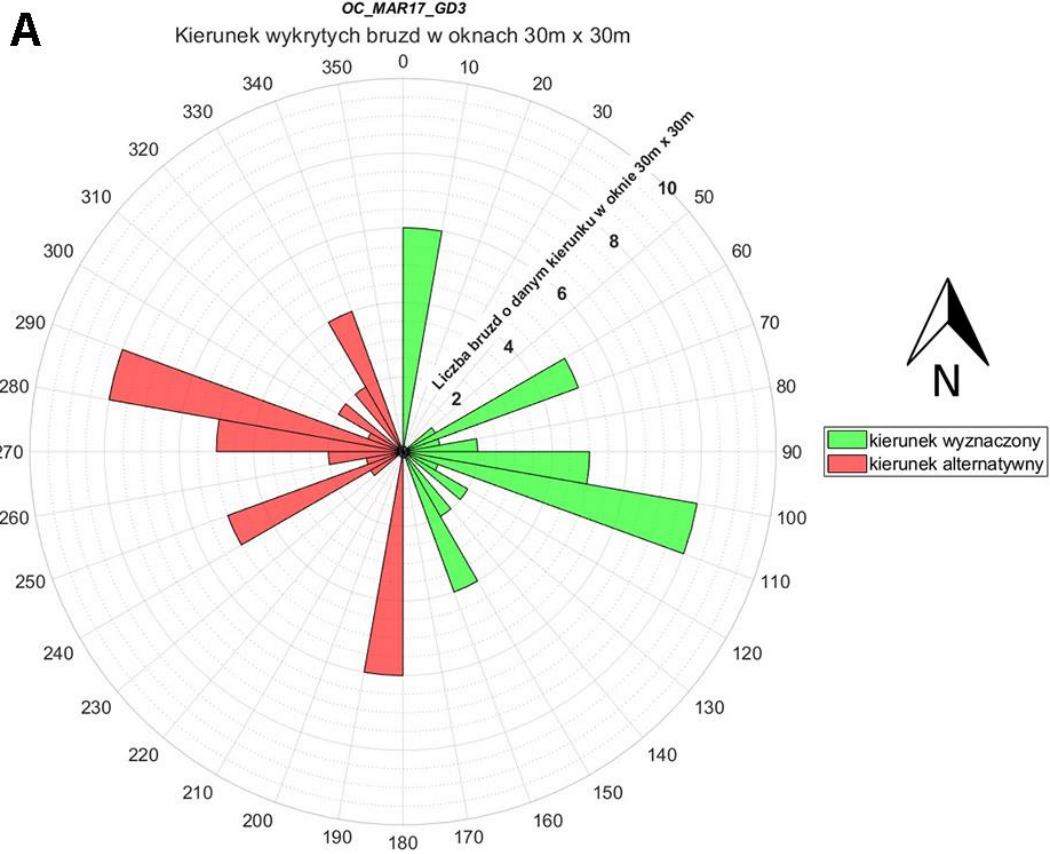
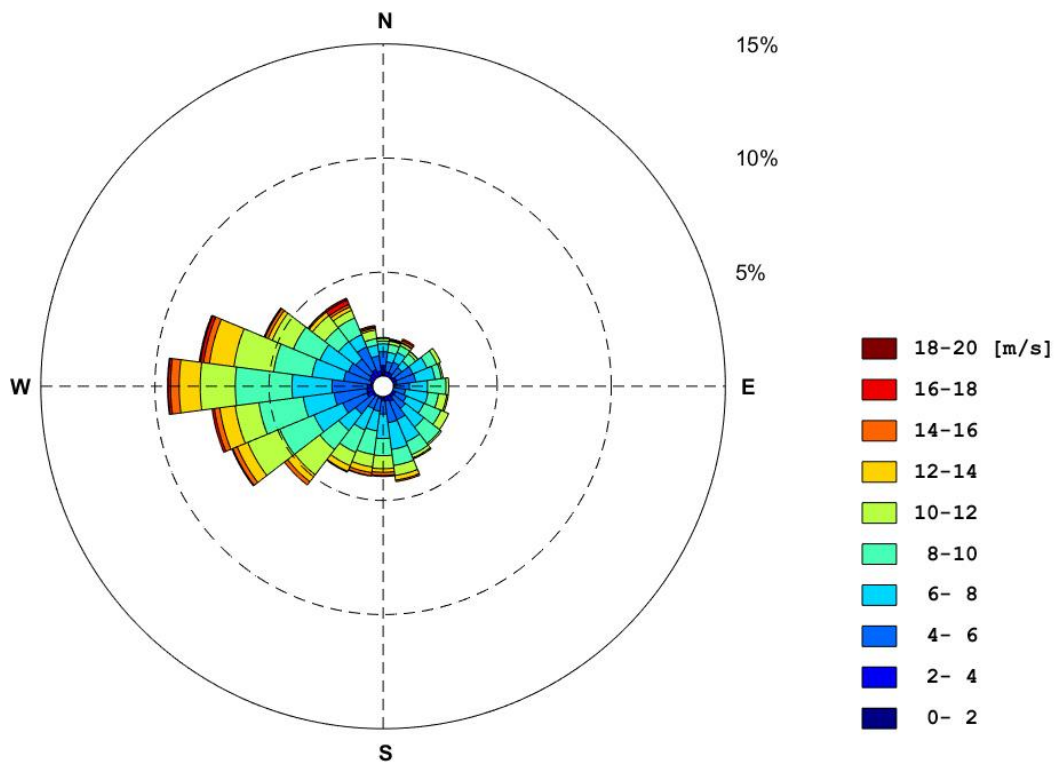


Diagram róży wiatrów dla rejonu OC_MAR17_GD3 - 2017 rok



B

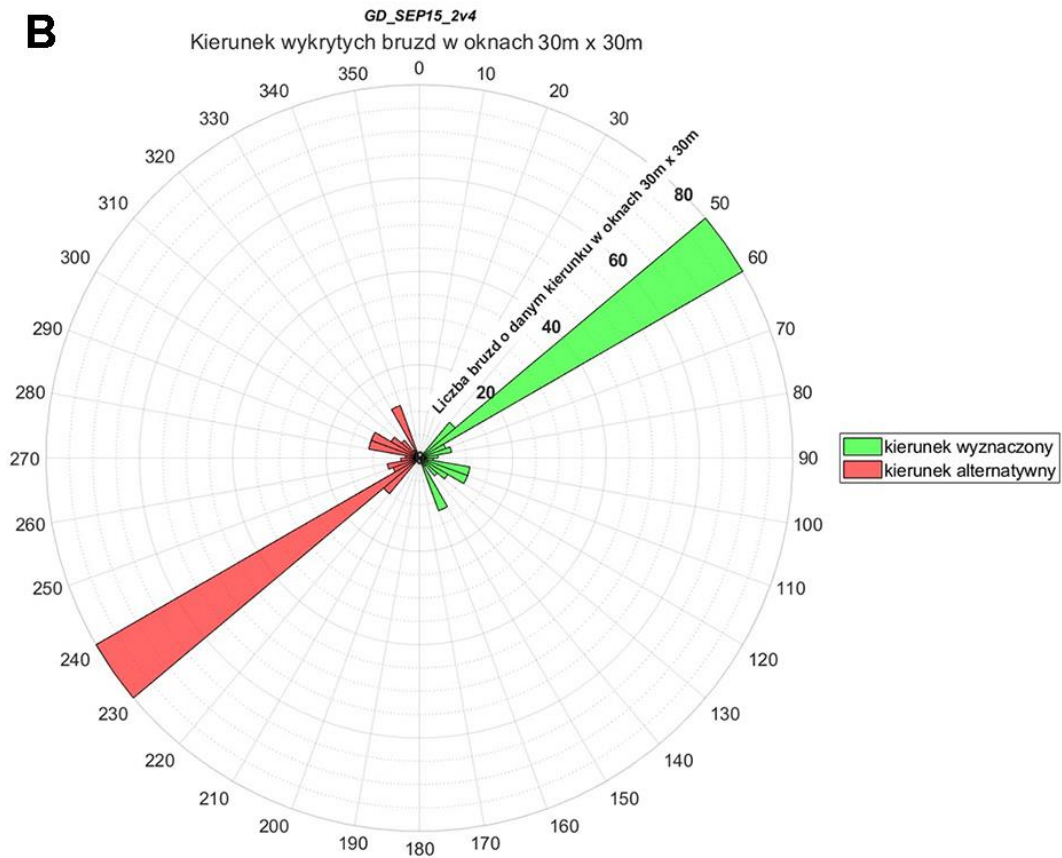
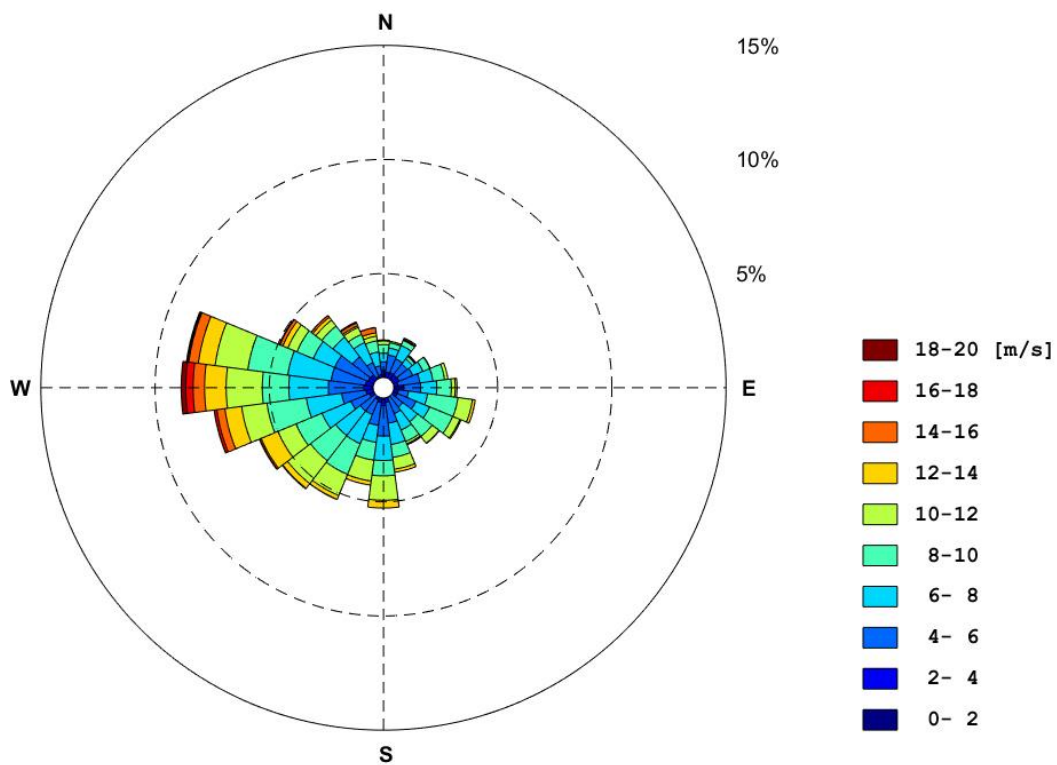


Diagram róży wiatrów dla rejonu GD_SEP15_2v4 - rok 2015



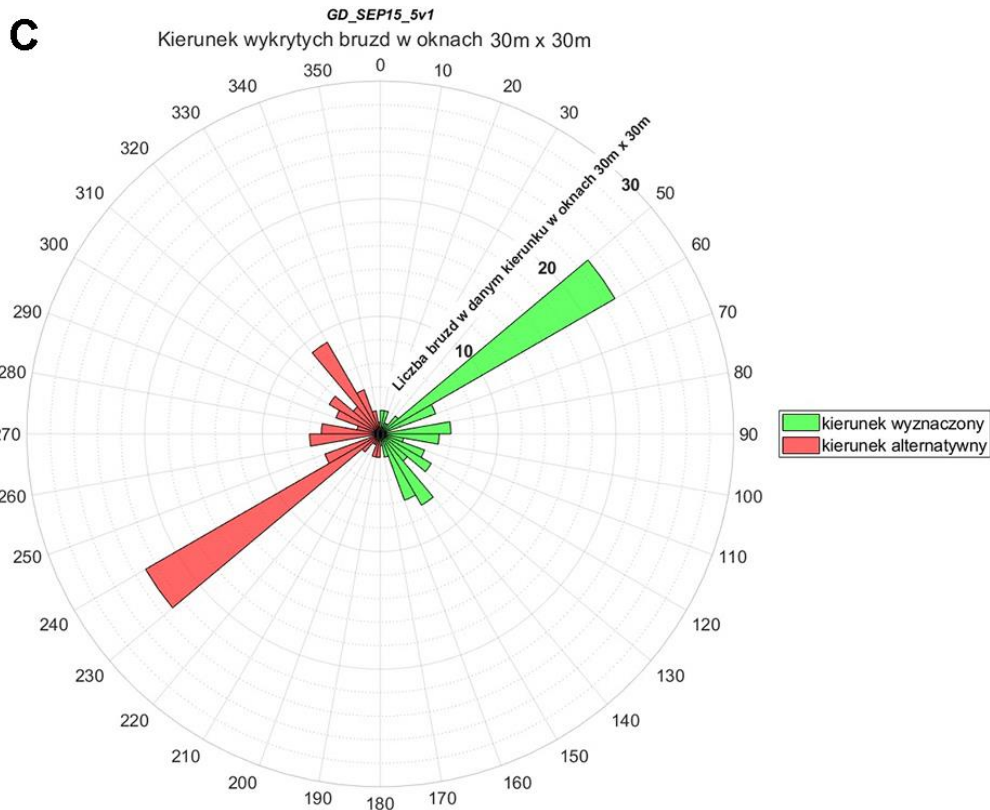
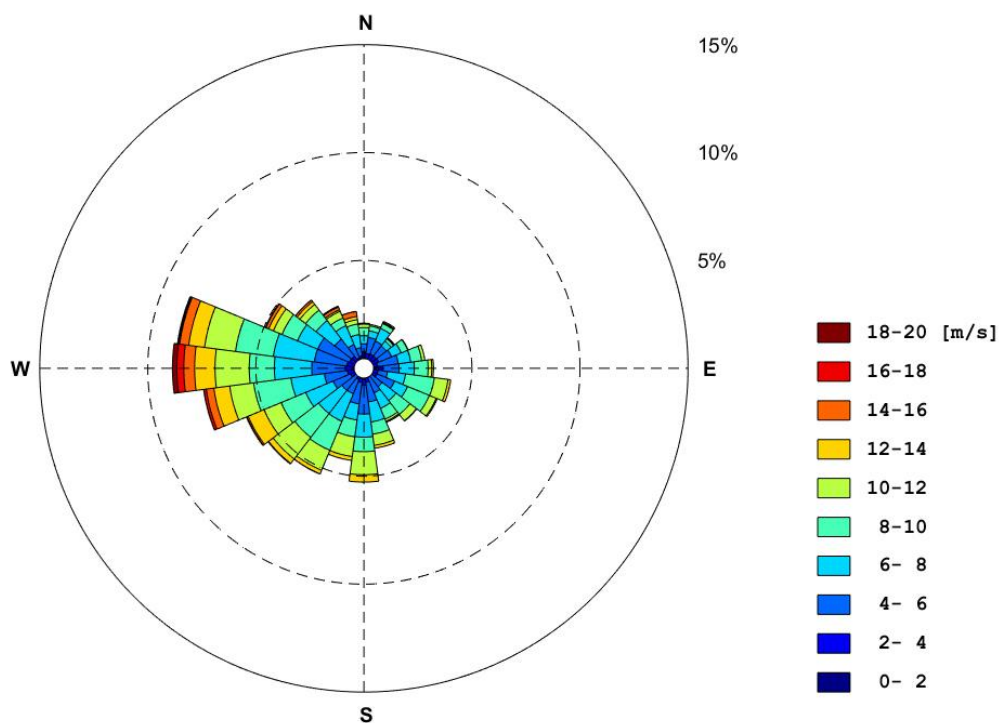


Diagram róży wiatrów dla rejonu GD_SEP15_5v1 - rok 2015



Rysunek 10.7 Zestawienie wyników analizy kierunkowości bruzd wykrytych w obszarze B – Głębia Gdańska (rejon: A - OC_MAR17_GD3; B - GD_SEP15_2v4; C - GD_SEP15_5v1) z danymi dotyczącymi kierunku i prędkości wiania wiatru w tych rejonach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja zbiorów hydroakustycznych

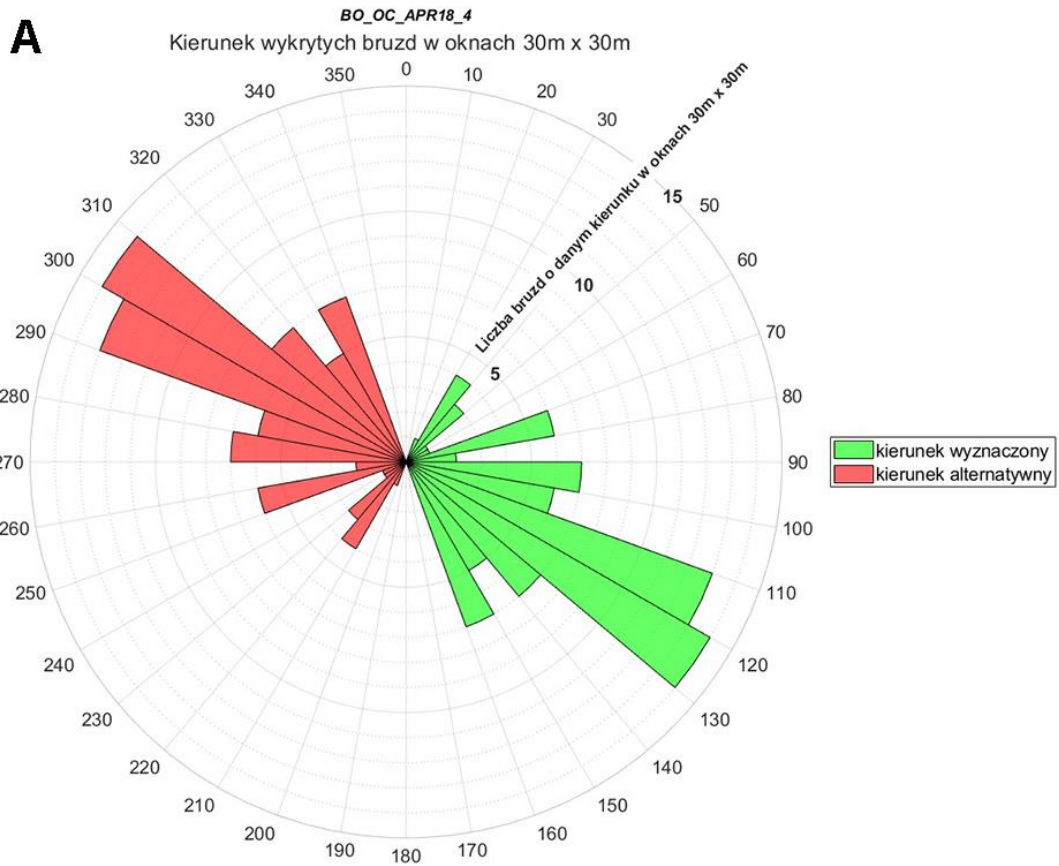
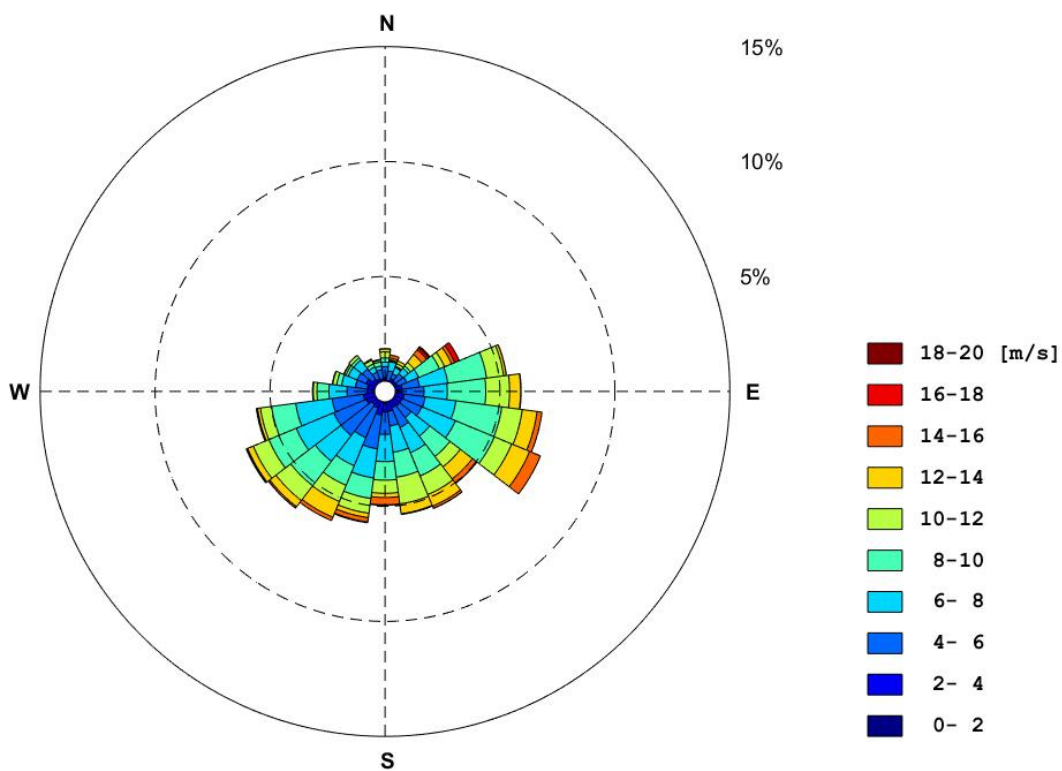


Diagram róży wiatrów dla rejonu BO_OC_APR18_4 - rok 2018



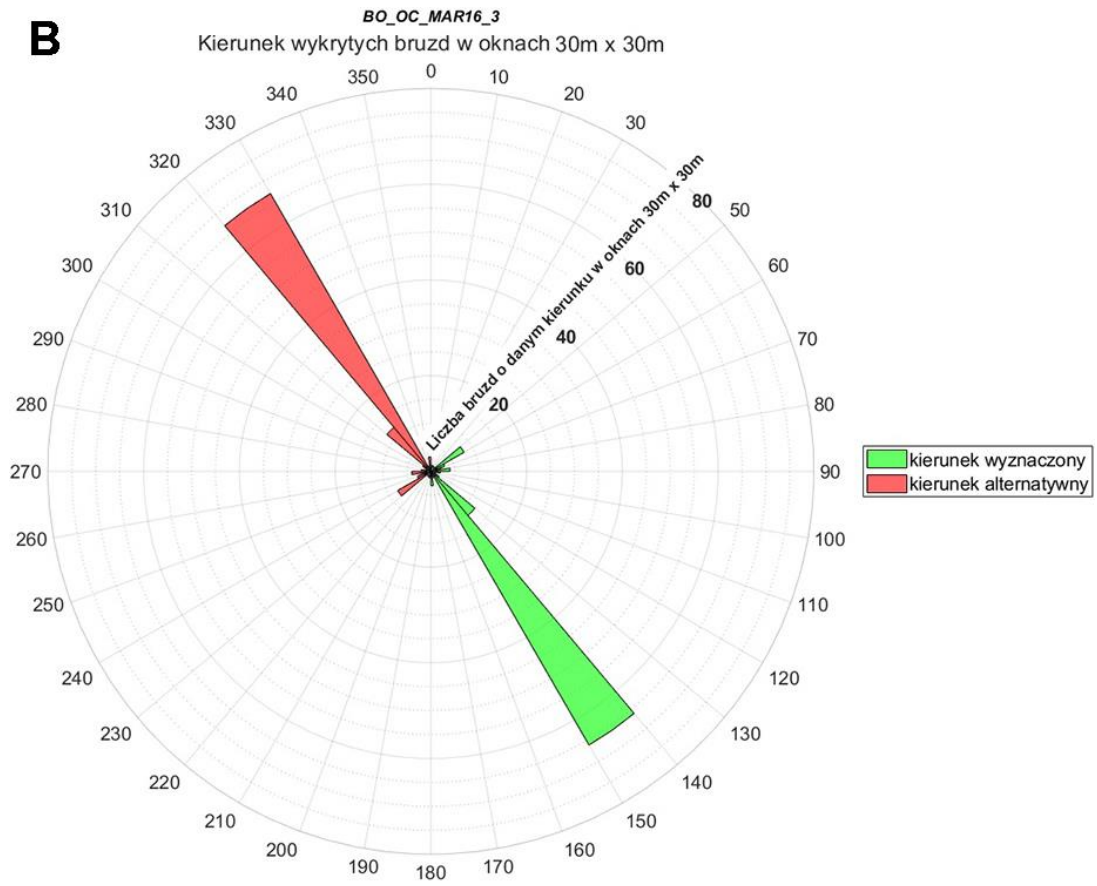
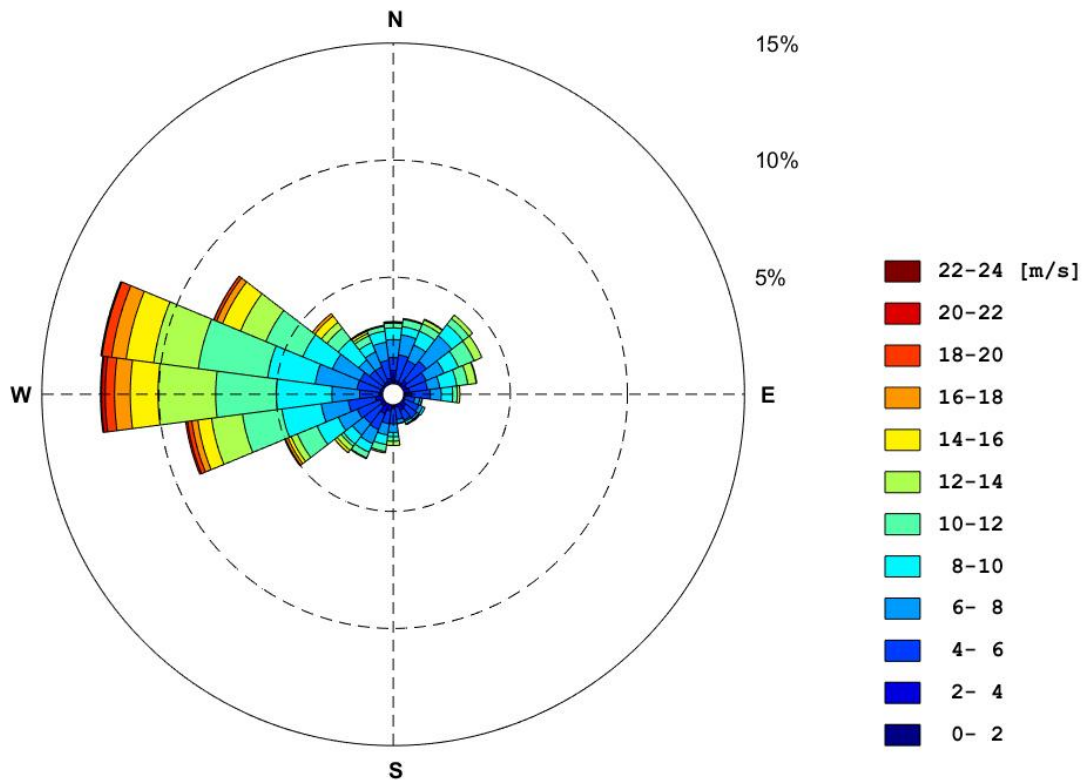
B

Diagram róży wiatrów dla rejonu BO_OC_MAR16_3 - rok 2016



C

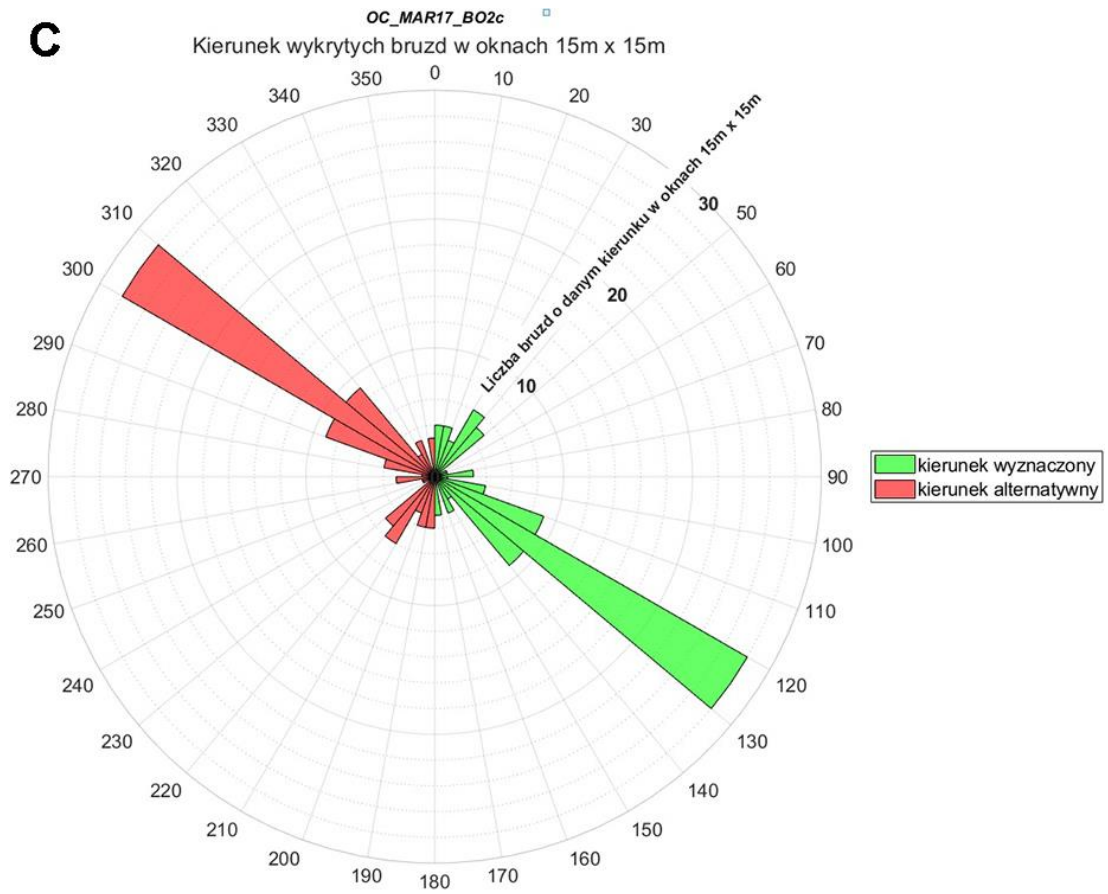
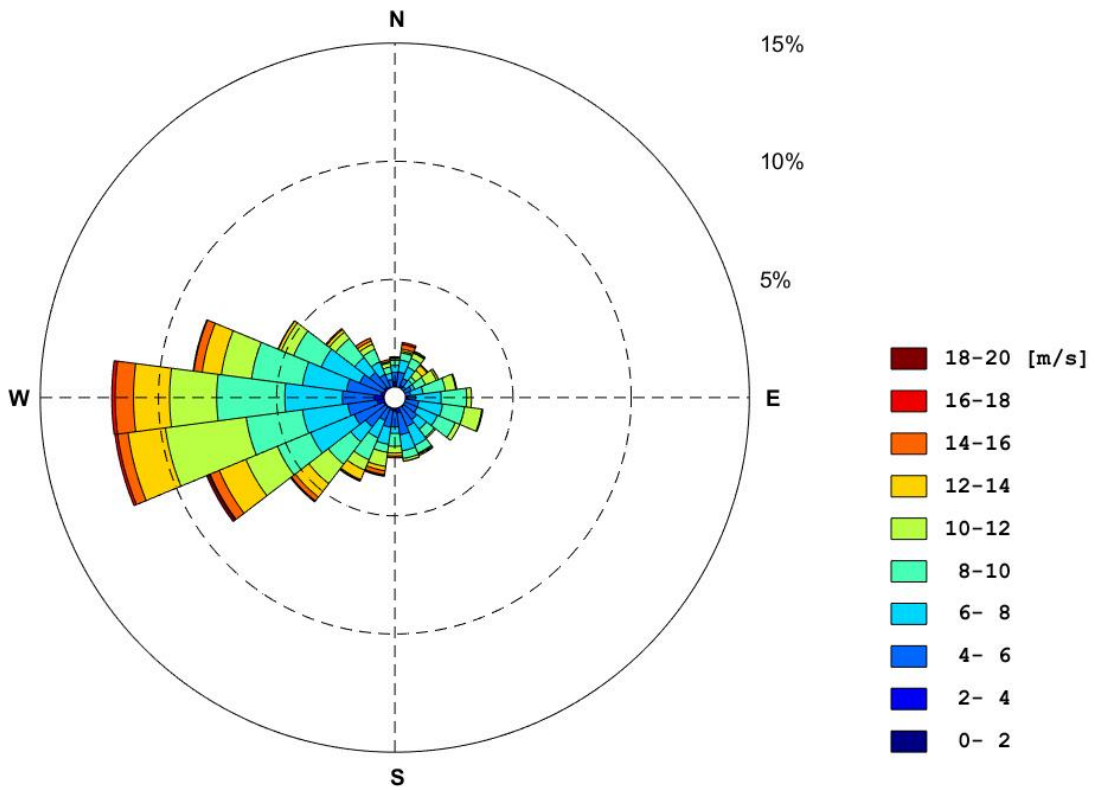


Diagram róży wiatrów dla rejonu OC_MAR17_BO2c - rok 2017



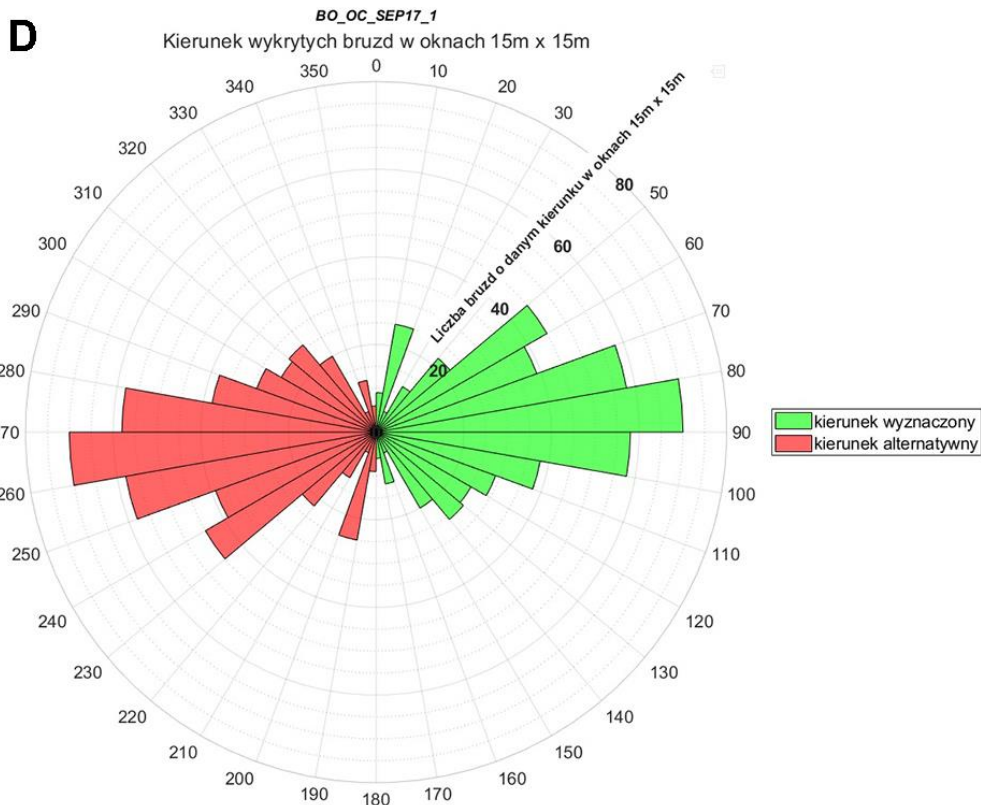
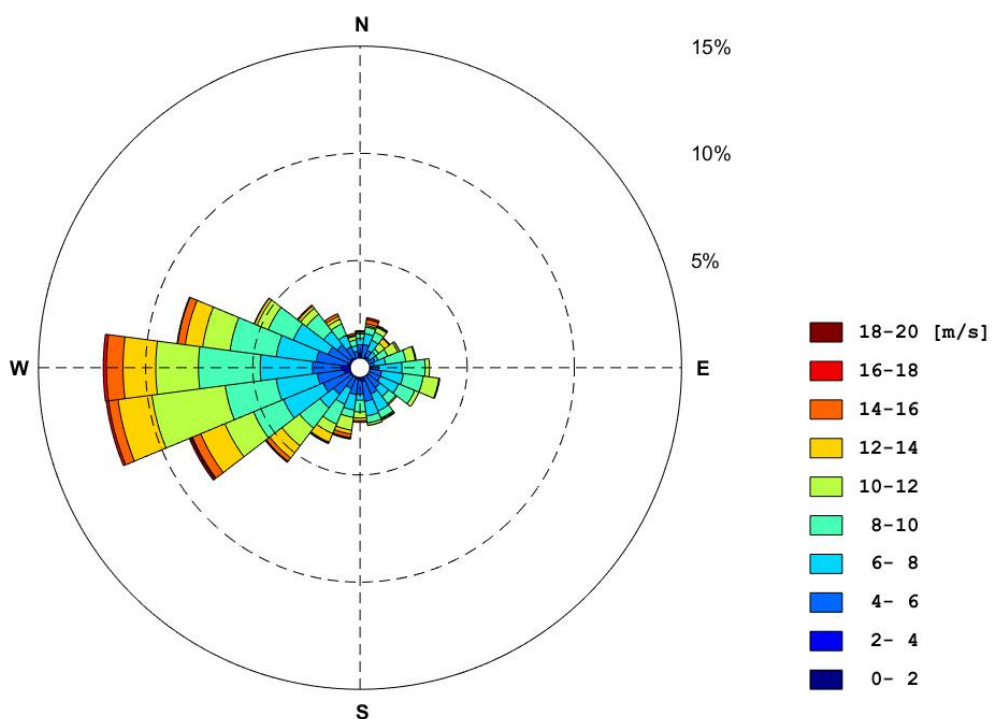


Diagram róży wiatrów dla rejonu BO_OC_SEP17_1 - rok 2017



Rysunek 10.8 Zestawienie wyników analizy kierunkowości brzd wykrytych w obszarze C – Głębia Bornholmska (rejon: A – BO_OC_APR18_4; B – BO_OC_MAR16_3; C – OC_MAR17_BO2c; D – BO_OC_SEP17_1) z danymi dotyczącymi kierunku i prędkości wiania wiatru w tych rejonach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja zbiorów hydroakustycznych

11. Podsumowanie i wnioski

W obrębie czterech obszarów zlokalizowanych w południowej części Morza Bałtyckiego - Zatoce Gdańskiej, Głębi Gdańskiej, Głębi Bornholmskiej i Zatoce Kilońskiej, dokonano rozpoznania stopnia oddziaływania antropogenicznego na dno morskie. Skupiono się na analizie dwóch rodzajów wykrytej antropopresji – zanieczyszczenia środowiska spowodowane obecnością obiektów deponowanych na dnie i zakłócenia struktury dna w procesie trałowania, charakteryzując ich różne skale intensywności i rozmieszczenie przestrzenne. W akwenach tych przeprowadzono mapowania dna, na podstawie których uzyskano 11 szczegółowych (0,05 m rozdzielczości) mozaik sonarowych o łącznej powierzchni 2,09 km². Otrzymane zobrazowania podłoża morskiego posłużyły do półautomatycznego wyznaczenia lokalizacji i klasyfikacji wszystkich obiektów antropogenicznych, o minimalnej powierzchni obserwacji przynajmniej 0,375 m². Ponadto, dla zwiększenia poprawności identyfikacji, w obrębie każdej z mozaik wybrano cele referencyjne, które poddano szczegółowej inspekcji. Rozpoznane obiekty reprezentowały wszystkie typy przedmiotów odnajdywanych na dnie poszczególnych obszarów badań. Innym kierunkiem badań było przeprowadzenie analizy śladów powstałych na skutek działań jednostek rybackich w rejonach Głębi Gdańskiej oraz Głębi Bornholmskiej. Całość uzyskanych wyników posłużyła do oceny skali oddziaływania antropogenicznego na dno badanych akwenów. Przeprowadzone badania, a także informacje zawarte w literaturze naukowej, pozwoliły na przygotowanie opisu interakcji wykrywanych obiektów oraz śladów działalności człowieka na podłożu morskim z habitatami bentosowymi występującymi w obszarach badawczych. Poniżej zaprezentowano podsumowanie wyników detekcji presji antropogenicznej w poszczególnych akwenach z uwzględnieniem ilości i gęstości powierzchniowej wykrywanych przedmiotów oraz obecności śladów po aktywności technicznej człowieka na dnie.

Zaobserwowano, że w obrębie wszystkich mapowanych rejonów południowego Bałtyku napotykamy na przejawy presji antropogenicznej w postaci różnorodnych wytworów działalności ludzkiej spotykanych na dnie. Najwięcej z nich wykryto w obszarze Zatoki Kilońskiej, gdzie na podłożu morskim zaobserwowano łącznie 280 celów podwodnych. Gęstość powierzchniowa wykrywanych przedmiotów w tym rejonie wynosiła 509,09 obiektów/1 km². Ponad 99 z nich było zgrupowane w dwóch dużych skupiskach, które zostały rozpoznane jako cele o pochodzeniu militarnym. Na dnie mapowanej części

Zatoki Kilońskiej wykryto również pozostałości po materiałach wybuchowych występujących we wspomnianych celach oraz kratery powstałe na skutek neutralizacji podwodnych niewybuchów z wykorzystaniem kurtyn powietrznych.

Drugim obszarem pod względem największej ilości obiektów antropogenicznych wykrytych na podłożu morskim była Głębia Bornholmska. W obrębie czterech podobszarów zlokalizowanych w tej części Bałtyku wykryto łącznie 167 celów podwodnych, które spełniały wymagania zajmowania minimalnej powierzchni na dnie. Z spośród 11 wytypowanych obiektów referencyjnych należących do tego zgrupowania, 9 stanowiło przedmioty o pochodzeniu militarnym. Pozostałe 2 reprezentowały kategorię dużych śmieci i odpadów przemysłowych, a także wraków. Gęstość powierzchniowa przedmiotów obserwowanych na dnie w tej części Morza Bałtyckiego wynosiła 298,21 obiektów/km². Na każdej z mozaik sonarowych pochodzących z obszaru Głębi Bornholmskiej obserwowano również ślady powstałe na skutek prowadzenia połowów ryb z wykorzystaniem włoków dennych.

W przypadku Głębi Gdańskiej na podłożu morskim wykryto łącznie 149 obiektów antropogenicznych, z których 10 poddano rozpoznaniu i klasyfikacji. Gęstość powierzchniowa odnalezionych celów podwodnych w obrębie opisywanego akwenu wynosiła 275,93 obiekty/km². Dominowały tu śmieci i odpady przemysłowe, które stanowiły 70 % wszystkich celów referencyjnych rozpoznawanych w obszarze. Na dnie poligonów badawczych położonych w obrębie akwenu Głębi Gdańskiej wykryto również 2 obiekty o pochodzeniu militarnym, a także pojedynczy wrak zatopionej jednostki. Podobnie jak w przypadku Głębi Bornholmskiej, na mozaikach sonarowych obrazujących dno w tym rejonie zaobserwowano liczne ślady działalności człowieka związane z rybołówstwem.

Najmniej obiektów o pochodzeniu antropogenicznym wykryto w obszarach badań zlokalizowanych w obrębie Zatoki Gdańskiej. Całkowita liczba celów podwodnych zaobserwowanych w tej części Bałtyku wynosiła 86, zaś 5 z nich poddano szczegółowemu rozpoznaniu. Z spośród wspomnianych obiektów referencyjnych 3 zaklasyfikowano do kategorii dużych śmieci i odpadów przemysłowych. Pozostałe to wrak i cel o pochodzeniu militarnym. Gęstość powierzchniowa wykrywanych na dnie przedmiotów o pochodzeniu antropogenicznym w tej części Bałtyku wynosiła 195,46 obiektów/km². Na mozaikach utworzonych z danych sonarowych zarejestrowanych w obszarze Zatoki Gdańskiej nie zaobserwowano innych śladów działalności człowieka.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że w każdym z rejonów, w których prowadzono rozpoznanie dna wykryto ślady aktywności człowieka na podłożu morskim. Powyższy fakt potwierdza skuteczność zaproponowanych metod badawczych do określania skali antropopresji oddziałującej na dno akwenów morskich. W związku z tym, postawioną hipotezę można uznać za prawdziwą. Dodatkowo, na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zastosowane tu metody hydroakustyczne sprzężone z technikami wizualnej inspekcji są szybkim, bezpiecznym, dokładnym i skutecznym sposobem badania dna morskiego.
- Obszary południowego Bałtyku są narażone na silną antropopresję spowodowaną obecnością na podłożu morskim różnego rodzaju obiektów wytworzonych przez człowieka oraz na skutek prowadzenia komercyjnych połowów ryb. Zjawisko to zaobserwowano zarówno w płytkich, jak i głębokich rejonach południowej części Morza Bałtyckiego.
- Przedmioty zdeponowane na podłożu morskim ulegają przykrywaniu, zagrzebywaniu lub zakopywaniu szczególnie w miękkich i uwodnionych osadach budujących wierzchnie warstwy dna. Powoduje to trudności interpretacyjne i może być źródłem pomyłek w trakcie analiz mozaik sonarowych. Rozwiązaniem może być zastosowanie innych obrazujących technik badawczych opartych na sonarach niskiej częstotliwości lub urządzeniach z syntetyczną aperturą.
- Opracowane i zaproponowane w pracy algorytmy przetwarzania cyfrowych mozaik sonarowych przyspieszają analizę tego typu danych, a także wykazały przydatność w ich interpretacji.
- Zaobserwowane obiekty antropogeniczne na dnie tworzą nowe habitaty dla organizmów bentosowych. Choć bez dodatkowych badań biologicznych nie można stwierdzić czy przedmioty te mogą mieć negatywny wpływ na ich stan oraz bioróżnorodność.
- Obiekty o pochodzeniu militarnym stanowią szczególne zagrożenie dla organizmów morskich z uwagi na występujące w nich związki chemiczne

o właściwościach teratogennych, kancerogennych i genotoksycznych. Długotrwała ekspozycja organizmów bentosowych oraz ryb na uwalniające się z zatopianej amunicji bojowe środki trujące oraz substancje wykorzystywane do wytwarzania ładunków miotających będzie przekładać się na drastyczne pogorszenie ich stanu zdrowia lub śmierć, a także napędzać będzie mikroewolucyjne zmiany, których konsekwencją jest zmniejszona bioróżnorodność.

- Stwierdzona obecność śladów intensywnych połowów ryb demersalnych z zastosowaniem włoków dennych wskazuje na możliwość degradacji habitatów bentosowych i/lub występowania wzmożonej resuspensji osadów. Znaczna gęstość tego typu śladów w obszarach gdzie rozmieszczona była zatopiona amunicja powoduje podwyższenie ryzyka przemieszczania obiektów antropogenicznych spoczywających na dnie i resuspensję osadów skażonych np. produktami rozkładu broni chemicznej lub paliwami ciężkimi.
- Znajomość skali oddziaływania antropogenicznego na podłoże akwenów morskich pozwala w bardziej zrównoważony sposób zarządzać ich zasobami, a także lepiej planować działania związane z ochroną ekosystemów występujących w nich. Zdobyta tu wiedza zawarta w utworzonej bazie danych może również zostać wykorzystywana w innych dziedzinach nauki, takich jak np. archeologia podwodna.
- Ze względu na rosnącą aktywność techniczną człowieka na Morzu Bałtyckim monitorowanie oddziaływania antropogenicznego na dno tego akwenu wymaga powtórzeń dla określenia trendów. Sporządzona baza danych pozwoli w przyszłości powrócić na te obszary w celu przeprowadzenia kolejnych obserwacji i porównań.
- Wskazany jest, aby w przyszłości rozszerzyć obserwacje na inne akweny, a także udoskonalic opiswane metody badawcze w celu przeprowadzenia w pełni automatycznej detekcji oddziaływania antropogenicznego na dno morskie. Prace te będą realizowane w przyszłości poprzez systematyczne uzupełnianie opracowanej bazy danych, a także dzięki przygotowaniu na jej podstawie algorytmów wykorzystujących sieci neuronowe do zautomatyzowanej detekcji i klasyfikacji śladów aktywności technicznej człowieka na dnie.

12. Literatura

- Ahmad A., Dey L. (2007) *A k-mean clustering algorithm for mixed numeric and categorical data*. Data & Knowledge Engineering 63, pp. 503 – 527
- Akyidiz I.F., Pompili D., Melodia T. (2005) *Underwater acoustic sensor networks: research challenges*. Ad Hoc Networks 3, pp. 257 – 279
- Albregstern F. (2008) *Statistical Texture Measures Computed from Gray Level Cooccurrence Matrices*. Technical Note, Department of Informatics, University of Oslo
- Alcaro L., Della Torre C., Petochi T., Sammarini V., Matiddi M., Corsi I., Baroni D., Giordano P., Marino G., Focardi S., Amato E. (2012) *Studies on Environmental Effects of Underwater Chemical Munitions in the Southern Adriatic Sea (Mediterranean Sea)*. Marine Technology Society Journal Vol. 46, No. 3, pp. 10 – 20
- Amato E., Alcaro L., Corsi I., Della Torre C., Farchi C., Focardi S., Marino G., Tursi A. (2006) *An integrated ecotoxicological approach to assess the effects of pollutants released by unexploded chemical ordnance dumped in the southern Adriatic (Mediterranean Sea)*. Marine Biology 149 (1), pp. 17 – 23
- Andersson K., Jonsson P. (2003) *En ROV undersökning av trålspar i södra Östersjön*. J R Swedish Agric For Acad 142, pp. 39 – 42 (j. szwedzki)
- Anys H., He D-C. (1995) *Evaluation of Textural and Multipolarization Radar Features for Crop Classification*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. 33, No. 5, pp. 1170 – 1181
- Appel D., Strehse J. S., Martin H-J., Maser E. (2018) *Bioaccumulation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and its metabolites leaking from corroded munition in transplanted blue mussels (M. edulis)*. Marine Pollution Bulletin 135, pp. 1072 – 1078
- Azis F.A., Aras M.S.M., Rashid M.Z.A., Othman M.N., Abdullah S.S. (2012) *Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study*. Procedia Engineering 41, pp. 554 – 560
- Baine M. (2001) *Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance*. Ocean and Coastal Management 44, pp. 241 – 259
- Bałazy P., Copeland U., Sokołowski A. (2019) *Shipwrecks and underwater objects of the southern Baltic – Hard substrata islands in the brackish, soft bottom marine environment*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 255, 106240

- Banterle F., Corsini M., Cignoni P., Scopigno R. (2012) *A Low-Memory, Straightforward and Fast Bilateral Filter Through Subsampling in Spatial Domain*. Computer Graphics Forum, Vol. 31, No. 1, pp. 19 – 32
- Bates C. R., Lawrence M., Dean M., Robertson P. (2011) *Geophysical Methods for Wreck-Site Monitoring: the Rapid Archeological Site Surveying and Evaluation (RASSE) programme*. The International Journal of Nautical Archeology 40.2, pp. 404 – 416
- Beck J.A., van der Lee M.E., Eggert A., Stamer B., Glendhill M., Schlosser Ch., Achterberg P.E. (2019) *In Situ Measurements of Explosive Compounds Dissolution Fluxes from Exposed Munition Material in the Baltic Sea*. Environmental Science and Technology 53, 5652 – 5660
- Bełdowski J., Klusek Z., Szubska M., Turja R., Bulczak I. A., Rak D., Brenner M., Lang T., Kotwicki L., Grzelak K., Jakacki J., Fricke N., Östin A., Olsson U., Fabisiak J., Garnaga G., Rattfelt Nyholm J., Majewski P., Broeg K., Söderström M., Vanninen P., Popiel S., Nawala J., Lehtonen K., Berglind R., Schmidt B. (2016) *Chemical Munition Search & Assessment – an evaluation of the dumped munitions problem in the Baltic Sea*. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 128, pp. 85 – 95
- Bełdowski J., Long T., Söderström M. (2018) *Introduction* In: Bełdowski J., Been R., Turmus E. (eds) *Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM)*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 2018. pp. 1 – 17
- Bełdowski J., Potrykus J., Szubska M., Klusek Z., Lastumäki A., Lahtonen K., Turja R., Fabisiak J., Michalak J., Olejnik A., Pączek B., Lang T., Bickmeyer U., Brenner M., Garnaga G., Malejevas V., Popiel S., Östin A., Olsson U., Vanninen P., Koskela H., Söderström M., Halme M., Barasiene J., Fidler J. (2014) *CHEMSEA Findings – Result from CHEMSEA project (Chemical Munition Search and Assessment)*. Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences, Sopot, Poland, pp. 13 – 21
- Bełdowski J., Szubska M., Emelyanov E., Ganaga G., Drzewińska A., Bełdowska M., Vanninen P., Östin A., Fabisiak J (2015) *Arsenic concentration in Baltic Sea sediments close to chemical munition dumpsite*. Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography 128, pp. 114 – 122
- Bełdowski J., Szubska M., Siedlewicz G., Korejwo E., Grabowski M., Bełdowska M., Kwasigroch U., Fabisiaj J., Łońska E., Szala M., Pępkowiak J. (2019) *Sea-dumped ammunition as a possible source of mercury to the Baltic Sea sediments*. Science of the Total Environment 674, pp. 363 – 373
- Bikonis K. (2007) *Algorytmy rekonstrukcji kształtu dna morskiego i trójwymiarowa wizualizacja obiektów podwodnych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Polska Biblioteka Cyfrowa, pp. 16

- Blondel Ph. (2009) *The Handbook of Sidescan Sonar*. Springer, Berlin/Heidelberg/New York/Chichester ISBN 978-3-540-42641-7, pp. 15 – 18, 31 – 38, 80 - 81
- Blondel Ph. (2000) *Automatic mine detection by textural analysis of COTS sidescan sonar imagery*. International Journal of Remote Sensing Vol. 21, No. 16, pp. 3115 – 3128
- Bogdan M. (2010) *Symulacja i testowanie algorytmów wykrywania krawędzi na potrzeby lotu wśród kanionu ulicy*. Acta Mechanica et Automatica, Vol. 4, No. 3, pp. 9 – 15
- Bradshaw C., Tjensvoll I., Söld M., Allan J.I., Molvaer J., Magnusson J., Naes K., Nisson H.C. (2012) *Bottom trawling resuspends sediment and releases bioavailable contaminants in polluted fjord*. Environmental Pollution 170, 232-41
- Brekhovskikh L. M., Lysanov Yu. (1982) *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer – Verlag, Berlin, pp. 250
- Bresenham E.J. (1965) *Algorithm for computer control of a digital plotter*. IBM Systems Journal, Vol. 4, No. 1, pp. 25 – 30
- Brodecka A., Majewski P., Bolalek J., Klusek Z. (2013) *Geochemical and acoustic evidence for the occurrence of methane in sediments of the Polish sector of the southern Baltic Sea*. Oceanologia 55 (4), pp. 951 – 978
- Brown C. H., Wang H. (2013) *Underwater Augmented Reality: Navigation and identification*. 2013 OCEANS – San Diego, 23-27.09.2013, San Diego, Kalifornia, USA
- Carton G., Jagusiewicz A. (2009) *Historic Disposal of Munitions in U.S. and European Coastal Waters, How Historic Information Can be Used in Characterizing and Managing Risk*. Marine Technology Society Journal, Vol. 43, pp. 16 – 32
- Caruthers J.W. (1977) *Fundamentals of marine acoustics*. Elsevier Oceanography Series 18, pp. 49 - 52
- Celik T., Tjahjadi T. (2011) *A Novel Method for Sidescan Sonar Image Segmentation*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 36, No. 2, pp. 186 – 194
- Chavez Jr. P.S., Isbrecht J., Galanis P., Gabel G.L., Sides S.C., Soltesz D.L., Ross S.L., Velasco M.G. (2002) *Processing, mosaicking and management of the Monterey Bay digital sidescan-sonar images*. Marine Geology 181 (2002), pp. 305 – 315
- Chen C. T., Millero F. J. (1977) *Speed of sound in seawater at high pressure*. The Journal of the Acoustical Society of America 62 (5), pp. 1129 – 1135

- Chen Ch., Luo J., Parker J.K. (1998) *Image Segmentation via Adoptive K-Mean Clustering and Knowledge-Based Morphological Operations with Biomedical Application*. IEEE Transactions on Image Processing Vol. 7, No. 12, pp. 1673 – 1683
- Chen Ch-H., Lee J-D., Lin M-Ch. (2000) *Classification of Underwater Signals Using Neural Networks*. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 31 – 48
- Chesapeake Technology, Inc. (CTI) (2015) *SonarWiz Seabed Classification User Guide*. Rev. 6.0,9/16/2015 pp. 9 – 11
- Chesapeake Technology, Inc. (CTI) (2016) *SonarWiz Sidescan Nadir Filter*. Rev. 1.0,10/14/2016 pp. 3 – 5
- Chesapeake Technology, Inc. (CTI) (2016) *SonarWiz User Guide*. Rev. 6.01.0033, pp. 168, 508 – 509
- Chorzewska K. (2013) *Mozaikowanie obrazów sonarowych wykonanych urządzeniami holowanymi*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej R. 54 nr 4 (195), pp. 5 – 30
- Christensen M.A.I., Storgaard S.M., Fauser P., Hansen F.S., Baatrup E., Sanderson H. (2016) *Acute toxicity of sea-dumped chemical munitions: luminating the environmental toxicity of legacy compounds*. Global Security: Health, Science and Policy 1, pp. 39 – 50
- Christoffersen P. L., Christiansen C., Jensen J. B., Leipe T., Hille S. (2007) *Depositional conditions and organic matter distribution in the Bornholm Basin, Baltic Sea*. Geo-Marine Letters 27, 325 – 338
- Cieślakiewicz W., Dudkowska A., Gic-Grusza G., Jędrasik J. (2017) *Extreme bottom velocities induced by wind wave and currents in the Gulf of Gdansk*. Ocean Dynamics 67, pp. 1461 – 1480
- Clausi D.A. (2002) *An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of gray level quantization*. Canadian Journal of Remote Sensing Vol. 28, No. 1, pp. 45 – 62
- Cooley W.J., Turkey W.J. (1965) *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*. Mathematics of Computation 19, pp. 297 – 301
- Czub M., Kotwicki L., Lang T., Sanderson H., Klusek Z., Grabowski M., Szubska M., Jakacki J., Andrzejewski J., Rak D., Beldowski J. (2018) *Deep sea habitats in the chemical warfare dumping areas of the Baltic Sea*. Science of the Total Environment, Vol. 616 – 617, pp. 1485 – 1497
- Czub M., Nawala J., Popiel S., Dziedzic D., Brzeziński T., Maszczyk P., Sanderson H., Fabisiak J., Beldowski J., Kotwicki L. (2020) *Acute toxicity of sulfur mustard*

and its degradation products to *Daphnia magna*. Marine Environmental Research 161, 105077

- De Barros Pereira T.R., Vital H., Aquino de Silva A. (2017) *Classification of textural distribution of seabed using hydroacoustics data: Case study of Ponta Negra beach, Natal/RN-Brazil*. Proceedings of the 2017 IEEE/OES Acoustic in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), CPRM, Urca, Rio de Janeiro, Brasil, July 25 – 27, 2017
- Del Balzo D. R., Leclere J. H., Collins M. J. (1997) *Critical angle and seabed scattering issues for active-sonar performance prediction in shallow water [w:] High frequency acoustics in shallow water.*, SACLANTCEN Conf. Proc. Ser. CP-45, La Spezia, pp. 148 – 156
- Del Grosso V. A., Mader C. W. (1972) *Speed of Sound in Sea-Water Samples*. The Journal of the Acoustical Society of America 52 (3), pp. 961 – 974.
- Dera J. (2003) *Fizyka Morza*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, pp. 263, 462 – 478
- Dewi C., Sundari S., Mardji M. (2019) *Texture Feature on Determining Quantity of Soil Organic Matter For Patchouli Plant Using Backpropagation Neural Network*. Journal of Information Technology and Computer Science Vol. 4, No. 1, pp. 1 – 14
- Diaz Mendoza G., Schwarzer K. (2019) *Seabed features in Mecklenburg Bight based on Side-Scan Sonar Imagery*. Marine and River Dune Dynamics Conference – MARID VI, 1-3 April 2019, Bremen, Germany
- Doolette J.D. (2004) *Decompression practice and health outcome during a technical diving project*. South Pacific Underwater Medicine Society (SPUMS) Journal, Vol. 34, No.4, pp. 189 – 195
- Dziewicki M., Fleski A., Specht C. (1998) *Availability of DGPS reference station signal on South Baltic*. Proceedings of the 2nd European Symposium on Global Navigation Satellite Systems – GNSS '98, Toulouse, France
- Dziewicki M., Specht C. (1996) *Systemy DGPS na Bałtyku Południowym*. Żeglarska Konferencja Bezpieczeństwa, Gdynia, pp. 7 – 11
- Edwards H. M., Fornari J. D., Rognstad R. M., Kelly D. Ch., Mah L. Ch., Davis K. L., Flores R.M. K., Main L. E., Brusio L. N. (2016) *Time-lapse camera studies of sea-disposed chemical munition in Hawaii*. Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography 128, pp. 25 – 33
- Edwards H. M., Shjegstad M. S., Wilkens R., King C. J., Carton G., Bala D., Bingham B., Bissonnette C., M., Briggs Ch., Brusio S. N., Camilli R., Cremer M., Davis B. R., De Carlo H. E., DuVal C., Fornari J. D., Kaneakua-Pia I., Kelly D. Ch., Koide Sh., Mah L. Ch., Kerby T., Kurras J. G., Rognstad R. M., Sheild L., Silva J., Wellington B., Van Woerkom M. (2016) *The Hawaii Undersea Military Munition*

Assessment. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 128, pp. 4 – 13

- Einsidler D., Dhanak M., Beaujean P-Ph. (2018) *A Deep Learning Approach to Target Recognition in Side-scan Sonar Imagery*. OCEANS 2018 MTS/IEEE, 10 January 2018, Charleston, SC, USA
- Fabi G., Spagnolo A., Bellan-Santini D., Charbonnel E., Çiçek A. B., Goutayer Garcia J. J., Jensen C. A., Kallianiotis A., Neves dos Santos M. (2011) *Overview on Artificial Reefs in Europe*. Brazilian Journal of Oceanography 59 (special issue CARAH), pp. 155 – 166
- Fakiris E., Papatheodorou G., Geraga M., Ferentinos G. (2016) *An Automatic Target Detection Algorithm for Swath Sonar Backscatter Imagery, Using Image Texture and Independent Component Analysis*. Remote Sensing 8 (5), 373
- Falcão M., Santos M.N., Drago T., Serpa D., Monteiro C. (2009) *Effect of artificial reefs (south Portugal) on sediment – water transport of nutrients: importance of the hydrodynamic regime*. Estuary Coast and Shelf Science 83, pp. 451 – 459
- Feldens P., Darr A., Feldens A., Tauber F. (2019) *Detection of Boulders in Side Scan Sonar Mosaics by a Neural Network*. Geoscience 9, 159
- Felski A. (red.) (2017) *Optymalizacja poszukiwania obiektów podwodnych w aspekcie zagrożenia terrorystycznego akwenów portowych*. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia
- Filisetti A., Marouchos A., Martini A., Martin T., Collings S. (2018) *Developments and applications of underwater LiDAR systems in support of marine science*. Oceans 2018 MTS/IEEE Charlestone Conference, 22-25 October 2018, Charleston, SC, USA, pp. 1 – 10
- Fofonoff N. P., Millard R. C. Jr. (1983) *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. UNESCO technical papers in marine science. No. 44, Division of Marine Sciences. UNESCO, Place de Fontenoy, 75700 Paris
- Gafurov S. A., Klochkov E.V. (2015) *Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies*. Procedia Engineering Vol. 106, pp. 141 – 148
- Geraga M., Chrisodoulou D., Eleftherakis D., Papatheodorou G., Fakiris E., Dimas X., Georgiou N., Kordella S., Prevenios M., Iatrou M., Zoura D., Kekebanou S., Sotiropoulos M., Ferentinos G. (2020) *Atlas of Shipwrecks in Inner Ionian Sea (Greece): A Remote Sensing Approach*. Heritage 3, pp. 1210 – 1236
- Gourina Ch., Fakiris E., Geraga M., Williams D.P., Papatheodorou G. (2019) *Automatic Detection of Trawl-Marks in Sidescan Sonar Images through Spatial Domain Filtering, Employing Haar-Like Features and Morphological Operations*. Geosciences 9, 214

- Grabowski M., Fioravanti S., Been R., Cernich F., Malejevas V. (2018) *Suitability Study of Survey Equipment Used in the MODUM Project*. In: Bełdowski J., Been R., Turmus E. (eds) *Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM)*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, pp. 19– 47
- Grafulla Gonzáles B., Petillot Y., Smith Ch. (2004) *Detection and classification of trawling marks in side scan sonar images*. *Advances in Technology for Underwater Vehicle Conference Proceedings*, March 2004
- Grasmueck M., Eberli G. P., Viggiano D. A., Correa T., Rathwell G., Luo J. (2006) *Autonomous underwater vehicle (AUV) mapping reveals coral mound distribution, morphology, and oceanography in deep water of the Straits of Florida*. *Geophysical Research Letters* vol. 33
- Grządziel A. (2007) *Techniki sonaru bocznego w badaniach hydrograficznych*. *Przegląd Hydrograficzny* Nr 4
- Grządziel A., Wąż M. (2014) *System echosondy wielowiązkowej w pomiarach batymetrycznych planowanych tras żeglugi*. *Logistyka* 6/2014, pp. 4250 – 4256
- Hac B., Sarna O. (2021) *Ogólna metodyka oszczania bałtyckich wraków z paliwa: Propozycja Programu Zarządzania Wrakami dla Polski*. Fundacja MARE, Warszawa 2021
- Hall-Beyer M. (2017) *GLCM Texture: A Tutorial v. 3.0 March 2017*. PRISM: University of Calgary's Digital Repository
- Hall-Beyer M. (2017) *Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of modern spatial scales*. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 38, No. 5, pp. 1312 – 1338
- Haralick R. M. (1979) *Statistical and Structural Approaches to Texture*. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 5, pp. 786 – 804
- Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I'H. (1973) *Textural Feature for Image Classification*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* Vol. SMC-3, No. 6, pp. 610 – 621
- Helsinki Commission HELCOM (2013) *Chemical Munition Dumped in the Baltic Sea. Report of the ad hoc Expert Group to Update and Review Existing Information on Dumped Chemical Munitions in the Baltic Sea (HELCOM MUNI)*. *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 142, pp. 28 – 57
- Hendożko E., Szefer P., Warzocha J. (2010) *Heavy metals in *Macoma baltica* and extractable metals in sediments from the southern Baltic Sea*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74, pp. 152 – 163

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): *ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)
- Hildebrand A. J. (2009) *Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean*. Marine Ecology Progress Series Vol. 395, pp. 5 – 20
- Hopkins C.C.E (2003) *The Dangers of Bottom Trawling in the Baltic Sea*. Report for Coalition Clean Baltic, pp. 1 – 14
- Huggett Q.J., Millard N.W. (1992) *Towed Ocean Bottom Instrument TOBI: A New Deep-Towed Platform for Side-Scan Sonar and Other Geophysical Survey*. Proceedings of the 24th Annual Offshore Technology Conference in Houston, Texas, 4-7 May 1992
- Huvenne V.A.I., Blondel Ph., Henriot J.-P. (2002) *Textural analyses of sidescan sonar imagery from two mound provinces in the Porcupine Seabight*. Marine Geology 189, pp. 323 – 341
- Hylkema A., Hakkaart C.A.Q., Reid B. C., Osinga R., Murk J. A., Debrot O. A. (2021) *Artificial reefs in the Caribbean: A need for comprehensive monitoring and integration into marine management plans*. Ocean and Coastal Management 209, 105672
- Ierodiaconou D., Monk J., Rattary A., Laurenson L., Versace V.L. (2011) *Comparison of automated classification technique for predicting benthic biological communities using hydroacoustics and video observation*. Continental Shelf Research 31, pp. 28 – 38
- Jackson R.D., Richardson D.M. (2007) *High-Frequency Seafloor Acoustics*. Springer, New York, pp. 22
- Jakacki J., Meler S. (2018) *An evaluation and implementation of the regional coupled ice-ocean model of the Baltic Sea*. Ocean Dynamics, doi: 10.1007/s10236-018-1219-8
- Jakacki J., Przyborska A., Nowicki A., Wichorowski M., Przyborski M., Białoskórski M., Sochacki C., Tylman R. (2017) *eBalticGrid – an interactive platform for the visualization of results from a high-resolution operational Baltic Sea mode*. Meteorol. Hydrol. Water Manage. 5 (2), pp. 13 – 20
- Jiao Sh., Zhao Ch., Xin Y. (2018) *Research on Convolutional Neural Network Model for Sonar Image Segmentation*. MATEC Web of Conference 220, 10004
- Jones DOB., Bett BJ., Wynn RB., Masson DG. (2009) *The use of towed camera platform in deep-water science*. International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol. 28, No. 2, pp. 41 – 50

- Kaberow R., Szatan M. (2008) *Mozaikowanie obrazów sonarowych*. Przegląd Hydrograficzny BHMW No. 4
- Kampmeier M., Van der Lee E. M., Wichert U., Greinert J. (2020) *Exploration of the munition dumpsite Kolberger Heide in Kiel Bay, Germany: Example for a standardized hydroacoustic and optic monitoring approach*. Continental Shelf Research Vol. 198, 104108
- Kaniewski P. (2005) *Integrated Positioning System for AUV*. Molecular and Quantum Acoustics Vol. 26, pp. 115 – 128
- Karoui I., Fablet R., Boucher J.-M., Augustin J.-M. (2009) *Seabed segmentation using optimized statistics of sonar textures*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47 (6), pp. 1621 - 1631
- Kaur R., Sharma S., Kaur N. (2019) *Heavy metal toxicity and the environment*. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry SP1, pp. 247 – 249
- Kayaalti Ö., Hakan Aksebzeci B., Ökkeş Karahan I., Deniz K., Öztürk M., Yilmaz B., Kara S., Hakan Asyali M. (2014) *Liver fibrosis staging using CT image texture analysis and soft computing*. Applied Soft Computing 25, pp. 399 – 413
- Kelley Ch., Carton G., Tomlinson M., Gleason A. (2016) *Analysis of towed camera images to determine the effects of disposed mustard-filled bombs on the deep water benthic community of south Oahu*. Deep-Sea Research II 128, pp. 34 – 42
- Kita J., Stahl H., Hayashi M., Green T., Watanabe Y., Widdicombe S. (2014) *Benthic megafauna and CO₂ bubble dynamics observed by underwater photography during a controlled sub-seabed release of CO₂*. International Journal of Greenhouse Gas Control Vol. 38, pp. 202 – 209
- Koç C.K. (1995) *Analysis of Sliding Window Techniques for Exponentiation*. Computer Math. Applic. Vol. 30, No. 10, pp. 17 – 24
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. (2012) *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*. Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 1097 – 1105
- Kunde T., Held P., Sternberg H., Schneider von Deimling J. (2018) *Ammunition detection using high frequency multibeam snipper backscatter information*. Marine Pollution Bulletin 133, pp. 481 – 490
- Lastumäki A., Turja R., Brenner M., Vanninen P., Niemikoski H., Butrimavičienė L., Stankevičiūtė M., Lahtonen K.K. (2020) *Biological effects of dumped chemical weapon in the Baltic Sea: A multi-biomarker study using cage mussels at the Bornholm main dumping site*. Marine Environmental Research 161, 105036

- Lecours V., Dolan F. J. M., Micallef A., Lucieer L. V. (2016) *A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor*. Hydrology and Earth System Science 20, pp. 3207 – 3244
- Lienhart R., Maydt J. (2002) *An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection*. International Conference on Image Processing, 22 – 25 September 2002, Rochester, NY, USA
- Lokkeborg S. (2005) *Impact of trawling and scallop dredging on benthic habitats and communities*. FAO Fisheries Technical Paper 472:1, pp. 58
- Lotufo R.G., Chappell A.M., Price L.C., Ballentine L.M., Fuentes A.A., Bridges S.T., George D.R., Glisch J.E., Carlton G. (2017) *Review and synthesis of evidence regarding environmental risk posed by munition constituents (MC) in aquatic systems*. Report No. ERDC/EL TR-17-17, Environmental Laboratory (U.S.), pp. 63 – 69
- Lurton X. (2010) *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer, Berlin, pp. 22 – 28
- Mackenzie K. V. (1961) *Bottom reverberation for 530 and 1030 cps sound in deep water*. J. Acoust. Soc. Am., 33(11), pp. 1498 – 1506
- Mackenzie K. V. (1981) *Nine-term equation for sound speed in the oceans*. The Journal of the Acoustical Society of America 70 (3), pp. 807 – 812.
- MacLennan D.N. (1986) *Time Varied Gain Functions for Pulse Sonar*. Journal of Sound and Vibration 110(3), pp. 511 – 522
- Majewski A. (1989) *Podziały Morza Bałtyckiego*. Przegląd geofizyczny, 2 (XXXIV), pp. 167 – 168
- Majewski P. (2014) *Akustyczne rozpoznawanie form występowania gazonośnych osadów w Bałtyku Południowym*. Rozprawa doktorska, Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie
- Majewski P., Klusek Z. (2014) *Parameters of echo signals originated from a gas seepage site in the Southern Baltic Sea*. Hydroacoustics vol. 17, pp. 143 – 150
- Malinverni E. S., Cerrano C., Pantaleo U., Andreola C., Paolanti M., Chiappini S., Pierdicca R. (2020) *Image enhancement comparison to improve underwater cultural heritage survey*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 949 (1): 012102
- Mallios A., Ribas D., Ridao P. (2009) *Localization Advances in the Unstructured Under-water Environment*. 9th Symposium on Oceanography & Fisheries Vol. I, pp. 111 – 116

- Massel R.S. (2013) *Ocean surface waves: their physics and prediction*. World Scientific Publishing, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 36
- Medvedeva N., Polyak V., Kankaanpää H., Zaytseva T. (2009) *Microbial responses to mustard gas dumped in the Baltic Sea*. Marine Environmental Research 68 (2), pp. 71 – 81
- Medwin H., Clay C. S. (1998) *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, Boston
- Miętkiewicz R. (2020) *Dumped conventional warfare (munition) catalog of the Baltic Sea*. Marine Environmental Research Vol. 161, 105057
- Missiaen T., Feller P. (2008) *Very-high-resolution seismic and magnetic investigations of a chemical munition dumpsite in the Baltic Sea*. Journal of Applied Geophysics 65, pp. 142 – 154
- Missiaen T., Noppe L. (2009) *Detailed seismic imaging of a chemical munition dumpsite in the Bornholm Basin, south-western Baltic*. Environmental Earth Sciences 60 (1), pp. 81-94
- Missiaen T., Söderström M., Popescu I., Vanninen P. (2010) *Evaluation of a chemical munition dumpsite in the Baltic Sea based on geophysical and chemical investigation*. Science of the Total Environment 408, pp. 3536 – 3553
- Mitra V., Wang C., Banerjee S. (2005) *Lidar Signal Processing for Under-water Object Detection*. In: Wang J., Liao XF., Yi Z. (eds) *Advances in Neural Networks – ISNN 2005*. ISNN 2005. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3497. Springer, Berlin, Heidelberg
- Modalavalasa N., Sasi Bhushana Rao G., Satya Prasad K. (2012) *A Novel Approach for Segmentation of Sector Scan SONAR Images Using Adaptive Thresholding*. International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST) Vol. 2, No. 4, pp. 113 – 119
- Mojski J.E. (red.) (1995) *Atlas geologiczny Południowego Bałtyku*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa – Sopot
- Moszyński M., Stepnowski A. (2002) *Increasing the Accuracy of Time-varied-gain in Digital Echosounders*. Acta Acustica united with Acustica Vol. 88, No. 5, pp. 814 – 817 (4)
- National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey (2014) *Pre-Survey Planning*. In: National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Field Procedure Manual, pp. 58
- Newpower A. (2006) *Iron Men and Tin Fish: The Race to Build a Better Torpedo during World War II*. War, Technology, and History, Praeger Security International, Westport Connecticut, London, pp. 17

- Niemikoski H., Söderström M., Vanninen P. (2017) *Detection of Chemical Warfare Agents-Related Phenylarsenic Compounds in Marine Biota Samples by LC-HESI/MS/MS*. Analytical Chemistry 89 (20), pp. 11129 – 11134
- Niemikoski H., Straumer K., Ahvo A., Turja R., Brenner M., Rautanen T., Lang T., Lehtonen K.K., Vanninen P. (2020) *Detection of chemical warfare agent related phenylarsenic compounds and multibiomarker responses in cod (Gadus morhua) from munition dumpsites*. Marine Environmental Research 162, 105160
- Nord Stream Environmental Impact Assessment Documentation for Consultation under the Espoo Convention (2009) *Nord Stream Espoo Report: Key Issue Paper Munitions: Convectional and Chemical*
- Nornes M. S., Ludvigsen M., Ødegård Ø., Sørensen J. A. (2015) *Underwater Photogrammetric Mapping of an Intact Standing Steel Wreck with ROV*. International Federation of Automatic Control – PapersOnLine 48-2, pp. 206 – 2011
- Novarini J. C., Caruther J. W. (1998) *A simplified approach to backscattering from a rough seafloor with sediment inhomogeneities*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 22(3), pp. 157 – 166
- O'Neill F.G., Summerbell K. (2011) *The mobilization of sediment by demersal otter trawls*. Marine Pollution Bulletin 62, pp. 1088 – 1097
- Obarle K.J.F., Puig P., Martin J. (2017) *Fishing Activities*. in: Micallef A., Krastel S., Savini A. (ed.) *Submarine Geomorphology*, Springer Geology, pp. 503 – 534
- Obarle K.J.F., Swarzenski W.P., Reddy M.Ch., Nelson K.R., Baasch B., Hanebuth J.J.T. (2016) *Deciphering the lithological consequences of bottom trawling to sedimentary habitats on the shelf*. Journal of Marine Systems 159, pp. 120 – 131
- Osadczuk A. (2007) *Geofizyczne metody badań osadów dennych*. Studia Limnologica et Telmatologica Vol. 1, No. 1, pp. 25 – 32
- Otsu N. (1979) *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, pp. 62 – 66
- Paka V., Spiridonov M. (2002) *Research of dumped chemical weapon made by R/V "Professor Shtockman" in the Gotland, Bornholm and Skagerrak dump site*. In: Missiaen T., Henriot J-P. (eds.) *Chemical Munitions Dump Sites in Coastal Environment*. Federal Office for Science, Technical and Cultural Affairs (OSTC), pp. 27 – 42
- Pallavi C., Reddy S.S. (2015) *Denoising of an Image using Bilateral Filter on FPGA*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 4, Issue 3, pp. 142 - 147

- Parttilä M., Tervo V., Parmanne R. (1982) *Heavy Metals in Baltic Herring and Cod*. Marine Pollution Bulletin Vol. 13, No. 11, pp. 391 – 393
- Paull L., Saeedi S., Seto M., Li H. (2014) *AUV Navigation and Localization: A Review*. IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol. 39, No. 1, pp. 131 – 149
- Politz F. (1994) *Zeitbombe Ostsee – Das Giftgas – Erbe auf dem Meeresgrund*. Chr. Links Verlag, LinksDruck GmbH, Berlin, pp. 134 (j. niemiecki)
- Preston J. (2009) *Automated acoustic seabed classification on multibeam images of Stanton Banks*. Applied Acoustics 70, pp. 1277 – 1287
- Preston J. M., Kinney W. A., Jespers S. (1991) *Estimates of monostatic and bistatic reverberation using low-frequency linear fm pulses*. SACLANTCEN Technical Report SR-182
- Preston J.M., Christney A.C., Beran L.S., Collins W.T. (2004) *Statistical Seabed Segmentation – From Images and Echoes to Object Clustering*. Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delf, The Netherlands, 5-8 July, 2004
- Priyadharsini R., Sree Sharmila T. (2019) *Object Detection In Underwater Acoustic Images Using Edge Based Segmentation Method*. Procedia Computer Science 165, pp. 759 – 765
- Pryputniewicz D., Wojtasiewicz B. (2008) *Pomiary przezroczystości wody i widzialności podwodnej wykonane przez siły MW*. Przegląd Hydrograficzny Nr 5
- Queirolo D., Hurtado F.C., Gaete E., Soriguer C.M., Erzini K., Gutiérrez-Estrada C.J. (2012) *Effects of environmental conditions and fishing operations on the performance of a bottom trawl*. ICES Journal of Marine Science 69(2), pp. 293 – 302
- Rak D., Wieczorek P. (2012) *Variability of temperature and salinity over the last decade in selected regions of the southern Baltic Sea*. Oceanologia 54 (3), pp. 339 – 354
- Reed S., Ruiz I.T., Capus Ch., Petillot Y. (2006) *The Fusion of Large Scale Classified Side-Scan Sonar Image Mosaics*. IEEE Transactions on Image Processing Vol. 15, No. 7, pp. 2049 – 2060
- Rettray A., Ierodiconou D., Laurenson L., Burq S., Reston M. (2009) *Hydro-acoustic remote sensing of benthic biological communities on the shallow South East Australian continental shelf*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 84, pp. 237 – 245
- Rogowska J. Wolska L., Namieśnik J. (2010) *Impact of pollution derived from ship wreck on the marine environment on the basis of s/s “Stuttgart” (Polish coast, Europe)*. Science of the Total Environment 408, pp. 5775 – 5783

- Rosenberg R., Nilsson C.H., Grémare A., Amoroux J-M. (2003) *Effects of demersal trawling on marine sedimentary habitats analysed by sediment profile imagery*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 285 – 286, pp. 465 – 477
- Rychlicki M., Miskiewicz A. (2013) *Ocena dokładności danych lokalizacyjnych odbiorników GPS*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport., z. 92, pp. 187 – 198
- Sanderson H., Fauser P., Thomsen M., Vanninen P., Söderström M., Savin Y., Khalikov I., Hirvonen A., Niiranen S., Missiaen T., Gress A., Borodin P., Medvedeva N., Polyak Y., Paka V., Zhurbas V., Feller P. (2010) *Environmental Hazards of Sea-Dumped Chemical Weapons*. Environmental Science and Technology 44, 4389 – 4394
- Saniewski M., Zalewska T. (2018) *Budget of ⁹⁰Sr in the Gulf of Gdansk (southern Baltic Sea)*. Oceanologia 60 (3), pp. 256 – 263
- Shang X., Zhao J., Zhang H. (2019) *Obtaining High-Resolution Seabed Topography and Surface Details by Co-Registration of Side-Scan Sonar and Multibeam Echo Sounder Images*. Remote Sensing 11 (12), 1496
- Sheng Y.P. (2000) *Physical characteristic and engineering at reef sites*. In: Seaman W. (ed.) *Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, pp. 51 – 96
- Shrivakshan G.T., Chandrasekar Dr. C. (2012) *A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing*. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 5, No. 1, pp. 269 – 276
- Smith C. J., Banks C., Papadopoulou K-N. (2007) *Improving the quantitative estimation of trawling impacts from sidescan-sonar and underwater-video imagery*. ICES Journal of Marine Science, 64, pp. 1692 – 1701
- Söderström M., Östin A., Qvarnstrom J., Magnusson R., Rattfelt-Nyholm J., Veher M., Jöul P., Lees H., Kaljurand M., Szubska M., Vanninen P., Beldowski J. (2018) *Chemical Analysis of Dumped Chemical Warfare Agents During the MODUM Project*. In: Beldowski J., Been R., Turmus E. (eds) *Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM)*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, pp. 71 – 103
- Song Y., Choi S-J. (2016) *Underwater 3D Reconstruction for Underwater Construction Robot Base on 2D Multibeam Imaging Sonar*. Journal of Ocean Engineering and Technology 3 (30), pp. 227 – 233
- Song Y., He B., Liu P. (2019) *Real-Time Object Detection for AUVs Using Self-Cascaded Convolutional Neural Network*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 46, No. 1, pp. 56 – 67

- Stateczny A., Włodarczyk – Sielicka M. (2012) *The results of bathymetry data processing obtained by swath sounder GS+*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, rok LIII nr 4 (191), pp. 105 – 118
- Steiniger S., Hunter A.J.S. (2013) *The 2012 free and open source GIS software map – A guide to facilitate research, development, and adoption*. Computers, Environment and Urban Systems 39, pp. 136 – 150
- Stepnowski A., Łubniewski Z. (2011) *Combined Method for Multibeam Sonar Signal Processing and Image Analysis for Seafloor Classification*. International Symposium on Ocean Electronics, 16 – 18 November 2011, Kochi, India
- Strehse S.J., Appel D., Geist C., Maritn H-J., Maser E. (2017) *Biomonitoring of 2,4,6-trinitrotoluene and degradation products in the marine environment with transplanted blue mussels (M. edulis)*. Toxicology 390, pp. 117 – 123
- Suresh A., Shunmuganathan K.L. (2012) *Image Texture Classification using Gray Level Co-Occurrence Matrix Based Statistic Features*. European Journal of Scientific Research Vol. 75, No. 4, pp. 591 – 597
- Svane I., Petersen J.K. (2001) *On the problems of epibioses, fouling and artificial reefs, a rewiev*. Marine Ecology 22, pp. 169 – 188
- Szafrńska M., Gil M., Nowak J. (2021) *Towards monitoring and estimating the size of the HFO-contaminated seabed around a shipwreck using MBES backscatter data*. Marine Pollution Bulletin 171, 112747
- Szczucka J., Trudnowska E., Hoppe L. (2013) *Acoustic studies of Arctic zooplankton*. Hydroacoustics vol. 16, pp. 211 – 216
- Tęgowski J. (2006) *Akustyczna klasyfikacja osadów dennych*. Monografia habilitacyjna, Polska Akademia Nauk, Instytut Oceanologii w Sopocie, pp. 41 – 52
- Tian W-M. (2008) *Integrated method for the detection and location of underwater pipelines*. Applied Acoustics 69, pp. 387 – 398
- Tomasi C., Manduchi R. (1998) *Bilateral Filtering for Gray and Color Images*. Sixth International Conference on Computer Vision, Bombay, India, 7 January 1998
- Trudnowska E., Szczucka J., Hoppe L., Boehnke R., Hop H., Blachowiak – Samolyk K. (2012) *Multidimensional zooplankton observation on the northern West Spitsbergen Shelf*. Journal of Marine Systems 98-99, pp. 18 – 25
- Tulldahl H. M., Vahlberg C., Axelsson A., Karlsson H., Johnsson P. (2007) *Sea floor classification from airborne lidar data*. Proceedings of SPIE 6750, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III, Florence, Italy

- Urick R. J. (2013) *Principle of underwater sound*. wyd. 3, Peninsula Publishing
- Uścińowicz Sz. (1997) *Basen Gdański*. Przegląd Geologiczny, Vol. 45, No 6, pp. 589 – 599
- Vora P., Oza B. (2013) *A Survey on K-mean Clustering and Particle Swarm Optimization*. International Journal of Science and Modern Engineering Vol. 1, Issue 3, pp. 24 – 26
- Wang C., Philpot W. (2007) *Using airborne bathymetric LIDAR to detect bottom type variation in shallow waters*. Remote Sensing of Environment 106 (1), pp. 123 – 135
- Watson R., Revenga C., Kura Y. (2006) *Fishing gear associated with global marine catches II. Trends in trawling and dredging*. Fisheries Research 79, pp. 103 – 111
- Wąż M., Grządziel A., Nowak D. (2013) *Automatyczna Detekcja Obiektów Sonarowych*. Acta Scientiarum Polonorum Geodesia et Descriptio Terrarum 12 (1), pp. 29 – 42
- Weber C. T., Lurton X (2015) *Chapter 2 Background and Fundamentals* in: Lurton X., Lamarche G. (ed.) *Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations*. GeoHab Backscatter Working Group: Salvador da Bahia, Brazil, pp. 25 – 51
- Weinberg L.K., Kotwicki S. (2008) *Factors influencing net width and sea floor contact of survey bottom trawl*. Fisheries Research 93, pp. 265 – 279
- Wilson W. D., (1960) *Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure, and Salinity*. The Journal of the Acoustical Society of America 32 (6), pp. 641 – 644
- Witte T. H., Wilson A. M. (2004) *Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground*. Journal of Biomechanics 37, pp. 1891 – 1898
- Wołoszczyn M. (2008) *Detection of ferromagnetic objects in local magnetic anomaly of the Baltic Sea*. Polish Maritime Research 2(56), Vol. 15, pp. 77 – 82
- Wynn R. B., Huvenne V. A. I., Le Bas T. P., Murton B. J., Connelly D. P., Bett B. J., Ruhl H. A., Morris K. J., Peakall J., Parsons D. R., Sumner E. J., Darby S. E., Dorrell R. M., Hunt J. E. (2014) *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contribution to the advancement of marine geoscience*. Marine Geology 352, pp. 451 – 468
- Xie S., Chen J., Luo J., Xie P., Tang W. (2012) *Detection and Tracking of Underwater Object Based on Forward-Scan Sonar*. In: Su CY., Rakheja S., Liu H. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7506. Springer, Berlin, Heidelberg

- Xinyu T., Xuewu Z., Xiaolong X., Jinbao S., Yan X. (2017) *Methods for Underwater Sonar Image Processing in Objection Detection*. International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), 25-27 December 2017, Dalian, China
- Xiong Ch., Li Z., Sun X., Zhai J., Niu Y. (2018) *An Effective Method for Submarine Pipeline Inspection Using Three-Dimensional (3D) Models Constructed from Multisensor Data Fusion*. Journal of Coastal Research 34, 4, pp. 1009 - 1019
- Yildiz O., Yilmaz A.E., Gokalp B. (2009) *State-of-the-Art System Solutions for Unmanned Underwater Vehicle*. RADIOENGINEERING Vol. 18, No. 4, pp. 590 - 600
- Yuh J. (2000) *Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey*. Autonomous Robots 8, pp. 7 – 24
- Yun X., Bachmann E.R., McGhee R.B., Whalen R.H., Roberts R.L., Knapp R.G., Healey A.J., Zyda M.J. (1999) *Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation*. IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol. 24, No. 3, pp. 1 – 21
- Zhao J., Meng J., Zhang H., Yan J. (2017) *A New Method of Acquisition of High-Resolution Seabed Topography by Matching Seabed Classification Images*. Remote Sensing 9 (12), 1214
- Zupe N., Pawar V. (2012) *GLCM Textural Features for Brain Tumor Classification*. International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 3, No. 3, pp. 354 – 359

Strony internetowe:

- (1) http://www.kleinmarinesystems.com/PDF/datasheets/Klein_UUV_3500_rev0718.pdf (dostęp: lipiec 2019)
- (2) <https://www.gospodarkamorska.pl/artykuly/przeglad-metod-pomiarow-batymetrycznych-na-plytkich-wodach.html> (dostęp: grudzień 2020)
- (3) <http://www.saabseaeye.com/solutions/underwater-vehicles/falcon> (dostęp: sierpień 2019)
- (4) <https://www.tritech.co.uk/media/products/SeaPrince%20DST%20Datasheet.pdf?id=7f658a41> (dostęp: wrzesień 2019)
- (5) <http://www.teledynemarine.com/M900-2250%20Dual%20Frequency%20Series/?BrandID=3> (dostęp: wrzesień 2019)

- (6) <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/sonar-equation.html> (dostęp: maj 2020)
- (7) <http://maps.helcom.fi/website/mapservice/index.html> (dostęp: kwiecień 2021)
- (8) <https://sipam.gov.pl/geoportal> (dostęp: grudzień 2021)
- (9) <https://www.mathworks.com/help/images/ref/graycomatrix.html> (dostęp: październik 2021)
- (10) <https://www.mathworks.com/help/stats/zscore.html> (dostęp: październik 2021)

13. Spis rysunków i tabel

Rysunki:

- **Rysunek 2.1** Przykładowe działanie filtra progowego: A – fragment przetworzonej mozaiki sonarowej przez zastosowaniem filtra progowego; B – fragment mozaiki sonarowej po zastosowaniu filtra progowego. Strzałki w kolorze czerwonym wskazują lokalizację obiektów podwodnych
- **Rysunek 2.2** Przykładowe działanie algorytmu detekcji krawędzi na fragmencie mozaiki sonarowej. A – fragment mozaiki sonarowej przed wykrywaniem krawędzi; B, C i D - fragmenty przetworzonej mozaiki sonarowej po zastosowaniu algorytmu detekcji krawędzi przy pomocy metod *Sobel*, *Roberts* i *Canny* (przyjęta wartości progowe dla metody *Canny*: $\min = 0,01$ i $\max = 0,3$); Czerwone okręgi wskazują lokalizację obiektów podwodnych na uzyskiwanych zobrazowaniach
- **Rysunek 2.3** Detekcja krawędzi obiektów podwodnych i form morfologicznych dna na fragmencie mozaiki sonarowej przy pomocy 2D FFT oraz górnoprzepustowego filtra. A – fragment mozaiki sonarowej; B – widmo amplitudowe fragmentu mozaiki sonarowej A uzyskane przy pomocy 2D FFT; C – widmo amplitudowe mozaiki sonarowej A z zaimplementowanym dolnoprzepustowym filtrem Gaussa; D – fragment mozaiki sonarowej A po wykrywaniu krawędzi obiektów podwodnych i form morfologicznych (bruzd dennych) występujących na dnie
- **Rysunek 2.4** Architektura konwolucyjnej sieci neuronowej na przykładzie sieci VGG-16 – detekcja i klasyfikacja obiektów na obrazie do 1000 klas (na podstawie Nash i in., 2018)
- **Rysunek 3.1** Geometria akwizycji danych sonaru bocznego. Niebieskie strzałki oznaczają kierunek propagacji impulsów nadawanych, natomiast czarne to kierunki fal rozproszonych na dnie, zaś czerwone strzałki symbolizują echo odbite od dna powracające do przetwornika
- **Rysunek 3.2** Charakterystyka kierunkowa przetworników hydroakustycznych w sonarze bocznym Edgetech DF-1000: a) w płaszczyźnie pionowej, b) w płaszczyźnie poziomej (za Grządziel, 2007)
- **Rysunek 3.3** Schemat holowania sonaru bocznego nad dnem morskim
- **Rysunek 3.4** Schemat akwizycji danych z użyciem echosondy jednowiązkowej: a), b) i c) - kolejne momenty docierania nadanej fali akustycznej do dna morskiego
- **Rysunek 3.5** Uproszczony schemat akwizycji danych batymetrycznych przy użyciu echosondy wielowiązkowej
- **Rysunek 3.6** Uproszczony schemat działania systemów interferometrycznych: a) głowica systemu w kształcie litery V. Rzymską cyfrą I oznaczono matrycę przetworników nadawczych, pozostałe cyfry rzymskie odpowiadają kolejnym matrycom przetworników odbiorczych; b) sposób rejestracji sygnałów akustycznych generowanych przez systemy interferometryczne – kolorem niebieskim oznaczono impulsy nadawane, kolorem zielonym impulsy rejestrowane, odbite od dna (na podstawie (2))

- **Rysunek 4.1** AUV IVER 2 z zaznaczonymi najważniejszymi podzespołami
- **Rysunek 4.2** Ruch pojazdu AUV w sześciu stopniach swobody. Kolorem czerwonym oznaczono układ odniesienia
- **Rysunek 4.3** Schemat prowadzenia nawigacji podwodnej z wykorzystaniem systemów: a) USBL, b) SBL i c) LBL
- **Rysunek 4.4** Przykładowy schemat architektury systemu pozycjonowania podwodnego pojazdów typu AUV
- **Rysunek 4.5** Przykładowa misja platformy AUV IVER 2. Czerwona „pinezka” oznacza pozycję jednostki, z której pojazd był obsługiwany. Pomarańczowe punkty wyznaczają rejon, w którym pojazd znajdował się pod wodą, zaś żółte to kolejne punkty drogi. Kolorem granatowym oznaczona została trasa misji awaryjnej
- **Rysunek 4.6** a) zdalnie sterowany pojazd podwodny Saab Seaeye Falcon wraz z dodatkowymi akcesoriami i kabloliną w tle, b) jednostka sterująca pojazdem Falcon
- **Rysunek 4.7** Zdalnie sterowany pojazd podwodny ROV Seaeye Falcon z zaznaczonymi najważniejszymi podzespołami do obserwacji i identyfikacji wykrytych celów
- **Rysunek 4.8** Geometria prowadzenia obserwacji podwodnych przy użyciu sonaru BlueView zainstalowanego na pokładzie pojazdu ROV Falcon
- **Rysunek 5.1** Schemat aktywnego systemu hydrolokacyjnego z widocznymi elementami równania sonaru. Na podstawie Bikonis, 2007
- **Rysunek 5.2** Schemat zjawiska odbicia fali dźwiękowej na granicy dwóch ośrodków (toń wodna, dno morskie) przy założeniu idealnie płaskiej powierzchni dna
- **Rysunek 6.1** Mapa Południowego Bałtyku z zaznaczonymi obszarami badań: A – Zatoka Gdańska, B – Głębia Gdańska, C – Głębia Bornholmska i D – Zatoka Kilońska. Dodatkowo na mapie przedstawiono intensywność komercyjnych, rybackich trałów dennych, a także zaznaczono rejony, w których dochodziło do zatopień amunicji (na podstawie HELCOM)
- **Rysunek 6.2** Powierzchnia dna Zatoki Gdańskiej sfotografowana przy pomocy pojazdu podwodnego ROV Seaeye Falcon na głębokości 36 m z widocznymi formami morfologicznymi występującymi na dnie oraz roślinnością
- **Rysunek 6.3** Szczegółowa mapa Zatoki Gdańskiej (obszar A) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także wykrytym wrakiem. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze (na podstawie EMODnet data)
- **Rysunek 6.4** Płaska powierzchnia dna Głębi Gdańskiej z widocznymi matami bakteryjnymi. Głębokość ok. 101 m
- **Rysunek 6.5** Szczegółowa mapa Głębi Gdańskiej (obszar B) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także

wykrytym wrakiem. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której dochodziło do zrzutów amunicji chemicznej (na podstawie EMODnet data i HELCOM)

- **Rysunek 6.6** Powierzchnia dna Głębi Bornholmskiej z wyraźnie widocznym zagłębieniem, w którym spoczywa obiekt pochodzenia antropogenicznego. Głębokość ok. 93 m
- **Rysunek 6.7** Szczegółowa mapa Głębi Bornholmskiej (obszar C) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno, a także wykrytym wrakiem. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której dochodziło do zrzutów amunicji chemicznej (na podstawie EMODnet data i HELCOM)
- **Rysunek 6.8** Dno morskie w rejonie Zatoki Kilońskiej – obszar D z widocznymi przedstawicielami organizmów bentosowych. Głębokość ok. 11 m
- **Rysunek 6.9** Szczegółowa mapa Zatoki Kilońskiej (obszar D) z zaznaczonymi rejonami, w których prowadzono badania skali oddziaływania antropogenicznego na dno. Dodatkowo na mapie przedstawiono typy osadów budujących powierzchnię dna w tym obszarze oraz zaznaczono strefę, w której składowana jest amunicja konwencjonalna (na podstawie EMODnet data i HELCOM)
- **Rysunek 7.1** Diagram przedstawiający etapy prowadzenia poszukiwań obiektów i śladów antropogenicznych występujących na powierzchni dna morskiego. Bloki z czerwoną obwolutą oznaczają kluczowe produkty kolejnych etapów badań, bloki z czarną obwolutą reprezentują realizowane zadania oraz produkty pośrednie poszczególnych etapów, zaś bloki bez obwoluty to niezbędne kroki, które należy podjąć w celu uzyskania wyników wysokiej jakości
- **Rysunek 7.2** Przykładowy przebieg transektów sonarowych wpisanych w poligon o powierzchni 1 Mm². Zasięg kanału lewego i prawego wynosi 100 m, zaś odstępy między kolejnymi transektami to 133 m przy 150% pokryciu dna wiązką sonaru
- **Rysunek 8.1** Uproszczony schemat powstawania mozaik sonarowych
- **Rysunek 8.2** Wyznaczanie linii pierwszego odbicia od dna przy wykorzystaniu algorytmu „*Bottom Tracking*” zawartego w oprogramowaniu SonarWiz 6
- **Rysunek 8.3** Schemat wyznaczania rzeczywistych odległości od sonaru względem powierzchni dna
- **Rysunek 8.4** Korekcja niejednorodności nasycenia barwą sonogramów z wykorzystaniem funkcji ZRW oraz algorytmu EGN. a) sonogram nieprzetworzony, b) sonogram poddany działaniu funkcji ZRW ($20\log(R) + 0.01(R) - 10$ [dB]), c) sonogram przetworzony przy pomocy algorytmu EGN
- **Rysunek 8.5** Proces korekcji niejednorodności nasycenia barwą sonogramów z wykorzystaniem algorytmu EGN: a) obraz wejściowy; b) schemat budowy tabeli normalizacyjnej; c) sonogram po korekcji

- **Rysunek 8.6** Efekt działania filtra nadiru dostępnego w oprogramowaniu SonarWiz 6: a) fragment sonogramu poddany działaniu tylko algorytmu EGN; b) fragment sonogramu poddany działaniu algorytmu EGN i filtra nadiru
- **Rysunek 8.7** Sposób dzielenia przetworzonych mozaik sonarowych na mniejsze sektory kwadratowe: A – przykładowa mozaika podzielona na 108 sektorów; B – pojedynczy sektor kwadratowy o wymiarach 50 m x 50 m (1000 pikseli x 1000 pikseli)
- **Rysunek 8.8** Mechanizm działania okna przesunego. Czerwona strzałka wskazuje kierunek przesunięcia zadanego sąsiedztwa w płaszczyźnie poziomej. Kolorem niebieskim oznaczono piksel centralny w oknie przesunym. a) okno przesuwne w pozycji startowej; b) okno przesuwne przemieszczone o 1 piksel w płaszczyźnie poziomej; c) mozaika po wyznaczeniu parametrów statystycznych z wykorzystaniem okna przesunego
- **Rysunek 8.9** Kolejne etapy powstawania macierzy współwystępowania poziomów szarości na przykładzie 2 bitowego obrazu rastrowego (4 odcienie szarości). a) obraz wejściowy; b) i c) proces obliczania macierzy współwystępowania poziomów szarości w płaszczyźnie poziomej (0° , (1,0); na podstawie (9))
- **Rysunek 8.10** Dopuszczalne możliwości badania relacji przestrzennych między pikselami położonymi bezpośrednio obok siebie, w płaszczyznach poziomej, pionowej i przekątnych na przykładzie 2 bitowego obrazu rastrowego; na podstawie [6]
- **Rysunek 8.11** Proces tworzenia symetrycznej macierzy współwystępowania poziomów szarości. a) macierz wejściowa; b) niesymetryczna macierz współwystępowania poziomów szarości $P_{(A)}$ zbudowana na podstawie macierzy A; c) transponowana macierz $P_{(A)}$; d) symetryczna macierz współwystępowania poziomów szarości $P_{\text{sym}(A)}$ uzyskana z macierzy A. Kolorem żółtym zaznaczono przekątne macierzy współwystępowania poziomów szarości
- **Rysunek 8.12** Etapy działania algorytmu k-średnich na przykładzie dwuwymiarowej przestrzeni klasyfikacyjnej dla 12 obiektów ($N=12$) przyporządkowanych do 3 klas ($k=3$). Linia przerywaną zaznaczono położenie centroidów poszczególnych klas. a) wybór liczby klas; b) losowy wybór obiektów, które stają się centroidami; c) obliczanie odległości między obiektami położonymi najbliżej centroidów; d) wyznaczanie nowych centroidów; e) obiekty pogrupowane w 3 klasach
- **Rysunek 8.13** Okno programu SonarWiz, w którym dokonywana była detekcja anomalii magnetycznych (po odrzuceniu błędnych zapisów z powierzchni morza; w prezentowanym przykładzie próg detekcji wynosił 5 nT @ H = 3 m). Czarną linią na wykresie zaznaczono naturalne fluktuacje pola magnetycznego Ziemi zmierzone przez magnetometr w całej kolumnie wody. Linia zielona reprezentuje zmiany indukcji magnetycznej zarejestrowane przy pomocy magnetometru. Pionowe czerwone linie wskazują położenie wykrytych anomalii magnetycznych, zaś niebieska ramka określa rozmiar pojedynczej anomalii. Na osi rzędnych zaznaczono zmiany pola magnetycznego wyrażone w nT, a oś odciętych przedstawia kolejno rejestrowane próbki
- **Rysunek 8.14** Przykładowa mozaika sonarowa, z nałożoną mapą konturową zmian indukcji pola magnetycznego w kolorze żółtym. Czerwone punkty oznaczają lokalizację wykrytych anomalii magnetycznych. Kolorem zielonym oznaczono trasę, wzdłuż której prowadzona była rejestracja danych magnetometrycznych. Poza obszarem mozaiki istniało ryzyko rejestracji błędnych danych, w związku z tym, próbki te zostały odrzucone w trakcie analizy

- **Rysunek 8.15** Okno programu SonarWiz, w którym dokonywano pomiarów parametrów wykrytych obiektów, wraz z przykładowym celem zaznaczonym żółtą ramką. Kolorami niebieskim, zielonym i czerwonym oznaczono kolejne mierzone cechy analizowanych struktur: długość, szerokość oraz długość cienia akustycznego rzucanego na dno morskie przez obiekt
- **Rysunek 8.16** Wizualizacja parametrów niezbędnych do wyznaczania wysokości wykrytego obiektu spoczywającego na dnie na podstawie długości jego cienia akustycznego
- **Rysunek 8.17** A – przykładowy fragment mozaiki sonarowej zawartej w oknie przesuwym o wymiarach 21 x 21 m; B – widmo mocy analizowanego fragmentu uzyskane przy pomocy metody 2D FFT. Czerwona linia w części B symbolizuje granicę między górną i dolną półpłaszczyzną, które są symetryczne osiowo względem składowej stałej DC
- **Rysunek 8.18** Detekcja i wyznaczanie kierunkowości bruzd przy pomocy widma uzyskanego metodą 2D FFT i zerowych momentów widmowych: A – widmo mocy fragmentu przykładowej mozaiki z rys. 8.17B z nałożonymi cienkimi zielonymi liniami symbolizującymi zestaw 180 „przekrojów” górnej półpłaszczyzny otrzymanych z zastosowaniem algorytmu Bresenham’a; B – wykres funkcji zerowych momentów widmowych m_0 dla każdego z „przekrojów” od kąta azymutalnego względem północy. Kolorem czerwonym oznaczono maksimum dominujących bruzd, zaś kolorem pomarańczowym dwie dodatkowe bruzdy; C – fragment mozaiki sonarowej z rys. 8.17A z zaznaczonymi kierunkami bruzd względem północy, wyznaczonymi na podstawie wartości maksymalnych jakie przyjmowały obliczone zerowe momenty widmowe
- **Rysunek 8.19** Proces konwersji binarnych masek rastrowych na dane wektorowe: A – wybrany sektor przykładowej mozaiki sonarowej z zaznaczonymi kolorem zielonym pikselami o wartości 1; B – piksele o wartości 1 przekonwertowane na punkty wektorowe (oznaczone kolorem żółtym)
- **Rysunek 8.21** Wynik wektoryzacji binarnych masek rastrowych z wykorzystaniem funkcji *Raster pixel to point*, *DB scan* i *Buffer*. Każdy wykryty obiekt antropogeniczny o pożądanym wymiarach (oznaczony kolorem pomarańczowym) posiada unikatowy identyfikator oraz obliczoną powierzchnię jaką zajmował na dnie
- **Rysunek 8.22** Przykładowa mozaika sonarowa z nałożonymi czerwonymi, prostopadłymi względem bruzd znacznikami wektorowymi
- **Rysunek 9.1** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_MAR19_1
- **Rysunek 9.2** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_MAR19_1
- **Rysunek 9.3** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_SEP18_1
- **Rysunek 9.4** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OX_OC_SEP18_1
- **Rysunek 9.5** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji największego obiektu w obrębie mozaiki GD_OC_NOV18_2

- **Rysunek 9.6** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3
- **Rysunek 9.7** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_GD3
- **Rysunek 9.8** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu OC_MAR17_GD3 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.9** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_2v4
- **Rysunek 9.10** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_2v4
- **Rysunek 9.11** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu GD_SEP15_2v4 w oknach przesuwnych 30 m x 30. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.12** Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji klastra celów w obrębie mozaiki GD_SEP15_5v1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci, D) – obiekt czwarty, E) – obiekt piąty
- **Rysunek 9.13** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji szóstego obiektu w obrębie mozaiki GD_SEP15_5v1
- **Rysunek 9.14** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu GD_SEP15_5v1 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.15** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_APR18_4
- **Rysunek 9.16** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_APR18_4 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.17** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pierwszego obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_MAR16_3
- **Rysunek 9.18** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji drugiego obiektu w obrębie mozaiki BO_OC_MAR16_3
- **Rysunek 9.19** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_MAR16_3 w oknach przesuwnych 30 m x 30 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.20** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu w obrębie mozaiki OC_MAR17_BO2c

- **Rysunek 9.21** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu OC_MAR17_BO2c w oknach przesuwanych 15 m x 15 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.22** Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji celów zlokalizowanych w północnej części mozaiki BO_OC_SEP17_1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci, D) – obiekt czwarty
- **Rysunek 9.23** Fragmenty mozaiki sonarowej oraz kadry z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji celów zlokalizowanych w południowej części mozaiki BO_OC_SEP17_1: A) – obiekt pierwszy, B) – obiekt drugi, C) – obiekt trzeci
- **Rysunek 9.24** Bruzdy wykryte na zobrazowaniu BO_OC_SEP17_1 w oknach przesuwanych 15 m x 15 m. Bruzdy oznaczono na sonogramie prostopadłymi do nich czerwonymi kreskami
- **Rysunek 9.25** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu z pierwszego klastra celów w obrębie mozaiki KH_OC_SEP16_1v2
- **Rysunek 9.26** Fragment mozaiki sonarowej oraz kadr z materiału wideo uzyskanego podczas wizualnej inspekcji pojedynczego obiektu z drugiego klastra celów w obrębie mozaiki KH_OC_SEP16_1v2
- **Rysunek 9.27** Fragment mozaiki sonarowej KH_OC_SEP16_1v2 z widocznymi kraterami powstałymi na skutek neutralizacji niewybuchów z wykorzystaniem podwodnych kurtyn powietrznych
- **Rysunek 10.1** Inspekcja obiektu podwodnego w warunkach niskiej przejrzystości wody: obraz z kamery optycznej (A) oraz sonaru wielowiązkowego BlueView (B) zainstalowanych na platformie ROV Falcon
- **Rysunek 10.2** Częstość obserwacji obiektów antropogenicznych w poszczególnych klasach dla 926 analizowanych sektorów tworzących wszystkie przetworzone mozaiki sonarowe. Dodatkowo na rysunku przedstawiono klasę 0, do której przypisywano sektory, w obrębie których nie wykryto celów na dnie
- **Rysunek 10.3** Przykładowy wynik analizy składowych głównych dla 6 cech opisujących przetworzone obrazy sonarowe: A – trójwymiarowy wykres prezentujący zależności pomiędzy składowymi pierwotnymi (lokalna średnia – Mean, lokalna wariancja wyrażona poprzez odchylenie standardowe – STD, entropia – Energy, GLCM en. i GLCM con. - odpowiednio drugi moment rozkładu kąta i kontrast, H-F – wartość jasności mozaiki po operacji z wykorzystaniem metody 2D FFT z zaimplementowanym górnoprzepustowym filtrem; B – wykres osypiska jako wynik analizy PCA
- **Rysunek 10.4** Porównanie działania algorytmu k – średnich do detekcji obiektów antropogenicznych w wybranym fragmencie mozaiki testowej : A – z wykorzystaniem 3 parametrów opisujące analizowany obraz, zredukowanych na podstawie analiz PCA; B - z wykorzystaniem wszystkich parametrów opisujących analizowany obraz. Strzałkami oznaczono artefakty, które nie są poszukiwanymi celami

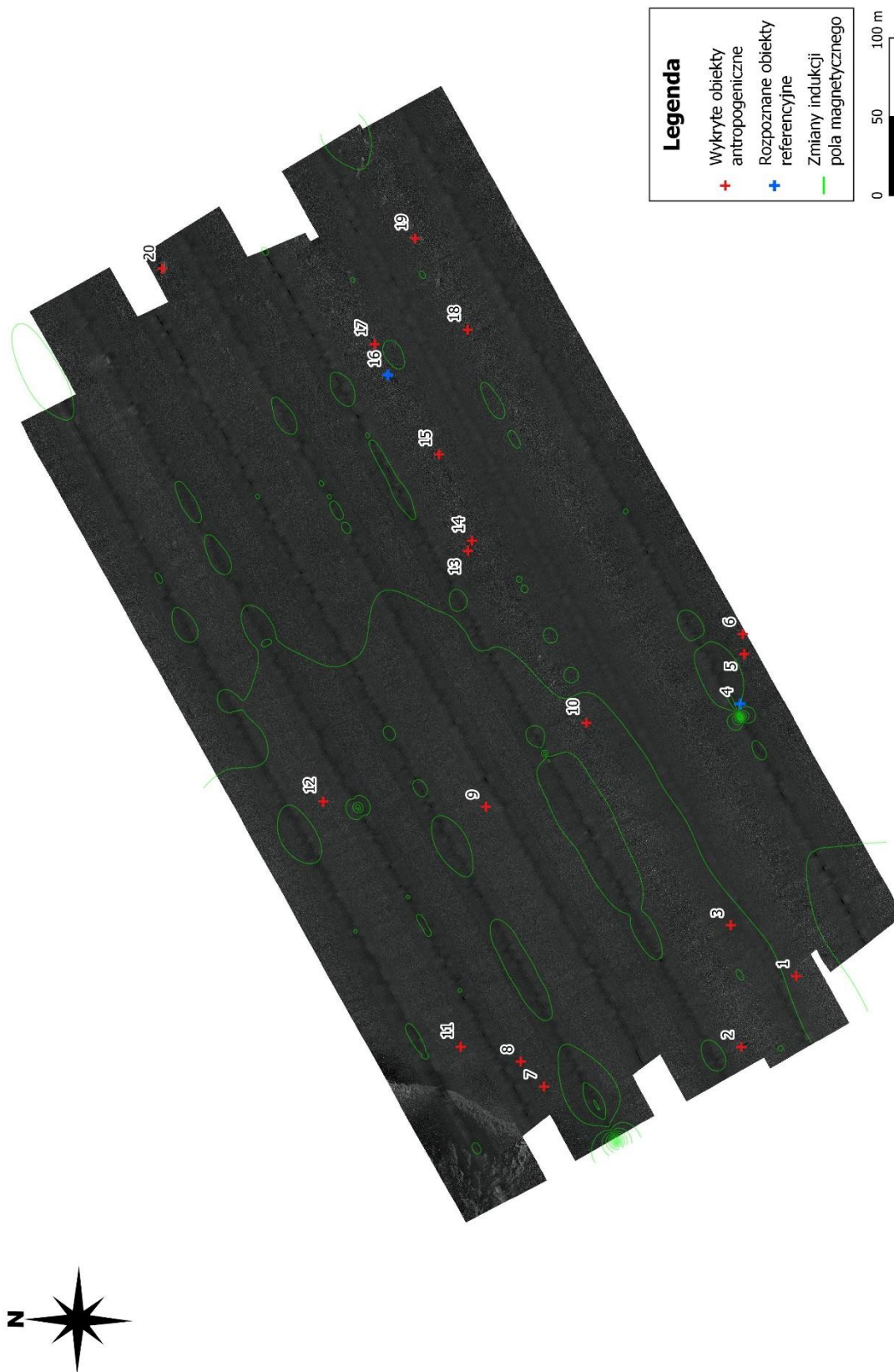
- **Rysunek 10.5** Przykładowe echa dwóch obiektów zagrzebanych w miękkich osadach dennych, wykrytych przy pomocy niskoczęstotliwościowego profilomierza osadów: A – obszar Głębi Gdańskiej, B - obszar Głębi Bornholmskiej
- **Rysunek 10.6** Powstawanie bruzd widocznych na dnie na skutek zastosowania włóków dennych do połowu ryb demersalnych (zmodyfikowano na podstawie Oberle i in., 2016)
- **Rysunek 10.7** Zestawienie wyników analizy kierunkowości bruzd wykrytych w obszarze B – Głębia Gdańska (rejon: A - OC_MAR17_GD3; B - GD_SEP15_2v4; C - GD_SEP15_5v1) z danymi dotyczącymi kierunku i prędkości wiania wiatru w tych rejonach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja zbiorów hydroakustycznych
- **Rysunek 10.8** Zestawienie wyników analizy kierunkowości bruzd wykrytych w obszarze C – Głębia Bornholmska (rejon: A – BO_OC_APR18_4; B – BO_OC_MAR16_3; C – OC_MAR17_BO2c; D – BO_OC_SEP17_1) z danymi dotyczącymi kierunku i prędkości wiania wiatru w tych rejonach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja zbiorów hydroakustycznych

Tabele:

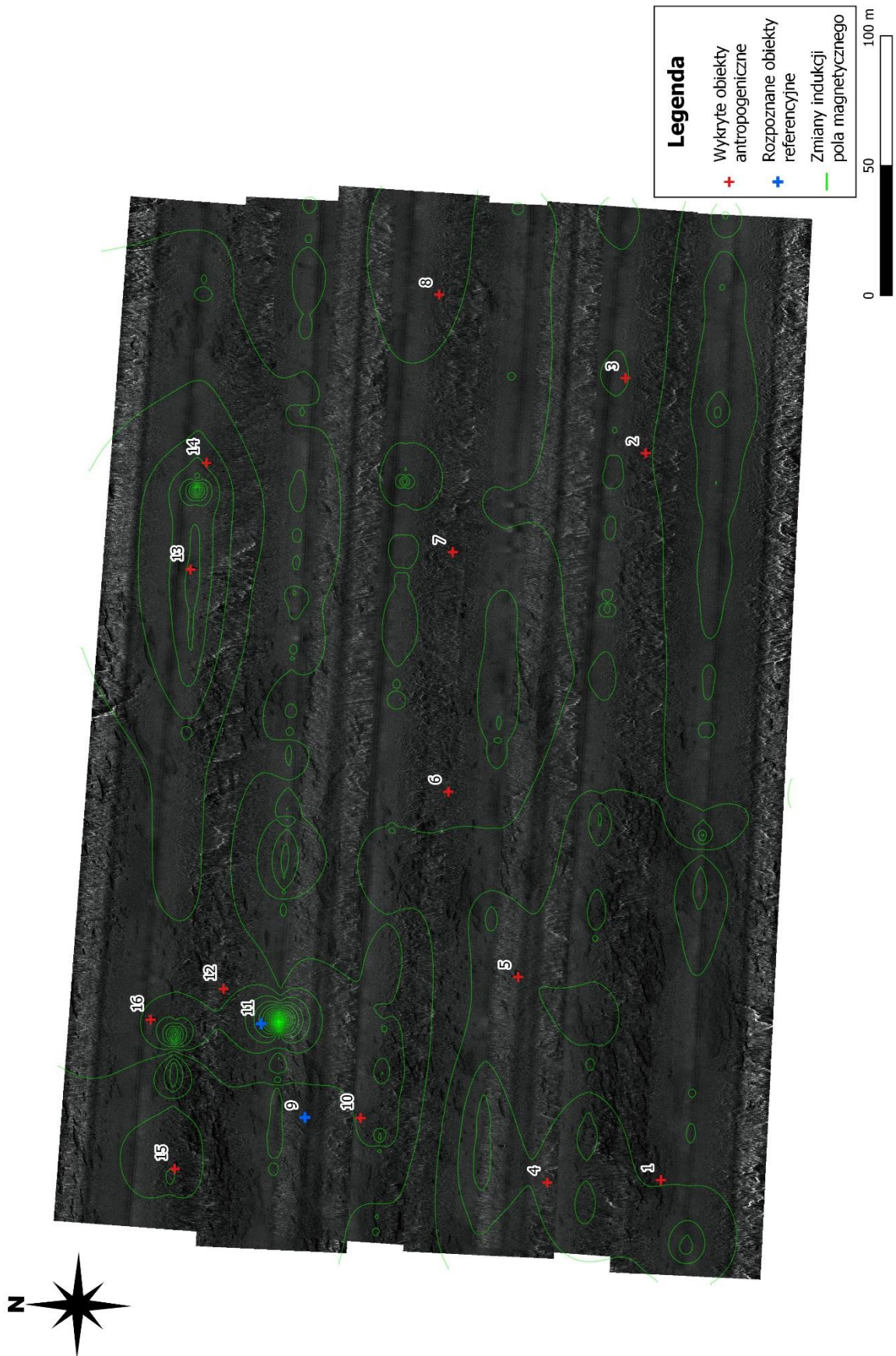
- **Tabela 4.1** Przykładowa klasyfikacja pojazdów ROV (za: Azis i in., 2012)
- **Tabela 9.1** Podsumowanie wyników mapowania dna przy pomocy platform AUV
- **Tabela 9.2** Zestawienie wyników badań skali oddziaływania antropogenicznego na dno obszarów A, B, C oraz D
- **Tabela 10.1** Zbieżność orientacji bruzd dennych widocznych na mozaikach sonarowych uzyskanych w rejonach B oraz C z zamodelowanymi kierunkami wiania wiatrów w tych obszarach z uwzględnieniem lat, w których prowadzona była akwizycja danych hydroakustycznych (- - brak zbieżności; + - niska zbieżność; ++ - wysoka zbieżność; +++ - bardzo wysoka zbieżność)

14. Załączniki

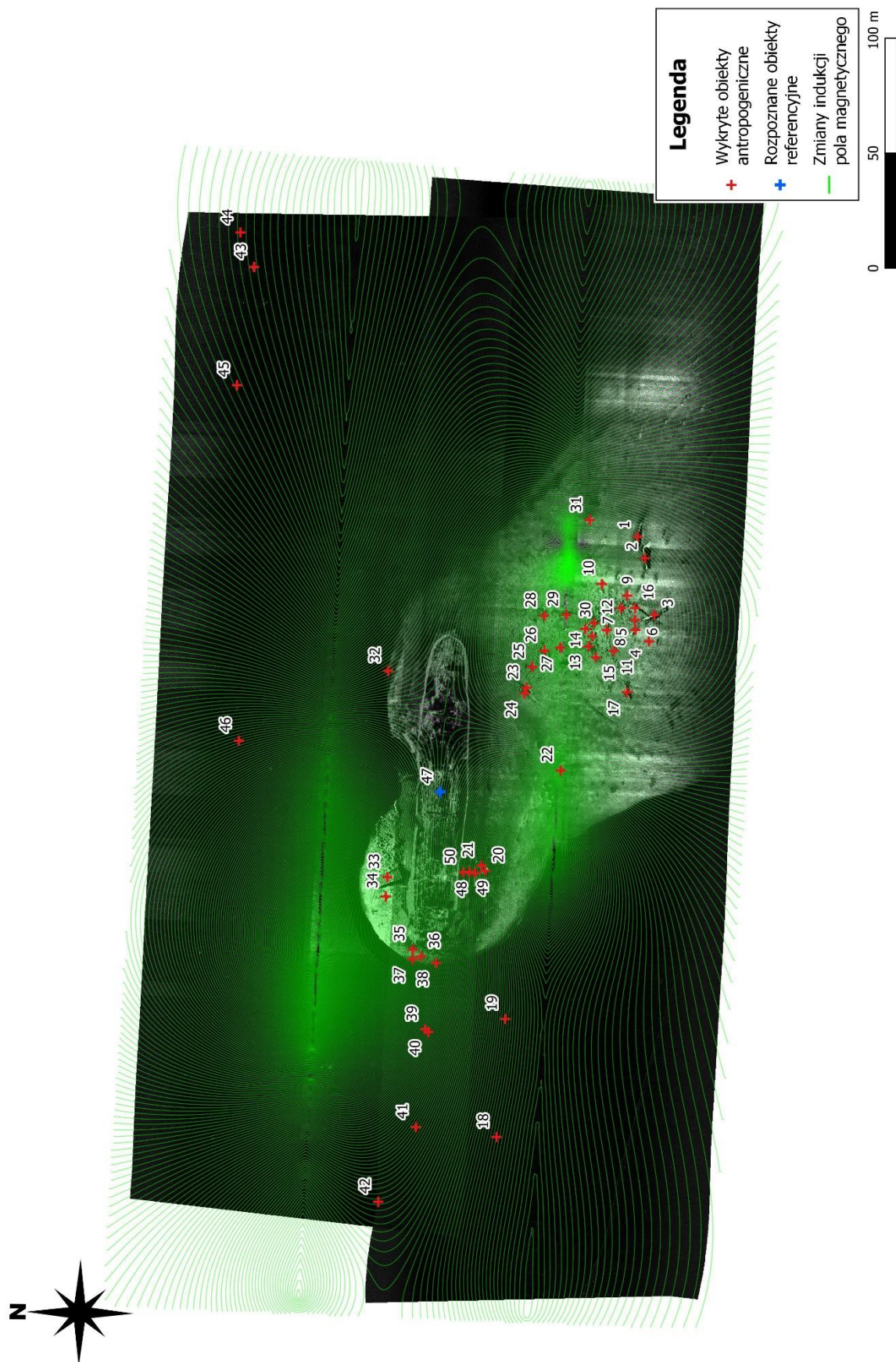
Załącznik 1. Mozaika OX_OC_MAR19_1



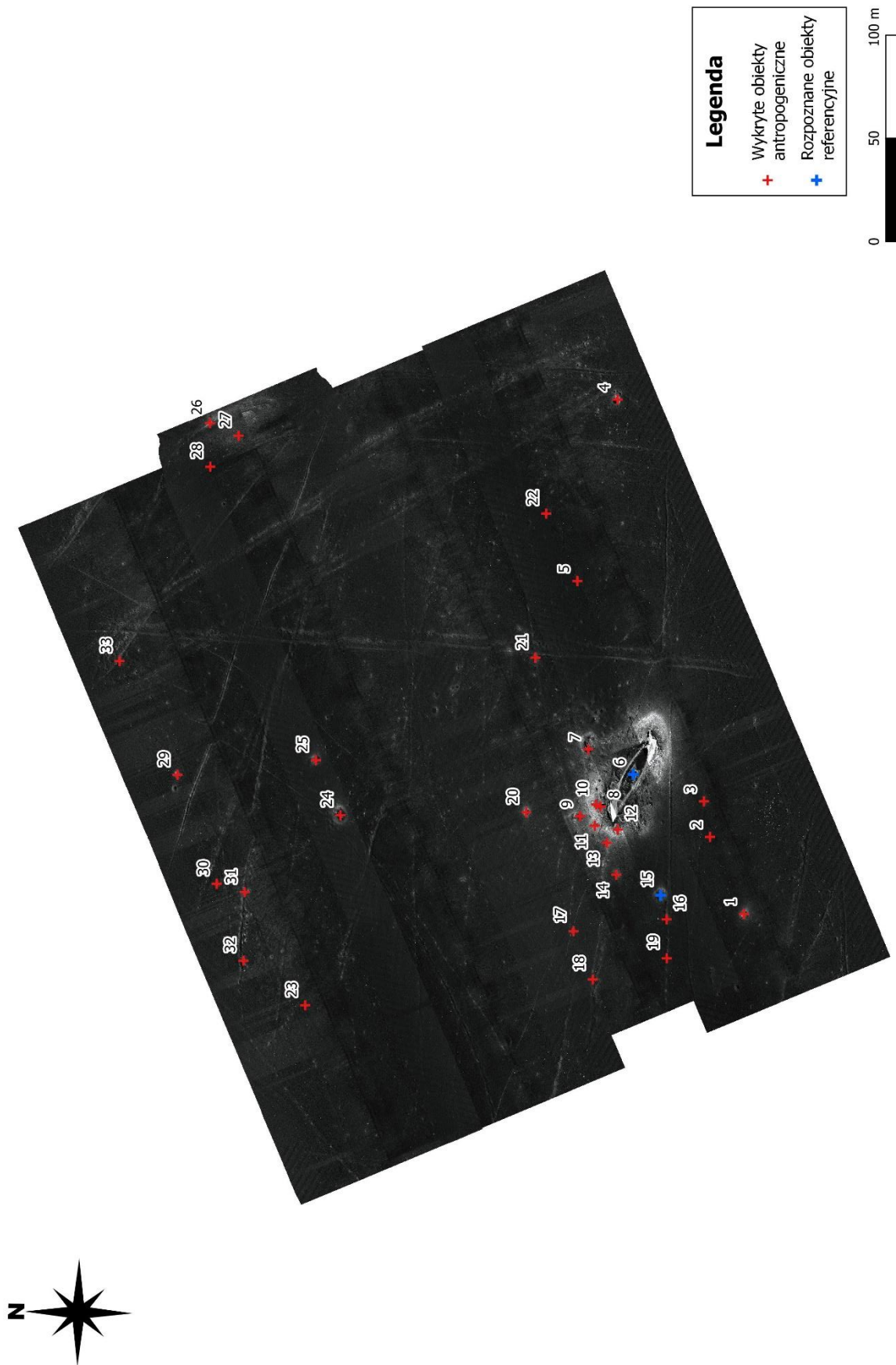
Załącznik 2. Mozaika OX_OC_SEP18_1



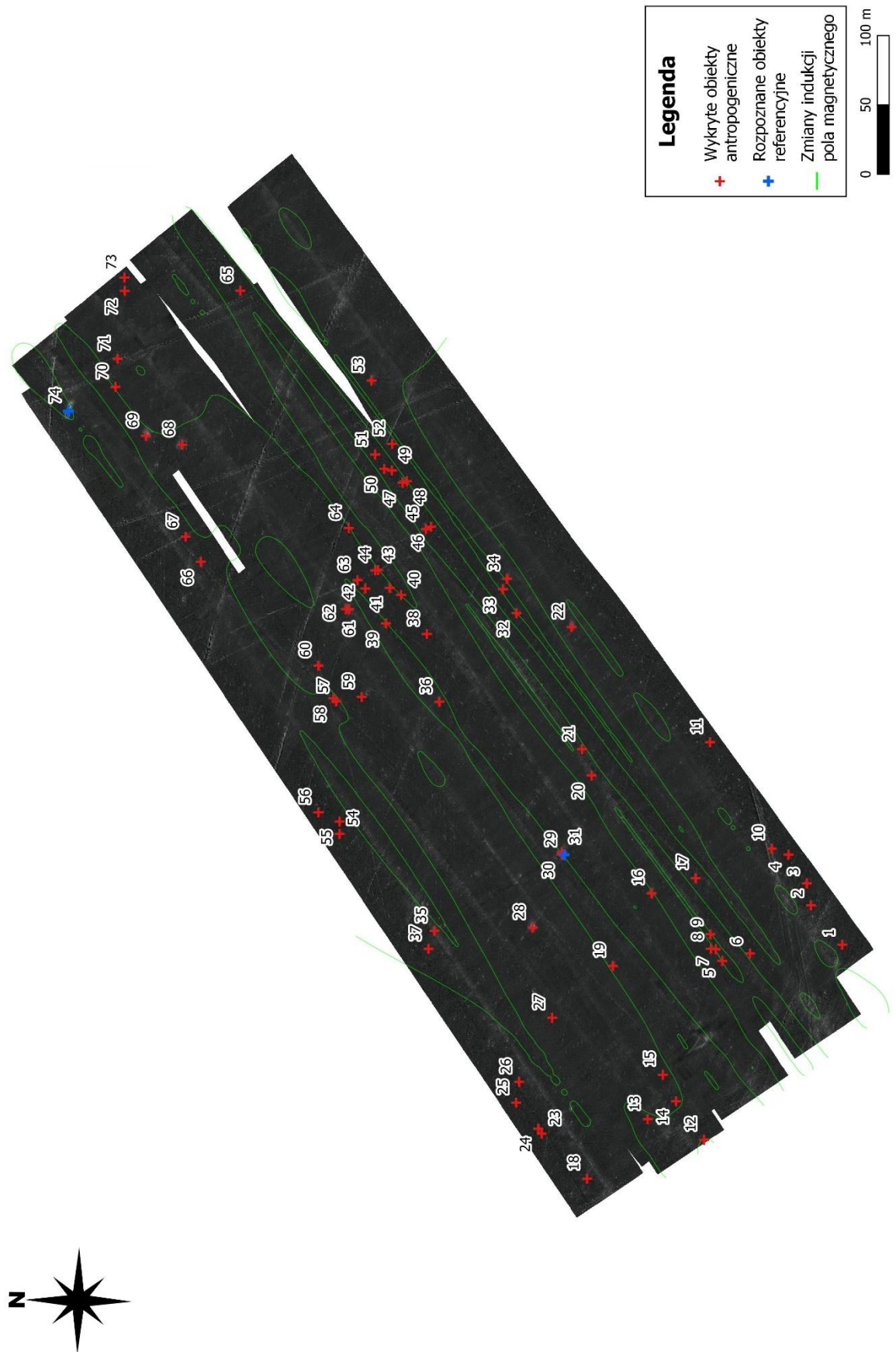
Załącznik 3. Mozaika GD_OC_NOV18_2



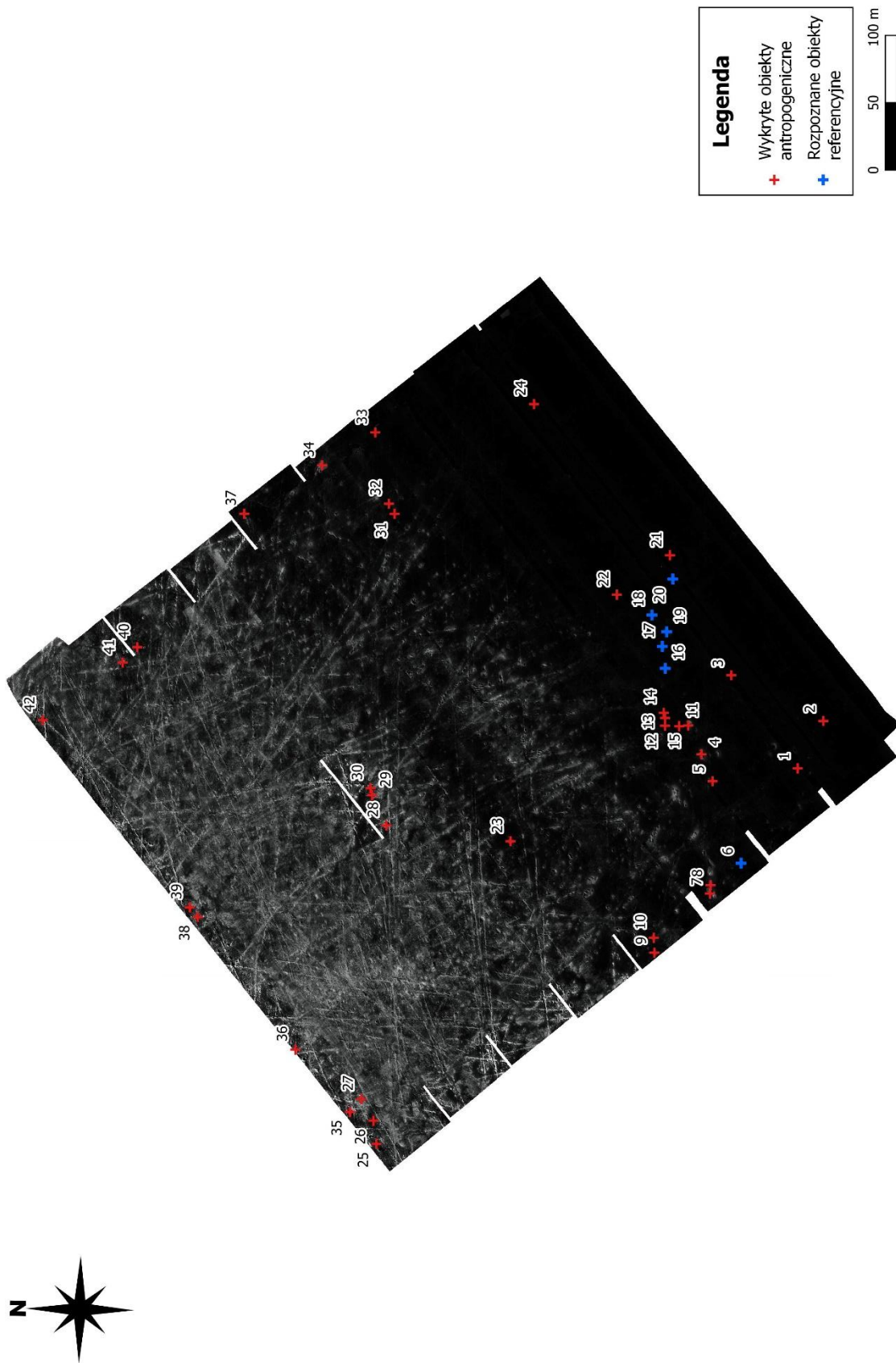
Załącznik 4. Mozaika OC_MAR17_GD3



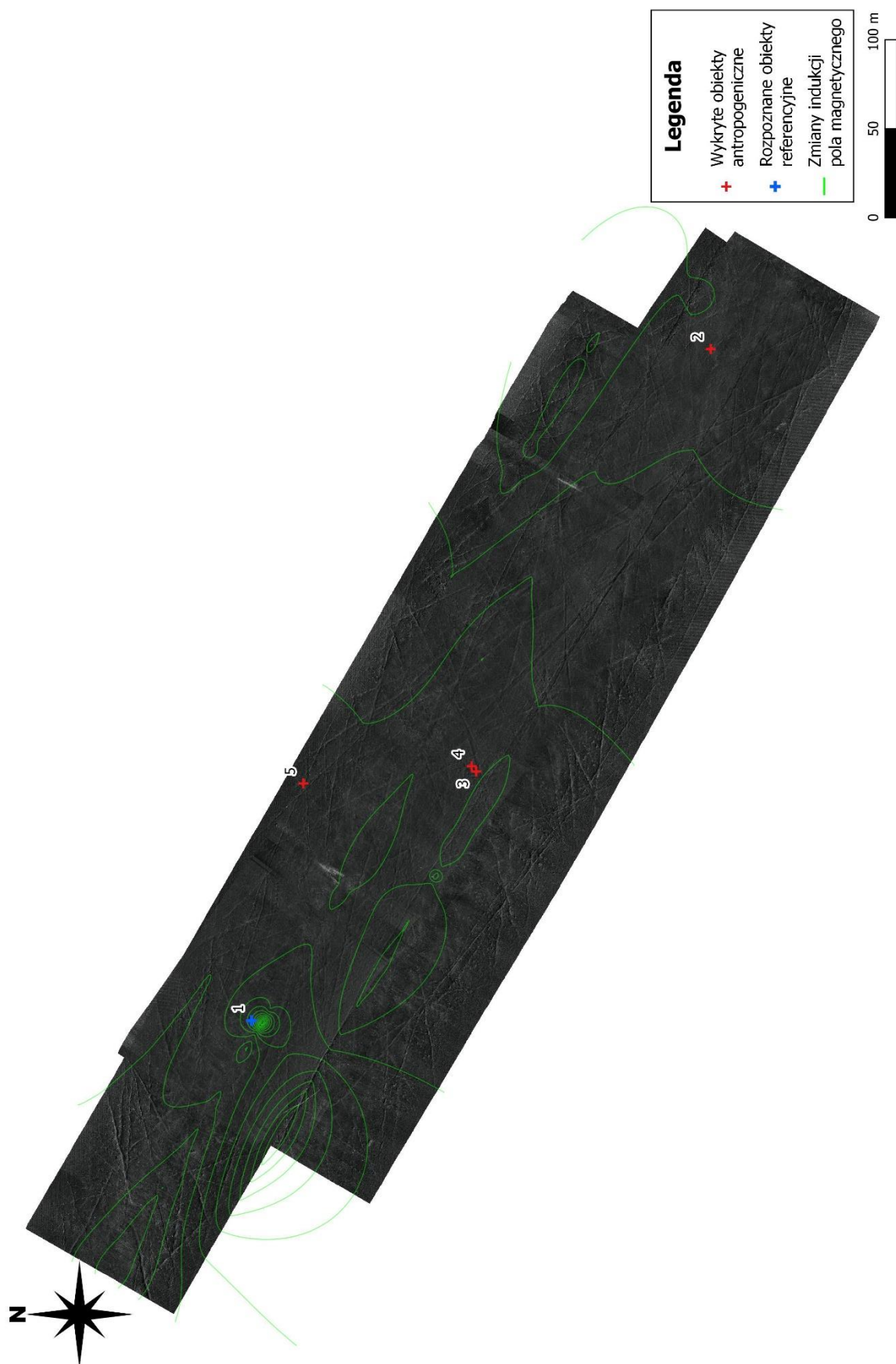
Załącznik 5. Mozaika GD_SEP15_2v4



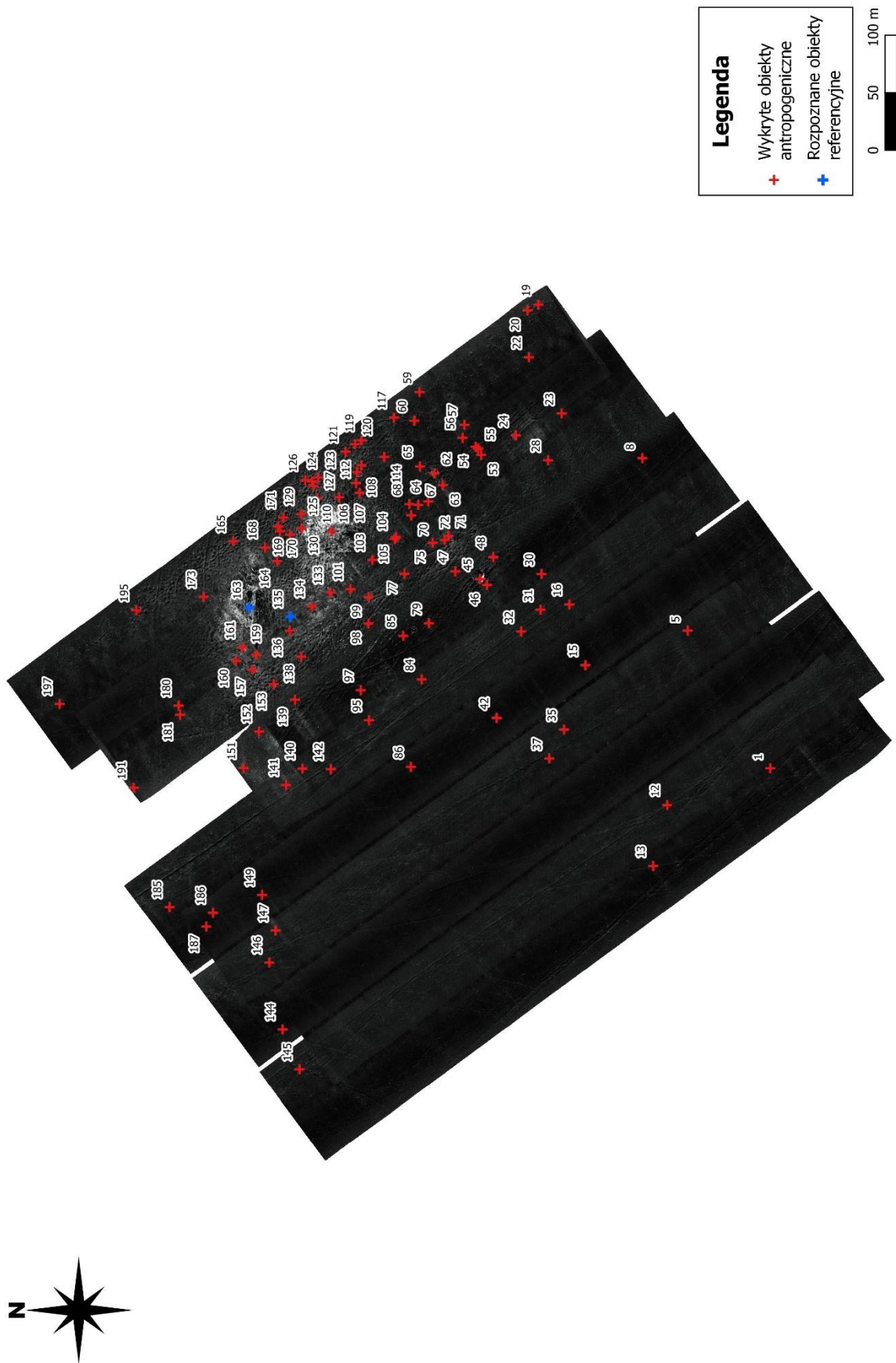
Załącznik 6. Mozaika GD_SEP15_5v1



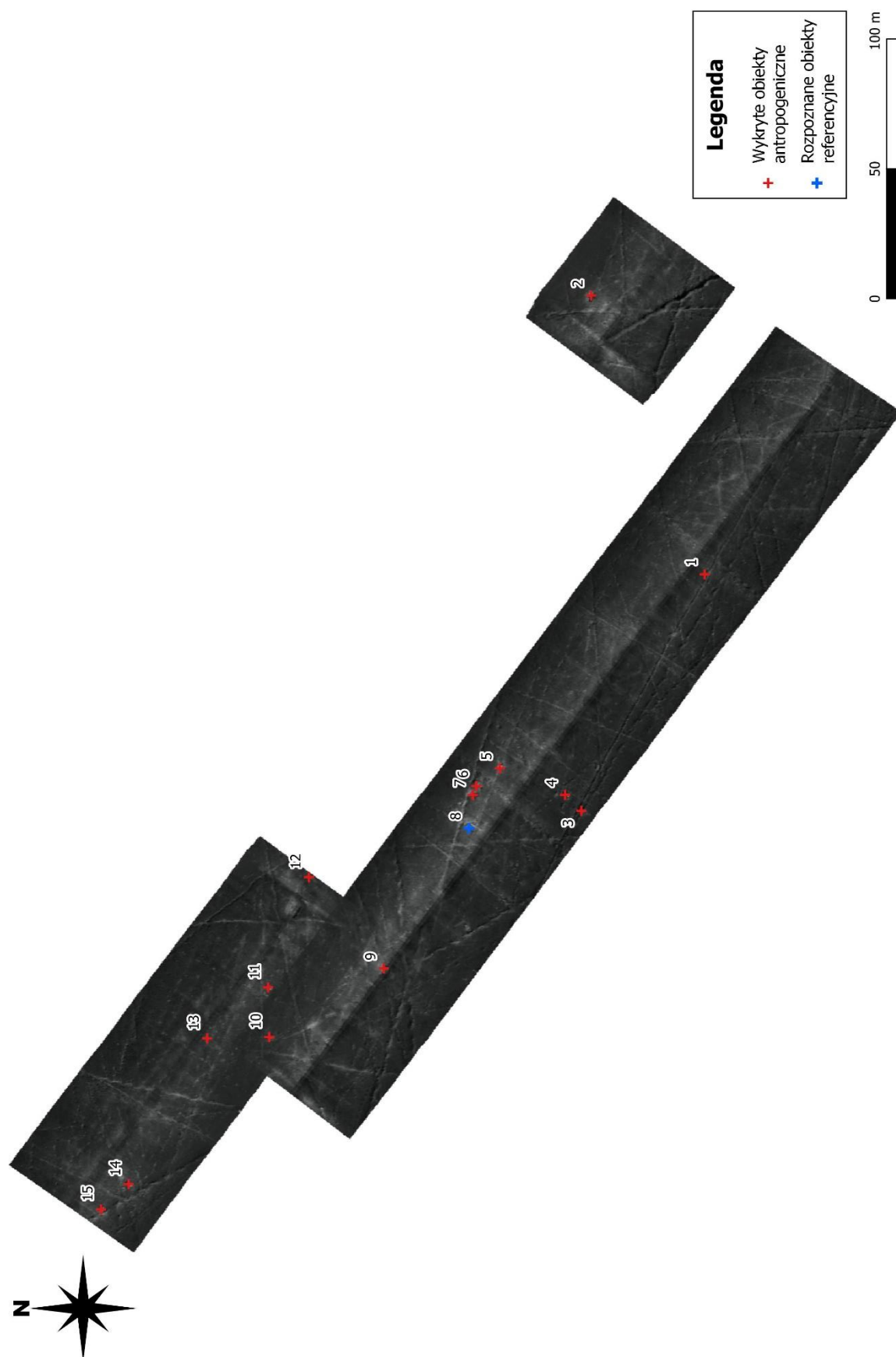
Załącznik 7. Mozaika BO_OC_APR18_4



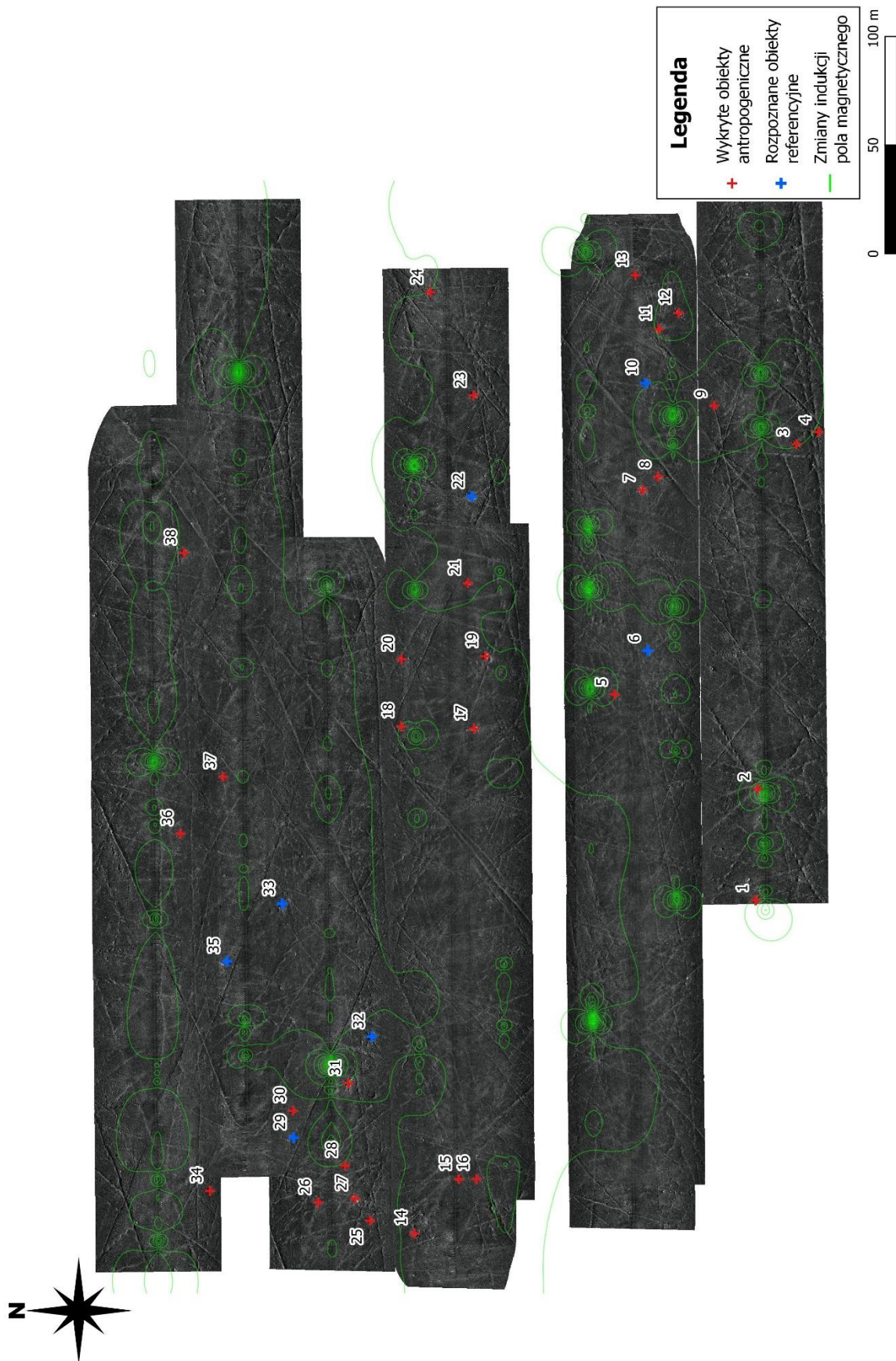
Załącznik 8. Mozaika BO_OC_MAR16_3



Załącznik 9. Mozaika OC_MAR17_BO2c



Załącznik 10. Mozaika BO_OC_SEP17_1



Załącznik 11. Mozaika KH_OC_SEP16_1v2

