

**INNOVATIVE
METHODS FOR
RESEARCH PORT
WATERS USING
UNMANNED
SURFACE
VEHICLES**

Praca zbiorowa pod redakcją
Beaty Szymanowskiej

**INNOWACYJNE METODY
BADAŃ AKWENÓW
PORTOWYCH
Z WYKORZYSTANIEM
BEZZAŁOGOWYCH
PLATFORM
NAWODNYCH**



Polskie
Towarzystwo
Ekonomiczne



Polskie Towarzystwo Ekonomiczne

**INNOWACYJNE METODY BADAŃ
AKWENÓW PORTOWYCH
Z WYKORZYSTANIEM
BEZZAŁOGOWYCH PLATFORM
NAWODNYCH**

**INNOVATIVE METHODS
FOR RESEARCH PORT WATERS
USING UNMANNED SURFACE VEHICLES**

Praca zbiorowa pod redakcją Beaty Szymanowskiej

Zielona Góra 2023

INNOWACYJNE METODY BADAŃ
AKWENÓW PORTOWYCH
Z WYKORZYSTANIEM BEZZAŁOGOWYCH
PLATFORM NAWODNYCH

INNOVATIVE METHODS
FOR RESEARCH PORT WATERS
USING UNMANNED SURFACE VEHICLES

Praca zbiorowa pod redakcją Beaty Szymanowskiej

Recenzenci:
Witold Kazimierski
Robert Marek

ISBN: 978-83-87193-14-0
DOI: 10.26366/PTE.ZG.2023.248

Copyright © 2023, www.port.gdynia.pl

WYDANIE CYFROWE - Open Access CC BY 4.0

Wydawnictwo: www.ptezg.pl
Projekt okładki: www.reklamowaagencja.pl

Spis treści

Wstęp.....	5
Rozdział 1. Wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych w portach morskich.....	9
Hanna Klimek, Tomasz Nowosielski, Anna Salomon	
Rozdział 2. Bezzałogowa platforma nawodna HydroDron-1 wykorzystywana w realizacji projektu MPSS.....	23
Andrzej Stateczny, Marzena Delekta	
Rozdział 3. Sprawdzenie możliwości zastosowania bezzałogowych platform nawodnych do pobierania próbek wody i osadów dennych na przykładzie Portu Gdynia.....	35
Katarzyna Galer-Tatarowicz, Aleksandra Bojke, Grażyna Dembska, Grażyna Pazikowska-Sapota, Agnieszka Flasińska, Tomasz Dziarkowski, Barbara Lednicka	
Rozdział 4. Wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych do oceny poziomu zanieczyszczenia mikroplastikami oraz dioksynami wody i osadów na przykładzie Portu Gdynia.....	47
Marzena Poppek, Katarzyna Krasowska, Alina Dereszewska, Katarzyna Hlebowicz-Wojciechowska	
Rozdział 5. Techniki integracji danych pochodzących z systemów obserwacyjnych w monitoringu strefy przybrzeżnej oraz obszarów portowych.....	67
Andrzej Chybicki, Beata Szymanowska	
Rozdział 6. Modelowanie hydrodynamiczne akwatorium portu morskiego w Gdyni za pomocą modelu GEMSS.....	87
Tomasz Berezowski, Kristoffer Kalbekken, Eirik Tenningen	
Rozdział 7. Problemy związane z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich.....	99
Bohdan Pac, Bartosz Langowski	
Rozdział 8. Użyteczność bezzałogowej platformy nawodnej do pomiarów wybranych parametrów akwenów portowych w Porcie Gdynia.....	113
Tomasz Nowosielski, Marzena Delekta, Justyna Policht	
Zakończenie.....	129
Beata Szymanowska	
O Autorach.....	131
Podziękowania.....	137
Zdjęcia Zespołu pracującego nad projektem.....	138

Table of contents

Preface.....	141
Chapter 1. The use of unmanned surface vehicles in maritime ports	145
Hanna Klimek, Tomasz Nowosielski, Anna Salomon	
Chapter 2. Unmanned surface vehicles HydroDron-1 utilized in the MPSS project.....	157
Andrzej Stateczny, Marzena Delekta	
Chapter 3. Assessing the feasibility of using unmanned surface vehicles for water and sediment sampling: a case study the Port of Gdynia.....	169
Katarzyna Galer-Tatarowicz, Aleksandra Bojke, Grażyna Dembska, Grażyna Pazikowska-Sapota, Agnieszka Flasińska, Tomasz Dziarkowski, Barbara Lednicka	
Chapter 4. The use of unmanned surface vehicles to assess the level of microplastics and dioxin contamination in water and sediments using the Port of Gdynia as an example	181
Marzenna Popek, Katarzyna Krasowska, Alina Dereszewska, Katarzyna Hlebowicz-Wojciechowska	
Chapter 5. Integration techniques for data from observational systems in coastal zone and port area monitoring	199
Andrzej Chybicki, Beata Szymanowska	
Chapter 6. Hydrodynamic modeling of the Gdynia seaport area using the GEMSS Model.....	219
Tomasz Berezowski, Kristoffer Kalbekken, Eirik Tenningen	
Chapter 7. Challenges related to the use of unmanned surface vehicles for research purposes in maritime ports.....	231
Bohdan Pac, Bartosz Langowski	
Chapter 8. The utility of unmanned surface vehicles for measuring selected parameters of port waters in the Port of Gdynia	245
Tomasz Nowosielski, Marzena Delekta, Justyna Policht	
Conclusion	261
Beata Szymanowska	
Acknowledgments.....	263
About the Authors.....	265
Photos of the Team that worked on the project	271

Wstęp

Badania akwenów portowych z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych to obecnie istotny trend w branży morskiej. Dynamiczny rozwój technologii i rosnące zapotrzebowanie na precyzyjne wyniki badań sprzyjają wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań w portach morskich. Rynek bezzałogowych platform nawodnych, przeznaczonych zarówno do realizacji zadań cywilnych, jak i wojskowych, szybko się rozwija, co wynika z rosnącego zainteresowania takimi jednostkami klientów z branży morskiej. Inwestycje w badania i rozwój umożliwiają konstruowanie jednostek wyposażonych w zaawansowane urządzenia i oprogramowanie, wykorzystujących potencjał sztucznej inteligencji, zdobywających dane w czasie rzeczywistym, umożliwiających badanie różnych parametrów środowiskowych, co przyczynia się do szybkiego uzyskania bardziej precyzyjnych (w porównaniu z wykorzystaniem metod konwencjonalnych) wyników badań akwenów portowych.

Praktyka pokazuje, że na znaczeniu zyskują proekologiczność oraz wysoka efektywność bezzałogowych platform nawodnych. Ich zdolność do pracy w trudnych warunkach i niski negatywny wpływ na środowisko naturalne sprawiają, że są one coraz częściej wykorzystywane do wykonywania różnych zadań w portach morskich. Wydaje się, że stały postęp techniczny i technologiczny w tej dziedzinie przyczyni się do przełomowych pozytywnych zmian w badaniach akwenów portowych oraz ochronie środowiska morskiego.

Monografia pt. *Innowacyjne metody badań akwenów portowych z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych* prezentuje rezultaty realizacji projektu pt. *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych* (MPSS). Jego zasadniczym celem jest opracowanie innowacyjnych metod badań akwenów portowych z wykorzystaniem zaawansowanych technologii, takich jak bezzałogowe platformy nawodne. Realizacja projektu MPSS stanowi znaczący postęp w dziedzinie monitoringu i badania stanu akwenów portowych, umożliwiając przeprowadzenie precyzyjnych analiz i pozyskiwanie danych w sposób bezpieczny, ekonomiczny i przyjazny środowisku naturalnemu. Szczegółowe cele projektu MPSS obejmują:

- analizę jakości wody i parametrów środowiskowych akwenów portowych, w tym poziomu zanieczyszczeń, temperatury wody, poziomu zawartości soli i innych ważnych wskaźników,
- monitorowanie warunków meteorologicznych w rejonach portowych, co pozwoli na lepsze przewidywanie warunków pogodowych, zwiększenie bezpieczeństwa żeglugi i zarządzania portem,
- badanie ruchu statków oraz innych obiektów na akwenach portowych, co umożliwia skuteczne zarządzanie ruchem morskim i minimalizację ryzyka kolizji,
- wykrywanie i monitorowanie struktur podwodnych, co ma kluczowe znaczenie dla utrzymania infrastruktury portowej w odpowiednim stanie technicznym,

- analizę różnorodności biologicznej i ekosystemów morskich, co pozwoli na ocenę wpływu działań portowych na środowisko oraz podejmowanie działań na rzecz ochrony przyrody,
- identyfikację zagrożeń i ryzyka zarówno dla infrastruktury portowej, jak i dla środowiska morskiego, co pozwoli na wczesne reagowanie na potencjalne niebezpieczeństwa,
- opracowanie strategii zrównoważonego rozwoju portów, uwzględniającej aspekty ekonomiczne, społeczne i ekologiczne,
- wprowadzenie innowacyjnych technologii i metod monitoringu i zarządzania akwenami portowymi.

Projekt pt. *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych* jest realizowany w ramach programu POLNOR 2019 Call, ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, przez międzynarodowe (polsko-norweskie) konsorcjum składające się z pięciu podmiotów. Są to:

- Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A. – lider,
- Politechnika Gdańska – partner,
- Uniwersytet Morski w Gdyni – partner,
- Norwegian Institute of Water Research – partner,
- MIROS AS – partner.

Uzyskał on dofinansowanie w wysokości: 5 454 456,03 zł, w tym 85% środków pochodziło z Norweskiego Mechanizmu Finansowego, zaś 15% z budżetu państwa. Wartość całego projektu wyniosła 6 715 051,63 zł.

Monografia składa się z ośmiu rozdziałów. W rozdziale 1, stanowiącym wprowadzenie do problematyki bezzałogowych platform nawodnych, scharakteryzowano te urządzenia i przedstawiono ich klasyfikację, podkreślając różnorodne możliwości ich wykorzystania w portach morskich. Zaprezentowano przykłady ich użycia do różnych celów (w tym związanych z monitoringiem stanu środowiska naturalnego lub transportem dóbr i ludzi) w wybranych portach morskich na różnych kontynentach.

W rozdziale 2 scharakteryzowano bezzałogową platformę nawodną HydroDron-1, wykorzystywaną do realizacji projektu MPSS. Szczegółowo przedstawiono jej wyposażenie techniczne oraz możliwości operacyjne. Omówiono możliwości jej zastosowania w pomiarach batymetrycznych i sonarowych. Skupiono się na udziale HydroDronu-1 w badaniach batymetrii, stanu wód i osadów dennych w akwatorium Portu Gdynia, prezentując przebieg procesu badawczego i jego efekty.

Zrealizowany w ramach projektu MPSS eksperyment z wykorzystaniem bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 omówiono w rozdziale 3. Polegał on na użyciu tego urządzenia do pobierania z akwenów Portu Gdynia próbek wody i osadów dennych do badań fizykochemicznych. Przebieg procesu próbkobrania, stan pobranych próbek oraz jego wpływ na dalsze etapy badań porównano z przebiegiem procesu przy wykorzystaniu konwencjonalnej metody pobierania próbek wody i osadów dennych,

wykorzystywanej dotychczas w gdyńskim porcie. Przedstawiono rezultaty eksperymentu z uwzględnieniem niepewności procesu pobierania próbek.

Problematykę badań poziomu zanieczyszczeń mikroplastikami i dioksynami wód i osadów dennych w akwatorium Portu Gdynia poruszono w rozdziale 4. Omówiono wykorzystanie bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 do pobierania próbek wody i osadów dennych. Zanieczyszczenie ekosystemów wodnych mikroplastikami stanowi obecnie istotny problem globalny ze względu na negatywne skutki ekotoksykologiczne dla fauny i flory morskiej. W rozdziale zaprezentowano przebieg procesu badawczego (z uwzględnieniem pobierania, wyodrębniania i identyfikacji cząstek mikroplastików) i jego wyniki. Dzięki realizacji projektu MPSS ustalono, że bezzałogowe platformy nawodne mogą być wykorzystane do pobierania próbek mikroplastików, szczególnie z powierzchniowych wód morskich, w basenach portowych.

Możliwości wykorzystania technik integracji danych pochodzących z systemów obserwacyjnych w monitoringu strefy przybrzeżnej oraz obszarów portowych omówiono w rozdziale 5. Przedstawiono tu techniki obserwacji z wykorzystaniem systemów satelitarnych oraz metody estymacji batymetrii w strefie przybrzeżnej, bazujące na punktowych pomiarach hydroakustycznych oraz na obrazowaniach multispektralnych uzyskanych dzięki wykorzystaniu systemu Sentinel-1 (czyli systemu satelitów regularnie, niezależnie od pogody, dostarczających dzienne i nocne obrazy powierzchni Ziemi). W czasie realizacji projektu MPSS poddano weryfikacji możliwość wykorzystania systemu Sentinel-1 do monitorowania aktualnego stanu infrastruktury w portach morskich, wykrywania jej zmian lub uszkodzeń i potwierdzono jego przydatność.

Rozdział 6 poświęcono hydrodynamicznemu modelowaniu akwatorium portu morskiego w Gdyni za pomocą modelu GEMSS (*Generalized Environmental Modelling System for Surface Waters*). Port Gdynia dysponuje narzędziami monitorującymi i czujnikiem stworzonym przez norweską spółkę MIROS do pomiaru prądów morskich, wysokości wody i prowadzenia badań meteorologicznych. Spółka MIROS przeprowadziła nowe pomiary batymetryczne i opracowała nowy system informatyczny do zarządzania danymi w ramach projektu MPSS. W rozdziale podsumowano rozwój modelu GEMSS, jego kalibrację i walidację, a także przedstawiono potencjalne zastosowania i ograniczenia stosowania.

W rozdziale 7 zidentyfikowano rzeczywiste i potencjalne problemy związane z zastosowaniem bezzałogowych platform nawodnych w portach morskich, a następnie poszukiwano przyczyn tych problemów, ustalając ich hierarchię. Wykorzystano tu metodę znaną w naukach o zarządzaniu i jakości, tzw. wykres Ishikawy (nazywany też wykresem rybiej ości). Ustalono, że zastosowanie HydroDronu-1 do celów badawczych nie sprawia poważnych problemów, a specyfika i odpowiednie wyposażenie urządzenia umożliwiają realizację przewidzianych dla niego zadań.

Rozdział 8 przedstawia użyteczność bezzałogowej platformy nawodnej do pomiarów wybranych parametrów akwenów portowych w Porcie Gdynia. Uwzględniając całokształt wyników realizacji projektu MPSS, uznano, że wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych do służby w portach morskich jest celowe, a ich uniwersal-

ność oraz różnorodność zastosowań i wyposażenia pozwalają na wykorzystanie tych jednostek do realizacji różnych zadań.

Realizacja projektu MPSS pokazała, że zastosowanie bezzałogowej platformy nawodnej, jako nośnika dla specjalistycznej aparatury pomiarowej, pozwala na prowadzenie wszechstronnych badań środowiskowych, monitoring akwenów portowych, podniesienie poziomu bezpieczeństwa oraz efektywności działań i prowadzi Port Gdynia w kierunku zrównoważonego rozwoju.

Beata Szymanowska

Rozdział 1. Wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych w portach morskich

Hanna Klimek, Tomasz Nowosielski, Anna Salomon

Wprowadzenie

Funkcjonowanie współczesnych portów morskich wymaga wykorzystywania różnych nowoczesnych rozwiązań technicznych i technologicznych. Najważniejszymi obszarami wdrażania innowacji w tych punktach transportowych są: podstawowa i pomocnicza działalność usługowa, zarządzanie różnorodnymi procesami, zapewnianie bezpieczeństwa obsługiwanym pasażerom, ładunkom oraz środkom transportu, a także ochrona środowiska naturalnego. Przykładowymi rozwiązaniami o charakterze innowacyjnym są wprowadzane do użytku w portach systemy zautomatyzowane, roboty i mobilne platformy bezzałogowe (drony).

Krótką charakterystyka bezzałogowych platform nawodnych

Bezzałogowe platformy nawodne (*unmanned surface vehicle*, USV), nazywane pływającymi dronami, to urządzenia pływające, poruszające się po powierzchni wody, które wykonują swoje zadania na lub pod powierzchnią wody. Mogą charakteryzować się różnym stopniem autonomii (od prostego zdalnego sterowania przez człowieka, przez półautonomiczne unikanie przeszkód, po całkowicie autonomiczną nawigację od początku do końca trasy; niektóre mają wszystkie trzy poziomy autonomii; wszystkie nie wymagają załogi ani pilota pokładowego), mają różne kształty i rozmiary, które zależą głównie od zamierzonego zastosowania (od małych i przenośnych zdalnie sterowanych, po duże, bezzałogowe statki nawodne), jednak przewiduje się, że w przyszłości będą wykonywały swoje zadania w pełni autonomiczne, tj. bez kontroli człowieka. Trzeba podkreślić, że mają one zastosowanie zarówno w realizacji zadań cywilnych, jak i wojskowych (Ljulj i in., 2022, s. 135).

Bezzałogowe platformy nawodne, jako urządzenia zdalnie sterowane lub autonomiczne, mają wiele zalet. Pozwalają na zdalną realizację określonych zadań, eliminując konieczność wysyłania jednostek załogowych, co przyczynia się do obniżenia kosztów operacji. Charakteryzuje je stosunkowo niewielkie zużycie paliwa i energii, a także wysoka efektywność działania. Zaletami dronów nawodnych (ale także podwodnych) są niewielkie rozmiary i możliwość dotarcia do stref trudnych w nawigacji i niebezpiecznych dla ludzi, co umożliwia wyeliminowanie zagrożeń ludzkiego życia oraz zagrożeń dla bezpieczeństwa znacznie kosztowniejszych jednostek pływających podczas wykonywanych operacji. Mogą one być wykorzystywane do realizacji działań cyklicznych, co jest istotne w przypadku prowadzenia stałego lub okresowego monitoringu określonego akwenu. Ze względu na te cechy mogą być wykorzystywane do realizacji niebezpiecznych zadań przez wojsko, straż graniczną, straż pożarną i policję. Jednostki tego typu, ze względu na swoje niewielkie rozmiary oraz wymienione zalety, mogą stacjonować zarówno na terenach portów handlowych, zapewniając ochronę

obiektom strategicznym, takim jak np. terminale paliwowe czy kontenerowe, jak i portów wojennych.

W praktyce bezzałogowe platformy nawodne obejmują liczną grupę różnorodnych urządzeń o wymienionych wyżej cechach i zaletach, które można klasyfikować według różnych kryteriów. Jednym z głównych kryteriów ich podziału jest przeznaczenie. USV mogą być wykorzystywane na potrzeby cywilne w żegludze komercyjnej i portach, logistyce miast portowych, poszukiwaniach i ratownictwie morskim, monitoringu środowiska morskiego, rejestracji danych o parametrach środowiska morskiego, monitoringu nielegalnej działalności w wyłącznej strefie ekonomicznej państwa nadmorskiego i egzekwowaniu prawa, patrolowaniu i obserwacji granic oraz kontroli portów i innej infrastruktury morskiej, w sektorze akwakultury i rybactwa, w sektorze morskiej energetyki wiatrowej (Lee, 2021). W celach wojskowych USV mogą być wykorzystywane do: ochrony sił zbrojnych i portów morskich, patroli i rozpoznania, operacji przeciwdziałania minom, zwalczania okrętów podwodnych, wykrywania zagrożeń związanych z chemią jądrową, holowania morskiego, stawiania min i bomb głębinowych, obsługi logistyki wsparcia, oceny zniszczenia sił po działaniach wojennych oraz do działań zwiadowczych.

Jednym z kryteriów podziału tego typu dronów jest ich wielkość. Mniejsze jednostki (krótsze niż 10 stóp) są na ogół przeznaczone do celów badawczych (ale także w ratownictwie morskim). Są wyposażone w czujniki służące do prowadzenia pomiarów nad i pod wodą. Badania pogody mogą wymagać instalowania na nich przyrządów do pomiaru temperatury, prędkości wiatru, ciśnienia barometrycznego i wysokości chmur, natomiast pomiary oceanograficzne mogą wymagać instalacji przyrządów do badania wysokości i okresu fal, pływów, przewodności i zasolenia morza oraz prądów oceanicznych, a także urządzeń sonarowych mierzących prędkość ruchu pod wodą (np. *Doppler Velocity Logs*, DVL). Mniejsze drony są na ogół zasilane energią elektryczną (akumulatory są dołączonym komponentem), wykorzystują system spaliniowo-elektryczny lub panele słoneczne. Na rysunku 1.1 zaprezentowano *Smart Drifter Cariddi*, w którym zastosowano unikalne rozwiązanie polegające na zapewnieniu mu zdolności do śledzenia obiektów w otoczeniu, szacowania ich obecnych i przyszłych pozycji oraz uwzględniania ich za pomocą algorytmu optymalizacji, autonomicznego wyboru dalszej trasy, optymalnej prędkości, akwizycji danych do chmury (Calabrò, b.d.).

Platformy średniej wielkości (o długości 10–30 stóp) są na ogół urządzeniami wielozadaniowymi. Wykorzystuje się je zarówno w badaniach naukowych, jak i do celów komercyjnych, np. jako autonomiczne łodzie dostawcze. Większe pojazdy (o długości powyżej 30 stóp), włącznie z supercysternami, promami i dużymi autonomicznymi statkami oceanicznymi, to urządzenia, nad których wykorzystaniem do celów komercyjnych trwają badania. Praktyka pokazuje, że technologia jest już „prawie” dostępna, ale przepisy ograniczają jej użycie. „Prawie” oznacza, że nadal potrzebne są rygorystyczne testy i udoskonalenia, podobnie jak w przypadku samochodów samojezdnych (Fairchild, 2022).



Rysunek 1.1. Smart Drifter Cariddi, zaprojektowany przez zespół MDM (Fairchild, 2022, s. 1)

Kolejnym kryterium podziału nawodnych platform pływających jest środowisko, w którym wykonują one swoje zadania. Można zatem wyróżnić takie, które przeznaczone są do działania na powierzchni akwenów i realizują funkcje monitorowania (żeglugi, stanu środowiska), transportu (pasażerów, ładunków) oraz inne funkcje (np. pożarnicze, ratownicze). Drugą grupą tego rodzaju jednostek są platformy nawodne przeznaczone do prac pod powierzchnią wody i pozwalają przede wszystkim na prowadzenie inspekcji brzegów, instalacji podmorskich, infrastruktury portowej, kadłubów jednostek, dna konkretnych akwenów czy zawartości wody morskiej. Są też takie, które wykonują swoje zadania zarówno na powierzchni wody, jak i pod powierzchnią.

Można wyróżnić jeszcze inne kryteria podziału, np. zasilanie albo napęd. Trzeba przyznać, że kryteria podziału tych jednostek są powiązane. Bezzałogowe platformy nawodne służące do wykonywania konkretnych zadań muszą mieć określoną wielkość i charakteryzować się możliwością pracy w określonym środowisku.

Porty morskie jako obiekty wykorzystujące bezzałogowe platformy nawodne

Obecnie w portach morskich powszechnie wykorzystywane są drony latające, które są stosunkowo niedrogie i łatwe w obsłudze. Używa się ich do inspekcji ruchu morskiego w porcie i na redzie, pomiarów stanu powietrza, a także przenoszenia niewielkich ładunków. Natomiast nawodne wersje dronów są jeszcze dość rzadko wykorzystywane w praktyce, to znaczy są chętnie testowane przez władze portowe, ale dość wolno wdrażane do pracy w portach morskich. Wykorzystuje się urządzenia budowane specjalnie na zamówienie podmiotów portowych, które spełniają specyficzne wymagania zamawiających, oraz rozwiązania gotowe, oferowane przez producentów komercyjnych.

W portach morskich wykorzystaniem różnego typu bezzałogowych platform nawodnych zainteresowani są zarówno operatorzy terminali portowych i zarządy portów morskich, jak i hydrograficzne ośrodki badawcze czy administracje morskie poszczególnych krajów. W zależności od przeznaczenia, drony nawodne w portach, podobnie jak na innych akwenach, mogą być przeznaczone do wykonywania zadań związanych z: monitoringiem ruchu statków i innych jednostek pływających (np. za pomocą systemu VTS i wypełniać funkcje *Port State Control*), inspekcją podwodnych części kadłubów statków oraz obiektów infrastruktury portowej, gaszeniem pożarów na terenie portów, badaniami dna morskiego oraz stanu i zawartości wód portowych i osadów dennych (pobieraniem próbek wody i osadów dennych), falowania, stanu powietrza, wykonywaniem zadań polegających na zbieraniu zanieczyszczeń i śmieci pływających w akwenach portowych, ograniczeniem zasięgu rozlewów olejowych, a także przewożeniem ludzi lub pojazdów w kanałach portowych (bezzałogowe małe promy krótkiego zasięgu). Mogą być szczególnie przydatne na akwenach niedostępnych lub trudno dostępnych dla większych jednostek załogowych (KONSBERG, 2023; Reimer, 2022, s. 1).

W portach morskich zastosowanie znalazłyby drony realizujące zadania związane z nadzorem ruchu statków i pozwalające zbierać informacje dotyczące działań *Port State Control*. Powiązanie danych identyfikacyjnych statków, pochodzących z systemu *Vessel Traffic Service*, i ewidencji zdarzeń zaistniałych na akwenach portowych umożliwiłoby sprawowanie rzeczywistej pełnej kontroli nad jednostkami zawijającymi do danego portu. Podobne drony pływające mogą być przeznaczone do monitorowania stanu wód portowych i powietrza, co wiąże się z nadzorem nad emisją pochodzących ze statków zanieczyszczeń ropopochodnych oraz zanieczyszczeń powietrza SO_x , NO_x i pyłami zawieszonymi PM. Zastosowanie takiego rodzaju urządzeń w portach jest zgodne z wymogami konwencji MARPOL 73/78 w zakresie monitorowania zanieczyszczeń olejowych i powietrza, co ma szczególnie istotne znaczenie dla obszarów kontroli emisji siarki (*sulphur emission control area*, SECA).

Istotnym rozwiązaniem technicznym, zwiększającym bezpieczeństwo na terenie portów morskich, są pływające jednostki pożarnicze, umożliwiające gaszenie obiektów i statków od strony akwenów portowych. W ofercie przedsiębiorstwa KONSBERG znajdują się nawodne drony pożarnicze, które umożliwiają podejście autonomicznej jednostki możliwie blisko pożaru, bez narażania życia strażaków (rysunek 1.2). Wydaje się, że w tego rodzaju łodziach pożarniczych powinny być wyposażone duże terminale paliwowe, gdyż z ich wykorzystaniem możliwe jest prowadzenie akcji gaśniczej nawet w sytuacji znacznego ryzyka.



Rysunek 1.2. Zdalnie sterowana łódź strażacka (KONSBERG, 2023)

Na terenie portów morskich często ruch pasażerski i drogowy jest utrzymywany przez promy łączące brzozy kanałów portowych. Ich rolę mogą pełnić bezzałogowe autonomiczne platformy nawodne. Poza pełną automatyzacją, jednostki tego typu mogą być wyposażane w napęd elektryczny, łatwiejszy do implementacji i niezanieczyszczający środowiska. Obecnie w Norwegii są prowadzone zaawansowane prace nad autonomicznymi małymi promamiorskimi, które będą służyć do przewozu ładunków na naczepach samochodowych (*Electric...*, 2022). We wrześniu 2022 roku ochrzczono tam pierwsze dwa elektryczne, autonomiczne drony pływające. Są przeznaczone do przewozu naczep ciężarówek elektrycznych z ładunkami przez największego norweskiego dystrybutora produktów spożywczych. Zostały zaprojektowane do w pełni autonomicznego przewożenia naczep przez norweski Fiord Oslo. W ciągu dwóch lat te jednostki będą testowane, aby uzyskać certyfikat wymagany dla operacji bezzałogowych, a po zakończeniu procesu certyfikacji ich ruch będzie nadzorowany przez centrum lądowe. Jednostki są zasilane akumulatorami o pojemności 1846 kWh i będą ładowane automatycznie w czasie pobytu w porcie. Wykorzystanie tych urządzeń umożliwi nie tylko przeniesienie ruchu towarowego z dróg na morze, ale wyliczono, że przyczyni się też do ograniczenia emisji CO₂ o 5 tys. ton rocznie.

W norweskim Trondheim testowano też niewielki autonomiczny elektryczny prom pasażerski milliAmpere 2, obsługujący ruch wahadłowy przez główny kanał portowy (badano zarówno funkcjonalność i sprawność urządzenia, jak i reakcje pasażerów). Zastosowanie tego urządzenia ma służyć rewitalizacji zrównoważonego transportu publicznego w mieście poprzez wykorzystanie miejskich dróg wodnych w nowy sposób. Uznano, że jest to pierwszy krok w kierunku rozwoju nowej formy mikromobilności w mieście posiadającym drogi wodne. Technologia ta ma być rozwijana, aby stworzyć ekologiczny, elastyczny i efektywny system transportowy wzdłuż całego norweskiego wybrzeża. Badania potwierdziły, że autonomiczne takie promy są tańsze w eks-

ploatacji niż promy z personelem i w razie potrzeby mogą być elastycznie rozmieszczone na wielu trasach. W dłuższej perspektywie tego typu promy mogą sprawić, że życie w przywodnych dzielnicach miast portowych będzie bardziej atrakcyjne. Urządzenia będą sterowane z lądu (Haugan, 2022).

Istotną grupą dronów są jednostki służące do inspekcji akwenów portowych. Znajdują zastosowanie przy ocenie stanu infrastruktury portowej, w szczególności basenów, falochronów i innych hydrotechnicznych budowli portowych. Drony mogą także asystować nurkom w przypadku napraw podwodnych części nabrzeży i falochronów. Urządzenia tego rodzaju nie wymagają angażowania w celu inspekcji nurków, co pozwala redukować koszty związane z rutynową obserwacją elementów podwodnych infrastruktury portowej. Poza dronami nawodnymi, wykorzystywanymi do tego celu, są też używane drony podwodne, które mają także istotną zaletę, ponieważ można je wykorzystywać w miejscach niebezpiecznych dla nurków, np. w zamkniętych przestrzeniach.

Innym zastosowaniem bezzałogowych platform nawodnych może być zaopatrywanie statków. W związku z koniecznością izolacji załóg statków w czasie pandemii koronawirusa Dolphin 1 Remote Control Lifebuoy został przetestowany pod kątem dostarczania zaopatrzenia na statek, aby uniknąć bliskiego kontaktu personelu dostawcy i załogi statku. USV ma siłę ciągu i holowania do 150 kg ładunku i zasięg 500 m, jest wyposażony w system plecaków i może być wypuszczany, transportowany i pobierany przez jedną osobę. Szybko dociera do docelowego statku, kierowany za pomocą pilota zdalnego sterowania. Jest napędzany śmigłami elektrycznymi. Załoga zaopatrywanego statku może odebrać zapas za pomocą haka lub podnośnika linkowego, a po uzyskaniu zapasów może wyrzucić urządzenie bezpośrednio do wody, a ono dotrze do centrum dowodzenia. Dolphin 1 należy do nowej generacji robotów ratowniczych opracowanych przez Ocean Alpha (Ocean Alpha, 2023a). Bezzałogowe platformy nawodne mogą być też wykorzystane do ratowania ludzi w wypadkach morskich. W 2018 r. dwie tonące osoby zostały uratowane przez bezzałogowy statek nawodny OceanAlpha M75 i wówczas było to bardzo rzadkie zastosowanie USV, nawet w skali globalnej, w ratownictwie morskim. Sygnał S.O.S. został wykryty przez centrum dowodzenia na Morzu Południowochińskim i dron M75 został natychmiast wysłany na ratunek. Z autonomiczną nawigacją GPS i inteligentną funkcją unikania przeszkód szybko dotarł na miejsce wypadku, zaś operator, który zdalnie kontrolował jego ruch za pomocą wieleokranowej stacji bazowej na brzegu, był w stanie komunikować się z tonącymi przez zintegrowany głośnik USV. W kierunku tonących została automatycznie zrzucona tratwa ratunkowa, a następnie zostali oni zabrani na brzeg na tej tratwie ciągniętej przez USV (Ocean Alpha, 2023b). Obecnie Dolphin1 i inne podobne urządzenia, stworzone przez Ocean Alpha, są nabywane i używane na całym świecie do ratownictwa wodnego. Są to kompaktowe i wszechstronne urządzenia, które mogą być szeroko stosowane na morskich platformach naftowych i gazowych, w departamentach rządowych, na statkach handlowych i łodziach każdej wielkości, w marinach, na publicznych plażach

i w miejscach rekreacji wodnej, takich jak parki rozrywki, rzeki, tamy i kąpieliska (Ocean Alpha, 2023c).

USV mogą znaleźć zastosowanie w sektorze akwakultury. Okazuje się, że urządzenia automatyczne są tu bardziej skuteczne i efektywne niż metody i narzędzia konwencjonalne. Wykorzystuje się je do pozyskiwania danych środowiskowych i monitorowania środowisk akwakultury. Są szczególnie przydatne w badaniach warunków dobrostanu ryb oraz środowiska w pobliżu zagród rybnych (Sousa i in., 2019).

Ciekawym rozwiązaniem w zakresie badań środowiska morskiego jest tzw. piramida obserwacyjna (wykorzystana przez naukowców NTNU z AMOS, Centrum Autonomicznych Operacji i Systemów Morskich), którą można stosować do badania normalnych i szkodliwych zakwitów glonów oraz różnych zmian wód morskich spowodowanych globalnym ociepleniem klimatu. Obejmuje ona kombinację różnych autonomicznych urządzeń pracujących jednocześnie. Składa się z satelity badawczego NTNU, HYPSO-1, z hiperspektralnym imagerem, dronu powietrznego z kamerą hiperspektralną, tzw. UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), bezzałogowych łodzi z podwodnym zobrazowaniem hiperspektralnym, czujnikami akustycznymi i innymi rodzajami czujników, tzw. USV (*Unmanned Surface Vehicles*), robotów podwodnych, zwanych AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*). Rozwiązanie polegające na jednoczesnym wykorzystaniu map hiperspektralnych i dronów powietrznych w połączeniu z bezzałogowymi platformami nawodnymi i dronami podwodnymi umożliwi gromadzenie ogromnej liczby danych w krótkim czasie. Biolodzy pobierający próbki wody m.in. w celu dostarczenia szczegółowych danych dotyczących różnych wodnych gatunków roślin i zwierząt czy fotosyntezy, co rejestrują, przetwarzają i interpretują platformy bezzałogowe (Ofstedahl, 2022).

Przykłady zastosowania bezzałogowych platform nawodnych w portach morskich

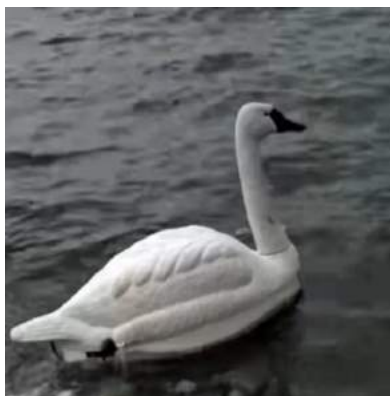
Port w Oslo ogłosił, że zastosuje (we współpracy z Agencją Środowiska Miejskiego, Funduszem Ochrony Środowiska Handlu, *Clean Sea Solutions AS i Maritime Robotics*) autonomiczny dron do oczyszczenia basenu portowego i fiordu. *Clean Sea Solutions i Maritime Robotics* opracowały „Oslo Drone” (lub *Cleaning Drone V1 – CDV1*, która jest jego wstępną oficjalną nazwą) (*Port of Oslo...*, 2021). Urządzenie jest w pełni elektrycznym bezzałogowym statkiem nawodnym, zaprojektowanym do usuwania odpadów z tworzyw sztucznych na i tuż pod powierzchnią wody w portach, kanałach, ujściach rzek i innych środowiskach morskich. Jest sterowany za pomocą graficznego interfejsu użytkownika, *Vehicle Control Station (VCS)*, opracowanego przez *Maritime Robotics*, lub za pośrednictwem aplikacji mobilnej. Może być również wyposażony w czujniki do mapowania dna morskiego i zbierania danych środowiskowych. Zdaniem władz portowych, dron ten jest pierwszą na świecie elektryczną łodzią ekologiczną tego rodzaju i pływającym koszem na śmieci, który usuwa plastik i śmieci w fiordzie.

Port w Rotterdamie, we współpracy z uniwersytetami (Port Innovation Lab z Politechniką w Delft i Uniwersytetem Erazma w Rotterdamie) oraz holenderskimi start-up'ami, w tym *AquaSmartXL*, prowadzi badania nad możliwością wdrożenia różnych

innowacyjnych rozwiązań, w tym pływających dronów (*Rotterdam Innovative...*, 2016). Start'up AquaSmartXL opracowuje inteligentne drony wodne, które umożliwiają szybkie i bezpieczne prowadzenie inspekcji konstrukcji infrastrukturalnych oraz ich konserwację (AquaSmartXL, b.d.).

Drony portowe są jednym z rezultatów wdrażania innowacyjnego systemu ekologicznego. Przykładem jest AquaSmartXL, czyli mała, bezzałogowa łódź, wyposażona w kamerę. Wysyła zobrazowania w czasie rzeczywistym do nabrzeża, zapewniając w ten sposób elastyczne rozwiązanie w zakresie nadzoru i inspekcji z powierzchni wody. Władze portowe uznały, że o wiele bezpieczniej jest używać dronu wodnego do inspekcji budowli hydrotechnicznych, szczególnie tych trudno dostępnych (zwłaszcza biorąc pod uwagę fakt, że w porcie występują pływy). W porcie jest też wykorzystywany Waste Shark, większy niż AquaSmartXL. Jest to urządzenie pływające o wielkości samochodu osobowego, które ma „otwarte usta”, na głębokości 35 cm pod powierzchnią wody, służące do usuwania jednorazowo do 500 kg odpadów z wody. Odpady są następnie przetwarzane. Dron nawodny w rotterdamskim porcie sprawdza betonowe konstrukcje terminalu naftowego i wizualizuje je w 3D. Odbywa się to w miejscach, w których stosowanie rozwiązań załogowych jest zbyt trudne, niebezpieczne lub niepożądane (obejmuje to pomosty, mosty i inne konstrukcje).

Drony są również wykorzystywane przez inspektorów portowych do nadzoru, wykrywania zagrożeń, inspekcji obiektów portowych, reagowania na incydenty, ale też poszukiwań i ratownictwa w porcie morskim w Singapurze (Tay, 2020). W przyszłości mają być też wykorzystywane do uruchomienia autonomicznej mobilności miejskiej. Ciekawym rozwiązaniem są łąbiedzie-roboty testujące jakość wody w tym porcie (w ramach projektu SWAN (*Smart Water Assessment Network*). Zostały zaprojektowane tak, aby wyglądały jak prawdziwe łąbiedzie i wtapiały się w otoczenie. Dryfują po powierzchni wody, jednak pod spodem znajduje się system śmigieł i urządzeń do pobierania próbek wody, które wykorzystują technologię bezprzewodową do wysyłania wyników w czasie rzeczywistym do krajowej agencji wodnej PUB. Urządzenia te (rysunek 1.3) są wystarczająco wytrzymałe, aby przetrwać spotkania z kajakami i małymi łodziami.



Rysunek 1.3. Łabędź-robot w Singapurze (Coleman, 2018)

Bezzałogowe platformy nawodne są też używane w porcie w Hamburgu. Dzięki niewielkiemu zanurzeniu mogą wykonywać pomiary w miejscach, do których nie mogą dotrzeć konwencjonalne statki sondujące statki (*Surface drone in...*, 2020). Bezzałogowy, bardzo zwrotny i niewielki, dron nawodny „Echo 1” (o długości 1,65 m), wyposażony w echosondę, jest przeznaczony do pomiaru głębokości wody i stanu ścian nabrzeży portowych (Yan, b.d.). Dociera do trudno dostępnych rejonów akwatorium. Na pokładzie ma sonar, a nawigują go kamery i sygnały satelitarne. Ruch urządzenia jest monitorowany na lądzie za pomocą monitora.

Po udanym teście funkcjonalnym w 2019 roku, w trudnych warunkach, zarząd portu w Hamburgu zdecydował o wdrożeniu USV Kongsberg & OceanAlpha do stałych pomiarów wód portowych. Wykorzystano SL40 USV (produkcji Ocean Alpha), jako platformę sprzętową do przenoszenia wielowiązkowej echosondy Kongsberg M3, a także innych wysokowydajnych czujników. Od 2020 roku USV wspiera portową jednostkę hydrograficzną w realizacji zadań badawczych, począwszy od pomiaru płytkich i trudno dostępnych obszarów. Dron ten został doceniony za swoją kompaktowość, zwrotność, wysoką jakość wykonania, dobrą stabilność w wodzie, intuicyjną i bezpieczną obsługę. Oprogramowanie SL40 ułatwia planowanie tras, z których USV może odpływać i płynąć autonomicznie, umożliwiając operatorowi śledzenie innych ważnych systemów i danych pomiarowych oraz nieustanną kontrolę. Zainstalowany na dronie moduł *Collision Avoidance* automatycznie wykrywa przeszkody i zatrzymuje jednostkę w celu zminimalizowania ryzyka wypadków (rysunek 1.4).



Rysunek 1.4. SL40 USV w porcie w Hamburgu 4 (testy zastosowania USV dla celów monitoringu bezpieczeństwa na wodach portowych przeprowadzono w 2022 roku w porcie w Los Angeles) (OceanAlpha, 2023d, s. 104; Galdorisi, 2022)

Dotychczas bezpieczeństwo portu jest nieustannie monitorowane przez 500 kamer rozmieszczonych w całym porcie oraz za pomocą floty statków załogowych. Trzeba jednak zauważyć, że na akwenach portowych jest duża liczba pływaczni, które są poza zasięgiem tych jednostek. To skłoniło władze portu do zaproszenia Maritime Tactical Systems Inc. (MARTAC) do zaprezentowania trzech jednostek tzw. MANTAS T6, T8 i T12 (wysokowydajnych, zbudowanych na kadłubie katamaranu i występujących w wielu wariantach o rozmiarach od 6 stóp do 50 stóp; jeden z nich został przedstawiony na rysunku 1.5). MANTAS T6 został wykorzystany jako statek przechwytyjący do szybkiego reagowania na potencjalne zagrożenia przy dużych prędkościach do 55 węzłów. Jednostka została wyposażona w standardową kamerę elektro-optyczną skoncentrowaną na szybkim przechwytywaniu i identyfikacji zagrożeń. MANTAS T8 został wyposażony w kamerę termowizyjną FLIR M232, a jego rolą było przewidywanie ruchu statków poruszających się po wodach portowych. MANTAS T12, którego zadaniem jest ściganie, prowadzenie operacji nadzoru nad i pod powierzchnią wody, wykrywanie i identyfikowanie statków intruzów lub innych zagrożeń (np. nurków, pływaków) dla zasobów portowych, może być wyposażony w różnorodne czujniki zamontowane na powierzchni i podpowierzchniowe (sonary i echosondy), a także inne urządzenia (np. czujniki chemiczne, biologiczne, jądrowe), monitory jakości wody oraz czujniki środowiskowe do badań powietrza i wody. Demonstracja możliwości tych urządzeń na wodach portu Los Angeles potwierdziła zasadność zastosowania dokładnie przetestowanego i sprawdzonego USV. Bardzo pozytywne wyniki testów przeprowadzonych przy wykorzystaniu tych niewielkich jednostek skłoniły władze portowe do przeprowadzenia badań większych dronów nawodnych, tj. 24- i 38-stopowych, które mogłyby pracować przez dłuższy czas i przenosić dodatkowe czujniki. T38 MANTAS został zademonstrowany w kilku ćwiczeniach US Navy i przeprowadził kolejne testy monitoringu bezpieczeństwa w porcie Tampa Bay z podobnymi wynikami. Testy tego typu dronów zostały pozytywnie ocenione przez władze portu i urządzenia te w przyszłości zapewne zostaną wprowadzone do eksploatacji. Wdrożenie USV wydaje się

innowacyjnym i efektywnym rozwiązaniem, zaprojektowanym w celu uzupełnienia obecnych zasobów portu.



Rysunek 1.5. The „Devil Ray” USV (Photo by Jack Rowley) (Galdorisi, 2022)

MARTAC produkuje obecnie serię większych USV „klasy ekspedycyjnej”, m.in. właśnie dla celów wykonywania misji związanych z monitorowaniem i zapewnieniem bezpieczeństwa w Los Angeles i innych portach. Prym wiodzie T38 „Devil Ray”, który został wykorzystany w testach w porcie Tampa, a także w wielu ćwiczeniach amerykańskiej marynarki wojennej i ćwiczeniach międzynarodowych (m.in. Trident Warrior, IBP-21, IMX-22, Autonomous Warrior 22) (Rowley, 2022).

W polskich portach morskich (zarówno tych największych, jak i pozostałych) dotychczas nie są wykorzystywane drony pływające. Badania nad zastosowaniem tego typu urządzeń do realizacji różnych zadań na akwenach portowych (zwłaszcza badań wody i osadów dennych) są obecnie prowadzone tylko w Gdyni (w ramach projektu MPSS). Trzeba jednak dodać, że w 2022 roku odbyły się testy półautonomicznego USV na wodach Motławy i Martwej Wisły w Gdańsku. Prototyp jednostki powstaje w ramach projektu badawczo-rozwojowego „*TRANSACT – Transform safety-critical cyber-physical systems into distributed solutions for end-users and partners*”. Jest to międzynarodowy projekt realizowany w ramach programu HORYZONT 2020 KDT-UJ przez zespół naukowców Gdańsk Tech (z Politechniki Gdańskiej) we współpracy z partnerami z Niemiec, Finlandii, Danii, Norwegii, Hiszpanii, Austrii, Belgii i Holandii. Docelowo jednostka może służyć do inspekcji kanałów portowych, badania stanu wód i patrolowania obszarów morskich farm wiatrowych. Statek wraz z podstawowym wyposażeniem jest już gotowy. Naukowcy z Gdańsk Tech pracują obecnie nad rozwiązaniami w zakresie technologii brzegowych i chmurowych, wykorzystując sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. Planują opracować i wdrożyć niezawodny system łączności bezprzewodowej (m.in. odporny na bloker sygnału czy urządzenia zakłócające), służący do jednoczesnej komunikacji z wieloma jednostkami autonomicznymi. Jednostka o nazwie „Hornet”, poza nowoczesnymi czujnikami nawigacyjnymi, zostanie wyposażona w różne zaawansowane czujniki (takie jak lidy, które precyzyjnie wykrywają kształty obiektów na powierzchni wody), a także radary krótkiego zasięgu, systemy podczerwieni i wizyjne oraz sonary akustyczne, pozwalające na

dokładne obrazowanie tego, co znajduje się pod wodą, a także energooszczędne inteligentne anteny (autorski produkt Politechniki Gdańskiej) służące do zwiększenia niezawodności komunikacji bezprzewodowej (Gdańsk University..., 2022).

Podsumowanie

Opisane przykłady świadczą o tym, że bezzałogowe platformy nawodne są urządzeniami, które bez wątplenia znajdują zastosowanie w portach morskich na świecie. Stanowią one wygodną, efektywną i przyjazną środowisku naturalnemu alternatywę dla konwencjonalnych badań wykorzystujących większe jednostki załogowe. Jednak w większości przypadków ciągle mamy do czynienia z testami i poszukiwaniem rozwiązań najbardziej odpowiadających oczekiwaniom władz portowych. Przegląd literatury przedmiotu i aktualności na stronach internetowych portów morskich wskazuje, że zainteresowanie USV na świecie wzrasta. Co ciekawe i ważne zarazem, często prace nad tymi urządzeniami, dedykowanymi konkretnym portom, odbywają się w ramach międzynarodowych konsorcjów realizujących projekty badawcze, angażujących ośrodki naukowe i instytuty badawcze, start-up'y, projektantów i producentów dronów pływających oraz producentów instalowanego na nich wyposażenia i oprogramowania.

Bibliografia

- AquaSmartXL (b.d.). <https://aquasmartxl.com/about-us/>
- Calabrò, V. (b.d.). https://www.linkedin.com/posts/vcalabro_what-is-autonomy-many-researchers-and-professional-activity-6996940667180494848-ZXis?utm_source=share&utm_medium=member_desktop
- Coleman, A. (2018). *Singapore recruits swanbots to test water quality*. <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-42689027>
- Electric, Autonomous Ro-Ro Freight Ferries Begin Service in Norway* (2022). The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/article/electric-autonomous-ro-ro-freight-ferries-begin-service-in-norway>
- Fairchild, M. (2022). *Types of unmanned underwater vehicles and unmanned surface vehicles*. <https://bluerobotics.com/types-of-unmanned-underwater-vehicles-and-unmanned-surface-vehicles/>
- Galdorisi, G. (2022). *Employing unmanned surface vehicles to guard ports and harbours*. <https://cimsec.org/employing-unmanned-surface-vehicles-to-guard-ports-and-harbors/>
- Gdańsk University of Technology (2022). *Unmanned surface vessel to enhance security of Polish ports and offshore wind farms* (2022). <https://pg.edu.pl/en/news/2022-11/unmanned-surface-vessel-enhance-security-polish-ports-and-offshore-wind-farms>
- Haugan, I. (2022). *NTNU Trials World's First Urban Autonomous Passenger Ferry*. The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/editorials/ntnu-trials-world-s-first-urban-autonomous-passenger-ferry>
- KONGSBERG (2023). <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-shipping>
- Lee, A. (2021). *Equinor claims world first with 'sea drone' that checks how fish and floating wind get along*. <https://www.rechargenews.com/technology/equinor-claims-world-first-with-sea-drone-that-checks-how-fish-and-floating-wind-get-along/2-1-1076272>
- Ljulj, A., Slapničar V., i Brigić, J. (2022). *Unmanned Surface Vehicle – TRITOR*. *Brodogradnja, Vol. 73, No. 3*, 135–150. <https://doi.org/10.21278/brod73308>

- Ocean Alpha (2023a). *Dolphin1 Deliver Supplies Between Ships*.
https://www.oceanalpha.com/application_cases/dolphin1-delivery-supplies-between-ships/
- Ocean Alpha (2023b). *M75 / USV Rescues Two Drowning Victims From South China Sea*.
https://www.oceanalpha.com/application_cases/m75-%e4%b8%a8usv-rescues-two-drowning-victims-from-south-china-sea/
- Ocean Alpha (2023c). *Dolphin1 Launched in Perth*.
https://www.oceanalpha.com/news_list/dolphin1-launched-in-perth/
- Ocean Alpha (2023d). *Hamburg Port Authority Uses USV in Hydrographic Survey*.
https://www.oceanalpha.com/application_cases/hamburg-port-authority-uses-usv-in-hydrographic-survey/
- Oftedahl, L. (2022). *Norwegian Researchers Test "Automated Coast Guard" for Data Collection*. The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/editorials/norwegian-researchers-test-automated-coast-guard-for-data-collection>
- Port of Oslo to launch autonomous drone in Fjord clean up drive* (2021).
<https://www.porttechnology.org/news/port-of-oslo-to-launch-autonomous-drone-in-fjord-clean-up-drive/>
- Reimer, J. (2022). *Underwater drone technology can enhance port maintenance*.
<https://www.here.com/learn/blog/underwater-drone-technology>
- Rotterdam Innovate with New Water Drones* (2016).
https://www.porttechnology.Org/news/rotterdam_innovate_with_new_water_drones/
- Rowley, U. H. (2022). *Leveraging USVs to Enhance Port and Harbor Security*.
<https://www.navalnews.com/naval-news/2022/09/leveraging-usvs-to-enhance-port-and-harbor-security/>
- Sousa, D., Hernandez, D., Oliveira, F., Luis, M., Sargento, S. (2019). *A Platform of Unmanned Surface Vehicle Swarms for Real Time Monitoring in Aquaculture Environments*. Sensor Vol. 19(21). <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/21/469>
- Surface drone in Port of Hamburg* (2020). Hamburg News. <https://www.hamburg-news.hamburg/en/innovation-science/surface-drone-port-hamburg>
- Tay, S. (2020). *How Singapore is gearing up for autonomous shipping*.
<https://govinsider.asia/intl-en/article/how-singapore-is-gearing-up-for-autonomous-shipping-mpa>
- Yan, C. (b.d.). *Water Drone Christened in the Port of Hamburg*. <https://trends.nauticexpo.com/oceanalpha/project-65687-331560.html>

Rozdział 2. Bezzałogowa platforma nawodna HydroDron-1 wykorzystywana w realizacji projektu MPSS

Andrzej Stateczny, Marzena Delekta

Wprowadzenie

W ciągu najbliższych lat należy oczekiwać dalszego dynamicznego rozwoju platform bezzałogowych operujących we wszystkich sferach działalności ludzkiej. Tendencje do redukcji obciążenia pracą załóg statków i okrętów oraz dążenia do minimalizowania błędów ludzkich będą intensywnie wpływać na dalszy rozwój platform bezzałogowych. Platformy bezzałogowe zarówno latające, jeżdżące po lądzie, jak i pływające, zastąpią w niedalekiej przyszłości dotychczasowe załogowe środki transportu. Dotyczy to w dużej mierze bezzałogowych platform pływających operujących na akwenach śródlądowych i morskich. Konieczność utrzymywania na statkach załóg została mocno wystawiona na próbę w okresie pandemii. Obecny kryzys energetyczny i środowiskowy jeszcze bardziej spotęguje tendencje redukcji załóg i rozwoju bezzałogowych platform autonomicznych zarówno w zastosowaniach cywilnych, jak i militarnych. Na tej podstawie zespół naukowców wraz z wieloma pracownikami różnych przedsiębiorstw (polskich i zagranicznych) uznał, że należy przeprowadzić projekt pilotażowy dotyczący funkcjonowania bezzałogowej platformy nawodnej w warunkach portów morskich. Przygotowano założenia koncepcyjne oraz zrealizowano badania w ramach projektu pod nazwą *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych*, zwanego dalej MPSS. Natomiast bezzałogowa platforma nawodna wykorzystywana w ramach tego projektu otrzymała nazwę HydroDron-1. Badania przeprowadzono w oparciu o doświadczenie, które zostało opisane w literaturze przedmiotu (Stateczny i in., 2019a; Stateczny i in., 2019b; Stateczny i in., 2019c; Stateczny i in., 2019d; Stateczny i in., 2019e; Stateczny i in., 2020; Stateczny i in., 2021; Stateczny i in., 2022).

Jak wspomniano wcześniej, bezzałogowe platformy nawodne mogą być wykorzystane do realizacji różnych celów, w zależności od ich rozmiaru, funkcji lub unikalnych cech. Bezzałogowe platformy nawodne można sklasyfikować w następujących aspektach:

- a) zastosowanie: badawcze, komercyjne, militarne;
- b) wielkość: małe, średnie, duże;
- c) kadłub: pojedynczy, katamaran, trimaran;
- d) zasilanie: elektryczne, wiatrowe i solarne, spalinowe;
- e) napęd: żaglowy, śrubowy, strugowodny;
- f) komunikacja: radiowa, Wi-Fi/WLAN, satelitarna.

Wykorzystując przedstawione powyżej rodzaje platform, bezzałogową platformę nawodną wykorzystywaną w projekcie MPSS HydroDron-1 można sklasyfikować jako jednostkę badawczą i komercyjną, o średniej wielkości i kadłubie w kształcie katamaranu (o dwóch pływakach o długości po 4 m i szerokości 0,5 m rozmieszco-

nych w odległości 1 m, co daje zewnętrzny wymiar o szerokości 2 m), zasilaną prądem elektrycznym i solarnie, o napędzie śrubowym, komunikującą się za pomocą radia i Wi-Fi/WLAN. Parametry techniczne i funkcjonalności bezzałogowej platformy badawczej HydroDron-1, wykorzystywanej w projekcie MPSS, zostały opisane w dalszej części rozdziału.

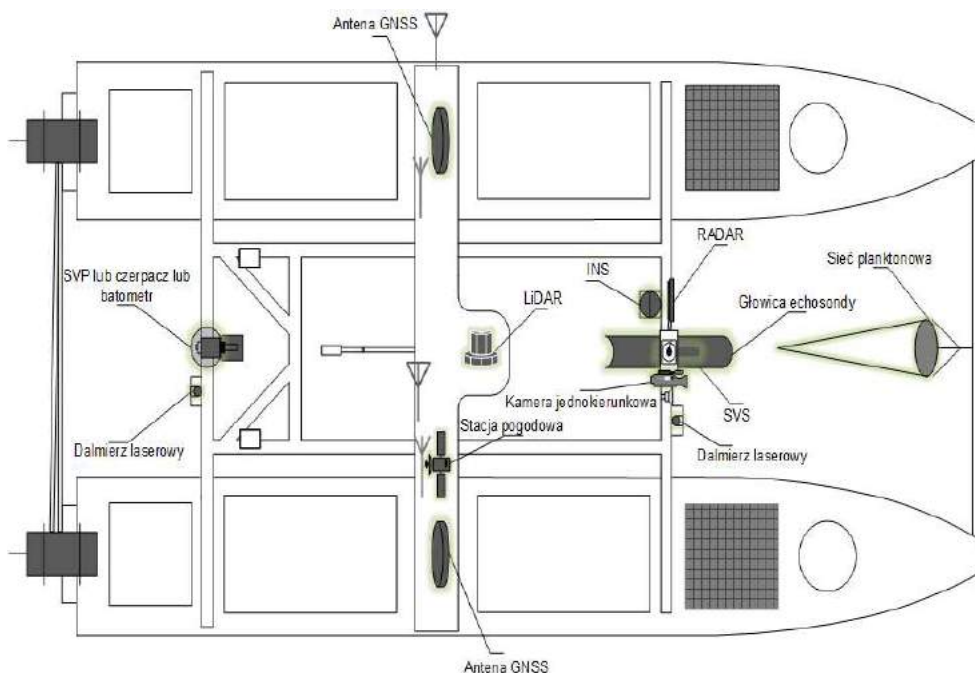
Specyfikacja techniczna bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1

HydroDron-1 został zaprojektowany jako bezzałogowa platforma nawodna przeznaczona do realizacji misji pomiarowych (badawczych i biznesowych) na akwenach śródlądowych i morskich przybrzeżnych. Ze względu na rozmiary kadłubów platformy nie przewiduje się realizacji jej misji na otwartym morzu. Istotną cechą platformy jest jej mobilność, rozumiana jako zdolność do wodowania w dowolnym miejscu, do którego możliwy jest dojazd samochodem z przyczepą, lub na akwenu wyposażonym w dźwig dla jachtów czy motorówek. Platforma może wykonywać różnorodne misje uzależnione od potrzeb użytkownika. Wśród misji pomiarowych można wskazać pomiary batymetryczne echosondą wielowiązkową lub jednowiązkową, badania sonarowe sonarem 3D, skanowanie strefy brzegowej metodami optoelektronicznymi, w tym z wykorzystaniem lidarów i kamer metrycznych, pomiary środowiskowe, w tym rejestracje parametrów fizykochemicznych wody, oraz pobieranie próbek wody i dna akwenu. Platforma może zostać również wyposażona w inne sensory i efektory, zależnie od potrzeb użytkownika.

Podstawowym trybem pracy platformy jest tryb autonomiczny, w którym platforma samodzielnie realizuje trajektorię zaplanowaną przez operatora systemu, np. profile pomiarowe na akwenach ograniczonych. W sytuacjach wymagających bezpośredniego sterowania przez człowieka, operator platformy może w każdym momencie przejąć sterowanie i przejść na tryb zdalnego sterowania ze stanowiska brzegowego. Jest to szczególnie przydatne w sytuacjach zwiększonego ruchu na akwenu, w procesie cumowania lub podchodzenia do innej jednostki pływającej. W przypadku utraty łączności ze stanowiskiem brzegowym platforma jest zaprogramowana do przejścia w tryb zatrzymania silników, by uniknąć ewentualnych wypadków z uczestnictwem platformy, gdy operator nie może ingerować. Taka sytuacja może teoretycznie wystąpić przy awarii systemu łączności lub przy wyjściu z zasięgu konsoli manewrowej, która jest przystosowana do manewrów w niewielkiej odległości od operatora i nie wymaga systemu anten brzegowych. Może się zdarzyć przy sterowaniu z innej jednostki załogowej, np. w trakcie przeprowadzania platformy pomiędzy akwenami pomiarowym lub w miejscu wodowania do akwenu pomiarowego. Jednostka jest przewożona z miejsca na miejsce na przyczepie samochodowej. Mobilność platformy zapewnia przyczepa samochodowa z podłogą aluminiową, zdolna do wodowania z nieuzbrojonego brzegu czy slipu, zaś odpowiednie zawiesia (pasy do podwieszania jednostki) umożliwiają wykorzystanie dźwigu z brzegu lub statku bazy.

Platforma jest wyposażona w siłowniki i windę kotwiczną umożliwiające podnoszenie i opuszczanie sensorów lub urządzeń pomiarowych. Wszystkie te elementy są obsługiwane ze stanowiska brzegowego. Winda kotwiczna jest przeznaczona do opusz-

czania kotwicy, profilomierza, batometrów, czerpacza czy innych urządzeń pomiarowych. Posiada ona funkcję automatycznego zatrzymania po dotarciu zawieszonoego elementu do dna akwenu. Zamontowana na ruchomym siłowniku głowica echosondy wielowiązkowej może być podniesiona do pozycji bezpiecznej powyżej tafli wody lub opuszczona na głębokość roboczą do pomiarów batymetrycznych i sonarowych. Na składanym maszcie antenowym umieszczono anteny GNSS, łączności, lidar, stację pogodową oraz kamerę obrotową. W trakcie pracy na akwenu pomiarowym maszt antenowy jest podnoszony, a w czasie transportu i postoju platformy na przyczepie jest złożony. Na rysunkach przedstawiono schematy platformy HydroDron-1 z zaznaczonymi sensorami i efektorami: odpowiednio widok z góry na rysunku 2.1, od dziobu na rysunku 2.2 i perspektywiczny na rysunku 2.3.

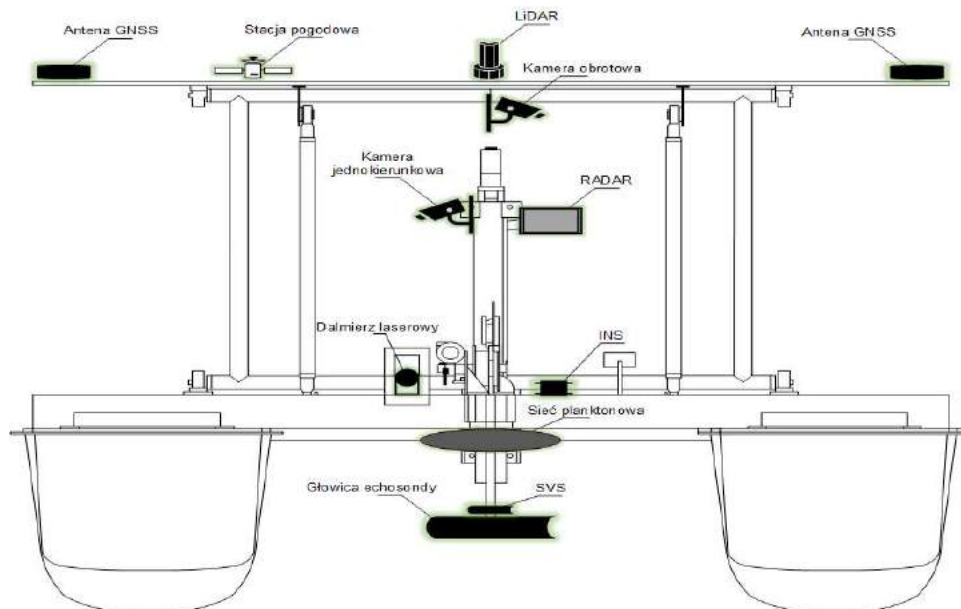


Rysunek 2.1. Schemat budowy i wyposażenia bezałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 – widok z góry (opracowanie własne na podstawie (HydroDron, 2023)).

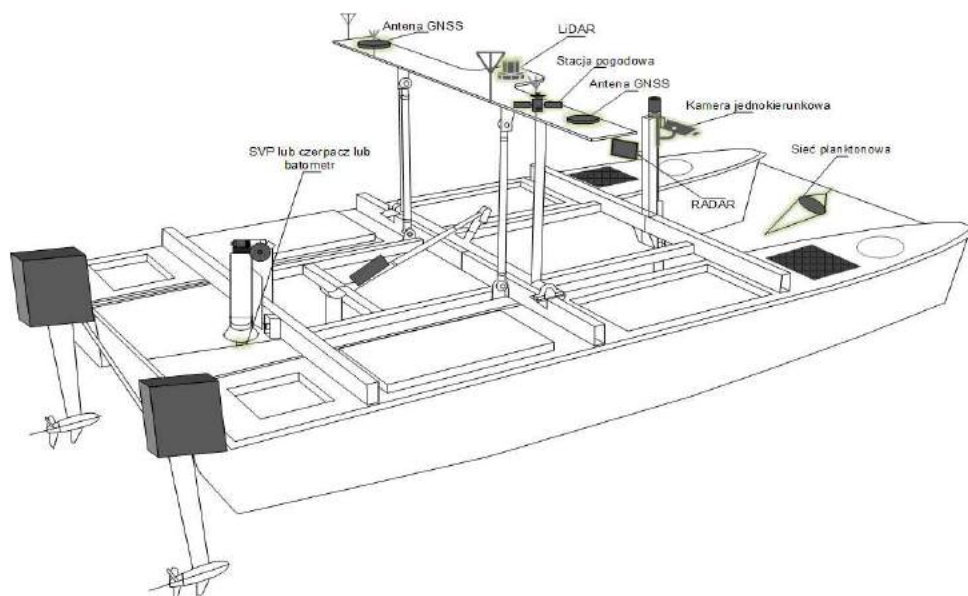
Platforma posiada zdolność do monitorowania pełnej sfery wokół platformy zarówno nawodnej, jak i podwodnej. Oznacza to, że zainstalowane na niej sensory mogą monitorować sytuację pod wodą (zarówno batymetrię, jak i pokrycie dna) oraz powyżej powierzchni wody (kształt i pokrycie terenu).

W celu podwyższenia bezpieczeństwa nawigacji platformy zainstalowano na niej liczne sensory umożliwiające wykrycie potencjalnych przeszkód nawodnych i podwodnych oraz unikanie nadmiernego zbliżenia z tymi przeszkodami. Do zadań związanych z unikaniem nadmiernego zbliżenia z innymi obiektami oraz wyznaczenia obszaru dopuszczalnych manewrów w stosunku do obiektów nawodnych wykorzystywany jest radar, lidar, dwa dalmierze laserowe oraz w stosunku do sytuacji podwodnej dwie

echosondy pionowe sygnalizujące aktualną głębokość pod dziobową częścią kadłubów. Odpowiednie oprogramowanie realizuje funkcję sygnalizacji nadmiernego zbliżenia oraz podejmuje działania zapobiegawcze, w tym zatrzymanie ruchu platformy.



Rysunek 2.2. Schemat budowy i wyposażenia bezałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 – widok od dziubu (opracowanie własne na podstawie (HydroDron, 2023)).



Rysunek 2.3. Schemat budowy i wyposażenia bezałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 – widok perspektywiczny (opracowanie własne na podstawie (HydroDron, 2023)).

Zainstalowane na platformie kamery wideo umożliwiają operatorowi zdalną kontrolę i podgląd poprzez łącze sieci Wi-Fi, które transmituje dane do stacji brzegowej. Dodatkowo operator pozyskuje informacje o pogodzie ze stacji meteo oraz o poziomie napięcia akumulatorów i napięcia podawanego na silniki. Ważną informacją dla operatora jest pozycja masztu, głowicy hydrograficznej oraz windy kotwicznej. Dane z sensorów hydroakustycznych (echosonda wielowiązkowa) i optoelektronicznych (lidar) są rejestrowane lokalnie na platformie na dwóch pokładowych komputerach przemysłowych. Operator ma pełną możliwość zdalnej kontroli i podglądu danych oraz uruchamiania oprogramowania na obu komputerach przemysłowych: hydrograficznym i nawigacyjnym.

Platforma jest zdalnie kontrolowana przez operatora, tj. ze stanowiska brzegowego lub stanowiska umieszczonego na statku bazie. Może on w każdym momencie realizacji misji pomiarowej przejąć kontrolę i zatrzymać ruch platformy lub manualnie nią sterować. Do kontroli zdalnej służą odpowiednie konsole umieszczone na stanowisku brzegowym. Stanowisko operatorskie (na brzegu lub na statku bazie) jest wyposażone w dwie konsole podstawowe: hydrograficzną i nawigacyjną, oraz w dwie konsole manewrowe. Wszystkie konsole są zabezpieczone przed wpływami atmosferycznymi, a konsole podstawowe są zbudowane na bazie przenośnych komputerów przemysłowych i umieszczone w szczelnych i wodoodpornych obudowach. Konsole są przyłączone do sieci Wi-Fi poprzez specjalny brzegowy moduł radiowy z urządzeniami i antenami łączności. Konsole manewrowe są przeznaczone do ręcznego sterowania jednostką w bliskiej odległości od brzegu czy nabrzeża, w tym cumowania, i pracują niezależnie od systemu łączności modułu radiowego, co umożliwia sterowanie platformą z dowolnego stanowiska, w tym umieszczonego na załogowej jednostce pływającej.

Podstawowym oprogramowaniem do planowania, akwizycji, przetwarzania danych pomiarowych zarówno hydroakustycznych, jak i optoelektronicznych aż do uzyskania produktu końcowego w postaci planu batymetrycznego akwenu, sprawozdania z badań sonarowych, przetwarzania danych pochodzących z lidar, jest HYPACK MAX z rozszerzeniem HYSWEEP. Oprogramowanie HYPACK jest oprogramowaniem światowego obiegu najszerzej stosowanym aktualnie na świecie. Jego ważną zaletą jest możliwość przetwarzania zarówno danych hydrograficznych, pochodzących z lidar, magnetometrycznych, jak i wykonania niezbędnych obliczeń, w tym obliczeń kubaturowych (dotyczących różnic pomiędzy powierzchniami), w jednej spójnej aplikacji. Operatorzy mają do dyspozycji również oprogramowanie narzędziowe, pochodzące od producentów sensorów pomiarowych (oprogramowanie firm SBG, AML, Velodyne) zainstalowanych na platformie, wykorzystywane do kontroli i kalibracji urządzeń. W tabeli 2.1 przedstawiono poszczególne parametry bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 i ich specyfikacje techniczne.

Tabela 2.1. Specyfikacja techniczna platformy HydroDron-1 (opracowanie własne na podstawie (HydroDron, 2023, s. 1–9))

Parametr	Specyfikacja parametru
Konstrukcja	– pływaki: laminat – pozostałe elementy: stal kwasoodporna
Wymiary	długość: 4 m, szerokość: 2 m, wysokość: 1 m (opuszczona brama antenowa), wysokość: 1,40 m (podniesiona brama antenowa)
Waga	około 300 kilogramów
Silniki	Torqueedo Cruise 4.0RL o mocy 0–4KW x 2
Prędkość	maksymalna: 14 kn, przelotowa: 6 kn, pomiarowa: 3–4 kn
Zanurzenie	kadłuby: 0,25 m, silniki: 0,5 m, głowica MBES: 0,5 m (w pozycji dolnej)
Autonomiczność	zestaw akumulatorów litowo-jonowych pozwalający na pracę do 12 h przy prędkości pomiarowej dodatkowo wspierany dwoma panelami fotowoltaicznymi
Komunikacja	zdalne sterowanie do 40 km, transmisja danych pokładowych do 6 km
Wyposażenie wielofunkcyjne	opuszczana głowica sonaru, podnoszony maszt, winda z liną 20 m do opuszczania profilomierza dźwięku lub innych urządzeń pomiarowych
Podwozie	przyczepa podłodziowa z podłogą aluminiową przystosowana do wodowania

Wyposażenie bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1

Skład wyposażenia technicznego platformy został poddany analizie ukierunkowanej na zapewnienie możliwości realizacji wszelkich założonych funkcji pomiarowych. Dotyczy to wyposażenia typowo hydrograficznego oraz teledetekcyjnego i oceanograficznego. Uzyskano wysoką uniwersalność platformy, rozumianą jako możliwość realizacji różnorodnych misji pomiarowych przy zapewnieniu wysokiego bezpieczeństwa nawigacji.

Na wyposażenie hydrograficzne bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 składają się:

- PING 3DSS-DX-450: echosonda wielowiązkowa wykorzystująca technologię interferometryczną i zaawansowane techniki przetwarzania sygnału w celu uzyskania batymetrii i trójwymiarowych obrazów sonarowych do głębokości 50 m;
- SBG Ekinox2-D: inercyjny system nawigacji satelitarnej GNSS RTK w wersji morskiej, dostarczający precyzyjne informacje pozycyjne i o ruchu platformy; wykorzystanie układu dwuantenowego pozwala na precyzyjny pomiar nie tylko współrzędnych pozycji, ale również kursu platformy;
- AML SVP Base X2: profilomierz prędkości dźwięku w wodzie. Przyrząd może rejestrować zarówno bezpośrednio prędkość dźwięku, jak również (poprzez rejestrację konduktywności, temperatury i gęstości wody) wyznaczać prędkość dźwięku w całym słupie wody. Czas pracy profilomierza wynosi 11 h przy pełnym naładowaniu akumulatora. Profilomierz może być opuszczany nawet do 100 m,

natomiast winda kotwiczna wykorzystywana do opuszczania profilomierza została przystosowana do opuszczania na głębokość 20 m z możliwością zmiany tego parametru. Operator poprzez łącze Wi-Fi może zapewnić odczyt i transfer do oprogramowania hydrograficznego zmierzonego profilu dźwięku;

- AML SV Xchange: czujnik prędkości dźwięku w wodzie, zintegrowany z interfejsem sondy wielowiązkowej 3DSS-DX-450 i zamontowany przy głowicy sondy;
- 2x EchoRange 200kHz: dwie echosondy jednowiązkowe do kontroli głębokości pod pływakami platformy. Opracowane przez Marine Technology oprogramowanie umożliwia również identyfikację rodzaju dna. Operator otrzymuje informację o bieżącej głębokości na konsoli nawigacyjnej.

Na rysunkach przedstawiono platformę HydroDron-1 odpowiednio skośnie z przodu (rysunek 2.4) i od rufy (rysunek 2.5).



Rysunek 2.4. Bezzałogowa platforma nawodna HydroDron-1 z głowicą sondy wielowiązkowej w górnym położeniu i czujnikiem dźwięku zamontowanym nad głowicą – widok skośnie z przodu (foto: A. Stateczny)

Potrzeby obserwacyjnej sytuacji nawigacyjnej wokół platformy zostały zrealizowane poprzez zainstalowanie licznych sensorów i czujników. Sensory teledetekcyjne wybrane do zainstalowania na platformie HydroDron-1:

- radar UMRR 0C Type 42, 24GHz: radar stacjonarny odporny na warunki atmosferyczne, działający do 300 m;
- lidar Velodyne Puck VLP-16: popularny sensor laserowy powszechnie używany do pozyskiwania chmury punktów, działający do 100 m, popularny w pojazdach autonomicznych;
- 2 dalmierze laserowe LW20: przeznaczone do wykrywania przeszkód nawigacyjnych do 100 m od platformy;

- 2 kamery jednokierunkowe Hikvision – Model DS-2CD1143GO: kamery jednokierunkowe umieszczone w kierunku przed dziobem i rufą platformy;
- kamera PTZ Hikvision – Model DS-2DE3304W-DE: kamera obrotowa sterowana przez operatora, umożliwiająca pełny przegląd sytuacji wokół platformy;
- WX Ultrasonic WeatherStation: stacja pogodowa do pomiaru parametrów hydro-meteorologicznych marki Airmar.



Rysunek 2.5. Bezzałogowa platforma nawodna HydroDron-1
– widok od rufy na silniki elektryczne (foto: A. Stateczny)

Kolejnym zestawem wyposażenia pomiarowego platformy są urządzenia do pomiarów oceanograficznych. Zostały one precyzyjnie dobrane do realizacji zadań pomiarowych wyspecyfikowanych w projekcie MPSS. Wyposażenie oceanograficzne platformy HydroDron-1 stanowią:

- 2 batometry typu NISKIN o pojemności 7,5 l, przystosowane do automatycznego poboru próbek wody powierzchniowej i głębinowej,
- czerpacz typu Petite Ponar 6" x 6" przystosowany do automatycznego poboru próbek z dna akwenu.

Platforma HydroDron-1 może pracować w różnych trybach pracy wybieranych przez operatora. Mogą to być następujące tryby:

- autonomiczny – podstawowy tryb pracy autonomicznej do realizacji zaplanowanej trajektorii; platforma może zrealizować pomiary na zaplanowanych profilach pomiarowych,
- adaptacyjne sterowanie kursem – platforma utrzymuje zadany kurs w stosunku do dna akwenu, adaptacyjnie kompensując warunki hydrometeorologiczne; tryb ten jest wybierany automatycznie, gdy operator wybierze funkcję „leć tu”,

- dynamiczne pozycjonowanie – platforma utrzymuje zadaną pozycję w stosunku do dna akwenu z założonym promieniem tolerancji; tryb ten jest wybierany automatycznie po osiągnięciu punktu końcowej zaplanowanej trajektorii;
- manualny – operator w każdym momencie pracy platformy może przejść na sterowanie ręczne, kontrolując parametry ruchu platformy ze stanowiska brzegowego; aktywny moduł antykolizyjny sygnalizuje zagrożenie i uniemożliwia zderzenie z dnem czy inną jednostką;
- hold – tryb bezpieczeństwa, w którym silniki i ster są unieruchomione. Platforma automatycznie przechodzi w tryb Hold w przypadku utraty łączności ze stanowiskiem brzegowym w stosunku do aktualnie używanej konsoli (również przy sterowaniu z konsoli manewrowej).

Pomiary batymetryczne i sonarowe wykonane z wykorzystaniem bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1

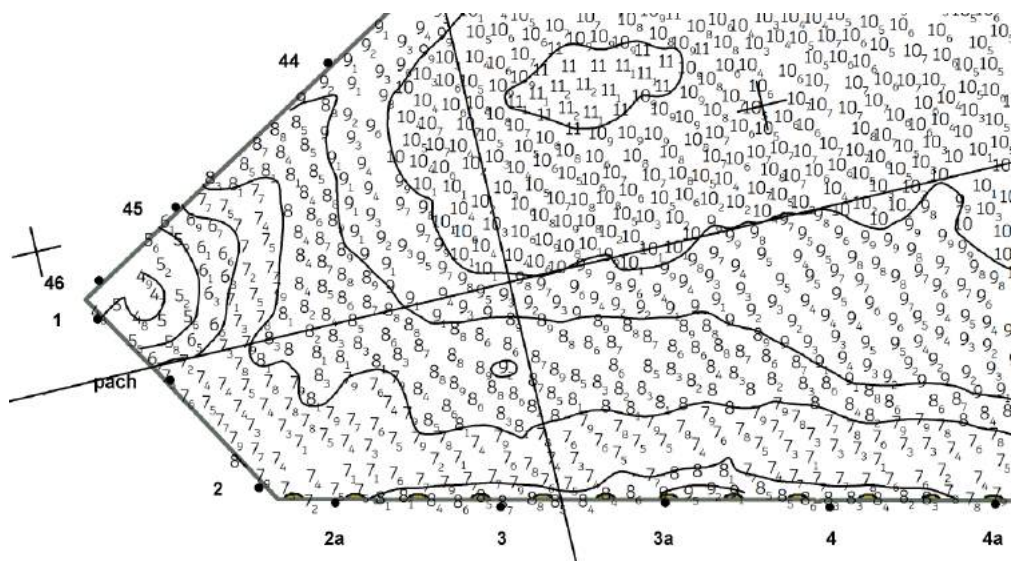
W ramach realizacji projektu MPSS w 2023 roku wykonano serię 12 sondaży i badań sonarowych przy wybranych nabrzeżach w porcie morskim w Gdyni. Pomiary zostały zrealizowane w trzech sesjach pomiarowych przy następujących nabrzeżach: Węgierskim, Słowackim, Rumuńskim, Czeskim, Stanów Zjednoczonych, Rotterdamskim oraz Fińskim.

Wszystkie pomiary w zakresie profili podstawowych (równoległych do nabrzeży) przeprowadzono w trybie autonomicznym, zaś profile kontrolne (prostopadle do nabrzeży) w trybie manualnym. Na rysunku 2.6 przedstawiono platformę HydroDron-1 w trakcie pomiarów przy nabrzeżu Rotterdamskim (wykonanych w trakcie sesji pomiarowej w maju 2023 roku).

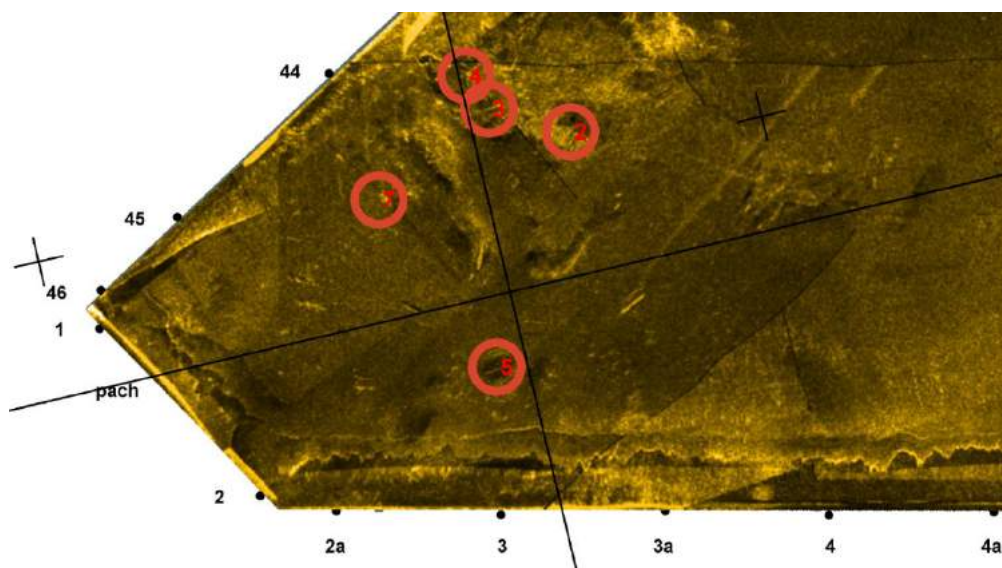


Rysunek 2.6. Bezzałogowa platforma nawodna HydroDron-1 w trakcie pomiarów przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni wykonanych w maju 2023 r. (foto: A. Stateczny)

Na rysunku 2.7 przedstawiono fragmenty planu batymetrycznego akwenu przy nabrzeżu Rotterdamskim oraz na rysunku 2.8 fragment mozaiki sonarowej z wykrytymi obiektami dennymi.



Rysunek 2.7. Fragment planu batymetrycznego akwenu przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni (opracowanie własne na podstawie (*Plan batymetryczny akwenu...*, 2023, s. 1)).



Rysunek 2.8. Fragment mozaiki sonarowej z obiektami dennymi wykrytymi przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni (opracowanie własne na podstawie (*Mozaika sonarowa...*, 2023, s. 1)).

Podsumowanie

W trakcie realizacji projektu MPSS wszystkie zaplanowane zadania zostały wykonane. Oznacza to, że zrealizowano zadania oceanograficzne związane z pobieraniem prób wody, próbek dna i rejestracji profili fizykochemicznych wody oraz zadania hydrograficzne związane z pomiarami batymetrycznymi i sonarowymi. Zadania oceanograficzne zostały wykonane o każdej porze roku, każdorazowo w siedmiu wytypowanych punktach pomiarowych. W każdym punkcie pobrano po dwie próbki wody w ilości 7,5 l na

głębokości 1 m nad dnem oraz 1 m poniżej powierzchni wody. Każdorazowo pobierano próbki dna oraz ustalano profile fizykochemiczne wody w tym: zasolenie, temperaturę oraz dodatkowo wskaźnik pH pobranej próbki wody. Pobrane próbki i zarejestrowane profile zostały przekazane do badania w autoryzowanym laboratorium.

Dla 12 pomiarów hydrograficznych wykonano plany batymetryczne oraz przygotowano sprawozdania z sonarowego badania dna. Wyniki pomiarów batymetrycznych zostały porównane z wynikami wcześniejszych pomiarów i wykryto pewne rozbieżności, które będą przedmiotem dalszych analiz, w tym również w ramach realizacji innych projektów.

Operatorzy platformy HydroDron-1 w całym okresie realizacji projektu analizowali zachowanie platformy i wprowadzali usprawnienia procedur oraz modyfikacje techniczne, co zaowocowało lepszym dopasowaniem platformy do wykonywania zadań na akwenach portowych i innych akwenach ograniczonych, a zdobyte bogate doświadczenia mogą zostać wykorzystane również w czasie realizacji innych projektów i na innych akwenach.

Bibliografia

- Mozaika sonarowa z obiektami dennymi wykrytymi przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni* (2023). Marine Technology: Gdynia
- Plan batymetryczny akwenu przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni* (2023). Marine Technology: Gdynia
- HydroDron* (2023). Marine Technology: Gdynia. <https://marinetechnology.pl/hydrodron/>
- Stateczny, A., Kazimierski, W., Burdziakowski, P., Motyl, W., i Wisniewska, M. (2019a). Shore construction detection by automotive radar for the needs of Autonomous Surface Vehicle navigation, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (2), 80. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020080>
- Stateczny, A., i Burdziakowski, P. (2019b). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, Vol. 26 No. 1(101), 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>
- Stateczny, A., Kazimierski, W., Gronska-Sledz, D., i Motyl, W. (2019c). The Empirical Application of Automotive 3D Radar Sensor for Target Detection for an Autonomous Surface Vehicle's Navigation. *Remote Sensing*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs11101156>
- Stateczny, A., Gronska-Sledz, D., i Motyl, W. (2019d). Precise bathymetry as a step towards producing bathymetric electronic navigational charts for comparative (terrain reference) navigation. *Journal of Navigation*, 72 (5), 1623–1632. <https://doi.org/10.1017/S0373463319000377>
- Stateczny, A., Blaszcak-Bak, W., Sobieraj-Zlobinska, A., Motyl, W., i Wisniewska, M. (2019e). Methodology for Processing of 3D Multibeam Sonar Big Data for Comparative Navigation. *Remote Sensing*, 11(19), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs11192245>
- Stateczny, A., Burdziakowski, P., Najdecka, K., i Domagalska-Stateczna, B. (2020). Accuracy of Trajectory Tracking Based on Nonlinear Guidance Logic for Hydrographic Unmanned Surface Vessels. *Sensors*, 20, 832. <https://doi.org/10.3390/s20030832>
- Stateczny, A., Specht, C., Specht, M., Brčić, D., Jugović, A., Widźgowski, S., Wiśniewska, M., i Lewicka, O. (2021). Study on the Positioning Accuracy of GNSS/INS Systems Supported by DGPS and RTK Receivers for Hydrographic Surveys. *Energies*, 14 (21), 7413. <https://doi.org/10.3390/en14217413>

Stateczny, A., Gierlowski, K., i Hoefl, M. (2022). Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Surface Unmanned Vehicles. *Sensors*, 22(2), 655.
<https://doi.org/10.3390/s22020655>

Rozdział 3. Sprawdzenie możliwości zastosowania bezzałogowych platform nawodnych do pobierania próbek wody i osadów dennych na przykładzie Portu Gdynia

Katarzyna Galer-Tatarowicz, Aleksandra Bojke, Grażyna Dembska,
Grażyna Pazikowska-Sapota, Agnieszka Flasińska, Tomasz Dziarkowski,
Barbara Lednicka

Wprowadzenie

Obszary portowe należą do stref, w których głównym źródłem zanieczyszczeń jest działalność związana z produkcją usług, przemysłem (w tym stoczniowym), a także eksploatacją infrastruktury miejskiej. Wpływy antropogeniczne znajdują odzwierciedlenie w danych monitoringowych dotyczących tych obszarów. Dodatkowo akweny te często stanowią dynamiczne obszary, gdzie procesy zachodzą na bardzo małej przestrzeni w krótkim czasie. Ze względu na znaczną ich różnorodność, sposób pobierania próbek wód i osadów basenów portowych ma istotny wpływ na uzyskane wyniki badań.

Wody morskie oraz osady denne są istotnymi elementami środowiska, których stan należy monitorować zarówno pod względem jakości, jak i możliwości zanieczyszczenia na skutek działalności antropogenicznej. Jedną z trudności przy wykonywaniu analiz wód i osadów stanowi fakt, że nie można przebadać całej ich objętości. Dlatego konieczne jest stosowanie takich programów i metod pobierania próbek, które dawałyby jak najbardziej reprezentatywne wyniki, a zastosowany sprzęt umożliwiałby pobieranie próbek z akwenów niedostępnych lub trudno dostępnych dla jednostek załogowych.

Badania środowiskowe, zwłaszcza te prowadzone w ekosystemach naturalnych będących pod dużym wpływem antropogenicznym, stanowią duże wyzwanie dla chemików analityków, których działania nie ograniczają się jedynie do zapewnienia jakości na etapie analiz chemicznych, ale wymagają od nich również wiedzy i doświadczenia w wykonywaniu prac terenowych, do których należy pobieranie próbek. Każdy z wymienionych wyżej etapów może być źródłem błędów, stąd też istnieje konieczność zapewnienia kontroli jakości dla procesu pobierania próbek na takim samym poziomie jak na etapie samego pomiaru analitycznego (Ellison i Williams, 2012; Ramsey i Ellison, 2007).

Obecnie wykonanie analizy chemicznej z zastosowaniem metod instrumentalnych stanowi najbardziej powtarzalną i charakteryzującą się największą precyzją część procesu pomiarowego, a błędy, które są popełniane na tym etapie, są bardzo łatwe do zidentyfikowania i wyeliminowania. Niezwykle ważnym zagadnieniem jest otrzymywanie wyników z akceptowalną wiarygodnością lub inaczej – jak najmniejszą niepewnością – z całego procesu pomiarowego, a więc także z procesu pobierania próbek. Jeżeli niepewność pobierania próbek ma przeważający udział w niepewności pomiaru, to zastosowanie bardzo precyzyjnych i dokładnych metod analitycznych nie poprawi jakości uzyskanych wyników analiz i nie wpłynie na końcową wartość niepewności

(Ramsey i in., 2019; Ramsey i Thompson, 2007; Thompson, 1998). Oznacza to, że nawet jeżeli zostanie zastosowana najlepsza z możliwych metod analitycznych, a proces pobierania próbek będzie nieodpowiedni i obarczony dużym błędem, to jakość końcowego wyniku analiz będzie wątpliwa.

Według Polskiego Centrum Akredytacji proces pobierania próbek jest ustaloną procedurą pobierania do badań części określonej substancji, materiału bądź wyrobu w celu zapewnienia reprezentatywnej próbki dla całości. Taka reprezentatywna próbka powinna być źródłem informacji niezbędnych do: określenia stanu (jakości) badanego obiektu, potwierdzenia postawionej hipotezy badawczej lub podjęcia właściwej decyzji (administracyjnej, gospodarczej i prawnej). Proces pobierania próbek uwzględnia również przygotowanie próbek do badań, co wiąże się z ich utrwaleniem, zabezpieczeniem, transportem i przechowywaniem, czyli tzw. sterowanie ważnością wyników badań (Bodnar i in., 2015; Czechowicz, 2014).

Port Gdynia jest z racji swojego położenia portem morskim, ponieważ przez jego baseny nie przepływa woda rzeczna, jak ma to miejsce w pozostałych polskich portach. W takiej sytuacji podczas pobierania próbek stosuje się odniesienie do regulacji normatywnych dotyczących wód morskich i morskich osadów dennych. Metody pobierania tego typu próbek są regulowane głównie przez trzy normy. Pierwsza norma to „Jakość Wody – Pobieranie Próbek – Część 9: Wytyczne Dotyczące Pobierania Próbek Wód Morskich” (PN ISO 5667-9:2005), drugą normą jest „Jakość Wody – Pobieranie Próbek – Część 1: Wytyczne Opracowania Programów Pobierania Próbek i Technik Pobierania” (PN ISO 5667-1:2023-10) oraz trzecią jest „Jakość Wody – Pobieranie Próbek – Część 19: Wytyczne Dotyczące Pobierania Próbek Osadów Morskich” (PN-EN ISO 5667-19:2006).

Pobieranie próbek wód i osadów dennych do badań fizykochemicznych

Norma PN ISO 5667-1:2023-10 (dotycząca opracowywania programów i technik pobierania próbek) wskazuje, że przed opracowaniem programu pobierania próbek bardzo ważne jest staranne ustalenie celów procesu, ponieważ są one głównymi czynnikami określającymi: położenie miejsc pobierania próbek, częstotliwość ich pobierania, czas pobierania, procedury pobierania, możliwości transportu i wymagania analityczne (Bodnar i in., 2015; PN ISO 5667-1:2023-10).

Wybór odpowiedniej metody pobierania próbek zależy od celu badania, na który może mieć wpływ, m.in. głębokość badanego akwenu, rodzaj osadu i wymagana głębokość penetracji osadu. Wybór właściwej metody pobierania próbek umożliwi uzyskanie odpowiedniej jakości wyników badań do wybranego celu. Kluczowe kwestie tego procesu obejmują: koszt, dostępność miejsc i reprezentatywność pobranych próbek. Niewłaściwie dobrane metody pobierania próbek mogą skutkować otrzymaniem próbek niereprezentatywnych dla badanego środowiska lub mogą prowadzić do błędów systematycznych. Błędy w pobieraniu próbek wywierają wpływ na wyniki analizy próbek, co w konsekwencji może prowadzić do uzyskania nieodpowiednich zestawów danych (Tuit i Wait, 2020).

Należy mieć na uwadze, że objętość pobranej próbki powinna być wystarczająca do wykonania wymaganych/zaplanowanych analiz. Sprzęt do pobierania próbek oraz pojemniki do ich przechowywania powinny spełniać określone warunki. Zgodnie z wymaganiami normy PN-ISO 5667-9:2005, dotyczącej pobierania próbek wód morskich, pojemniki powinny być obojętne chemicznie, wytrzymałe, łatwe do zamknięcia i ponownego otwarcia, z odpowiednio szeroką szyjką oraz powinny być skonstruowane w sposób umożliwiający ich umycie i ponowne użycie. Do pobierania wody z określonej głębokości najczęściej stosuje się przyrządy rurowe wyposażone na obu końcach w zawory lub klapki (np. batometry NISKIN, próbnik van Dorn) (Apeti i in., 2012; Fornai i in., 2012; PN ISO 5667-9:2005). Próbniki tego typu są dostępne w handlu i charakteryzują się niewielkimi rozmiarami i wagą, dzięki czemu są kompatybilne i można je zintegrować z bezzałogową platformą nawodną (*unmanned surface vehicle*, USV) o małych rozmiarach. Można je zaadaptować jako pojedynczy próbnik lub umieścić w karuzeli w celu zbierania pojedynczych próbek na różnych głębokościach. Nie są one jednak zaprojektowane do pracy autonomicznej. Próbnikami zarządza personel zdalnie sterujący USV, wskazujący który próbnik i z jakiej głębokości ma pobierać wodę (Fornai i in., 2012).

Próbki osadów powierzchniowych do badań pilotażowych i podstawowych można pobierać za pomocą próbników chwytakowych i skrzyniowych, zaprojektowanych do penetracji podłoża grawitacyjnie lub przy użyciu dźwigni (Apeti i in., 2012; PN-EN ISO 5667-1:2008; PN-EN ISO 5667-19:2006). Próbniki chwytakowe charakteryzują się stosunkowo małą głębokością penetracji (3–30 cm) i dużą objętością próbki (0,5–70 l), co sprawia, że są one szczególnie dobrze przystosowane do pobierania osadów powierzchniowych (Tuit i Wait, 2020). Dodatkowo są relatywnie szybkie i łatwe w użyciu. Ze względu na różnorodne rozmiary komercyjnie dostępnych próbników chwytakowych, można odpowiednio dopasować ich rozmiar do dzielności nawodnej platformy bezzałogowej (PN-EN ISO 5667-19:2006).

Pobieranie próbek z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych

Bezzałogowe platformy nawodne w ostatnim czasie stały się ważnym narzędziem pomocniczym do mapowania obszarów morskich, wykorzystywanym w badaniach śródlądowego transportu wodnego, badaniach jakości wody i osadów dennych oraz innych obszarów działania. Obecnie monitoring jakości wody może być prowadzony ręcznie przez człowieka, ale także autonomicznie i równie skutecznie przy zastosowaniu systemów robotycznych (Babić i in., 2020; De Sousa i Andrade Gonçalves, 2011; Deusdado i in., 2016) oraz różnych mobilnych sterowanych platform (*Autonomous Surface Vehicle*, autonomiczny pojazd nawodny, ASV) i (*Unmanned Surface Vehicle*, bezzałogowy pojazd nawodny – USV) (Bae i in., 2019; Codiga, 2015; Demetillo i Taboada, 2019; Jo i in., 2019; Manley, 2016; Xiong i in., 2022). Platformy takie mogą być wyposażone w czujniki do bezpośredniego pozyskiwania danych pochodzących z pomiarów pH, temperatury, tlenu rozpuszczonego czy przewodnictwa oraz w przyrządy do pobierania próbek wód i osadów dennych (Bae i in., 2019; Bae i in., 2021;

Demetillo i Taboada, 2019; Fornai i in., 2012; Fornai i in., 2016). W ramach realizacji projektu MPSS przeprowadzono testy bezzałogowej platformy nawodnej USV – HydroDron-1 w celu zweryfikowania jej przydatności do pobierania próbek wody i osadów dennych w basenach portowych Portu Gdynia.

Niepewność procesu pobierania próbek

Systematyczna kontrola jakości pobierania próbek pozwala na bieżąco monitorować ten proces i eliminować błędy związane z poszczególnymi jego etapami (pobieranie, transport, przechowywanie), warunkami, w jakich pobierana jest próbka oraz prawdopodobną zmianą samej próbki (Grynkiewicz i in., 2008). W tym celu konieczne jest określenie wymagań dotyczących zapewnienia jakości, które obejmują wymagania kompetencyjne osób zaangażowanych w proces pobierania próbek, walidację i kontrolę jakości tego procesu (Bodnar i in., 2013). Walidacja procesu pobierania próbek nie jest wystarczająca do zapewnienia jakości danej procedury analitycznej. Niejednorodność próbki, miejsce i warunki pobierania mają główny wpływ na wartość niepewności. Dodatkowo nieprawidłowe sposoby transportowania i przechowywania próbki mogą wywołać nieodwracalne zmiany jej parametrów, prowadzące do otrzymania fałszywych wyników. Oprócz walidacji samego procesu pobierania, bardzo ważna jest również wewnętrzna kontrola jakości na etapie pobierania próbek (Bodnar i in., 2015; Grynkiewicz i in., 2008).

Niepewność pobierania próbek oznacza udział błędów procesu pobierania w niepewności złożonej związanej z pomiarem analitycznym, gdy wielkością mierzoną jest stężenie analitu w obiekcie (Ramsey i Thompson, 2007; Thompson, 1998). Według Thompsona błędy pobierania próbek można określić ilościowo dopiero po analizie próbek, więc wyniki rutynowych pomiarów zawierają zarówno błędy pobierania próbek, jak i błędy analityczne. W konsekwencji wyniki wykorzystywane do oszacowania niepewności pobierania próbek muszą pochodzić z zaplanowanych eksperymentów (Thompson, 1998).

Eksperymentalna metoda wyznaczania niepewności pomiaru pozwala na szybką i stosunkowo prostą ocenę wszystkich źródeł niepewności związanych z pobieraniem próbek (Giercuskiewicz-Bajtlik i Gworek, 2014). Dwukrotne zastosowanie procedury pobierania umożliwia sprawdzenie precyzji pobierania próbek oraz określenie wariancji całego procesu pobierania próbek. W projekcie MPSS próbki były pobierane z danej lokalizacji przez różne osoby stosujące różne techniki pobierania próbek. W tym przypadku (zgodnie z teorią) niepewność złożona była określana jako różnica między wynikami pomiarów wykonanych za pomocą różnych technik przez różne osoby. Wnioski wyciąga się na podstawie analizy wariancji (ANOVA).

Materiały i metody badań w projekcie MPSS

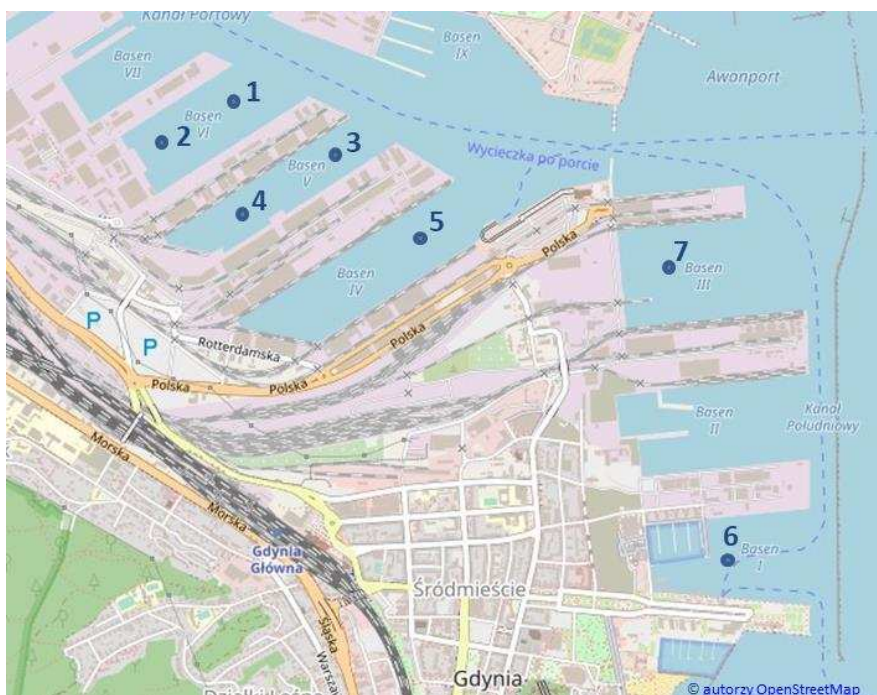
Przedstawione badania opierały się na wynikach analiz próbek wód morskich i osadów dennych zebranych z obszaru Portu Gdynia z pięciu basenów portowych (I – Prezydenta, III – Węglowy, IV – Marszałka Piłsudskiego, V – Ministra Kwiatkowskiego i VI) w siedmiu punktach pomiarowych (rysunek 3.1). W ciągu roku odbyły się cztery kam-

panie pomiarowe podczas czterech sezonów 2022 roku (kampania zimowa: 28 lutego – 3 marca, kampania wiosenna: 16–19 maja, kampania letnia: 18–21 lipca, kampania jesienna: 17–20 października 2022 r.). Dane empiryczne zbierane były przy wykorzystaniu jednostki IMOS 2 Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (IM UMG) oraz bezzałogowej nawodnej platformy badawczej HydroDron-1. Obie jednostki przedstawiono na rysunku 3.1. Zarówno próbobiorky akredytowanego laboratorium, jak i jednostka bezzałogowa, zostali wyposażeni w system batometrów do pobierania próbek wody z warstwy powierzchniowej i przydennej oraz w próbnik Van Veena do pobierania próbek osadów dennych (rysunek 3.2).



Rysunek 3.1. Jednostka pływająca Uniwersytetu Morskiego w Gdyni – IMOS-2 oraz HydroDron-1 na wodach basenu portowego Portu Gdynia (foto: A. Bojke)

Punkty pobierania próbek wybrano po uwzględnieniu różnych czynników, takich jak analiza wyników historycznych z badanego regionu, dostępność, głębokość i jakość osadów. Częstotliwość próbkowania wyznaczono w sposób regularny w cyklu rocznym, obejmującym zmiany sezonowe badanych parametrów, po uwzględnieniu ewentualnego wpływu warunków meteorologicznych na proces pobierania próbek oraz wyników badań historycznych czystości wód basenów portowych z lat 2012–2019 (Poppek i in., 2022). Badania eksperymentalne przeprowadzano w warunkach wody spokojnej przy przybliżonym stanie morza o sile 2 (w skali Beauforta).



Rysunek 3.2. Miejsca pobierania próbek wód i osadów dennych – baseny portowe Portu Gdynia (opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap 2023)

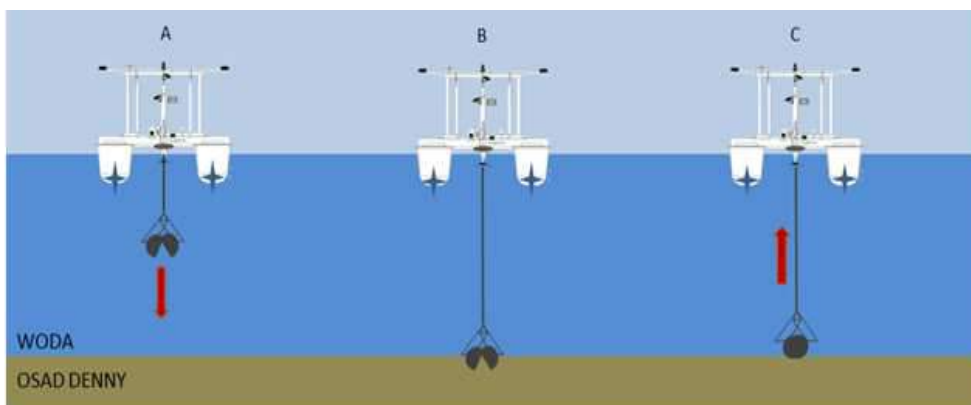
Na wyposażeniu platformy HydroDron-1 są dwa batometry typu NISKIN o pojemności $7,5 \text{ dm}^3$ przystosowane do automatycznego pobierania próbek wody powierzchniowej i głębinowej oraz czerpacz przystosowany do automatycznego pobierania próbek osadów powierzchniowych z dna. Na platformie zamontowano również profilomierz wyposażony w czujniki i miernik prędkości dźwięku (SVP i SVS) do pomiarów *in situ* przewodnictwa elektrycznego, temperatury, głębokości i zasolenia w kolumnie wody.

W każdej z kampanii pomiarowych pobierano próbki wody i osadów dennych z maksymalnie dwóch punktów pomiarowo-badawczych dziennie. Próbkę wód morskich pobierano za pomocą batometru (rysunek 3.3), zgodnie z wymaganiami normy PN ISO 5667-9:2005, natomiast próbki osadów pobierano próbnikiem czerpakowym typu Van Veena lub Ponar zgodnie z normą PN-EN ISO 5667-19: 2006.

Na rysunku 3.4 zaprezentowano procedurę pobierania próbek powierzchniowych osadów dennych próbnikiem chwytakowym. Działanie zapewnia wyciągarka zamontowana na platformie HydroDron-1. Procedura zdalnego pobierania próbek osadów powierzchniowych za pomocą próbnika chwytakowego polega na zanurzeniu próbnika na dno w pozycji otwartej (A). Następnie, gdy próbnik dotknie dna, odzepia się zatrzask utrzymujący rozwarcie szczęk próbnika (B), w tym momencie próbnik ulega automatycznemu zamknięciu. Wówczas USV rozpoczyna wyciąganie próbnika wraz z próbą (C).

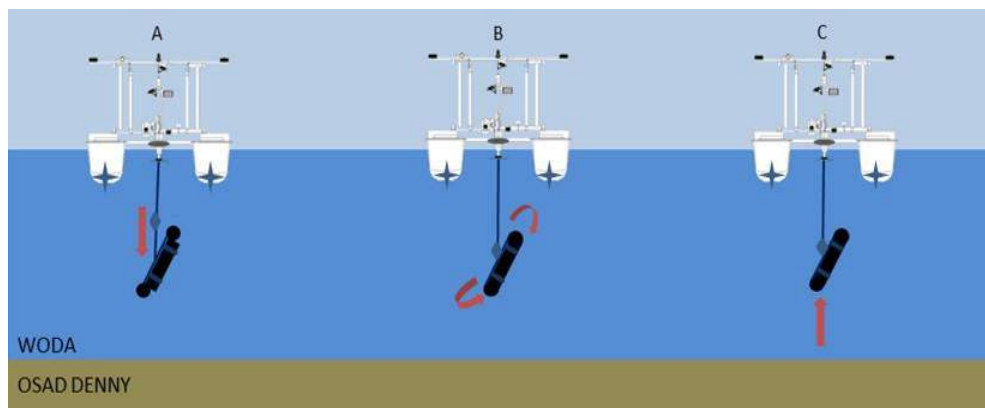


Rysunek 3.3. Przyrządy wykorzystywane do pobierania: próbek wód morskich w basenach Portu Gdynia – batometr (po lewej) oraz próbek osadów morskich – czerpacz Van Veena (po prawej) (foto: B. Lednicka)



Rysunek 3.4. Procedura zdalnego pobierania próbek osadów powierzchniowych za pomocą próbnika chwytakowego (A) zanurzanie próbnika; (B) zamknięcie szczęk próbnika; (C) wyciąganie próbnika wraz próbką (opracowanie własne)

W podobny sposób przebiegało pobieranie próbek wody morskiej za pomocą batometru (rysunek 3.5). Procedura zdalnego pobierania próbek wody batometrem polega na zanurzeniu batometru na odpowiednią – żądaną głębokość w pozycji otwartej (A). Gdy batometr znajdzie się na odpowiedniej głębokości uwalniany jest „posyłacz” powodujący zwolnienie blokad i zamknięcie pokryw batometru (B). Wówczas USV rozpoczyna wyciąganie zamkniętego batometru wraz z pobraną próbką wody (C). W każdym punkcie pomiarowym pobierano wodę morską z warstwy powierzchniowej (z głębokości do 30 cm pod powierzchnią) oraz z warstwy naddennej (z głębokości 1 m nad dnem).



Rysunek 3.5. Procedura zdalnego pobierania próbek wody za pomocą batometru (A) zanurzenie batometru; (B) zwolnienie blokad i zamknięcie pokryw batometru; (C) wyciąganie pobranej próbki wody (opracowanie własne)

Po pobraniu próbki HydroDron-1 przypluwał do nabrzeża, gdzie próbkę wody rozlewano do przygotowanych wcześniej butelek, a próbkę osadu, po uprzednim wyrzuceniu do chemicznie obojętnego pojemnika i uśrednieniu, przenoszono za pomocą łopatkę do szklanych pojemników i woreczków z polipropylenu. Próbkę przechowywano w lodówkach w temperaturze nie wyższej niż 4°C i tak transportowano do laboratorium badawczego. Podobnie postępowano z próbkami pobranymi metodą manualną z jednostki pływającej IMOS-2.

Rezultaty eksperymentu w projekcie MPSS

HydroDron-1 został przetestowany podczas pobierania próbek wód morskich i powierzchniowych osadów dennych w basenach portowych Portu Gdynia. Wody pobierane były z warstwy powierzchniowej oraz z głębokości od 9 do 15 m. Eksperymenty były prowadzone w czterech sezonach badawczych. Oceniono, że system próbkowania działał prawidłowo. Testowanie chemicznej obojętności całego systemu, czyli określenie, czy próbki ulegają zanieczyszczeniu podczas ich pobierania oraz określenie niepewności procesu pobierania zostało przeprowadzone w akredytowanym Laboratorium Zakładu Ochrony Środowiska Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Próbkami odniesienia były próbki wody i osadów dennych pobierane równolegle w sposób manualny przez zespół próbkobiorców z Laboratorium Zakładu Ochrony Środowiska Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (certyfikat PCA nr AB 646).

W pobranych próbkach z basenów portowych oznaczono następujące wskaźniki zanieczyszczeń:

- a) w wodach powierzchniowych i przydennych: węglowodory ropopochodne (indeks oleju mineralnego), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), BTEX (benzen, etylobenzen, toluen, m- + p-ksylen, o-ksylen, styren), bisfenol a, azot azotanowy (N-NO₃), azot azotynowy (N-NO₂), azot amonowy (N-NH₄),

fosfor fosforanowy (P-PO₄), azot ogólny (N_{og}), fosfor ogólny (P_{og}), tlen rozpuszczony, zawiesiny ogólne, pH oraz ogólny węgiel organiczny (OWO), zasolenie;
 b) w osadach dennych: oleje mineralne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), tributyllocyna (TBT), azot ogólny (N_{og}) i fosfor ogólny (P_{og}).

W tabeli 3.1 przedstawiono przykładowe wyniki badań próbek wody pobranych z wykorzystaniem dwóch opisanych wyżej metod.

Tabela 3.1. Przykładowe wyniki analiz w próbkach wody pobranych w dniach 18–21 lipca 2022 r. (opracowanie własne)

Numer stacji pomiarowej	Rodzaj analizy/ jednostka	Wynik (próbka pobrana manualnie)	Wynik (próbka pobierana przez HydroDron-1)	% błędu	Rozstęp
1.	Indeks oleju mineralnego [mg·dm ⁻³]	<0,01	<0,01	0,00	0,00
2.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
3.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
4.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
5.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
6.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
7.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
1.	Nog [mg·dm ⁻³]	0,30	0,29	3,45	0,01
2.		0,30	0,28	7,14	0,02
3.		0,27	0,26	3,85	0,01
4.		0,26	0,25	4,00	0,01
5.		0,25	0,28	10,71	0,03
6.		0,24	0,26	7,69	0,02
7.		0,24	0,22	9,09	0,02
1.	pH	8,11	8,09	0,25	0,02
2.		8,06	8,01	0,62	0,05
3.		8,11	8,06	0,62	0,05
4.		8,09	8,09	0,00	0,00
5.		8,30	8,24	0,73	0,06
6.		8,45	8,33	1,44	0,12
7.		8,46	8,42	0,48	0,04

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 3.1 można stwierdzić, że system pobierania próbek zamontowany na platformie HydroDron-1 nie wpływa na wzrost zanieczyszczenia badanych próbek wody w odniesieniu do analizowanych parametrów. Wartość procentowa różnicy pomiędzy dwiema metodami pobierania próbek wykazuje minimalne błędy. Uzyskane wyniki dla porównywanych wyżej wskaźników: indeks oleju mineralnego, azot ogólny i pH są zbliżone, zaś różnice mieszczą się w obszarze niepewności zastosowanych metod analitycznych.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu potwierdziły, że system automatycznego pobierania próbek nie wnosi zanieczyszczeń w procesie pobierania próbek wody i osadów dennych. System zamontowany na platformie HydroDron-1 działa poprawnie i nie wpływa na dalszy proces pomiarowy w laboratorium stacjonarnym. Charakterystyka próbek pobranych manualnie i z platformy bezzałogowej jest porównywalna, a niepewność procesu pobierania pozostaje bez znaczących różnic na poziomie maksymalnym dla najbardziej zmiennego parametru: dla wód morskich – 20% (związki azotu), a dla powierzchniowych osadów dennych – 30% (związki fosforu). Niepewność złożona procesu pobierania została obliczona na podstawie analizy różnic między wynikami pomiarów wykonanych za pomocą różnych technik przez różne osoby dla różnych parametrów w eksperymencie z udziałem replikacji próbek. Wnioski wyciąga się na podstawie analizy wariancji (ANOVA). Szczegółowe wyniki procesu walidacji pobierania próbek i określania jego niepewności zostaną przedstawione w osobnej pracy. W przyszłości sprawdzona zostanie możliwość pracy jednostki bezzałogowej przy większym falowaniu oraz zamontowaniu większej liczby czujników do pomiarów bezpośrednich (np. pH, tlenu rozpuszczonego, chlorofilu itp.). Zostanie przeanalizowana możliwość automatyzacji procesów rozlewania do butelek laboratoryjnych próbek wód pobieranych przez HydroDron-1. Sprawdzona zostanie także możliwość umieszczania pobranych próbek osadów dennych w odpowiednich pojemnikach znajdujących się na urządzeniu HydroDron-1. Zastosowanie tych rozwiązań znacznie skróciłoby czas poboru próbek i wyeliminowało konieczność przyplływania jednostki do nabrzeża z każdą pobraną pojedynczą próbką wody czy osadu w celu jej odbioru i zabezpieczenia.

Bibliografia

- Apeti, D. A., Hartwell, S. I., Johnson, W. E., i Lauenstein, G. G. (2012). *National Status and Trends Bioeffects Program: Field methods*. NOAA/National Centers for Coastal Ocean Science: Silver Spring. <http://hdl.handle.net/1834/30540>
- Babić, A., Vasiljević, G., i Mišković, N. (2020). Vehicle-in-the-Loop Framework for Testing Long-Term Autonomy in a Heterogeneous Marine Robot Swarm. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 4439–4446. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3000426>
- Bae, J. H., Jo, W., Park, J. H., Voyles, R. M., McMillan, S. K., i Min, B. C. (2021). Evaluation of Sampling Methods for Robotic Sediment Sampling Systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(2), 542–554. <https://doi.org/10.1109/JOE.2020.3005576>
- Bae, J. H., Min, B. C., Luo, S., Kannan, S. S., Singh, Y., Lee, B., Voyles, R. M., Postigo-Malaga, M., Zenteno, E. G., i Aguilar, L. P. (2019). Development of an unmanned surface vehicle for remote sediment sampling with a van veen grab sampler, *OCEANS 2019 MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2019*. <https://doi.org/10.23919/OCEANS40490.2019.8962837>
- Bodnar, M., Konieczka, P., i Namieśnik, J. (2015). Sampling Strategies: Statistics of Sampling. W: J. L. Anderson, A. Berthod, V. Pino (red.), *Analytical Separation Science*. Apryll Stalcup Verlag: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2015, 1385–1399. <https://doi.org/10.1002/9783527678129.assep051>
- Bodnar, M., Namieśnik, J., i Konieczka, P. (2013). Validation of a sampling procedure. *TrAC-Trends in Analytical Chemistry*, 51, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.06.011>

- Codiga, D. L. (2015). A marine autonomous surface craft for long-duration, spatially explicit, multidisciplinary water column sampling in coastal and estuarine systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(3), 627–641. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00171.1>
- Czechowicz, B. (2014). Proces pobierania próbek – plany, procedury, zapewnienie jakości i dokumentowanie. W: *Pobieranie próbek w działalności akredytowanych jednostek oceniających zgodność*, s. 2–8. Polskie Centrum Akredytacji. https://www.pca.gov.pl/download/gfx/pca/pl/defaultaktualnosci/36/20/1/euro-lab2014_prezentacja.pdf
- De Sousa, J. B., i Andrade Gonçalves, G. (2011). Unmanned vehicles for environmental data collection. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0313-5>
- Demetillo, A. T., i Taboada, E. B. (2019). Real-Time Water Quality Monitoring for Small Aquatic Area Using Unmanned Surface Vehicle. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 3959–3964. <https://doi.org/10.48084/etasr.2661>
- Deusdado, P., Guedes, M., Silva, A., Marques, F., Pinto, E., Rodrigues, P., Lourenço, A., Mendonça, R., Santana, P., Corisco, J., Almeida, S. M., Portugal, L., Caldeira, R., Barata, J., i Flores, L. (2016). Sediment sampling in estuarine mudflats with an aerial-ground robotic team. *Sensors*, 16(9), 1–31. <https://doi.org/10.3390/s16091461>
- Ellison, S. L. R., i Williams, A. (red.). (2012). *EURACHEM/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements*. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf
- Fornai, F., Bartaloni, F., Ferri, G., Manzi, A., Ciuchi, F., i Laschi, C. (2012). An autonomous water monitoring and sampling system for small-sized ASVs operations. *Oceans*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405015>
- Fornai, F., Ferri, G., Manzi, A., Ciuchi, F., Bartaloni, F., Laschi, C., i Member, S. (2016). An Autonomous Water Monitoring and Sampling System for Small-Sized ASVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42, 5–12. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2552818>
- Giercuskiewicz-Bajtklik, M., i Gworek, B. (2014). Experimental methods of evaluating measurement uncertainty resulting from sample collection and preparation for analysis in chemical laboratories / Niepewność pomiaru wynikająca z poboru i przygotowania próbek do badań w laboratorium chemicznym oszacowana. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 25(3), 21–25. <https://doi.org/10.2478/oszn-2014-0016>
- Gryniewicz, M., Dembska, G., Sapota, G., Flasińska, A., Wisniewski, S., i Aftanas, B. (2008). The quality during the collecting of underground waters samples. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 15(4), 513–528.
- Jo, W., Hoashi, Y., Paredes Aguilar, L. L., Postigo-Málaga, M., Garcia-Bravo, J. M., i Min, B. C. (2019). A low-cost and small USV platform for water quality monitoring. *HardwareX*, 6, e00076. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00076>
- Manley, J. E. (2016). *Unmanned Maritime Vehicles, 20 years of commercial and technical evolution*. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761377>
- OpenStreetMap (2023). *Baseny portowe Portu Gdynia*. <https://www.openstreetmap.org/copyright>
- PN-EN ISO 5667-1:2023-10. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 1: Wytyczne opracowania programów pobierania próbek i technik pobierania, (2023).
- PN-EN ISO 5667-19:2006. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 19: Wytyczne dotyczące pobierania próbek osadów morskich (2006).
- PN ISO 5667-9:2005. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 9: Wytyczne dotyczące pobierania próbek wód morskich (2005).
- Popek, M., Dereszewska, A., Dembska, G., i Pazikowska-Sapota, G. (2022). The Impact of Transport on the Quality of Water in the Port of Gdynia. *TransNav*, 16(1), 167–173. <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.20>

- Ramsey, M. H., i Ellison, S. L. R. (red.). (2007). *Eurachem / CITAC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches*.
https://eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/UfS_2007.pdf
- Ramsey, M. H., Ellison, S. L. R., i Rostron, P. (red.). (2019). *EURACHEM / CITAC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches*.
https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/UfS_2019_EN_P2.pdf
- Ramsey, R. H., i Thompson, M. (2007). Uncertainty from sampling, in the context of fitness for purpose. *Accreditation and Quality Assurance*, 12, 503–513.
<https://doi.org/10.1007/s00769-007-0279-0>
- Thompson, M. (1998). Uncertainty of sampling in chemical analysis. *Accreditation and Quality Assurance*, 3, 117–121. <https://doi.org/10.1007/s007690050202>
- Tuit, C. B., i Wait, A. D. (2020). A review of marine sediment sampling methods. *Environmental Forensics*, 21(3–4), 291–309. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1771630>
- Xiong, Y., Zhu, H., Pan, L., i Wang, J. (2022). Research on Intelligent Trajectory Control Method of Water Quality Testing Unmanned Surface Vessel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1252. <https://doi.org/10.3390/jmse10091252>

Rozdział 4. Wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych do oceny poziomu zanieczyszczenia mikroplastikami oraz dioksynami wody i osadów na przykładzie Portu Gdynia

Marzenna Poppek, Katarzyna Krasowska, Alina Dereszewska,
Katarzyna Hlebowicz-Wojciechowska

Wprowadzenie

Intensyfikacja działalności człowieka związana z nowymi technologiami, a zwłaszcza nowymi substancjami, postępem w przemyśle i zwiększeniem potrzeb postępującej cywilizacji, powoduje wzrost antropogenicznej presji na środowisko oceanów i mórz (Zalewska i in., 2015). Zanieczyszczeniami morskimi są wszelkie wyrzucone lub utracone materiały dostające się do środowiska morskiego w wyniku działalności człowieka. Obecnie zanieczyszczenie morza odpadami, ściekami i emisją z transportu stało się jednym z najważniejszych problemów środowiskowych. Występuje we wszystkich siedliskach morskich i stanowi rosnące zagrożenie dla środowiska morskiego na całym świecie (Haseler i in., 2020). Obejmuje wszystkie zakresy wielkości, od komercyjnych kontenerów morskich, poprzez plastikowe butelki, odpady przemysłowe i rolnicze, aż po cząstki o wielkości nanometrów. Plastik, jako jedno z dominujących zanieczyszczeń antropogenicznych, występuje na powierzchni otwartego morza, w osadach morskich, na plażach na całym świecie, w tym również w Arktyce (Peng i in., 2020, s. 1; Tekman i in., 2017, s. 88–92; Eriksen i in., 2014).

Porty morskie, ze względu na charakter swojej działalności, są źródłem zanieczyszczeń środowiska, zwłaszcza toni wodnej i osadów dennych. Zanieczyszczenia dostają się do środowiska wodnego w trakcie załadunku, pogłębiania torów wodnych, ruchu statków oraz poprzez spływy, zrzuty ścieków, pyły itp. Pogłębianie konserwacyjne jest operacją niezbędną do prawidłowego funkcjonowania portów i zapewnienia bezpiecznej żeglugi. Powoduje jednak podnoszenie się osadów dennych zanieczyszczonych substancjami chemicznymi i mieszanie z tonią wodną (Guerra-Garcia i Garcia-Gomez, 2005).

Niejednokrotnie w pobliżu portów stwierdza się obecność tworzyw sztucznych w osadach dennych (zwłaszcza granulatów i włókien) (UNEP, 2016, s. 88, Browne i in., 2010, s. 3406). Chociaż nie jest możliwe podanie dokładnych danych liczbowych dotyczących wprowadzania tworzyw sztucznych do środowiska poprzez migrację z portów, to można założyć, że ich ilość będzie się zmieniać w zależności od takich czynników jak dynamika prac w rejonie wód i osadów portowych, intensywność żeglugi oraz stopień uprzemysłowienia wybrzeża. Zanieczyszczenie ekosystemów wodnych mikroplastikami stanowi istotny problem globalny ze względu na negatywne skutki ekotoksykologiczne dla fauny i flory. Szkodliwe substancje uwalniane w wyniku działalności antropogenicznej są gromadzone w organizmach morskich poprzez łańcuch pokarmowy; w rezultacie zdrowie ludzkie może być zagrożone z powodu spożycia żywności pochodzenia morskiego skażonej toksycznymi substancjami (Copat i in., 2012).

Morze Bałtyckie jest półzamkniętym płytkim obszarem o powierzchni ok. 374 000 km² i jest połączone z Oceanem Atlantyckim przez Morze Północne, co oznacza, że wymiana wody w Morzu Bałtyckim jest ograniczona i dlatego jest bardziej zagrożone zanieczyszczeniem niż inne obszary morskie. Obszar Morza Bałtyckiego jest jednym z największych na świecie obszarów wód słonawych i ekologicznie unikalnym ekosystemem. Strefa przybrzeżna południowej części Morza Bałtyckiego znajduje się pod silnym wpływem czynników antropogenicznych pochodzących z przemysłu, turystyki i żeglugi (Lang i in., 2018).

Jedną z najbardziej zanieczyszczonych stref Morza Bałtyckiego jest Zatoka Gdańska, do której odprowadzane są ścieki z dwóch dużych polskich miast – Gdańska i Gdyni, co wskazuje na obecność mikrozanieczyszczeń w basenach portowych tych miast. Zatoka Gdańska jest stosunkowo płytka, a jej wybrzeże intensywnie zaludnione. Odnowa i wymiana jej wód jest bardzo powolna. Czynniki te niekorzystnie wpływają na środowisko wodne. Ponadto w odprowadzaniu wód słodkich do Zatoki Gdańskiej dominuje Wisła, która dostarcza około 7% słodkiej wody do Morza Bałtyckiego. Bieg Wisły przez najbardziej uprzemysłowione rejony Polski powoduje, że jest ona jednym z istotnych źródeł zanieczyszczenia Zatoki Gdańskiej.

Port Gdynia jest trzecim co do wielkości portem w Polsce i prowadzi różnorodną działalność usługową i handlową. Główne źródła jego zanieczyszczenia pochodzą z działalności miejskiej i portowej. Różne źródła zanieczyszczeń powodują, że ich stężenie nie zmienia się w tym samym tempie w danym czasie.

Port Gdynia jest chroniony falochronem zewnętrznym, jednak intensywny ruch wody występujący podczas silnych wiatrów lub sztormów prowadzi do mieszania się wód portowych i osadów dennych z wodami Zatoki Gdańskiej, co może prowadzić do migracji zanieczyszczeń zgromadzonych w basenach portowych (Radtko i in., 2012). Z tego względu jakość osadów dna akwenów portu ma znaczny wpływ na ekosystem Morza Bałtyckiego sąsiadujący z portem.

Obecnie wiadomo, że rejestrowanie wszelkich zmian zachodzących w środowisku wymaga monitorowania określonych parametrów odpowiadających presji antropogenicznej. W rozdziale omówiono aktualny stopień zanieczyszczenia cząstkami mikroplastiku oraz dioksynami basenów w Porcie Gdynia. Skupiono się na badaniu obecności mikroplastików w wodach oraz osadach dennych Portu Gdynia. Oznaczono cząstki mikroplastików od 0,3 mm do 5 mm w wybranych pięciu basenach portowych.

Mikroplastiki w środowisku morskim

Ze względu na rosnącą z roku na rok produkcję syntetycznych polimerów i ich niską biodegradowalność, zanieczyszczenie tworzywami sztucznymi stało się poważnym problemem środowiskowym (Graca i in., 2017, s. 7651). Szybko rośnie świadomość społeczeństwa, że tworzywa sztuczne są istotną grupą odpadów morskich, ponieważ dostępne dane wskazują, że stanowią one od 60% do 80% wszystkich odpadów morskich i ponad 90% wszystkich cząstek pływających (Setälä i in., 2014; de Lucia i in.,

2014). W literaturze przedmiotu można znaleźć różne definicje mikroplastików, w których określono nie tylko górną, ale także dolną granicę wymiaru ich cząstek.

Tworzywa sztuczne w postaci małych cząstek są nazywane mikroplastikami i są obecnie uważane za główny składnik zanieczyszczenia środowiska morskiego tworzywami sztucznymi (Beer i in., 2018, s. 1272). Niektórzy badacze definiują mikroplastiki jako ledwo widoczne cząstki, które przechodzą przez sito 500 μm , ale są zatrzymywane na sicie 67 μm (Gregory i Andrady, 2003, s. 379–401). Imhof i inni (2013) sklasyfikowali mikrodrobiny plastiku jako cząstki mniejsze niż 1 mm. Obecnie nadal nie ma jednak powszechnie uznanej, jednoznacznej definicji przedziałów wielkości cząstek mikroplastiku. Większość badaczy definiuje mikroplastik jako nowe trwałe zanieczyszczenie środowiska w postaci małych cząsteczek plastiku o średnicy mniejszej niż 5 mm (Yu i in., 2018, s. 1–14).

Mikroplastik pierwotny to cząstki tworzyw sztucznych, które od początku swojego istnienia mają mikrorozmiary. Głównymi źródłami jego pochodzenia są procesy prania syntetycznych ubrań (35% mikroplastików pierwotnych), ścieranie opon samochodowych podczas jazdy (28%) oraz kurz miejski (24%). Z kolei mikrogranulki, najczęściej dodawane do kosmetyków, stanowią zaledwie 2% tych tworzyw. Mikroplastiki mogą być przenoszone przez rzeki, wiatr i spływy powierzchniowe do ekosystemów morskich. Ważną rolę w dostarczaniu mikrodrobin plastiku do środowiska morskiego mogą odgrywać ścieki z oczyszczalni ścieków (Frias i Nash, 2019). Mikroplastik wtórny z kolei powstaje w wyniku stopniowej degradacji dużych fragmentów tworzyw sztucznych pod wpływem działania wody czy promieni słonecznych. Powstaje on również podczas eksploatacji produktów takich jak opony, tekstylia czy farby, więc procesy degradacji mogą zachodzić także przed uwolnieniem tworzyw sztucznych do środowiska (Imhof i in., 2013). Zanieczyszczenie mórz i oceanów mikroplastikami gwałtownie wzrasta, a ich cząstki znajdują się obecnie w wodach powierzchniowych, w rybach, w osadach głębinowych oraz w wodzie i lodzie arktycznym.

Większość tworzyw sztucznych jest niezwykle trwała w środowisku. Należy zatem przyjąć, że ilość tych mikrodrobin plastiku będzie nadal wzrastać z powodu fragmentacji makroplastików obecnych w środowisku (Rogowska i in., 2021).

Ważnym zagadnieniem jest wiedza o tym, jak tworzywa sztuczne krążą i rozkładają się w środowisku morskim oraz jaka jest ich rola w ekosystemach. Ta wiedza pozwoli na ilościowe określenie roli i wpływu tworzyw sztucznych na łańcuch pokarmowy. Obecnie nie jest możliwe określenie pochodzenia cząstek mikroplastiku wykrytych w próbkach środowiskowych.

Mikroplastiki w środowisku morskim mogą rozpaść się na mniejsze włókna i fragmenty plastiku, nawet nanoplastiki, które mogą być łatwo połknięte przez wiele organizmów, takich jak bezkręgowce morskie. Oczekuje się, że badania pozwolą lepiej zrozumieć toksykologiczne konsekwencje wpływu mikrodrobin plastiku zarówno na organizmy morskie, jak i zdrowie ludzkie (Koelmans i in., 2015).

W związku z tym, że mikroplastiki mogą znajdować się zarówno w toni wodnej, jak i w osadach, badania mające na celu ocenę ilościową ich zawartości należy prowa-

dzić dla wody powierzchniowej oraz osadów dennych, pobranych z ich górnej warstwy. Do identyfikacji mikrodrobin plastiku stosuje się różne metody. Analiza próbki osadów dennych zwykle składa się z następujących etapów: przesiewania, suszenia, separacji gęstościowej, utleniania materii organicznej, filtracji i sortowania wizualnego. Jednym z najbardziej znaczących problemów podczas oceny stopnia zanieczyszczenia środowiska morskiego przez mikroplastik jest nieustandaryzowana procedura pobierania próbek, przygotowania i identyfikacji mikrodrobin plastiku (Zobkov i Esiukowa, 2017). Do fizycznej i chemicznej charakterystyki mikroplastików badacze z różnych ośrodków naukowych stosują kombinację dwóch lub więcej metod analitycznych. Ostatnio w badaniach wykorzystuje się spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) lub spektroskopię Ramana (Cutroneo i in., 2020).

Zanieczyszczenie środowiska morskiego dioksynami

Termin „dioksyny” jest powszechnie używany w odniesieniu do toksycznych substancji chemicznych o podobnej strukturze chemicznej i wspólnym mechanizmie toksycznego działania. Grupa ta obejmuje 75 z polichlorowanych dibenzo-p-dioksyn (PCDD) oraz 135 polichlorowanych dibenzofuranów (PCDF). Nazwa dioksyny obejmuje również tzw. dl-polichlorowane bifenyle (PCB) (Ogura i in. 2001).

Emisja dioksyn do środowiska ma źródła zarówno naturalne (np. wulkaniczne, pożary), jak i antropogeniczne. Te ostatnie są związane najczęściej z produktami ubocznymi procesów przemysłowych, szczególnie procesów spalania. Dioksyny są uwalniane między innymi w transporcie, hutach żelaza, celulozowniach oraz poprzez przecieki instalacji przemysłowych. Udział w tych emisjach mają również niekontrolowane procesy spalania odpadów (np. na wysypiskach) oraz spalania węgla w gospodarstwach domowych. Emisje lotnych związków organicznych pochodzą w większości ze źródeł antropogenicznych, a tylko w niewielkim zakresie z procesów naturalnych (Dobrzycka-Kraheil i Bogalecka, 2022). Dioksyny gromadzą się w osadach w pobliżu ich głównych źródeł, takich jak: młyny celulozowo-papiernicze, zakłady chemiczne, w tym produkujące chlorek winylu lub biocydy, oraz w rejonie portów. Na obszarach portowych dioksyny mogą spływać wraz ze smarami i olejami podczas wymywania deszczem betonowych powierzchni i stalowych konstrukcji. Dioksyny przedostają się do morza z atmosfery na skutek interakcji wód z powietrzem, wpływają z lądu wraz z wodami rzeczными, mogą tam również trafiać na skutek awarii i wycieków w transporcie morskim (HELCOM, 2010, s. 74). Przenikając do morza, formują bardzo muliste dno. Ograniczenia przepływu wód (np. zapory wodne, przestrzeń basenów portowych) zwiększają toksyczność osadów, gdyż powodują koncentrację dioksyn opadających na dno. Kumulacja taka ma miejsce między innymi w Głębi Gdańskiej (118 m), o ograniczonych przepływach prądów wznoszących (Niemirycz i Jankowska, 2011).

Dioksyny są związkami trwałymi, trudno ulegającymi biodegradacji, mającymi zdolność kumulacji w organizmach żywych. Ich lipofilność powoduje, że łatwo przenikają z wody do materii organicznej, a w dalszym etapie łańcucha troficznego gromadzą się w tkankach zarówno organizmów morskich, jak i ludzkich (McLachlan i Unde-

mann, 2020). Cechuje je również stosunkowo dobra lotność, umożliwiająca transport atmosferyczny. W środowisku morskim dioksyny mogą przenikać do organizmów poprzez drogi pokarmowe lub oddechowe, bądź ulegać kumulacji na ich powierzchni dzięki procesom sorpcji. Znaczna ilość dioksyn jest adsorbowana (pochłaniana powierzchniowo) przez fitoplankton. Wraz ze wzrostem poziomu w łańcuchu troficznym, potęguje się stężenie dioksyn w organizmach. Na kumulację dioksyn wpływa również stopień eutrofizacji zbiornika wodnego. Spadek stężenia biogenów obniża zagęszczenie nośników dioksyn, tym samym ograniczając ich akumulację w rybach (Kowalewska i in., 2003).

Morze Bałtyckie jest morzem śródlądowym o małej wymianie wody, dużym dopływie zanieczyszczeń antropogenicznych, wysokim poziomie eutrofizacji wód. Znaczne zanieczyszczenie dioksynami powietrza nad obszarem Polski Północnej sprzyja migracji dioksyn do środowiska morskiego. Źródłem zanieczyszczenia mogą być również kanały portowe, które są pogłębiane w celu pełniejszego wykorzystania potencjału portu. Stałe pogłębianie dna kanałów i basenów portowych wiąże się z deponowaniem urobku w sąsiednich ekosystemach, na specjalnie wyznaczonych obszarach lądowych lub morskich (Lewandowski i in., 2014). Z tego względu niezbędne jest prowadzenie kontroli stężeń substancji niebezpiecznych dla środowiska, w tym dioksyn, w osadach portowych sąsiadujących z ekosystemem Morza Bałtyckiego.

Metodyka badań w projekcie MPSS

Na podstawie przyjętych standardów oznaczania mikroplastików w wodach morskich i oceanicznych (GESAMP, 2019, s. 37–47; Masura i in., 2015, s. 3–12) opracowano metodykę badań dostosowaną do wymagań projektowych. Przeprowadzono cztery sesje pomiarowe w każdej porze roku. W każdej sesji pomiarowej próbki badawcze pobierano w wodach powierzchniowych w pięciu wybranych basenach portowych (Basen nr I, III, IV, V, VI), jak również z powierzchniowych osadów dennych w punktach pomiarowych w analizowanych basenach portowych.

Mikroplastiki o rozmiarze od 0,3 mm do 5 mm z badanych prób wyodrębniono, wykorzystując opracowaną w ramach projektu metodykę separacji. Dla tych cząstek, których rozmiary umożliwiały analizę jakościową przeprowadzono identyfikację rodzaju tworzywa (Dereszewska i in., 2023, s. 6–13).

Do analizy mikroplastików pobrano jedną kontrolną próbę. Próba ta została pobrana w terenie, bez kontaktu z wodą portową, w celu oceny wpływu depozycji atmosferycznej w basenach portowych. Kontrola terenowa składała się z pustego, wstępnie przepłukanego słoika otwartego podczas pobierania badanych prób. Pomiar kontrolny pozwolił sprawdzić, jak czysty był proces pobierania i analizy prób. Próba ślepa została wykorzystana do uwzględnienia zanieczyszczeń proceduralnych wynikających z pobierania prób. Aby zminimalizować zanieczyszczenie z laboratorium, badane próbki były przykryte, ale zamiast plastiku używano szkła, a cały sprzęt wielokrotnego użytku był przed użyciem dokładnie czyszczony etanolem i płukany wodą destylowaną.

Pobrane w punktach pomiarowych powierzchniowe osady denne poddano również badaniom w zewnętrznym laboratorium standaryzowanym w kierunku obecności mikroplastików oraz dioksyn. Analizowano obecność 8 typów mini-mikroplastików (PA 6, PE, PET, PP, PS, PMMA, PVC, PC) o rozmiarze od 0,027 mm do 1 mm.

Pobieranie mikroplastików z wód powierzchniowych i osadów basenów portowych

W ramach projektu MPSS *Monitoring and analysis of the impact of selected substances and materials in terms of environmental protection*, jak wspomniano wyżej, pobierano mikroplastiki w pięciu wybranych basenach portowych (Basen nr I, III, IV, V, VI). Do zbierania cząstek tworzyw sztucznych unoszących się przy powierzchni wody morskiej wykorzystano mobilną nawodną bezzałogową platformę badawczą HydroDron-1. HydroDron-1 przemieszczał się w centralnej części wybranych basenów portowych. Narzędziem zastosowanym do poboru mikroplastików z wód portowych była siatka planktonowa, którą ciągnięto w odległości 2 m od rufy HydroDronu-1. Wlot sieci był zanurzony poniżej powierzchni wody, a próbki pobierano poziomo. Do pobierania próbek mikroplastików w dużych zbiornikach, zwłaszcza z powierzchniowej wody morskiej lub kanałów portowych, zalecane są wielkości oczek, takie jak 200, 330 i 350 μm , które w ostatnich latach stosowano jako standardowe narzędzia do pobierania próbek w badaniach mikroplastików (Cutroneo i in. 2020). W projekcie użyto sieci planktonowej o rozmiarze oczek 300 μm (HydroBios), średnicy wlotu 25 cm i długości 50 cm. Rozmiar oczek sieci wskazuje dolną granicę wymiaru zebranych mikroplastików. W całym okresie badawczym przez siatkę planktonową przefiltrowano ponad 4510 m³ wody z basenów Portu Gdynia, którą przeanalizowano pod kątem obecności mikroplastików. Objętości poszczególnych próbek wahały się od 89 m³ do 471 m³. Po pobraniu próbek w kanałach portowych sieci były transportowane w szczelnych pojemnikach ze stali nierdzewnej na statek badawczy, aby uniknąć zanieczyszczenia sieci, w których pobrano mikroplastiki. Próbki były pobierane przez personel ubrany w bawełnianą odzież i lateksowe rękawice. Po pobraniu próbek, przed analizą, sieci były zamykane i ponownie przechowywane w szczelnych pojemnikach.

Powierzchniowe osady denne w analizowanych punktach pomiarowych pobierano zgodnie z normą PN-EN ISO 5667-19:2006 przy użyciu czerpaka Vanveena. Pobrane osady umieszczano w oznakowanych szklanych słojach odkażonych etanolem i przechowywano w temperaturze 5°C do czasu dalszej analizy.

Wyodrębnianie cząstek mikroplastików zebranych z wód i osadów portowych

Wyodrębnianie mikroplastików zebranych w ramach realizacji projektu MPSS z powierzchniowej wody morskiej i powierzchniowych osadów dennych składało się z kilku głównych etapów: suszenia, ekstrakcji, mokrego utleniania nadtlenkowego, separacji gęstościowej, filtracji i sortowania wizualnego. Zebrane przy użyciu siatki planktonowej cząstki stałe z powierzchniowych wód w badanych basenach portowych przepłukiwano przez sita ze stali nierdzewnej (Retsch, wielkość oczek 5 i 0,3 mm). Muszle, rośliny i organizmy żywe większe niż 5 mm usuwano ręcznie. Następnie

zebrany materiał suszono do stałej masy. Po wysuszeniu z próbek usuwano materię organiczną (metodą chemicznego trawienia). W celu oddzielenia mikroplastików od materii organicznej można przeprowadzić różne rodzaje trawienia próbek (utleniające, kwaśne, zasadowe i enzymatyczne) (Cutroneo i in., 2020; Miller i in., 2017). W ramach realizacji zadania projektowego trawienie labilnej materii organicznej przeprowadzono przy użyciu 30-procentowego nadtlenu wodoru w obecności katalizatora Fe(II) (roztwór 0.05M). Proces trawienia powtarzano do momentu całkowitego usunięcia materii organicznej. Cząstki z tworzyw sztucznych nie wchodzą w reakcje chemiczne z zastosowanymi odczynnikami i po trawieniu pozostają niezmienione.

W kolejnym etapie do mieszaniny dodano chlorek sodu NaCl w celu zwiększenia gęstości roztworu wodnego do wartości około $1,2 \text{ g/cm}^3$. Roztwór ten powoduje wypłynięcie na powierzchnię tworzyw sztucznych charakteryzujących się małą gęstością. Umożliwia wyodrębnienie wszystkich cząstek polimerowych unoszących się na powierzchni i w toni wody morskiej. Otrzymaną mieszaninę przenoszono do szklanego separatora gęstości w celu wyizolowania cząstek tworzyw sztucznych poprzez flotację. Wszystkie pływające cząstki tworzyw sztucznych, zebrane w separatorze gęstości, oddzielano przy użyciu systemu filtracji próżniowej (WaterVac 100-MB, Rocker Scientific) z filtrem nylonowym 0,3 mm. Separator gęstości przepłukano kilkakrotnie wodą destylowaną w celu przeniesienia wszystkich cząstek stałych do zestawu filtracyjnego. W końcowej fazie procesu filtracji filtry przepłukiwano wodą destylowaną, aby uniknąć po wysuszeniu tworzenia się na ich powierzchni kryształów soli. Filtry z cząstkami z tworzyw sztucznych przenoszono do szklanych szalek Petriego i przykrywano folią aluminiową. Pozostawiono je do wyschnięcia w temperaturze pokojowej, aby później wykorzystać je do badania.

W celu wyodrębnienia mikroplastików z pobranych powierzchniowych osadów dennych z każdej pobranej w porcie próby osadu odważono po dwie próby o masie 400 g, które suszono przez 24 godziny w temperaturze 90°C . Następnie w osadach przeprowadzono wstępną dezagregację wysuszonych osadów przy użyciu metafosforanu potasu. Tak przygotowane osady przesiewano przez sita ze stali nierdzewnej (Retsch, wielkość oczek 5, 1 i 0,3 mm), uzyskując w ten sposób dwie frakcje osadów $<0,3 \text{ mm} - 1 \text{ mm}>$ oraz $<1 \text{ mm} - 5 \text{ mm}>$. Następnie każdy z osadów zalano 300 cm^3 55-procentowego chlorku cynku (ZnCl_2) o gęstości $1,6 \text{ g/cm}^3$ w celu wyizolowania tworzyw sztucznych za pomocą flotacji. Roztwór chlorku cynku jest najczęściej stosowany w celu zagęszczenia roztworu i wyodrębnienia nawet najgęstszych mikroplastików. Pływające części stałe zebrano za pomocą siatki 0,3 mm. Po wysuszeniu usunięto materię organiczną poprzez trawienie przy użyciu 30-procentowego nadtlenu wodoru w obecności katalizatora Fe(II) (roztwór 0.05M). Podobnie jak w wypadku procesu separacji mikroplastików zebranych w wodach portowych, proces trawienia powtarzano do momentu, gdy nie był widoczny żaden materiał biologiczny. W kolejnym etapie do mieszaniny dodano chlorek sodu NaCl w celu zwiększenia gęstości roztworu wodnego (gęstość około $1,2 \text{ g/cm}^3$) i odseparowania niestrawionych cząstek tworzyw sztucznych przy użyciu szklanego separatora gęstości. Wszystkie pływające cząstki tworzyw

sztucznych, zebrane w separatorze gęstości, oddzielono przy użyciu systemu filtracji próżniowej (WaterVac 100-MB, Rocker Scientific) z filtrem nylonowym 0,3 mm. W końcowej fazie procesu filtracji filtry przepłukiwano wodą destylowaną, aby uniknąć tworzenia się kryształów soli na suchych filtrach. Filtry z cząstkami z tworzyw sztucznych przenoszono do szklanych szalek Petriego i przykrywano folią aluminiową. Pozostawiono je do wyschnięcia w temperaturze pokojowej. Wysuszone filtry z wyizolowanymi mikroplastikami pobranymi w wodach portowych i osadach dennych ważono w celu określenia masy mikroplastików. Poszczególne cząstki poddano dalszej analizie w celu zidentyfikowania koloru, kształtu i rodzaju polimeru (Krasowska i in., 2022). Równolegle prowadzono również rozdział gęstościowy mikroplastików zebranych w próbie ślepej.

Identyfikacja mikroplastików zebranych w wodach i osadach portowych

Cząstki tworzyw sztucznych, zebrane w pięciu badanych basenach portowych, zidentyfikowano metodą mikroskopową i spektroskopową. Tworzywa sztuczne obserwowano w skali makro i mikro. Obserwacje makroskopowe prowadzono przy użyciu kamery FujiFilm S2500 HD, natomiast obserwacje mikroskopowe przy użyciu mikroskopu metalograficznego AL-PHAPHOT-2YS2-H Nikon połączonego z kamerą fotograficzną Delta Optical DLT-Cam PRO 6.3MP USB 3.0. Mikrofotografie analizowanych cząstek tworzyw sztucznych wykonywano w świetle odbitym.

Identyfikację chemiczną zebranych cząstek tworzyw sztucznych prowadzono przy użyciu spektroskopii w podczerwieni z całkowitym odbiciem (*Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy*, ATR-FTIR) i oprogramowania OMNIC. Widma FTIR rejestrowano w trybie atenuowanego całkowitego odbicia (*ATR Smart Orbit Accessory*, Thermo Fisher Scientific) na spektrometrze Nicolet 380 FTIR (Thermo Scientific) z celą diamentową. Cząstki były ręcznie mocowane do kryształu diamentu i skanowane z rozdzielczością 4 cm^{-1} i zakresem IR $4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$, a dla każdego pomiaru wykonywano 32 skany. Przy użyciu ATR-FTIR można analizować tylko cząstki tworzyw sztucznych o wielkości powyżej $500\text{ }\mu\text{m}$ (Preston-Whyte i in. 2021, s. 1–13). Uzyskane widma były automatycznie porównywane z widmami referencyjnymi znajdującymi się w 20 bibliotekach spektralnych, zawierających ponad 11300 widm, które obejmowały zarówno materiały i związki syntetyczne, jak i naturalne. Zgodnie z procedurą identyfikacji cząstek tworzyw sztucznych, jeżeli zgodność typu polimeru była większa niż 60%, to dopasowanie uznawano za wiarygodne, natomiast jeżeli była mniejsza, to zgodność oceniano krytycznie (Aigars i in., 2021, s. 4–8; Lindeque i in., 2020; Jeong i in., 2022).

Wyniki badań i ich omówienie

Zurbanizowane zbiorniki wodne, wykorzystywane do celów gospodarczych, takie jak baseny portowe, mogą być źródłem mikroplastików przedostających się do środowiska morskiego. Przeprowadzono stosunkowo wiele badań dotyczących obecności, ilości i rozmieszczenia mikroplastików w osadach dennych oraz w wodach morskich i ocea-

nicznych. Niestety wciąż ograniczone są informacje dotyczące źródeł, wykrywania i ilości mikroplastików w basenach portowych.

Wody basenów portowych, w porównaniu z wodami morskimi lub śródlądowymi, charakteryzują się niskim stopniem zasiedlenia przez organizmy roślinne i zwierzęce. Jednakże w wodach tych mogą występować cząstki flokujące pochodzące z operacji przeładunkowych w portach. W ramach realizacji projektu MPSS, na podstawie przeprowadzonych poborów cząstek stałych przy użyciu sieci planktonowej, stwierdzono stosunkowo dużą zawartość cząstek pochodzenia roślinnego. Zalecanym środkiem do usuwania materiału roślinnego jest reakcja Fentona z wykorzystaniem mieszaniny nadtlenu wodoru z katalizatorem żelazowym Fe(II). Natomiast w przypadku znacznych ilości tkanki zwierzęcej należy zastosować trawienie wodorotlenkiem potasu (Szymańska i Obolewski, 2020).

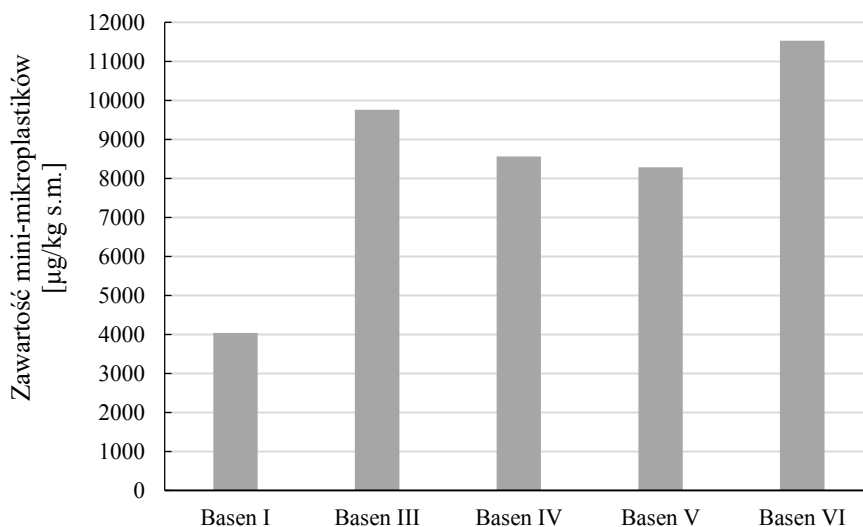
W większości cząstek stałych, zebranych w ramach opisywanych badań, mokre utlenianie nadtlenkowe skutecznie rozkładało materię organiczną. Jedynie próbki zebrane w basenie portowym nr IV, który jest zlokalizowany w pobliżu Bałtyckiego Terminalu Zbożowego, charakteryzowały się znaczną zawartością nasion o twardych łupinach. Cząstki te zawierały znaczną ilość włókna, które charakteryzowało się odpornością na procesy trawienia. W związku z tym, po etapie filtracji, były one ręcznie usuwane przy użyciu pęsety. Ze względu na obecność w badanych próbkach nietypowych zanieczyszczeń, związanych prawdopodobnie z obsługą ładunków, konieczne jest opracowanie skuteczniejszej niż reakcja Fentona metody trawienia materii organicznej w wypadku wyodrębniania mikroplastików w akwenach portowych. Badania mikroplastików w portach wykazują różny poziom stężeń w powierzchniowych osadach dennych i wodach powierzchniowych.

Z wykorzystaniem mobilnej bezałogowej nawodnej platformy badawczej Hydro-Dron-1 w pięciu badanych basenach Portu Gdynia zebrano i zidentyfikowano mikroplastiki o rozmiarze od 0,3 mm do 5 mm, których stężenie wynosiło odpowiednio: 280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Basenie I, 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Basenie III, 524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Basenie IV, 440 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Basenie V oraz 410 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Basenie VI. Odnotowane niższe stężenie mikroplastików w basenach I i III może być związane z ich lokalizacją (bardziej otwarta przestrzeń). W próbie ślepej nie stwierdzono obecności mikroplastików o wymiarach od 0,3 do 5 mm.

Porównanie uzyskanych wyników z wcześniejszymi wynikami badań przeprowadzonych w innych portach jest trudne ze względu na różnice w metodach poboru prób, procedurach analitycznych, a także w jednostkach sprawozdawczych. Globalne porównanie sugeruje mniejszą zawartość mikroplastików w wodach powierzchniowych Portu Gdynia w porównaniu do innych portów, takich jak Port Durban (RPA), Suva Port (Fidżi), Göteborg Port (Szwecja), Port Turku (Finlandia), Melbourne Port (Australia), czy szwedzki przemysłowy port Stenungsund (Preston-Whyte i in., 2021; Ferreira i in., 2020; Magnusson i in., 2016, s. 67–73; Magnusson, 2014, s. 1–17; Su i in., 2020, s. 4–8; Noren, 2007, s. 173–183).

W przeprowadzonych badaniach osadów dennych z basenów Portu Gdynia odnotowano stężenie mikroplastików w zakresie od 12392–24330 $\mu\text{g}/\text{kg}$ s.m.o. Były to przede wszystkim mikroplastiki z frakcji od 1 mm do 5 mm.

Biorąc pod uwagę, że w rozmiarze od 0,3 mm do 1 mm wyizolowano stosunkowo niewielką ilość mikroplastików, pobrane osady denne poddano badaniom w zewnętrznym standaryzowanym laboratorium, posiadającym aparaturę umożliwiającą detekcję mini-mikroplastików. Badania obejmowały analizę obecności 8 typów mini-mikroplastików: poliamid 6 (PA 6), polietylen (PE), politereftalan etylenu (PET), polipropylen (PP), polistyren (PS), polimetakrylan metylu (PMMA), polichlorek winylu (PVC), poliwęglan (PC) o rozmiarze od 0,027 mm do 1 mm. Na podstawie uzyskanych wyników badań z laboratorium zewnętrznego stwierdzono obecność mini-mikroplastików we wszystkich analizowanych osadach z pięciu basenów Portu Gdynia. Na rysunku 4.1 przedstawiono sumaryczną zawartość mini-mikroplastików oznaczoną w osadach dennych pochodzących z pięciu basenów portowych. W ramach badania stwierdzono, że osady denne Basenu VI Portu Gdynia charakteryzowały się największą ilością mikroplastików zarówno we frakcji $<0,027\text{mm}-1\text{mm}>$, jak i frakcji $<1\text{ mm}-5\text{ mm}>$.



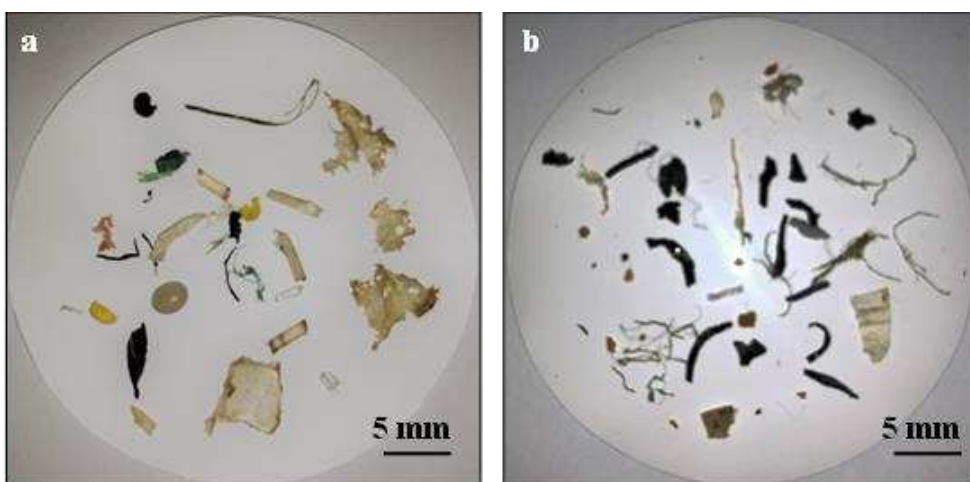
Rysunek 4.1. Zawartość mini-mikroplastików o rozmiarze od 0,027 mm do 1 mm w powierzchniowych osadach dennych pobranych w basenach Portu Gdynia (opracowanie własne)

Cząstki tworzyw sztucznych można podzielić na cztery główne grupy pod względem kształtu: fragmenty, folie, włókna i kule (Xu i in., 2018). Toksyczność mikroplastików niesferycznych (tj. fragmentów i włókien) jest wyższa niż mikroplastików sferycznych (Jung i in., 2021). Fragmenty definiuje się jako kawałki o wszystkich wymiarach porównywalnych, folie jako cienkie arkusze, włókna jako cienkie wydłużone cząstki o jednym wymiarze znacznie większym, a kule jako cząstki kuliste. Zarówno w obszarach morskich, jak i oceanicznych oszacowano, że włókna są najliczniejszą kategorią kształtów wykrywaną w wodach powierzchniowych i osadach dennych.

Stanowią one około połowy MP wykrytych i raportowanych w literaturze (Aigars i in., 2021, s. 4–8; Ugwu i in., 2021; Zobkov i Esiukova, 2017).

Najczęściej spotykane kolory cząstek tworzyw sztucznych to czarny, biały, przezroczysty, czerwony, niebieskozielony, wielobarwny. Kolor jest jednym z wyznaczników przy identyfikacji źródła cząstek plastiku. Identyfikacja kolorystyczna cząstek tworzyw sztucznych może być trudna, ponieważ mikroplastiki tracą swoją pierwotną barwę. Przyczyną zmiany koloru są warunki panujące w środowisku wodnym, na które narażone są tworzywa sztuczne (np. tworzenie biofilmu, starzenie się). Identyfikacja barwy przez ludzi jest też subiektywna i może być utrudniona przez wady wzroku (Frias i Nash, 2019; GESAMP, 2019, s. 90; Xu i in., 2018).

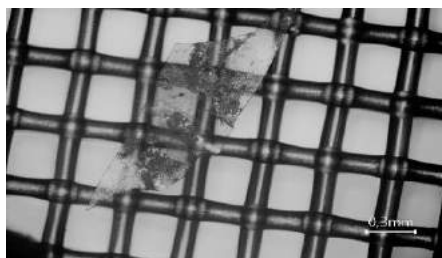
Zebrane w wodach i osadach dennych Portu Gdynia cząstki tworzyw sztucznych posortowano i sklasyfikowano na podstawie koloru i kształtu. Na rysunku 4.2 przedstawiono cztery kategorie mikroplastików zidentyfikowanych w wodach portowych i osadach dennych: folie, fragmenty, włókna, kule. Wśród skategoryzowanych kształtów dominowały fragmenty i włókna. Włókna i fragmenty były również dominującym typem mikroplastików w Porcie Suva (Fidzi) czy Porcie Baseco (Filipiny), natomiast w szwedzkim porcie przemysłowym Stenungsund przeważały cząstki kuliste (Noren, 2007; Ferreira i in., 2020; Castro i in., 2021). Dominującymi kolorami zarówno w wodach, jak i osadach wykrytych w kanałach portowych Portu Gdynia były czarny i biały, również licznie występowały bezbarwne transparentne drobiny.



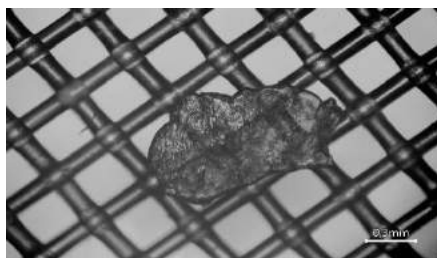
Rysunek 4.2. Fotografie mikroplastików o rozmiarze od 0,3 mm do 5 mm zebranych w wodach (a) i osadach dennych (b) Portu Gdynia (opracowanie własne)

Wykonane obserwacje makroskopowe zostały potwierdzone przez obserwacje mikroskopowe. Zaprezentowane na rysunku 4.3 mikrofotografie ilustrują przykładowe różne rodzaje kształtów mikroplastików, które zebrano w badanych basenach portowych.

Mikroplastiki (0,3–5 mm) zebrane w wodach basenów portowych



Folia z Basenu VI



Fragment z Basenu V

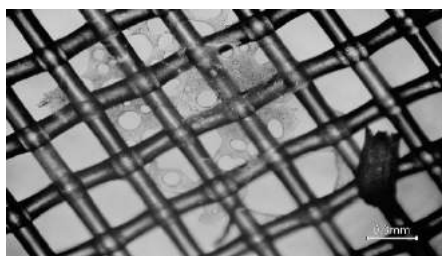


Włókno z Basenu I

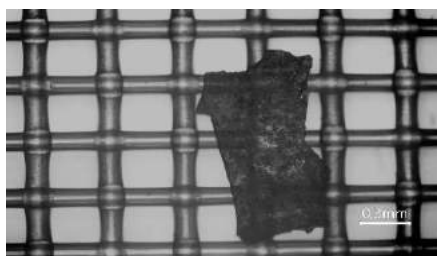


Włókno i folia z Basenu III

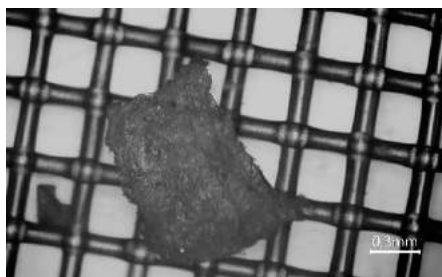
Mikroplastiki (0,3–5 mm) zebrane w osadach dennych basenów portowych



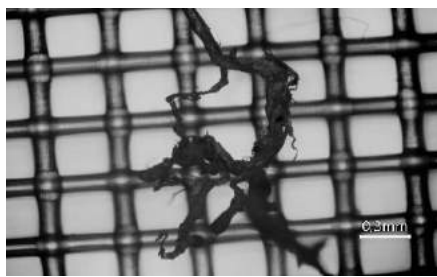
Folia i fragment z Basenu I



Fragment z Basenu V



Fragment z Basenu III



Włókna z Basenu IV

Rysunek 4.3. Przykładowe mikrofotografie cząstek tworzyw sztucznych o rozmiarze od 0,3 mm do 5 mm zebranych w wodach i osadach dennych Portu Gdynia (opracowanie własne)

W projekcie MPSS z próbek wody i osadów portowych wyodrębniono łącznie 90 cząstek o wielkości powyżej 500 μm umożliwiającej identyfikację jakościową polimerów. Przy użyciu spektroskopii w podczerwieni otrzymano widmo każdej analizowanej cząstki, które porównywano z wzorcem, aby określić, z jakiego polimeru wykonane są

poszczególne cząstki. Technika ATR-FTIR pozwala na jednoznaczne określenie, czy cząstki są wykonane z tworzywa sztucznego.

Wśród zidentyfikowanych cząstek tworzyw sztucznych występujących w wodach i osadach portowych dominowały poliolefiny i ich pochodne. Najczęściej identyfikowanymi polimerami w wodach Portu Gdynia były polietylen (PE) i polipropylen (PP). Identyfikacja tych dwóch polimerów jest zgodna z polimerami zwykle występującymi w środowisku morskim. Głównymi polimerami wykrytymi w wodach powierzchniowych z Portu Durban (RPA) były polietylen (PE), politereftalan etylenu (PET), polistyren (PS), a w Porcie Suva (Fidżi) polipropylen (PP) i polietylen (PE) (Ferreira i in. 2020; Preston-Whyte i in. 2021). Natomiast w osadach z Portu Gdynia, oprócz PE, PP, PS, zidentyfikowano również poly(ester urethane), celophane, poliamid 6 oraz acrylamid.

Na podstawie uzyskanych wyników badań ze standaryzowanego laboratorium zewnętrznego wśród mini-mikroplastików o rozmiarze od 0,027 mm do 1 mm, wyodrębnionych z pięciu basenów Portu Gdynia, dominowały takie tworzywa sztuczne jak: PE, PP i PS. Wyniki te wskazują wyraźnie na obecność tworzyw sztucznych o małej gęstości w morskich osadach dennych, co prawdopodobnie jest spowodowane biofoulingiem, czyli porastaniem tych tworzyw sztucznych materią organiczną oraz późniejszą ich sedymentacją (Graca i in., 2017).

W laboratorium zewnętrznym osady denne z wszystkich punktów pomiarowych poddano również badaniom na obecność dioksyn. Pomiarzy prowadzono w różnych porach roku. Wyniki były zróżnicowane ze względu na miejsce poboru i porę roku. Wyniki uzyskane dla próbek pobranych w jesiennej sesji przedstawiono w tabeli 4.1.

W warstwie powierzchniowej osadów dennych wysokie stężenie uzyskano dla dwóch polichlorowanych dibenzo-p-dioksyn: OctaCDD (5,5–869 ng/kg s.m) oraz 1-, 2-, 3-, 4-, 6-, 7-, 8-HeptaCDD (0,9–172 ng/kg s.m.). Przewaga PCDD nad PCDF świadczy o tym, że głównym źródłem dioksyn w basenach Portu Gdynia jest atmosfera. Uzyskane w tak znacznej ilości pochodne chlorowane wskazują na to, że ich źródłem są procesy spalania (Sundqvist, 2009). Stężenie sumaryczne 17 pochodnych dioksyn (przedstawione w ostatnim wierszu – WHO-TEQ) w żadnym punkcie nie przekraczało wartości 21,5 ng/kg s.m., która to wartość została przyjęta jako minimalny poziom stężenia dioksyn wywołujący niekorzystne efekty biologiczne (Canadian Council..., 2001). Uzyskane wyniki świadczą o tym, że osady denne z Portu Gdynia nie stanowią zagrożenia dla środowiska.

Tabela 4.1. Zawartość dioksyn [ng/kg s.m.] odnotowana w poszczególnych punktach pomiarowych basenów Portu Gdynia w sesji jesiennej 2022 r. (opracowanie własne)

Nazwa parametru	Basen VI pkt 1	Basen VI pkt 2	Basen V pkt 3	Basen V pkt 4	Basen IV pkt 5	Basen I pkt 6	Basen III pkt 7
sucha masa	97,7	98,0	96,7	98,3	97,6	96,2	98,1
2,3,7,8-TetraCDD	0,235	< 0,165	< 0,170	< 0,180	0,274	< 1,91	< 0,172
1,2,3,7,8-PentaCDD	0,981	0,297	< 0,226	< 0,240	0,968	< 2,55	< 0,230
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	1,65	0,547	< 0,452	< 0,481	1,81	< 5,09	< 0,460
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	8,56	2,42	0,895	0,973	8,50	9,37	< 0,460
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	3,32	1,27	0,523	0,612	2,85	< 5,09	< 0,460
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	191	66,4	35,2	38,5	199	185	6,61
OctaCDD	902	328	164	144	962	882	36,6
2,3,7,8-TetraCDF	8,47	2,44	1,68	2,02	9,11	7,21	0,508
1,2,3,7,8-PentaCDF	3,07	0,645	< 0,415	< 0,441	3,00	< 4,67	< 0,421
2,3,4,7,8-PentaCDF	6,40	1,94	1,02	1,14	6,91	5,95	< 0,421
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	9,25	3,20	1,19	1,08	9,89	13,3	< 0,383
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	4,91	1,66	0,476	0,512	3,05	5,21	< 0,383
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	< 0,40	< 0,36	< 0,377	< 0,401	< 0,401	< 4,25	< 0,383
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	2,13	0,792	< 0,377	< 0,401	2,05	< 4,25	< 0,383
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	31,7	10,8	4,29	4,10	32,1	39,2	1,29
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	2,73	0,999	0,520	0,494	2,39	< 4,03	< 0,364
OctaCDF	33,1	12,3	3,49	3,36	30,4	< 34,0	< 3,07
WHO (2005)-PCDD/F TEQ (upper-bound)	9,63	3,22	1,76	1,90	9,81	14,3	0,978

Podsumowanie

Biorąc pod uwagę fakt, że Port Gdynia prowadzi różnorodną działalność usługową i handlową, można stwierdzić, że główne źródła zanieczyszczenia jego akwenów pochodzą z tego rodzaju działalności, a dodatkowo z działalności miejskiej. Niestety wciąż dostępnymi jest stosunkowo mało danych w zakresie rozpoznawania zanieczyszczeń akwenów portowych. Brakuje również informacji o tym, w jakim stopniu wody portowe, których stan zanieczyszczenia można stosunkowo łatwo i regularnie monitorować, są wskaźnikiem zanieczyszczenia otaczających je wód przybrzeżnych.

Do nowych kierunków badań stanu środowiska morskiego należy ocena stopnia zanieczyszczenia tworzywami sztucznymi i dioksynami. Przeprowadzone w ramach realizacji projektu badania dostarczyły wstępnych danych na temat obecności mikroplastików w wodach powierzchniowych i osadach powierzchniowych akwatorium Portu Gdynia oraz zanieczyszczenia osadów dioksynami. Wyniki badań wskazują na stosunkowo niewielkie zanieczyszczenie wód powierzchniowych i osadów dennych Portu Gdynia mikroplastikami o wielkości od 0,3 mm do 5 mm. W osadach portowych odnotowano dość wysokie stężenie mini-mikroplastików o rozmiarze od 0,027 mm do 1 mm. Niezależnie od pory roku, dominującymi cząstkami tworzyw sztucznych występującymi zarówno w wodach, jak i osadach portowych są polietylen i polipropylen.

Analiza zanieczyszczenia dioksynami osadów dennych obszaru Portu Gdynia wykazała, że ich głównym źródłem są obecne w atmosferze zanieczyszczenia pochodzące z procesów spalania. Przenikanie dioksyn z atmosfery do osadów dennych odbywa się w czasie różnych procesów fizyko-chemicznych (np. opadów atmosferycznych i procesów adsorpcji).

W ramach realizacji projektu MPSS stwierdzono, że mobilne nawodne bezzałogowe platformy mogą być wykorzystane do pobierania próbek mikroplastików, szczególnie z powierzchniowych wód morskich, w basenie portowym. Badania wykazały, że sieć planktonowa jest przydatnym urządzeniem do zbierania mikroplastików w warunkach portowych.

W dobie rosnącego zainteresowania stanem środowiska naturalnego niezbędne jest monitorowanie, zachowanie i zarządzanie ekosystemem wód morskich w sposób zrównoważony dla dobra współczesnych społeczeństw, jak również dla dobra przyszłych pokoleń. Badania prowadzone w ramach projektu *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych* wychodzi naprzeciw takim potrzebom.

Bibliografia

- Aigars, J., Barone, M., Suhareva, N., Putna-Nimane, I., i Dimante-Deimantovica I. (2021). Occurrence and spatial distribution of microplastics in the surface waters of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112860>
- Beer, S., Garm, A., Huwer, B., Dierking, J., Nielsen, T.G. (2018). No increase in marine microplastic concentration over the last three decades - A case study from Baltic Sea. *Science*

- of *The Total Environment*, 621, 1272–1279.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.101>
- Browne, M. A., Galloway, T. S., i Thompson, R. C. (2010). Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3404–3409.
<https://doi.org/10.1021/es903784e>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2001). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Polychlorinated dioxins and furans (PCDD/Fs)*. Winnipeg: Canadian Environmental Quality Guidelines, 1–7.
- Castro, L. J. A., Monsada, A. M., i Cruz, K. D. (2022). Occurrence of microplastics in the sediments of Baseco Port area at Manila Bay, Philippines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 958, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012009>
- Copat, Ch., Bell, F., Castaing, M., Fallico, R., i Sciacca, M. (2012). Heavy Metals concentrations in fish from Sicily (Mediterranean Sea) and Evaluation of Possible Health Risks to Consumers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88 (1), 78–83.
<https://doi.org/10.1007/s00128-011-0433-6>
- Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., Lenoble, V., Malatesta, A., Mounier, S., Petrillo, M., Rovetta, R., Stocchino, A., Tesan, J., Vagge, G., i Capello, M. (2020). Microplastics in seawater: sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8938–8952.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-07783-8>
- de Lucia, G.A., Caliani, I., Marra, S., Camedda, A., Coppa, S., Alcaro, L., Campani, T., Giannetti, M., Coppola, D., Cicero, A. M., Panti, C., Bainsi, M., Guerranti, C., Marsili, L., Massaro, G., Fossi, M. C., i Matiddi, M. (2014). Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian coast (Central-Western Mediterranean Sea). *Marine Environmental Research*, 100, 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.017>
- Dereszewska, A., Krasowska, K., i Popek, M. (2023). Microplastics in harbour sewaters: a case study in the Port of Gdynia, Baltic Sea. *Sustainability*, 15(8), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/su15086678>
- Dobrzycka-Kraheil, A., i Bogalecka, M. (2022). The Baltic Sea under anthropopressure – the sea of paradoxes. *Water*, 14(22), 3772, 1–20. <https://doi.org/10.3390/w14223772>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P., i Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world’s oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One*, 9:e111913, 1–16.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Ferreira, M., Thompson, J., Paris, A., Rohindra, D., i Rico, C. (2020). Presence of microplastics in water, sediments and fish species in an urban coastal environment of Fiji, a Pacific small island developing state. *Marine Pollution Bulletin*, 153:110991, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110991>
- Frias, J. P. G. L., i Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- GESAMP (2019). *Guidelines for the monitoring & assessment of plastic litter in the ocean*. Report and Studies No. 99. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. <http://www.gesamp.org/site/assets/files/2002/rs99e.pdf>
- Graca, B., Szewc, K., Zakrzewska, D., Dołęga, A., i Szczerbowska-Boruchowska, M. (2017). Surface and fate of microplastics in the marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea – a preliminary study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 7650–7661. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8419-5>
- Gregory, D. A., i Andrady, A. L. (2003). *Plastic in the marine environment*. Wiley & Sons.: New Jersey

- Guerra-Garcia, J. M., i Garcia-Gomez, J. C. (2005). Assessing pollution levels in sediments of a harbour with two opposing entrances. Environmental implications. *Journal of Environmental Management*, 77, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.01.023>
- Haseler, M., Balciunas, A., Hauk, R., Sabaliauskaite, V., Chubarenko, M., Ershova, A., i Schernewski, G. (2020). Marine Litter Pollution in Baltic Sea Beaches-Application of the Sand Rake Method. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599978>
- HELCOM (2010). Hazardous substances in the Baltic Sea - An integrated thematic assessment of hazardous substances in the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings 2010 I20b*. <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP120B.pdf>
- Imhof, H. K., Ivleva, N. P., Schmid, J., Niessner, R., i Laforsch, C. (2013). Contamination of beach sediments of subalpine lake with microplastics debris. *Current Biology*, 23(19), R867-R868. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.09.001>
- Jeong, H., Kusano, T., Addai-Arhin, S., Nugraha, W. C., Novirsa, R., Phan Dinh, Q., Shirosaki, T., Fujita, E., Kameda, Y., Cho, H. S., Ishibashi, Y., i Arizono, K. (2022). Differences in microplastic distributions on the surface freshwater collected using 100 and 355 µm meshes. *Environmental Monitoring and Contaminants Research*, 2, 22–34. <https://doi.org/10.5985/emcr.20210008>
- Jung, J. W., Park, J. W., Eo, S., Choi, J., Song, Y. K., Cho, Y., Hong, S. H., Shim, W.,J. (2021). Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape. *Environmental Pollution*, 270, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116217>
- Koelmans, A. A., Besseling, E., i Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review. W: M. Bergmann, L. Gutow, i M. Klages (red.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Cham: London, 325–340. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>
- Kowalewska, G., Konat-Stepowicz, J., Wawrzyniak-Wydrowska, B., i Szymczak-Zyła, M. (2003). Transfer of organic contaminants to Baltic in Odra Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 703–718. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00062-6)
- Krasowska, K., Dereszewska, A., i Popek, M. (2022). Preliminary approach to ecological risk assessment of microplastics in selected coastal regions of Baltic Sea. W: K. Kołowrocki, M. Bogalecka, E. Dabrowska, B. Magryta-Mut (red.), *Safety and Reliability of Systems and Processes, Summer Safety and Reliability Seminar*. Gdynia Maritime University: Gdynia, 133–142. <https://doi.org/10.26408/srsp-2022>
- Lang, S. C., Mayer, P., Hurtsthouse, A., Kötke, D., Hand, I., Schulz-Bull, D., i Witt, G. (2018). Assessing PCB pollution in the Baltic Sea – an equilibrium partitioning based study. *Chemosphere*, 191, 886–894. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.073>
- Lewandowski, K., Witt, M., Kobusińska, M., i Niemirycz, E. (2014). Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and pentachlorophenol (PCP) in bottom sediments of the Port of Gdansk. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 43, 312–323. <https://doi.org/10.2478/s13545-014-0146-7>
- Lindeque, P. K., Cole, M., Coppock, R. L., Lewis, C. N., Miller, R. Z., Watts, A. J. R, Wilson-McNeal, A., Wright, S. L., i Galloway, T. S. (2020). Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution*, 65, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>
- Magnusson, K. (2014). *Micro litter and other microscopic anthropogenic particles in the sea area off Rauma and Turku, Finland*. Swedish Environmental Institute: Stockholm, Sweden.
- Magnusson, K., Eliasson, K., Fråne, A., Haikonen, K., Hultén, J., Olshammar, M., Stadmark, J., i Voisin, A. (2016). *Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment. A review of existing data. Report C 183*. Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, Sweden.

- <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473b16/1628417679619/FULLTEXT01.pdf>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., i Herring, C. (2015). *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*. NOAA Marine Debris Division: Silver Spring. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-604>
- McLachlan, M., Undeman, E. (2020). *Dioxins and PCBs in the Baltic Sea*. HELCOM Baltic Sea Environment Proceedings, no. 171. https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/06/Helcom_171_Dioxins_PCBs.pdf
- Miller, M. E., Kroon, F. J., i Motti, C. A. (2017). Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Maritime Pollution Bulletin*, 123(1–2), 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.058>
- Niemirydz, E., i Jankowska, D. (2011). Concentrations and profiles of PCDD/Fs in sediments of major Polish rivers and the Gdansk Basin-Baltic Sea. *Chemosphere*, 85(3), 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.08.014>
- Noren, F. (2007). Small plastic particles in coastal Swedish waters. KIMO Sweden
- Ogura, I., Masunaga, S., i Nakanishi, J. (2001). Congener-specific characterization of PCDDs/PCDFs in atmospheric deposition: Comparison of profiles between deposition, source and environmental sink. *Chemosphere*, 45(2), 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00584-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00584-1)
- Peng, G., Bellerby, R., Zhang, F., Sun, X., i Li, D. (2020). The ocean’s ultimate trashcan: Hadal trenches as major depositories for plastic pollution. *Water Research*, 168, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115121>
- Preston-Whyte, F., Silburn, B., Meakins, B., Bakir, A., Pillay, K., Worship, M., Paruk, S., Mdazuka, Y., Mooi, G., Harmer, R., Doran, D., Tooley, F., i Maes, T. (2021). Meso- and microplastics monitoring in harbour environments: A case study for the Port of Durban, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111948>
- Radtke, B., Wasik, A., Jewell, L., Pączek, U., Gałuszka, A., i Namieśnik, J. (2012). The seasonal changes of organotin compounds in water and sediments samples collected from the area of Port of Gdynia. *Science of The Total Environment*, 441, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.006>
- Rogowska, W., Skorbiłowicz, E., Skorbiłowicz, M., i Trybułowski, L. (2021). Microplastic in costal sediments of Etckie Lake (Poland). *Studia Quaternaria*, 38, 109–116. <https://doi.org/10.24425/sq.2021.136827>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., i Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, 185, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- Su, L., Sharp, S. M., Pettigrove, V. J., Craig, N. J., Nan, N., Du, F., i Shi, H. (2020). Superimposed microplastic pollution in a coastal metropolis. *Water Research*, 168, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115140>
- Sundqvist, K. L., Tysklind, M., Cato, I., Bignert, A., i Wiberg, K. (2009). Levels and homologue profiles of PCDD/Fs in sediments along the Swedish coast of the Baltic Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 396–409. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0110-z>
- Szymańska, M., i Obolewski, K. (2020). Microplastics as contaminants in freshwater environments: A multidisciplinary review. *Ecology & Hydrobiology*, 20(3), 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.05.001>
- Tekman, M. B., Krumpfen, T., Bergmann, M. (2017). Marine litter on deep Arctic seafloor continues to increase and spreads to the North at the HAUSGARTEN observatory. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 120, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.12.011>

- Ugwu, K., Herrera, A., i Gomez, M. (2021). Microplastics in marine biota: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112540>
- UNEP (2016). *Marine plastic debris and microplastics. Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. United Nations Environment Programme: Nairobi. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7720/-Marine_plastic_debris_and_microplastics_Global_lessons_and_research_to_inspire_action_and_guide_policy_change-2016Marine_Plastic_Debris_and_Micropla.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Xu, P., Peng, G., Su, L., Gao, Y., Gao, L., i Li, D. (2018). Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.020>
- Yu, Y., Zhou, D., Li, Z., i Zhu, Ch. (2018). Advancement and Challenges of Microplastic Pollution in the Aquatic Environment: a Review. *Water, Air & Soil Pollution*, 229, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3788-z>
- Zalewska, T., Woron, J., Danowska, B., i Suplińska, A. (2015). Temporal changes HG, Pb, Cd, Zn environmental concentrations in the southern Baltic sediments dated with 210 Pb method. *Oceanologia*, 57(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2014.06.003>
- Zobkov, M., i Esiukova, E. (2017). Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.060>

Rozdział 5. Techniki integracji danych pochodzących z systemów obserwacyjnych w monitoringu strefy przybrzeżnej oraz obszarów portowych

Andrzej Chybicki, Beata Szymanowska

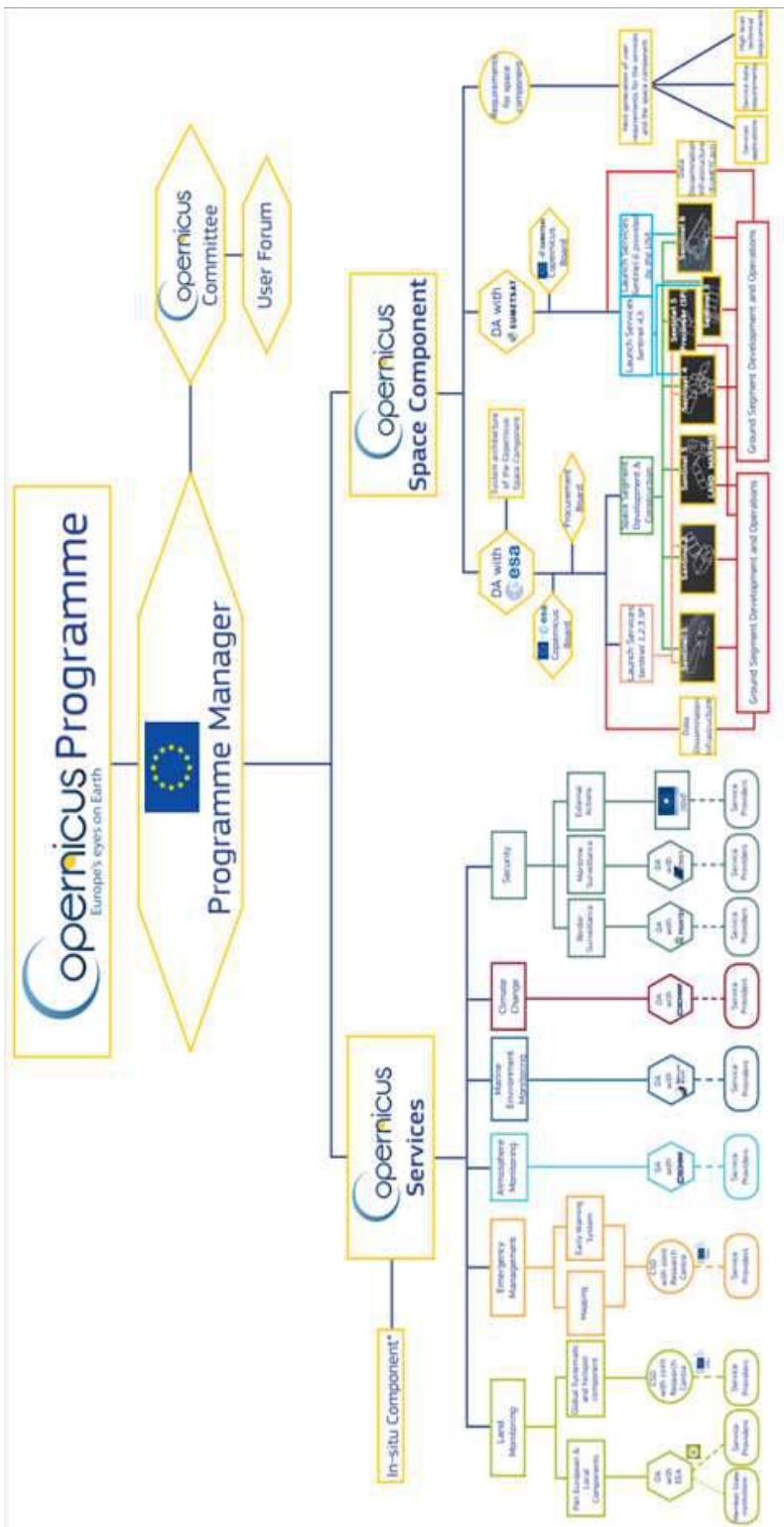
Wprowadzenie

Systemy Informacji Przestrzennej (SIP), zwane również GIS (ang. *Geographic Information System*), są podstawowym narzędziem służącym do przetwarzania danych przestrzennych umożliwiającym ich gromadzenie, analizę, archiwizację oraz wizualizację. Dzięki systematycznemu rozwojowi technologii informatycznych i telekomunikacyjnych, obecne trendy rozwoju systemów GIS obejmują szeroko rozumiane metody i techniki udostępniania oraz akwizycji danych o charakterze przestrzennym. Do głównych czynników rozwoju GIS zalicza się postęp takich obszarów wiedzy i technologii jak elektronika, miernictwo, telekomunikacja, systemy łączności, procesory sygnałowe oraz sensory. Ponadto, dzięki rozwojowi technik obliczeniowych i powstaniu superkomputerów, w systemach GIS coraz częściej wykorzystuje się techniki przetwarzania dużych zbiorów danych (ang. *big data*) (Graham i Shelton, 2013; Pijanowski i in., 2014), algorytmy sztucznej inteligencji (Tien Bui i in., 2017), uczenie maszynowe (Kobler i Adamič, 2000; Pradhan, 2013) czy modelowanie procesów biznesowych oraz środowiskowych (Bhatt i in., 2014; Formetta i in., 2014; Tavares i in., 2009).

Niniejszy rozdział dotyczy technik integracji danych, które pozwalają na wydobycie nowej wiedzy na temat obserwowanych zjawisk lub umożliwią poprawę jakości analizowanych obserwacji, pomiarów czy wyników przetwarzania danych. W szczególności przedstawione zostaną techniki obserwacji z wykorzystaniem systemów satelitarnych oraz metody estymacji batymetrii w strefie przybrzeżnej bazujących na punktowych pomiarach hydroakustycznych oraz na obrazowaniach multispektralnych Sentinel.

Systemy obserwacji satelitarnych – ogólna charakterystyka europejskich systemów obserwacji

Europejski program obserwacji Ziemi Copernicus (Bruniecki i in., 2014, s. 67–70; ESA, 2015a) obejmuje szereg działań Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) w zakresie monitorowania Ziemi (ESA, 2015b). Zasadniczo, program Copernicus to zbiór systemów i usług obserwacyjnych, które gromadzą, przechowują, przetwarzają i rozpowszechniają dane z wielu źródeł, takich jak satelity, pomiary in situ, stacje naziemne, czujniki lotnicze i morskie (Chybicki i in., 2013). Poprzez działające w ramach programu zestawy sensorów oraz stacje akwizycji danych wyniki pomiarów są dostarczane użytkownikom poprzez zestaw usług związanych z kwestiami ochrony środowiska i bezpieczeństwa.



Rysunek 5.1. Schemat programu Copernicus (Chybieki i in., 2015, s. 27)

Zastosowanie programu Copernicus może dotyczyć następujących zasadniczych grup zagadnień (rysunek 5.1):

- obserwacji lądów,
- obserwacji mórz i oceanów,
- obserwacji atmosfery,
- obserwacji zmian klimatu,
- zarządzania kryzysowego i bezpieczeństwa.

Produkty pochodzące z programu Copernicus i innych systemów obserwacji Ziemi mogą być również wykorzystywane w ochronie środowiska, zarządzaniu obszarami miejskimi, planowaniu regionalnym i lokalnym, rolnictwie, leśnictwie, rybołówstwie, ochronie zdrowia, transporcie, zmianie klimatu, zrównoważonym rozwoju, ochronie ludności i turystyce (Żróbek-Sokolnik i in., 2014, s. 1–2). Istotnym elementem infrastruktury programu Copernicus są tzw. serwisy czasu rzeczywistego (ang. *Nearly Real-Time Services*, NRT), które dostarczają cennych informacji do podejmowania krytycznych decyzji operacyjnych w przypadku sytuacji nadzwyczajnej, takich jak klęska żywiołowa lub kryzys humanitarny. Copernicus jest koordynowany i zarządzany przez Komisję Europejską, a rozwój infrastruktury obserwacyjnej odbywa się pod egidą Europejskiej Agencji Kosmicznej w zakresie komponentów kosmicznych oraz Europejskiej Agencji Środowiska i państw członkowskich w zakresie komponentów pomiarów *in situ*.



Rysunek 5.2. Satelita systemu Sentinel-1 podczas testów (Chybicki i in., 2015, s. 2).

Sentinel-1 (S-1) jest pierwszym systemem satelitarnym używanym w ramach programu Copernicus (ESA, 2015c; Torres, 2012). Posiada on zaawansowany instrument radarowy, który niezależnie od warunków pogodowych dostarcza regularnie dzienne i nocne zobrazowania powierzchni Ziemi (rysunek 5.2). W rzeczywistości S-1 to system satelitów, który składa się z dwóch jednostek orbitujących, oddalonych od siebie o 180°, o czasie rewizyty równym sześć dni.

Wykorzystanie zobrazowań satelitarnych typu SAR w monitoringu strefy przybrzeżnej i infrastruktury portowej

Obserwacje morskie

W celu zobrazowania możliwości jakie dają - w kontekście obserwacji - systemy z syntetyczną aperturą SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) można dokonać analizy zobrazowań otrzymanych poprzez zestaw usług dostępnych na stronie ESA Sentinel-1 (ESA, 2015d), która zapewnia bezpłatny otwarty dostęp do aktualizowanego archiwum S-1. Dane S-1 dostarczane są w postaci monochromatycznych zobrazowań, które zawierają informacje o wartości współczynnika odbicia danego obszaru. Zobrazowania te są uzupełniane o dodatkowe informacje zbierane przy użyciu różnych zaawansowanych metod przetwarzania danych, w tym zobrazowania uzyskane za pomocą różnych polaryzacji anteny lub technik interferometrycznych.

Satelity S-1 są wyposażone w czujnik C-SAR, który oferuje zobrazowania o średniej i wysokiej rozdzielczości niezależnie od warunków pogodowych. Czujnik C-SAR może również dostarczać zdjęcia nocne i wykrywać niewielkie ruchy na ziemi lub wodzie (np. statki), co czyni go szczególnie przydatnym do monitorowania linii brzegowej i łądu.

Jak wcześniej wspomniano, dane w systemie S-1 uzyskuje się za pomocą techniki radaru z syntetyczną aperturą (SAR), która służy do obrazowania mikrofalowego. Podstawową zaletą tej metody jest możliwość wirtualnego zwężenia wiązek radarowych w celu pozyskania danych o lepszej rozdzielczości przestrzennej niż uzyskiwana w klasycznych radarach. W systemach SAR zwiększenie rozdzielczości uzyskuje się poprzez transmisję i odbiór wiązki aktywnej z platformy mobilnej, przy czym odbierane sygnały łączone są ze sobą w taki sposób, jakby były odbierane przez znacznie większy odbiornik („wirtualny” wzrost rozmiaru anteny). Innym ważnym aspektem danych S-1 jest typ polaryzacji, który umożliwia pobieranie z uzyskanych zobrazowań informacji o rodzaju powierzchni, od której zostaje rozpraszana wiązka. Typowe czujniki SAR wysyłają wiązki o polaryzacji pionowej (V) i poziomej (H). Gdy oba sygnały są odbierane przez sensor, można wygenerować 4 różne zestawy danych w odniesieniu do polaryzacji, tj. VV, HH, VH i HV.

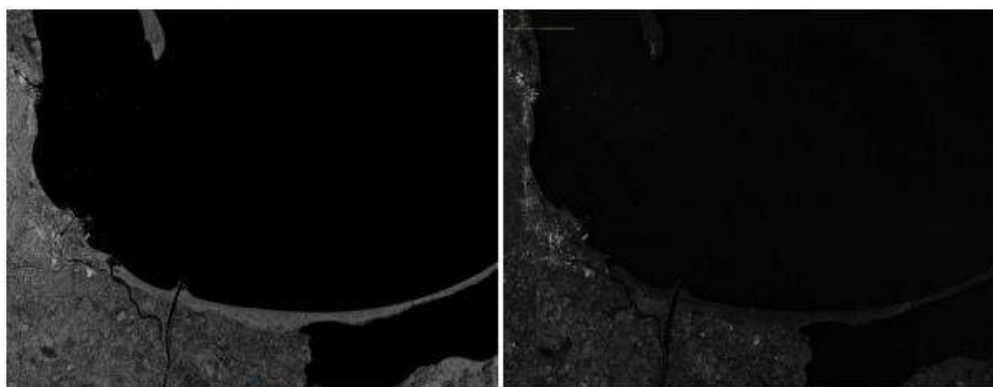
W poprzedniej sekcji omówiono aspekty związane z fizyczną warstwą sygnałów emitowanych oraz odbieranych w systemie Sentinel-1. Nie mniej istotną kwestią jest dalsze przetwarzanie odebranych informacji w celu wytworzenia produktów obserwacyjnych, które mogą być wykorzystywane przez końcowych użytkowników. System Sentinel-1 oferuje różne produkty danych podzielone według poziomów i trybów przetwarzania w zależności od przeznaczenia danych, ich parametrów i wielkości analizowanego obszaru. W konwencji nazewnictwa stosowanej dla danych systemu S-1, dane poziomu 0 to dane w formacie surowym (nieprzetworzonym), który jest skompresowany i nieostry. Format ten jest podstawą dla wszystkich pozostałych produktów wyższego poziomu. Produkty poziomu 1 (L-1) są przeznaczone dla większości użytkowników i zastosowań. Pierwszym typem danych L-1 są zobrazowania typu GRD (ang. *Ground*

Range Detection), które otrzymuje się poprzez rzutowane wiązki radarowej w kierunku powierzchni Ziemi, wykorzystując do tego model elipsoidy Ziemi. Drugim typem są dane *Single Look Complex* (SLC), które są dodatkowo powiązane geograficznie z danymi orbity satelity. Dane poziomu 2 są wykorzystywane do tworzenia produktów oceanicznych do pomiarów fal, wiatru i prądów morskich.

S-1 umożliwia również akwizycję danych w czterech trybach. Pierwszy tryb, Strip Map, jest przeznaczony tylko dla określonych przypadków, tj. nagłych wypadków lub katastrof. Ma szerokość zobrazowania równą 80 km i rozdzielczość przestrzenną 5 m * 5 m. Jest on pozyskiwany w wyniku emisji sekwencji impulsów sygnału, przy czym antena jest skierowana pod określonym kątem obserwacji w płaszczyźnie azymutalnej. Tryb *Interferometric Wide Swath* (IW) jest przeznaczony jako główny i najczęściej stosowany tryb akwizycji, który spełnia większość wymagań serwisowych. Gromadzi dane w pasie o szerokości 250 km i rozdzielczości 5 m x 20 m i jest pozyskiwany za pomocą techniki TOPSAR (ang. *Terrain Observation with Progressive Scans*, SAR) (De Zan i Monti Guarnieri, 2006). W tym przypadku wiązka obserwacyjna jest emitowana w płaszczyźnie ruchu sensora, co zapewnia zmniejszenie błędów pomiarów oraz skutkuje jednorodnością przestrzenną w zakresie jakości pozyskiwanego zobrazowania. Z kolei tryb *Extra Wide Swath* (EW) jest podobny, co do zasady działania, do trybu IW z tym, że pozyskuje dane na większym obszarze, tj. szerokość pasa obserwacyjnego dla pojedynczego przelotu wynosi 400 km w rozdzielczości 20 m x 40 m. Ostatni tryb, *Wave*, jest używany do analizy danych oceanicznych. Charakteryzuje się specyficznym wzorem akwizycji przeznaczonym do monitorowania wysokości i kierunku fali oraz poziomu wody.

Obszar Zatoki Gdańskiej

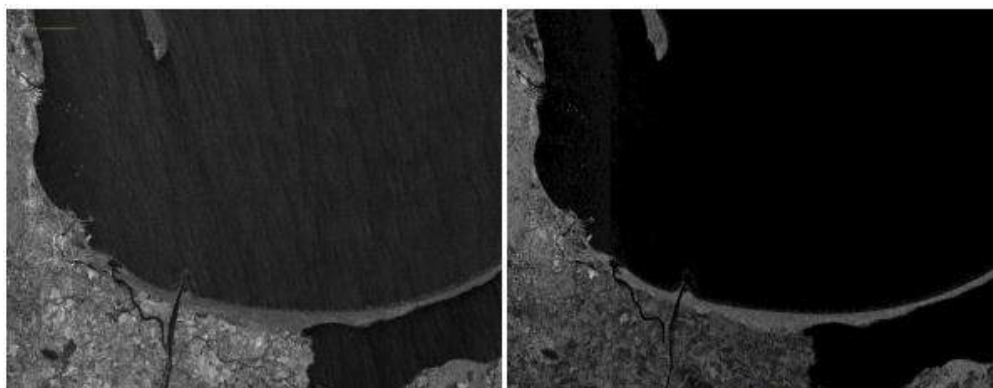
Po wprowadzeniu dotyczącym ogólnej specyfiki pomiarów systemami SAR, poniżej przedstawiono kilka wybranych wyników obserwacji wykonanych za pomocą systemu S1 dla obszarów morskich i portowych. W szczególności zaprezentowano wyniki pomiaru oraz analizy danych S-1 dla przykładowego zobrazowania zarejestrowanego 23 grudnia 2014 r. w polaryzacji VH (rysunek 5.3a) i VV (rysunek 5.3b) obszaru Zatoki Gdańskiej. Ten sam obszar zaobserwowano również podczas przelotu satelity 4 stycznia 2015 r. (rysunki 5.4a i 5.4b). Dodatkowo, wykonano analizę statystyczno-przestrzenną prezentowanych danych. Metoda analizy była następująca: najpierw wygenerowano maskę dzielącą morze i obszar lądowy za pomocą narzędzia S-1 Toolbox (ESA, 2015e), a następnie dokonano obliczeń w celu uzyskania podstawowych parametrów statystycznych: wartości średniej, odchylenia standardowego oraz wartości minimalnej i maksymalnej odpowiednio dla ładu i wody.



(a)

(b)

Rysunek 5.3. Obszar badań 1 – Zatoka Gdańska (23.12.2014 r.), polaryzacja VH (a) i polaryzacja VV (b) (Chybicki i in., 2015, s. 29)

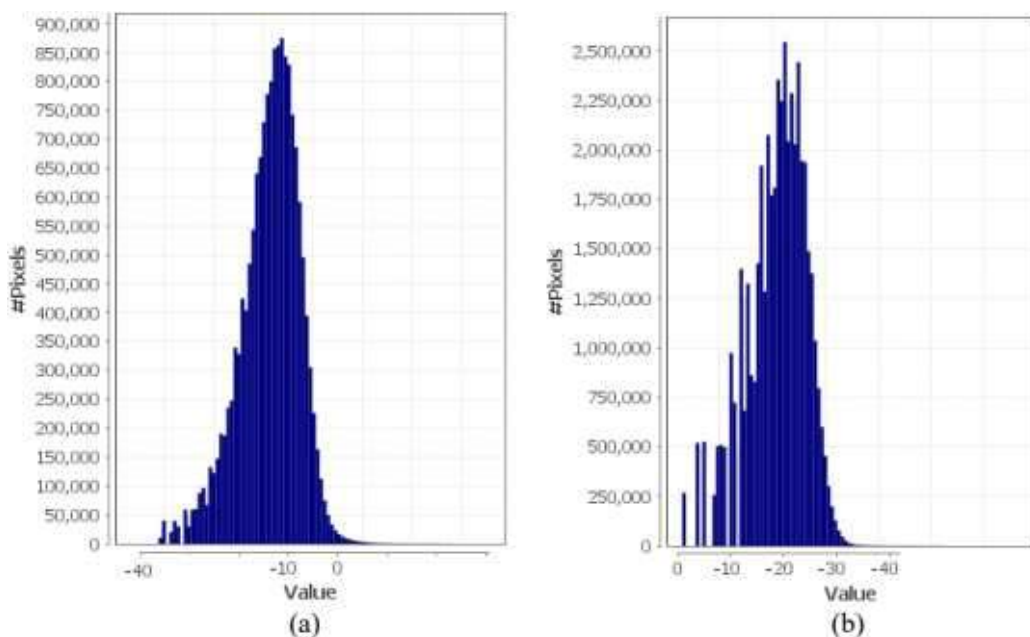


(a)

(b)

Rysunek 5.4. Obszar badań 3 – Zatoka Gdańska (4.01.2015), polaryzacja VH (a) i polaryzacja VV (b) (Chybicki i in., 2015, s. 29)

Oprócz analizy przestrzennej danych S-1, przeprowadzono również analizę histogramu dla danych pozyskanych 4 stycznia 2015 r. Wykresy, jak widać na histogramach, dla polaryzacji VH (rysunek 5.5a) i polaryzacji VV (rysunek 5.5b) są wyraźnie rozróżnialne pod względem rozkładu wartości oraz wartości średniej.



Rysunek 5.5. Rozkład wartości na obrazie przedstawiającym analizowany obszar dla dnia 4.01.2015 r. dla lądu w polaryzacji VH (a) i dla morza w polaryzacji VH (b) (Chybicki i in., 2015, s. 30)

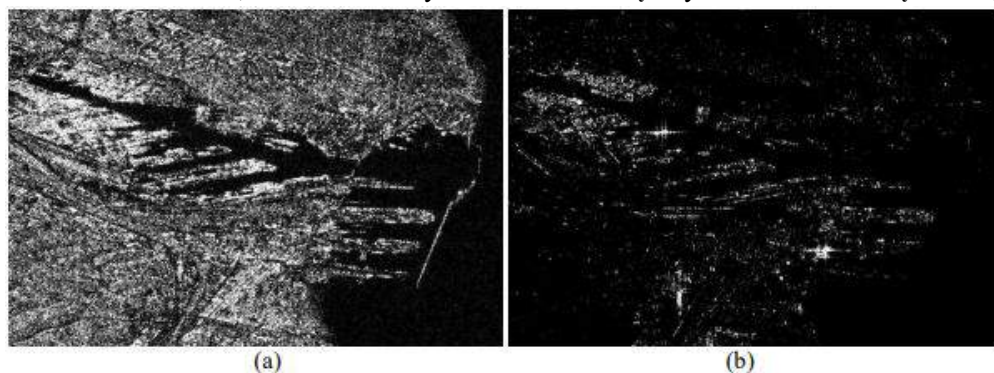
Tabela 5.1. Statystyki analizy danych SAR dla obszaru Zatoki Gdańskiej (Chybicki i in., 2015, s. 30)

Zobrazowanie SAR (data akwizycji, obszar, polaryzacja)	Średnia inten- sywność [dB]	Odchylenie standardowe	Procenty 3% [dB]	Procenty 97% [dB]
23.12.2014, ląd, VH	-9,84	1,14	-23,64	-2,40
23.12.2014, ląd, VV	-17,86	1,07	-30,57	-9,35
23.12.2014, ląd, VH	-20,11	0,21	-22,58	-1,80
23.12.2014, morze, VV	-28,16	0,10	-30,56	-9,46
04.01.2015, ląd, VH	-9,51	0,95	-23,57	-2,69
04.01.2015, ląd, VV	-2,88	0,74	-16,45	-0,74
04.01.2015, morze, VH	-17,69	0,23	-30,57	-11,68
04.01.2015, morze, VV	-8,15	0,47	-20,35	-0,84

Dodatkowo w tabeli 5.1 przedstawiono skumulowane wyniki analityczne obu przebiegów przedstawione na rysunkach 5.4 oraz rysunku 5.5. Podobnie jak w przypadku analizy przestrzennej, wyniki te pokazują również, że średnie natężenie pikseli reprezentujących obszary morskie jest znacznie niższe niż dla lądu. Zjawisko to można również zaobserwować dla wartości minimalnych i maksymalnych reprezentowanych jako 3 i 97 percentyl danych. Zgodnie z oczekiwaniami, odchylenie standardowe dla obszaru morskiego jest również znacznie mniejsze niż dla lądu. Zjawisko to można wytłumaczyć faktem, że ląd, szczególnie dla Zatoki Gdańskiej, jest znacznie bardziej zróżnicowany niż morze (Bossard, 2000).

Obserwacja portowej infrastruktury krytycznej w projekcie MPSS

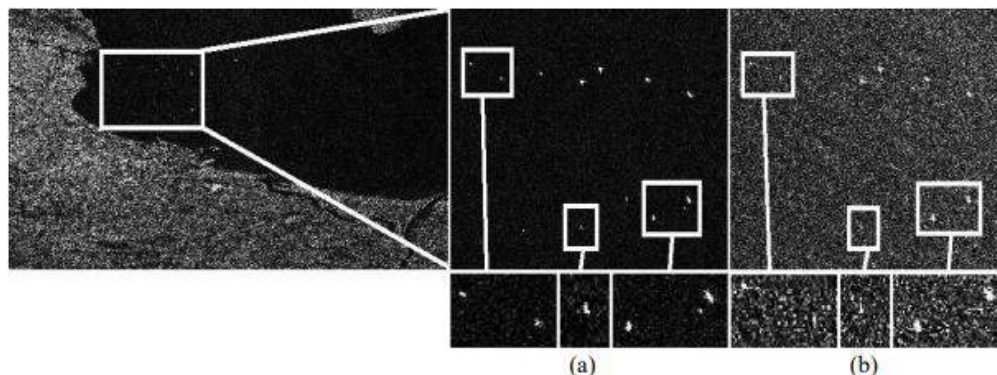
Wyniki analogicznych eksperymentów dla obiektów infrastruktury w portach morskich, na przykładzie portu w Gdyni, zaprezentowano na rysunkach 5.6 oraz 5.7. W ramach pracy, autorzy (Chybicki i in., 2015) zweryfikowali również, czy dokładność i rozdzielczość przestrzenna S-1 pozwala na analizę infrastruktury krytycznej szczególnie istotnej dla transportu czy gospodarki morskiej. W tym przypadku skupiono się na obszarze portu w Gdyni, gdyż jego specyfika dobrze ukazuje przydatność danych S-1. W tym kontekście system Sentinel-1 może być wykorzystywany do monitorowania aktualnego stanu infrastruktury, wykrywania zmian lub uszkodzeń infrastruktury, na przykład w falochronach, dokach lub innych obiektach związanych z infrastrukturą morską.



Rysunek 5.6. Obszar analiz: port w Gdyni (dostęp: 23.12.2015), polaryzacja VH (a) oraz polaryzacja VV (b) (Chybicki i in., 2015, s. 31)

Obserwacja obszarów morskich w projekcie MPSS

Ostatnim prezentowanym zastosowaniem danych S-1 jest detekcja jednostek morskich przeprowadzona dla obszaru Zatoki Gdańskiej w dniu 4 stycznia 2015 r. Jak widać na przykładzie przedstawionym na rysunku 5.7, zobrazowanie polaryzacji VH lepiej nadaje się do wykrywania statków niż polaryzacja VV, ponieważ wynikający z tego kontrast między obszarami morskimi a statkami jest znacznie wyraźniejszy. Warto również zauważyć, że to zastosowanie danych S-1 może przynieść dodatkowe informacje do już działających systemów, w tym ARPA (Bin i Chih-Hao, 2006; IMO, 2015) i innych.



Rysunek 5.7. Detekcja obiektów na przykładzie danych SAR – Port w Gdyni (dostęp: 4.01.2015), polaryzacja VH (a) oraz polaryzacja VV (b) (Chybicki, 2015, s. 31)

Integracja zobrazowań satelitarnych oraz pomiarów hydroakustycznych w celu estymacji batymetrii w płytkiej strefie przybrzeżnej

W kontekście obserwacji satelitarnych, interesującym i ostatnio dynamicznie rozwijającym się obszarem monitoringu, wykorzystującym obserwacje satelitarne, jest tzw. batymetria satelitarna (ang. *Satellite Derived Bathymetry*, SDB). W niniejszej sekcji monografii zaprezentowano podstawy działania tej techniki, jej zakres użyteczności oraz wady i zalety w kontekście monitoringu strefy przybrzeżnej.

Na początku rozważań warto zwrócić uwagę na istotną różnicę pomiędzy podejściem zaprezentowanym w podrozdziale powyżej a techniką SDB. Techniki SAR działają na zasadzie aktywnej, tj. emitują wiązkę radarową i sam proces monitoringu jest oparty na analizie sygnałów rozproszonych od powierzchni Ziemi, które są emitowane przez sensor. Metody obserwacji SAR należą zatem do tzw. aktywnych obserwacji i wymagają większego zapotrzebowania na energię dostarczaną do sensora, które wynika z konieczności emisji sygnału w kierunku Ziemi. Metody SDB zalicza się z kolei do tzw. pasywnych technik obserwacji. Oznacza to, iż nie emitują one energii z sensora obserwacyjnego, ale korzystają z energii wygenerowanej przez Słońce.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że na potrzeby niniejszego opracowania znacząco zawężono zakres rozważań dotyczących systemów obserwacji przybrzeżnej czy systemów satelitarnych. Skupią się one jedynie na obserwacjach z wykorzystaniem zobrazowań multispektralnych systemu Sentinel-2 w celu estymacji batymetrii w wodach optycznie płytkich. Zasadniczo sekcja ta zawiera opis wyników oraz wniosków z prac opisanych w literaturze przedmiotu, między innymi w: (Chybicki, 2017a; Chybicki, 2017b), obejmujących ich implementację, ocenę działania oraz optymalizację modeli estymacji batymetrii w strefie przybrzeżnej.

Modele SDB

Zasadniczo, wszystkie obecnie stosowane modele SDB bazują na równaniu bilansu promieniowania dla wód optycznie płytkich (6), definiującym refleksyjność atmosferyczną (ang. *reflectance on the top of the atmosphere*):

$$L_{TOA} = L_{\infty}[1 - e^{-kz}] + A_d e^{-2kz} + L_A + L_s, \quad (1)$$

gdzie $L_{\infty}[1 - e^{-kz}]$ reprezentuje efekt odbiciowości dla wód optycznie głębokich (tzn. bez interakcji związanej z odbiciem od dna), A_d jest wartością reprezentującą promieniowanie padające bezpośrednio na powierzchnię wody (przed oddziaływaniem z nakładającą się kolumną wody) [$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$], k jest współczynnikiem tłumienia (pochłaniania) promieniowania w kolumnie wody o głębokości z , L_A reprezentuje efekt pochłaniania światła w atmosferze, a L_s efekt odbicia powierzchniowego. Stąd wyrażenie $A_d e^{-2kz}$ reprezentuje efekt tłumienia energii wynikający z transferu światła w kolumnie wody o głębokości z . Modele SDB pozwalają na wydobywanie informacji o głębokości wody na podstawie energii rejestrowanej w sensorze po uprzednim przejściu przez atmosferę, powierzchnię wody, kolumnę wody oraz odbiciu od dna.

Istnieją dwa podstawowe podejścia uzyskiwania SDB. Oba stosują mechanizmy usuwania efektu powierzchniowego rozproszenia światła, uzyskując informację o głębokości na podstawie optycznych właściwości kolumny wody, mianowicie:

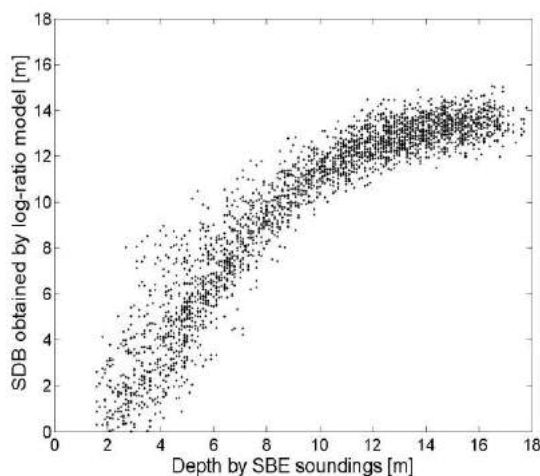
- model Stumpfa (Stumpf i in., 2003),
- model Lyzengi (Lyzenga, 1978; Lyzenga, 1981).

Model Stumpfa (log-ratio model)

Pierwsze z analizowanych podejść opisane jest równaniem ilorazu logarytmów refleksyjności badanej powierzchni w dwóch wybranych kanałach rejestrowanych przez sensor:

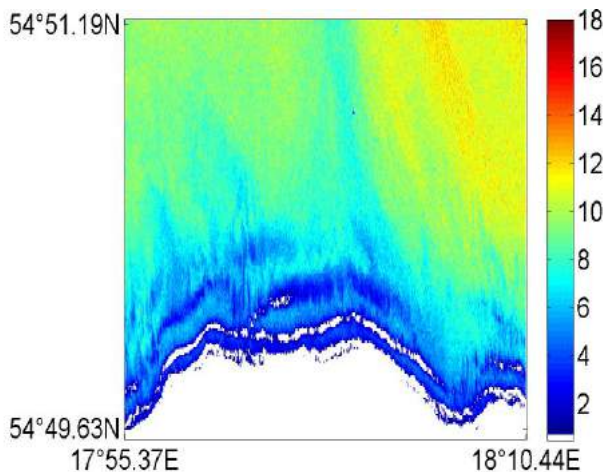
$$z_{est} = m_1 \frac{\ln(R(\lambda_i))}{\ln(R(\lambda_j))} + m_0, \quad (2)$$

gdzie z_{est} jest (poszukiwaną) estymowaną głębokością, m_0 i m_1 są współczynnikami modelu, a $R(\lambda_i)$ i $R(\lambda_j)$ oznaczają rejestrowaną refleksyjność dla kanałów o centralnej długości fali λ_i oraz λ_j . Ponieważ obecnie w literaturze nie są dostępne uniwersalne współczynniki kalibracyjne dla działania modelu, każdorazowo, tj. dla danej obserwacji, należy kalibrować model na podstawie dostępnych punktów pomiarowych (Pe'eri i in., 2014; Su i in., 2008). Następnie stosuje się metodę kalibracji modelu polegającą na tym, że dla każdego analizowanego piksela zobrazenia tworzona jest para <obserwacja, wartość modelu>. Dla każdej pary wartość modelu jest obliczana przy użyciu równania (2) z początkowymi wartościami $m_1 = 1$ i $m_0 = 0$. Następnie otrzymany zestaw par jest poddawany regresji w celu uzyskania optymalnych wartości m_0 oraz m_1 pozwalający w konsekwencji uzyskać zoptymalizowany model SDB. Wyniki działania zaprezentowano na rysunkach 5.8 i 5.9. Rysunek 5.8 przedstawia zależność uzyskanej wartości głębokości w danym punkcie w modelu SDB względem rzeczywistej wartości pomiarowej uzyskanej za pomocą klasycznego pomiaru hydroakustycznego.



Rysunek 5.8. Wykres punktowy obrazujący zależność pomiędzy próbkami pomiarowymi otrzymanymi z sondowań hydroakustycznych (oś odciętych) a skalibrowanym modelem Stumpfa. Przypadek testowy dla dnia 6 maja 2016 r. – zobrazenie wykonane za pomocą systemu Sentinel-2 (opracowanie własne)

Rysunek 5.9 przedstawia obrazowo mapę batymetrii dla skalibrowanego modelu Stumpfa, w którym kolor piksela na obrazie określa estymowaną głębokość.



Rysunek 5.9. Wynik działania modelu – estymacja batymetrii na podstawie skalibrowanego modelu Stumpfa: kolor piksela odzwierciedla głębokość wyrażoną w [m], białe plamy oznaczają piksele usunięte z analizy, tj. zaklasyfikowane jako ląd (opracowanie własne)

Model Lyzengi (model analityczny)

Model analityczny jest uogólnieniem podejścia stosowanego w modelu Stumpfa i zakłada, że stosunek współczynnika odbicia od dna pomiędzy dwoma pasmami widmowymi jest stały dla wszystkich typów dna, a zmienność tłumienia światła spowodowana efektami atmosferycznymi jest pomijalna dla danego obszaru. Głębokość szacowana przy użyciu modelu może być wtedy wyrażona jako:

$$z_{\text{est}} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \ln[R(\lambda_i) - R_{\infty}(\lambda_i)] \quad (3)$$

gdzie N jest liczbą rejestrowanych przez sensor kanałów, α_i ($i = 1, 2, \dots, N$) są parametrami modelu, a $R_{\infty}(\lambda_i)$ oznacza reflektancję dla obszaru charakteryzującego się brakiem odbicia od dna. Założenia dotyczące konieczności kalibracji modelu analitycznego są analogiczne, różnica w metodach kalibracji polega na tym, że model ten składa się z co najmniej pięciu parametrów ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$), które są poddawane procesowi kalibracji przy użyciu obserwacji wykonywanych w paśmie widzialnym Sentinel-2 (R, G, B). W tym przypadku, posiadając zbiór punktów kalibracyjnych M , kalibracja modelu jest realizowana na podstawie równania:

$$SDB_{M(k)} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \ln[R(\lambda_i)_{M(k)} - R_{\infty}(\lambda_i)] \quad (4)$$

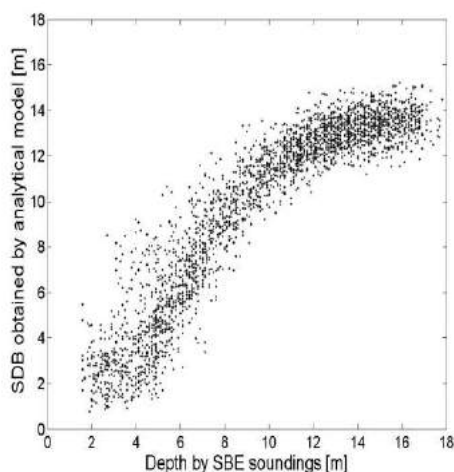
gdzie $SDB_{M(k)}$ jest wynikiem działania modelu dla k -tego punktu kalibracyjnego w zobrazowaniu, gdzie k ($1, 2, \dots, K$), K jest całkowitą liczbą punktów kalibracyjnych, a $R(\lambda_i)_{M(k)}$ jest reflektancją odpowiadającą punktowi $M(k)$. Znalezienie zestawu optymalnych parametrów jest realizowane poprzez rozwiązanie zestawu równań liniowych, których zapis w formie macierzowej przedstawia się następująco:

$$\hat{\alpha} = [L^T W L]^{-1} L^T z \quad (5)$$

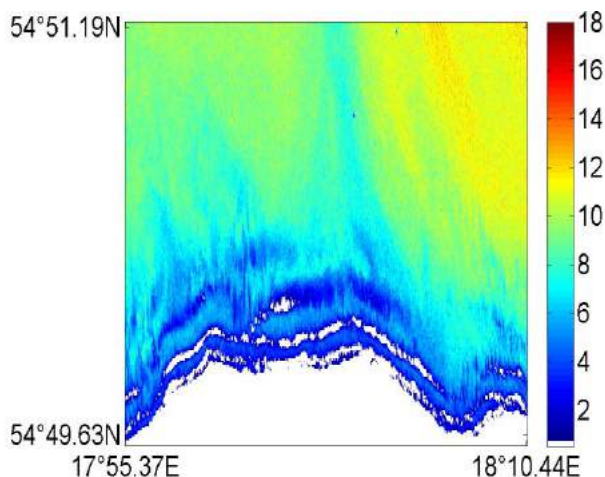
gdzie $\hat{\alpha}$ jest wektorem kolumnowym o długości N składającym się z optymalnych parametrów modelu (α_i), W jest opcjonalną macierzą o rozmiarze $K \times K$, L jest macierzą o wymiarach $K \times N$, a z jest K -elementowym wektorem kolumnowym zawierającym wartości $SDB_{M(k)}$.

W ramach badań przeprowadzonych w czasie realizacji projektu MPSS i opisanych w literaturze przedmiotu (Chybicki, 2017a, s. 15-25) przeprowadzono serię eksperymentów umożliwiających ewaluację modeli w kontekście ich zastosowania do monitorowania batymetrii w strefie przybrzeżnej. Wnioski z tych badań można określić następująco:

- oba modele, tj. model Stumpfa (*log-ratio mode*) (rysunek 5.9) i model Lyzengi (analityczny) (rysunek 5.11) charakteryzowały się podobnymi ograniczeniami w zakresie możliwości estymacji maksymalnej głębokości. Zjawisko to było powtarzalne dla wielu przypadków testowych, co oznacza, że głównym ograniczeniem działania modeli są właściwości fizyczne (optyczne) kolumny wody, której dotyczy estymacja;
- maksymalna głębokość estymacji dla przedstawionego poligonu testowego jest zmienna i zależy od lokalnych warunków, w ogólności jednak nie przekracza 16 m, natomiast dla wszystkich przypadków testowych (szerzej opisanych w (Chybicki, 2017a)) wynosi ponad 12 m;
- w przypadku procesu kalibracji modelu z wykorzystaniem pikseli odpowiadających większym głębokościom, wyliczany estymator głębokości staje się niezależny od rzeczywistej głębokości (rysunek 5.10). W efekcie następuje zwiększenie poziomu błędów wprowadzanych podczas procesu kalibracji, a uczenie modelu z wykorzystaniem wspomnianych punktów kalibracyjnych zmniejsza jego ogólną jakość.



Rysunek 5.10. Wykres punktowy obrazujący zależność pomiędzy próbkami pomiarowymi otrzymanymi z sondowań hydroakustycznych (oś odciętych) a skalibrowanym modelem analitycznym (Lyzenga). Przypadek testowy dla 6 maja 2016 r. – zobrazowanie wykonane satelitą Sentinel-2 (Chybicki, 2017a, s. 19)



Rysunek 5.11. Wynik działania modelu – estymacja batymetrii na podstawie skalibrowanego modelu analitycznego (Lyzenga): kolor piksela odzwierciedla głębokość wyrażoną w [m], białe piksele, zaklasyfikowane jako ląd, zostały usunięte z analizy (Chylicki, 2017a, s. 22)

Lokalne modele SDB

Przedstawione powyżej modele estymacji batymetrii w strefie przybrzeżnej nie uwzględniały lokalnej zmienności własności optycznych wody i mogły mieć zastosowanie jedynie dla relatywnie małych obszarów. Istotną poprawą w modelowaniu batymetrii było opracowanie modeli SDB uwzględniających **lokalną przestrzenną autokorelację** ich właściwości. W przeciwieństwie do globalnych systemów uczenia się, podejścia lokalne dzielą globalny problem optymalizacji na wiele pod-problemów związanych z uczeniem (Stulp i Sigaud, 2015). W przypadku omawianej problematyki jednym z najczęściej stosowanych podejść jest regresja ważona przestrzennie (ang. *Geographically Weighted Regression*, GWR) (Fotheringham i in., 1998, s. 1905–1927).

GWR w ogólności polega na przekształceniu modelu w taki sposób, aby uwzględnił on lokalną (w sensie geograficznym) zależność parametrów, tj.:

$$z(x, y) = \alpha_0(x, y) + \sum_j \alpha_j(x, y) \hat{B}(x, y) \quad (6)$$

gdzie $\hat{B}(x, y)$ jest estymatorem batymetrii wyznaczanym na podstawie inicjalnych parametrów równania (7), a j jest liczbą wybranych kanałów zdalnej obserwacji. W tym przypadku optymalizacja modelu (wyznaczanie optymalnych wag) wymaga przekształcenia globalnej funkcji kosztów J'_G w sumę niezależnych lokalnych funkcji J_l :

$$\begin{aligned} J'_G &= E \left[\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N [w_{l,i} (z_i - \Phi(o_i)^T \alpha_k)^2] \right] = \\ &= \sum_{l=1}^L E \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_{l,i} (z_i - \Phi(o_i)^T \alpha_k)^2 \right] = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L J_l \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie $E[\cdot]$ jest operatorem wartości oczekiwanej, z_i jest wartością (głębokości) i -tego punktu kalibracyjnego, $\Phi(o_i)^T$ jest wektorem obserwacji o_i odpowiadającym i -temu punktowi obliczanemu na podstawie inicjalnych warunków równania (12), $w_{l,i}$ jest

wagę i -tej obserwacji w l -tym ($l = (1, 2, \dots, L)$) modelu lokalnym. W lokalnie optymalizowanym modelu SDB okna wartości wag $w_{l,i}$, które definiują geograficzne położenie lokalnych modeli, muszą być zdefiniowane *a priori* w taki sposób, że im większa odległość od środka danego lokalnego modelu, tym mniejsze znaczenie ma kalibracja w danym punkcie. W tym przypadku optymalne wagi modelu wyznaczone są przez zestaw L równań:

$$\hat{\alpha}_l = [X^T W_l X]^{-1} X^T W_l z \quad (8)$$

gdzie $W_l \in \mathbb{R}^{n \times n}$ jest macierzą diagonalną, w której poszczególne elementy oznaczają „istotność” danej obserwacji odwrotnie proporcjonalną do jej odległości od środka geograficznego modelu.

Istotnym krokiem rozwoju podejścia GWR jest rozwinięcie modelu trójwymiarowej regresji geograficznej ważonej lokalnie (ang. *three-dimensional geographically weighted regression*, 3GWR), który polega na zastosowaniu regresji lokalnej nie tylko w płaszczyźnie poziomej (geograficznej), jak pokazano w poprzednich opracowaniach (Su i in., 2008), ale także w pionowej (głębokości) płaszczyźnie analizowanego regionu (Chybicki, 2017a, s. 15-25). Podejście to polega na wprowadzeniu dodatkowego zestawu modeli lokalnych połączonych z modelem GWR. Osiąga się to poprzez zastosowanie dwustopniowej procedury w procesie określania głębokości piksela. W pierwszym kroku głębokość jest określana na podstawie lokalnie zoptymalizowanych modeli zależnych od głębokości, a następnie końcowa głębokość piksela jest określana jako średnia ważona oszacowań zależnych lokalnie. Oznacza to, że współczynniki regresji lokalnej zależą nie tylko od położenia geograficznego punktu, jak w modelu GWR, ale również od jego głębokości.

W tym przypadku funkcja kosztu J_G'' zbioru problemów lokalnych jest sformułowana następująco:

$$J_G'' = E \left[\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N [w_{l,i} w_{l,d,i} (z_i - \phi(o_i)^T \alpha_d)^2] \right] = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D J_{d,l} \quad (9)$$

gdzie D jest całkowitą liczbą modeli lokalnych zależnych od głębokości, $d = (1, 2, \dots, D)$. W tym przypadku znalezienie estymacji $\hat{\alpha}_d$ dla której J_G'' przyjmuje wartość minimalną, wymaga skonstruowania dodatkowego zestawu równań macierzy, analogicznie jak w przypadku GWR. W tym przypadku lokalny model wyznaczony przez parametry głębokości α_d , określa się za pomocą następującego dodatkowego zestawu równań:

$$\hat{\alpha}_d = [X^T W_d X]^{-1} X^T W_d z \quad (10)$$

gdzie W_d jest macierzą wag zależnych od głębokości dla głębokości środkowej d , gdzie wartości leżące na jej przekątnej reprezentują ciężar odwrotnie proporcjonalny do odległości od centrum lokalnego modelu głębokości.

Metoda 3GWR pozwala na znaczącą poprawę jakości działania modelu, które zostało zweryfikowane na podstawie obrazowań wykonanych za pomocą systemu satelitarnego Sentinel-2. Jakość modelu została zweryfikowana za pomocą dwóch miar,

tj. współczynnika korelacji Pearsona (R) oraz pierwiastka średniego błędu kwadratowego ($RMSE$). Wyniki działania modelu zostały przedstawione w tabeli 5.2.

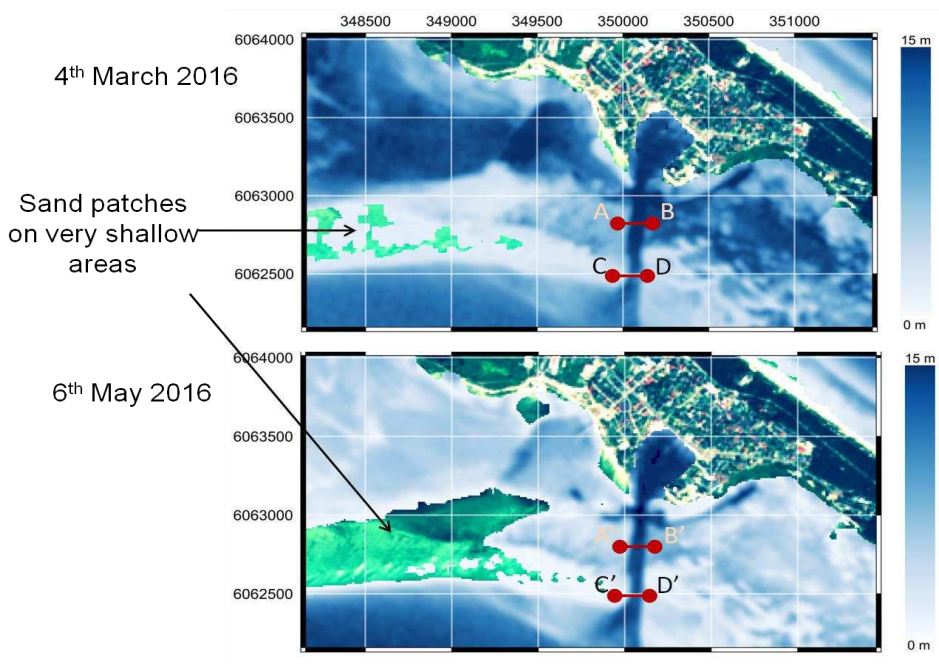
Tabela 5.2. Zestawienie wyników uzyskanych z wykorzystaniem zaproponowanego modelu 3GWR oraz porównanie do modelu GWR (Chybicki, 2017b, s. 14)

Zestaw testowy/ Data pomiaru	Proponowana metoda 3GWR		GWR		Względne obniżenie błędu RMSE [%]
	R (min-max)	RMSE [m] (min-max)	R (min-max)	RMSE [m] (min-max)	
4 marca 2016	0,91–0,93	1,07–1,23	0,9–0,91	1,31–1,46	17
9 marca 2016	0,95±0,005	0,88–0,95	0,94	1,16–1,24	23
27 marca 2016	0,93–0,94	1,01–1,07	0,91–0,92	1,45–1,5	29
6 maja 2016	0,95±0,004	1,08–1,14	0,93–0,94	1,53–1,62	30

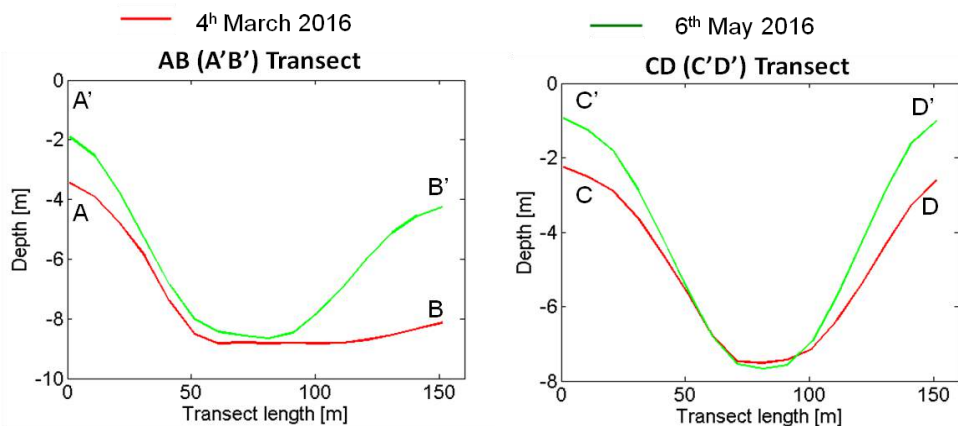
Otrzymany w ten sposób wzrost współczynnika korelacji pomiędzy referencyjnymi pomiarami hydroakustycznymi a estymatorem batymetrii można zaobserwować dla wszystkich przypadków testowych. Proponowane podejście 3GWR zostało również porównane z modelem GWR pod względem podstawowych miar statystycznych. W tym przypadku można zauważyć, że zastosowanie proponowanego podejścia znacząco poprawia ogólną jakość modelu w porównaniu ze standardową techniką GWR, co w konsekwencji pozwala na względną redukcję wskaźnika RMSE od 17% do 30% (ostatnia kolumna tabeli) w zależności od przypadku testowego.

W ramach badań zweryfikowano także przydatność powyższych metod poprzez ocenę potencjału aplikacyjnego do obserwacji zmian batymetrii przy wejściu do portu Jastarnia ($54^{\circ} 41'46,2''$ N $18^{\circ} 40'30,5''$ E) znajdującego się w Zatoce Puckiej (południowa strona Półwyspu Helskiego). Analiza tego miejsca jest szczególnie ważna, ponieważ dotyczy ono ważnej trasy morskiej dla licznych statków turystycznych i łodzi rybackich. Miejsce to jest też specyficzne, ponieważ większość tego obszaru charakteryzuje się piaszczystym homogenicznym typem dna i podatnością na migrację osadów dennych, które zagrażają bezpieczeństwu żeglugi na morzu.

Na rysunku 5.12 przedstawiono dwie kolejne obserwacje wykonane w dniach 4 marca i 6 maja 2016 r., w których za pomocą skali barwnej zaznaczono estymowaną głębokość (w zakresie 0–15 m) w badanym obszarze. Jak widać, wejście do portu ma szerokość ok. 150 m i znajduje się pomiędzy dwoma płytkimi obszarami wodnymi.



Rysunek 5.12. Przykład zastosowania opracowanego modelu 3GWR do obserwacji batymetrii w strefie przybrzeżnej (z odwzorowaniem UTM 34N) – okolice wejścia do portu w Jastarni (Półwysep Helski) (Chybicki, 2017a, s. 18)



Rysunek 5.13. Profile dna wzdłuż wybranych transektów dla dnia 4 marca 2016 r. (kolor czerwony) oraz 6 maja 2016 (kolor zielony) (Chybicki, 2017a, s. 19)

Dla celów dokładniejszej analizy, zdefiniowano cztery punkty kontrolne (A, B, C oraz D), które określają przebieg profili dna wyznaczonego na podstawie zobrazowania S2 wykonanego 4 marca 2016 roku oraz odpowiadające im na zobrazowaniu z dnia 6 maja 2016 r. punkty A', B', C' i D'. Na rysunku 5.13 zaprezentowano przebieg estymowanej batymetrii wyznaczonej wzdłuż profili AB (z lewej) oraz CD (z prawej) na podstawie dwóch przedstawionych wyżej zobrazowań, w których widać wynik procesu nanoszenia osadów dennych wzdłuż przedstawionych linii. Prezentowane wyniki

wyraźnie ukazują proces spłykania dróg morskich w pobliżu portu, który jest wynikiem migracji osadów wzdłuż południowej części Półwyspu Helskiego (Łabuz, 2015; Szmytkiewicz i in., 2000).

Zgodnie z proponowanym modelem SDB, w przypadku profilu AB (A'B'), można zauważyć, że głębokość punktu A (A') zmalała z 3,75 m do 1,9 m w okresie od marca do maja, natomiast w przypadku punktu B (B') różnica ta wynosi blisko 4 m (spadek od 8 m do 4,1 m). Warto też zauważyć, że głębokość profili w środkowej części (środek toru wodnego) jest podobna (całkowita głębokość około 8–8,5 m), a różnica między obserwacjami jest stosunkowo niewielka i wynosi ok. 20–30 cm. Analogiczne wnioski można wyciągnąć w odniesieniu do profilu CD (C'D'), gdzie zaobserwowana różnica w szacowanej głębokości na brzegach profilu wyniosła ok. 1–1,5 m, przy relatywnie niedużych zmianach obserwowanych w jego środku (tj. blisko osi toru wodnego).

Podsumowanie

Od lat 40. XX wieku morskie systemy telemonitoringu opierały się na pomiarach in situ i obserwacjach hydroakustycznych. W ostatnich latach, wraz z rozwojem technologii satelitarnych, wzrósł potencjał obserwacji obszarów morskich i przybrzeżnych. Kompleksowe obserwacje satelitarne dostarczają bardziej wartościowych informacji, umożliwiając naukowcom, przedstawicielom przemysłu i administratorom analizę procesów morskich. Niewątpliwie wyzwaniem w nadchodzących latach będzie umiejętna integracja nowych i klasycznych technik obserwacyjnych, narzędzi obliczeniowych (systemów informatycznych) i modeli empirycznych, które zaoferują nowe możliwości monitorowania i przewidywania zmian w ekosystemach morskich.

Ponadto w badaniu wprowadzono modele do szacowania batymetrii w strefach przybrzeżnych, rozwiązując ograniczenia poprzednich modeli. Modele te, w tym modele Stumpf i Lyzenga, poprawiły dokładność szacunków batymetrycznych, ale nadal miały ograniczenia w uwzględnianiu lokalnych właściwości optycznych wody. Geograficznie ważona regresja (GWR) i trójwymiarowa geograficznie ważona regresja (3GWR) zostały opracowane w celu wyeliminowania tych ograniczeń, uwzględniając lokalną autokorelację przestrzenną i zależność od głębokości. Postępy te wykazały znaczną poprawę jakości modelowania batymetrycznego, co zostało zweryfikowane za pomocą zdjęć satelitarnych z systemu Sentinel-2.

Bibliografia

- Bhatt, G., Kumar, M., i Duffy, C. J. (2014). A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework. *Environmental Modelling & Software*, 62, 70–84.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.003>
- Bin, L., i Chih-Hao, H. (2006). Comparison between ARPA radar and AIS characteristics for vessel traffic services. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(3), 182–189.
<https://doi.org/10.51400/2709-6998.2072>
- Bossard, M., Faranec, J., i Otahel, J. (2000). Raport: *Corine land cover technical guide – Addendum 2000. Technical report No 40*. EEA: Copenhagen.
- Bruniecki, K., Stepnowski, A., Moszyński, M., Łubniewski, Z., Drypczewski, K., Markiewicz, Ł., Kulawiak, M., i Bieliński, T. (2014). Using EO satellite data in Safe City and Coastal

- Zone web-GIS. *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Gdansk, Poland, 2014.
<https://doi.org/10.1109/MIKON.2014.6899843>
- Chybicki, A. (2017a). Mapping South Baltic Near-Shore Bathymetry Using Sentinel-2 Observations. *Polish Maritime Research*, 3(95), 15-25. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0086>
- Chybicki, A. (2017b). Three-dimensional geographically weighted inverse regression (3GWR) model for satellite derived bathymetry using Sentinel-2 observations. *Marine Geodesy*, 41(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/01490419.2017.137317>
- Chybicki, A., Kulawiak, M., i Łubniewski, Z. (2016). Surface and Air Temperature in the Baltic Sea Coastal Area Using Remote Sensing Techniques and GIS. *Polish Maritime Research*, 23 (1), 3–11. <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0001>
- Chybicki, A., Kulawiak, M., i Zinkiewicz, D. (2017). Satellite Remote Observation Data Dissemination For Mobile Devices Using ESA HMA Standards. W: *Geographic Information Systems Conference and Exhibition "GIS ODYSSEY 2017"*, 95–101.
- Chybicki, A., i Łubniewski, Z. (2017). Optimized AVHRR land surface temperature downscaling method for local scale observations: case study for the coastal area of the Gulf of Gdańsk. *Open Geosciences*, 9(1), 419–435. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0032>
- Chybicki, A., Łubniewski, Z., Niedzielko, J., i Ruciński, D. (2013). Application of satellite imagery and GIS tools for land surface temperature estimation and verification. *Hydroacoustics*, 16, 19–28.
- Chybicki, A., i Markiewicz, Ł. (2015). Coastal zone monitoring using Sentinel-1 SAR polarimetry data. *Hydroacoustics*, 18, 25–32
- De Zan, F.; i Monti Guarnieri, A., (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2352–2360.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>
- ESA (2015a). *Copernicus Programme overview*. <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- ESA (2015b). *ESA Sentinel-1 overview*. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1
- ESA (2015c). *ESA Sentinel-1 Scientific Data Hub*. <https://scihub.copernicus.eu/>
- ESA (2015d). *GMES Programme*. https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2012/Global_Monitoring_for_Environment_and_Security_GMESESA
- ESA (2015e). S-1 Toolbox software, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>
- Formetta, G., Antonello, A., Franceschi, S., David, O., i Rigon, R. (2014). Hydrological modelling with components: A GIS-based open-source framework. *Environmental Modelling & Software*, 55, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.019>
- Fotheringham, A. S., Charlton, M. E., i Brunson, C. (1998). Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 30(11), 1905–1927.
<https://doi.org/10.1068/a301905>
- Graham, M., i Shelton, T. (2013). Geography and the future of big data, big data and the future of geography. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 255–261.
<https://doi.org/10.1177/2043820613513121>
- IMO (2015). *AIS system overview*. International Maritime Organization.
<http://www.imo.org/OurWork/Safety/Navigation/Pages/AIS.aspx>
- Kobler, A., i Adamič, M. (2000). Identifying brown bear habitat by a combined GIS and machine learning method. *Ecological Modelling*, 135, 291–300.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00384-7)
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Appl. Opt.* 17(3), 379–383. <https://doi.org/10.1364/AO.17.000379>
- Lyzenga, D. R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and Water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1), 71–82. <https://doi.org/10.1080/01431168108948342>

- Łabuz, T. A. (2015). Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. W: Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer: Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 381–396
- Moszyński, M., Kulawiak, M., Chybicki, A., Bruniecki, K., Bieliński, T., Łubniewski, Z., i Stepnowski, A. (2015). Innovative Web-based Geographic Information System for Municipal Areas and Coastal Zone Security and Threat Monitoring Using EO Satellite Data. *Marine Geodesy*, 38(3), 203–224. <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.969459>
- Pe’eri, S., Parrish, C., Azuike, C., Alexander, L., i Armstrong, A. (2014). Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. *Marine Geodesy*, 37, 293–314.
- Pijanowski, B. C., Tayyebi, A., Doucette, J., Pekin, B. K., Braun, D., i Plourde, J. (2014). A big data urban growth simulation at a national scale: Configuring the GIS and neural network based Land Transformation Model to run in a High Performance Computing (HPC) environment. *Environmental Modelling & Software*, 51, 250–268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.015>
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350–365. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.023>
- Stulp, F., i Sigaud, O. (2015). Many regression algorithms, one unified model: A review. *Neural Network*, 69, 60–79. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2015.05.00>
- Stumpf, R. P., Holderied, K., i Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48, 547–556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Su, H., Liu, H., i Heyman, W. D. (2008). Automated Derivation of Bathymetric Information from Multi-Spectral Satellite Imagery Using a Non-Linear Inversion Model. *Marine Geodesy*, 31, 281–298. <https://doi.org/10.1080/01490410802466652>
- Szymtkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L. M., Okrój, T., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Różyński, G., i Skaja, M. (2000). Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data. *Coastal Engineering*, 40(2), 119–139. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00008-9)
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modeling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013>
- Tien Bui, D., Bui, Q.-T., Nguyen, Q.-P., Pradhan, B., Nampak, H., i Trinh, P. T. (2017). A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.002>
- Torres, R. i in. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Žróbek-Sokolnik, A., Dynowski, P., Stańczuk-Gałwiaczek, M., Kryszk, H., Kurowska, M., Dudzińska, M., Kocur-Bera, K., Chybicki, A., Bruniecki, K., i Kulawiak, M. (2014). *Application of geographic information system tools in a broad natural science*. Nacionalna knjižnica: Zagreb, Croatia.

Rozdział 6. Modelowanie hydrodynamiczne akwatorium portu morskiego w Gdyni za pomocą modelu GEMSS

Tomasz Berezowski, Kristoffer Kalbekken, Eirik Tenningen

Wprowadzenie

Zarządzanie obszarem portowym wymaga odpowiednich narzędzi do oceny stanu portu w czasie rzeczywistym i analizy realistycznych scenariuszy. Najczęściej takim narzędziem może być model hydrodynamiczny z funkcjami symulacji transportu. Obecnie istnieje kilka zestawów do modelowania, które pozwalają na takie analizy, z których niektóre z najbardziej popularnych to: DELFT-3D, MIKE 3 czy GEMSS. Chociaż dla każdego z tych modeli istnieje wiele zastosowań w różnych aspektach modelowania wybrzeży i portów, wybrano model GEMSS (*Generalized Environmental Modelling System for Surface Waters*) ze względu na jego wcześniejsze zastosowania w Porcie Gdynia i na Morzu Bałtyckim.

Model GEMSS został wykorzystany do oceny różnych aspektów modelowania Morza Bałtyckiego. Ważnym zastosowaniem było poszerzenie wiedzy na temat stratyfikacji termicznej i zasolenia wód w Morzu Bałtyckim (Dargahi i in., 2017). Ponadto Dargahi (2022) wykorzystał GEMSS do oceny poziomów rozpuszczonego tlenu (DO). Jak wykazano w tym badaniu, poziomy DO różni się sezonowo i w zależności od głębokości wody, podczas gdy te symulowane wzorce są zgodne z zakwitami glonów wykrytymi za pomocą teledetekcji. Vigouroux i in. (2016) przeprowadzili symulację obiegu składników odżywczych w dwunastu basenach Morza Bałtyckiego przy użyciu hydrodynamiki symulowanej przez model GEMSS. Chociaż rozdzielczość przestrzenna analizy była niewielka, wyniki pokazują bardzo dobrą zgodność czasową stężenia azotu i fosforu.

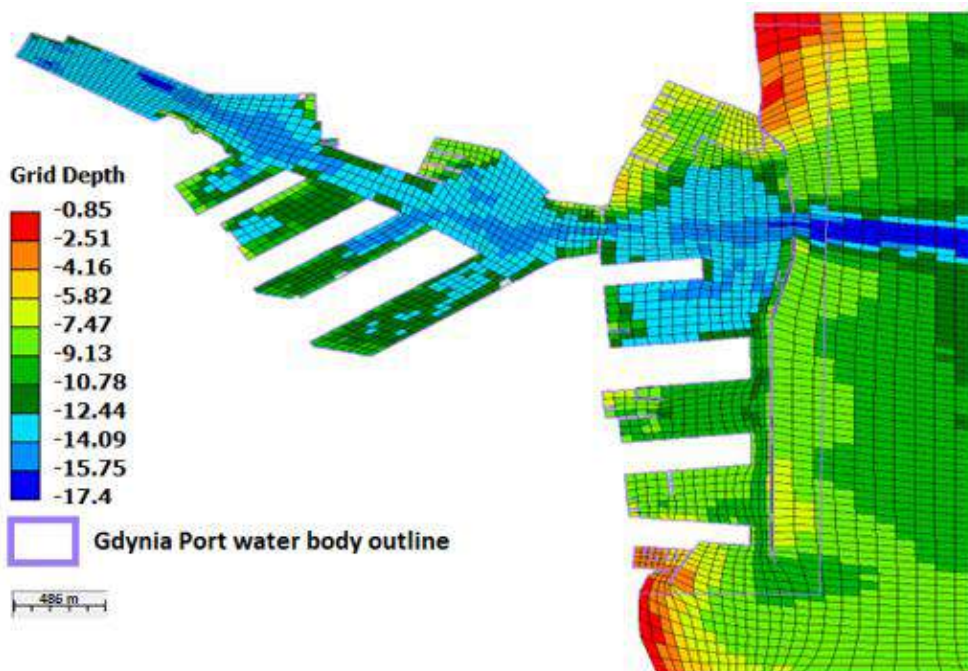
Do tej pory istniało tylko jedno zastosowanie modelu GEMSS w basenie Portu Gdynia (Reichel i in., 2015). To studium przypadku pokazało, że model GEMSS może symulować prądy morskie z niskim błędem i może być włączony do systemu operacyjnego czasu rzeczywistego. Od tego czasu Port Gdynia zaktualizował swoje narzędzia monitorujące i zastosował czujnik spółki MIROS do pomiaru prądów morskich, wysokości wody i badań meteorologicznych. Spółka MIROS przeprowadziła nowe pomiary batymetryczne i opracowała nowy system informatyczny do zarządzania danymi w ramach projektu pt. *System nadzoru i obserwacji portów morskich z wykorzystaniem mobilnych bezzałogowych jednostek badawczych* (MPSS). Ze względu na wszystkie te zmiany konieczne było zastosowanie nowej wersji modelu GEMSS. W niniejszym rozdziale podsumowano jego rozwój, kalibrację i walidację, a także przedstawiono potencjalne zastosowania i ograniczenia przy stosowaniu najnowszego modelu.

Opracowanie modelu

Siatka modelu i batymetria

Pierwszym krokiem w opracowaniu modelu jest zawsze skonstruowanie siatki modelowania. Siatka modelowania w projekcie została zbudowana w dwóch akwenach, tj. akwatorium Portu Gdynia i wodach Zatoki Gdańskiej. Rozszerzenie siatki modelowania poza obszar Portu Gdynia na obszar Zatoki Gdańskiej było konieczne dla zachowania odpowiedniej hydrodynamiki akwenu w pobliżu granicy portu oraz przy falochronach. Siatkę modelowania przedstawiono na rysunku 6.1. Składa się ona z 3077 elementów w warstwie górnej oraz łącznie z 15 warstw pionowych. Każda warstwa pionowa ma głębokość 1,227 m, co pozwala na pokrycie całej batymetrii Portu Gdynia i jego okolic.

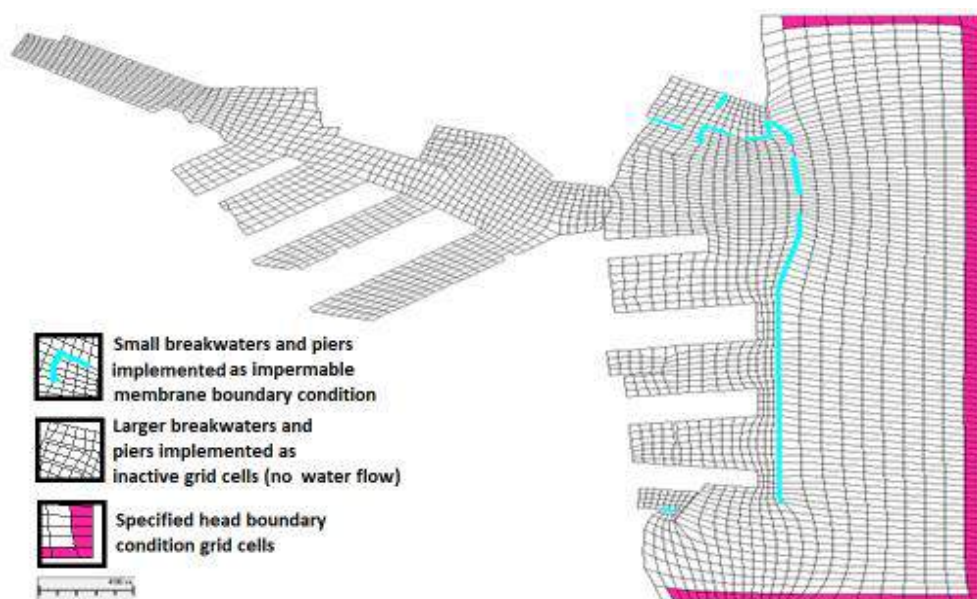
Batymetria w Porcie Gdynia została dostarczona przez Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A. (ZMPG S.A.) jako gęsta chmura punktów wyników pomiarów w formacie *.xyz. Na obszarach nieobjętych pomiarami wykorzystano dane batymetryczne z geoportalu Centralnej Bazy Danych Geologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego. Batymetria została interpolowana w modelu GEMSS przy użyciu metody Kriging z limitem wyboru punktów 500 m i współczynnikiem 1,5. Zastosowano wygładzanie batymetrii zapobiegające powstawaniu dziur w siatce modelu.



Rysunek 6.1. Siatka modelu GEMSS dla Portu Gdynia wraz z batymetrią (opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych od ZMPG S.A.)

Warunki brzegowe

W modelu zastosowano dwa typy warunków brzegowych. Po pierwsze, określenie zmiennego w czasie poziomu wody zostało zastosowane na wschodniej, południowej i północnej granicy sekcji akwenu Zatoki Gdańskiej poza akwenem portu (rysunek 6.2). W tym warunku brzegowym dane o poziomie wody były dostarczane w każdym kroku czasowym na podstawie pomiarów poziomu wody z czujnika MIROS. Zmiany poziomu wody w czasie wymusiły wpływ związków jakości wody do domeny modelu, a także wymusiły prądy wodne. Poziomy wody na początku symulacji były inicjowane równomiernie z odpowiedniego warunku brzegowego. Drugim rodzajem warunku brzegowego zastosowanego w modelu była wewnętrzna granica membrany. Jest to ściana wewnątrz komórek siatki modelowania, która blokuje przepływ wody. Ten warunek brzegowy został wykorzystany do modelowania małych falochronów i pirsów w porcie (Kolluru i in., 1999). Zaletą tego warunku brzegowego jest to, że pozwala on na symulację braku przepływu wody przez małe elementy, co nie byłoby możliwe przy standardowym rozmiarze siatki. Lokalizacje obu warunków brzegowych przedstawiono na rysunku 6.2.



Rysunek 6.2. Lokalizacja warunków brzegowych i objaśnienie cech siatki (opracowanie własne)

W modelu wykorzystano dane meteorologiczne ze stacji MIROS-Edge zlokalizowanej na terenie portu. Dotyczyły one temperatury powietrza, ciśnienia powietrza, kierunku wiatru, prędkości wiatru i wilgotności względnej. Takie sformułowanie danych meteorologicznych pozwoliło na uwzględnienie obliczeń powierzchniowej wymiany ciepła przy użyciu metody „*Term by Term*”. Wiatr został uwzględniony w obliczeniach hydrodynamicznych i umożliwił obliczenie efektu falowania.

Warunki początkowe dla modułu transportu zostały pobrane z początkowego kroku czasowego warunku brzegowego dla każdej symulacji. Temperatura i zasolenie zostały wykorzystane w modelu bezpośrednio do symulacji właściwości wody, podczas gdy stężenie barwnika zostało wykorzystane do symulacji czasu wymiany wody na obszarze portu. Zmienne w czasie zasolenie i temperatura wody zostały podane w warunkach brzegowych na podstawie pomiarów przeprowadzonych w ramach projektu na obszarze portu. Aby zwiększyć rozdzielczość czasową zestawu danych warunków brzegowych, został on udoskonalony za pomocą danych wyjściowych modelu HIROMB (Funkquist, 2001) dla Morza Bałtyckiego.

Procesy hydrodynamiczne

Szczegółowa symulacja trójwymiarowych (3D) procesów hydrodynamicznych w GEMSS jest realizowana przy użyciu uogólnionego, wzdłużno-boczno-pionowego modelu hydrodynamicznego i transportowego (*Generalized, Longitudinal-Lateral-Vertical Hydrodynamic and Transport, GLLVHT*) (Edinger i Kolluru, 1999). Model wykorzystywał warunki przyspieszenia pionowego i siły Coriolisa. Współczynnik naprężenia wiatru został obliczony przy użyciu metody Wu (1983). Schemat modelowania transportu to *Upwind First Order*. Gęstość wody obliczono metodą Gilla (1982, s. 599–603) z uwzględnieniem ściśliwości. Tarcie denne obliczono przy użyciu metody Chezy'ego ze stałym współczynnikiem Chezy'ego oszacowanym podczas kalibracji modelu. Pionowa dyspersja pędu została obliczona przy użyciu schematu 0-Equation, a długość mieszania została oszacowana przy użyciu zależności von Karmana. Współczynnik dyspersji pędu w kierunkach X i Y obliczono za pomocą zależności Okuba ze współczynnikiem 0,00584 i wykładnikiem 1,1. Współczynnik dyfuzji transportowej w kierunkach X i Y obliczono za pomocą zależności Prandtla, a liczba Prandtla wynosiła 10. Model fal został obliczony przy użyciu Teorii Fal z Metodą Roossa.

Transport i jakość wody

Jakość wody w modelu GEMSS została obliczona przy użyciu trzech modułów: transportu, transportu sedymentacyjnego i jakości wody. Moduł transportu był domyślnym modułem modelu i umożliwiał symulację temperatury wody, zasolenia i stężenia barwnika. Model transportu osadów umożliwił symulację stężenia osadów wynikającego z napływu osadów i procesów dennych, takich jak sedymentacja i resuspensja. Do modułu jakości wody wykorzystano zmodyfikowany model WASP5 WQDPM. Pozwala on na symulację pierwotnej produktywności w oparciu o stężenie składników chemicznych, takich jak amoniak (NH_3), azotany (NO_3), fosforany (PO_4), tlen rozpuszczony i ich pochodne, a także właściwości fizyczne atmosfery i wody. Model ten skutecznie oblicza wszystkie istotne procesy wymagane w projekcie, takie jak nityfikacja, denityfikacja, mineralizacja, wzrost fitoplanktonu.

Kalibracja i walidacja modelu

Dane wymuszające

Dane wymuszające do warunków brzegowych dla okresu kalibracji (w dniach 16–30 czerwca 2022 r.) zostały oparte na pomiarach przeprowadzonych w ramach projektu na terenie portu przy użyciu czujników MIROS. Zastosowano dwa okresy weryfikacji. Pierwszy, w którym zweryfikowano poziomy wody i prądy, trwał od 1 lipca do 22 lipca 2022 roku. W tym okresie zestaw danych wymuszających był taki sam jak w okresie kalibracji. Długość tego okresu była ograniczona dostępnością ciągłych danych o prądach wodnych z czujnika MIROS i nie mogła zostać przedłużona.

Drugi okres weryfikacji opierał się na dostępności danych z próbkowania wody w basenie Portu Gdynia. Próbkę wody pobrano podczas czterech kampanii w okresie od 28 lutego 2022 r. do 20 października 2022 r. Ze względu na brak danych w pomiarach MIROS symulacje w tym okresie walidacji zostały wymuszone wyłącznie przez zmienne w czasie zasolenie, temperaturę i wysokość wody z danych wyjściowych modelu HIROMB dla Morza Bałtyckiego.

Procedura kalibracji

Kalibracja modelu została przeprowadzona w okresie od 16 do 30 czerwca 2022 r. Parametrem modelu, który został skalibrowany, był współczynnik Chezy'ego [$\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$], który reprezentuje tarcie denne i jest najważniejszym parametrem do symulacji hydrodynamiki. Procedura kalibracji polegała na wielokrotnym uruchomieniu modelu z wartościami Chezy w zakresie od $C = 10$ do $C = 90$. Celem kalibracji było zminimalizowanie średniego błędu bezwzględnego (MAE) między obserwowanymi i symulowanymi prędkościami prądu i wysokością wody w polu widzenia czujnika MIROS-Wavex (prąd wody) oraz w lokalizacji czujnika MIROS-RangeFinder (wysokość wody). MAE jest określony równaniem:

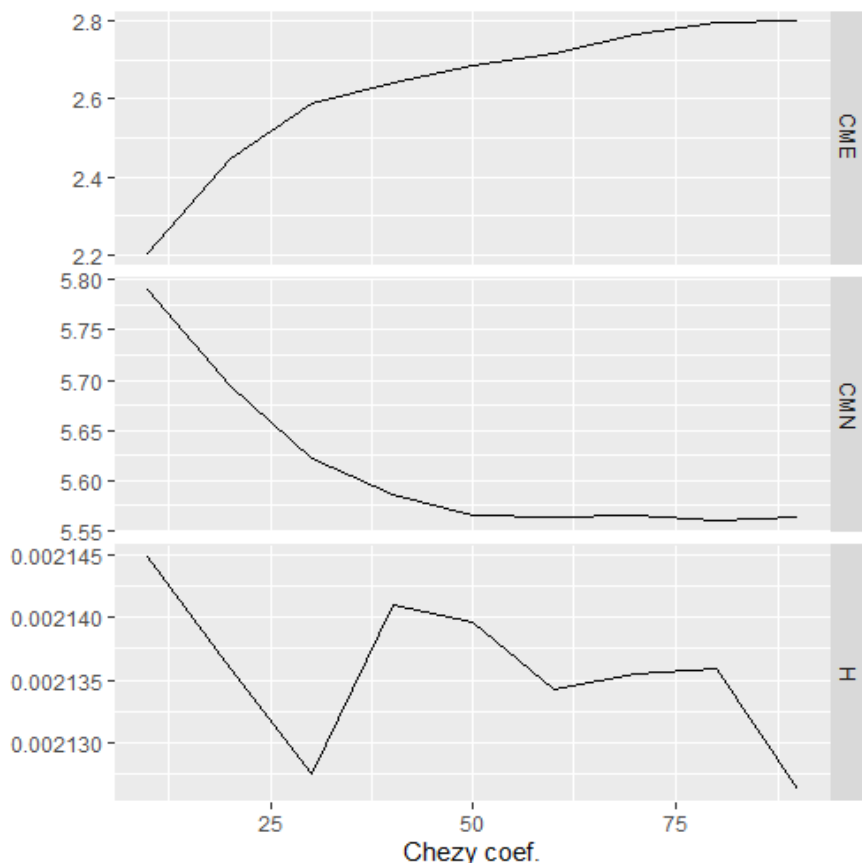
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |v_i^o - v_i^s|}{N},$$

gdzie v_i^o to obserwowana wartość, a v_i^s to symulowana wartość w kroku czasowym i z N wszystkich kroków czasowych. Spośród wszystkich pomiarów prądu wody MIROS zostały wybrane tylko te o stosunku sygnału do szumu (SNR) większym lub równym 7. Stało się tak, ponieważ zamierzano skalibrować model przy użyciu danych najlepszej jakości. Po odfiltrowaniu SNR do kalibracji pozostały 892 pomiary MIROS. Wykorzystano wszystkie pomiary wysokości wody, ponieważ nie miały one wpływu na niski poziom SNR. Pomiary MIROS i dane wyjściowe modelu zostały uśrednione w 1-godzinnym przedziale czasowym, tak jak w modelu GEMSS, w celu wykorzystania dokładnie tych samych przedziałów czasowych w obu zmiennych do obliczenia MAE.

Wyniki kalibracji

Wynikowy MAE dla każdej zmiennej różniący się wartościami współczynnika Chezy'ego przedstawiono na rysunku 6.3. Różne właściwości wody zachowywały się nieco inaczej przy zmienności współczynnika Chezy'ego, ale wartości MAE były

niewielkie w całym zakresie. Dlatego wybrano współczynnik Chezy'ego $30 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ jako optymalny dla wszystkich zmiennych.

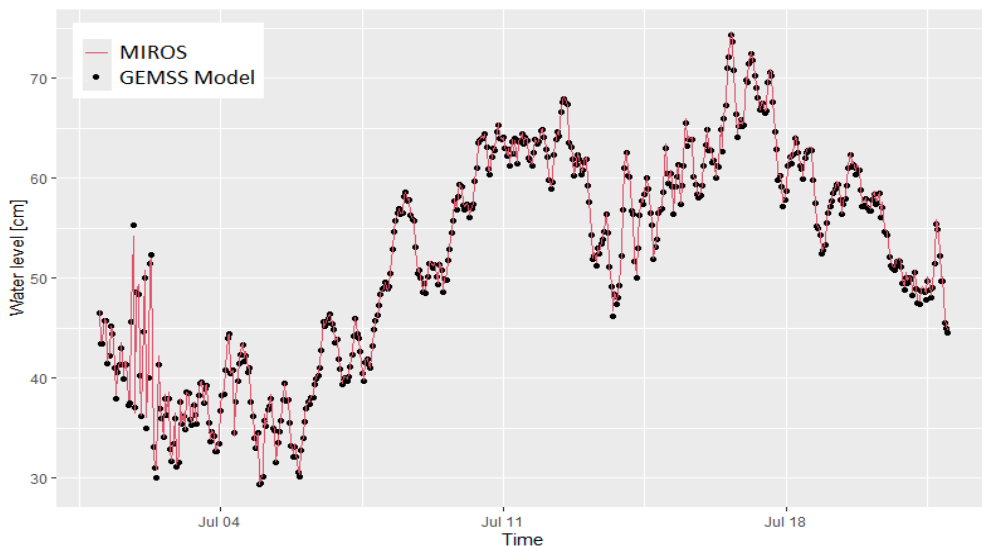


Rysunek 6.3. MAE kalibracji dla prądu wody w kierunku wschodnim (CME) [cm s^{-1}], prądu wody w kierunku północnym (CMN) [cm s^{-1}] i poziomu wody (H) [m] w funkcji współczynnika Chezy'ego MAE obliczono między obserwacjami MIROS a symulacjami modelu GEMSS w okresie 16–30 czerwca 2022 r. (opracowanie własne)

Walidacja symulowanych poziomów wody i prądów

Walidację symulowanych poziomów wody i prądów przeprowadzono przy użyciu MAE, tak jak w przypadku kalibracji, ale okres walidacji trwał od 1 lipca do 22 lipca 2022 roku. Wartości błędów wynosiły dla prądu wody w kierunku wschodnim $\text{MAE} = 3,67 \text{ cm/s}$, dla prądu wody w kierunku północnym $\text{MAE} = 7,23 \text{ cm/s}$, a dla poziomu wody $\text{MAE} = 0,0024 \text{ m}$ (lub $0,24 \text{ cm}$). Model bardzo dobrze dopasował obserwacje MIROS w czasie, z wyjątkiem okresów o największych zmianach wysokości na początku symulacji (rysunek 6.4). Powodem, dla którego błąd prądów wodnych w kierunku północnym jest około dwa razy większy niż w kierunku wschodnim jest to, że większość prądów wodnych na granicy Zatoki Gdańskiej i Portu Gdynia występuje na osi wschód-zachód, podczas gdy prądy północ-południe stanowią mniejszość. Takie zachowanie jest częściowo spowodowane dominacją wiatrów zachodnich i położeniem

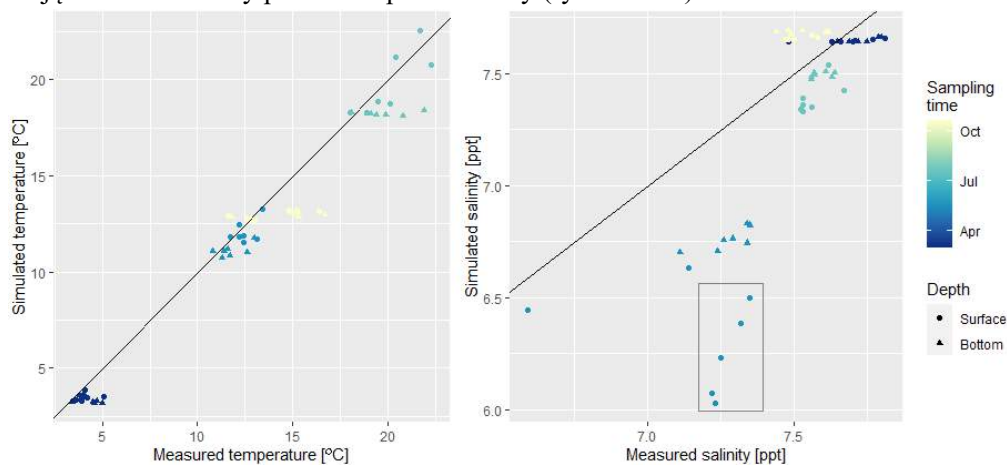
portu w Zatoce Gdańskiej. W rezultacie mniejsza zmienność prądów w kierunku północnym była symulowana z większymi błędami przez model GEMSS.



Rysunek 6.4. Symulowane (GEMSS) i obserwowane (MIROS) szeregi czasowe danych poziomu wody w punkcie pomiarowym MIROS w jednolitej części wód Portu Gdynia w okresie walidacji od 1 do 22 lipca 2022 r. (opracowanie własne)

Walidacja symulowanego zasolenia i temperatury wody

Walidację symulowanego zasolenia i temperatury wody przeprowadzono przy użyciu MAE, jak w kalibracji, ale okres walidacji trwał od 28 lutego 2022 r. do 20 października 2022 r. Wykonano ją dla zasolenia wody $MAE = 0,258$ ppt, a dla temperatury wody $MAE = 1,05^{\circ}C$. Symulowana temperatura i zasolenie wody bardzo dobrze odzwierciedlają czasowe zmiany pomiarów próbek wody (rysunek 6.5).



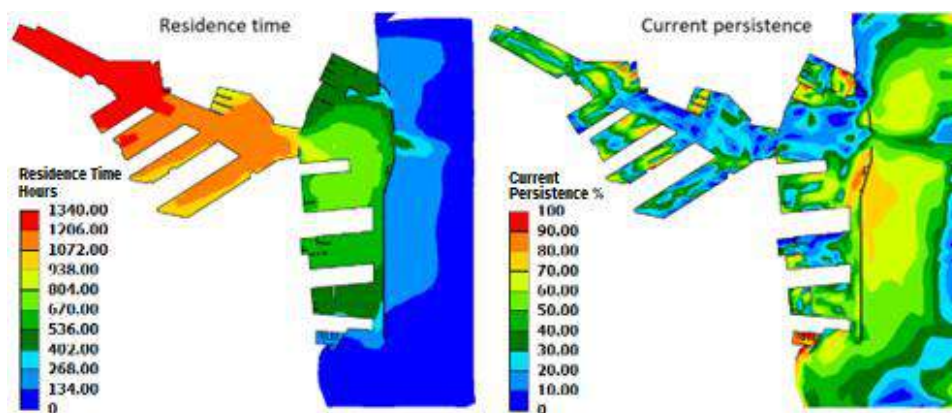
Rysunek 6.5. Porównanie symulowanej i zmierzonej temperatury i zasolenia wody w Porcie Gdynia w okresie od 28 lutego 2022 r. do 20 października 2022 r. Prostokąt w prawym panelu wskazuje wartości odstające zasolenia. Linia 1:1 jest oznaczona czarnym kolorem (opracowanie własne)

W przeciwieństwie do temperatury, symulacje zasolenia wykazują pięć wartości odstających w basenach portowych III, V i VI dla kampanii pomiarowej w maju 2023 r. (rysunek 6.5 – prostokąt). Te niedoszacowane wartości odstające występują tylko w symulacjach zasolenia, w warstwie powierzchniowej i tylko w jednej kampanii pomiarowej. Dlatego ich prawdopodobną przyczyną może być lokalne zanieczyszczenie wody, które wpłynęło na pomiary poprzez zwiększone zasolenie, ale nie zostało zasympulowane przez model.

Zastosowania modelu

Odpowiednio skalibrowany model może służyć jako cenne narzędzie do zarządzania portem, wspomaganie decyzji i analizy scenariuszy. Biorąc pod uwagę, że moduły modelu są odpowiednio zwalidowane, a dane są dostępne, model GEMSS pozwala analizować: prędkość przepływu i zmienność poziomu wody, jakość wody i rozwój glonów, sedymentację i erozję oraz inne parametry w sposób rozłożony przestrzennie i na wybranych głębokościach wody.

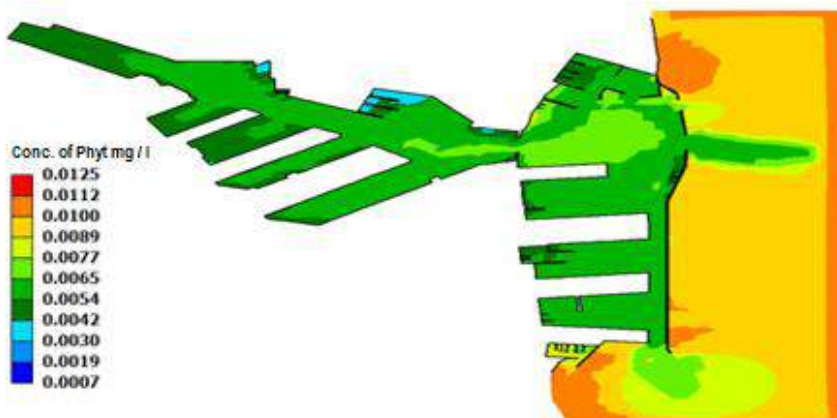
Model GEMSS dla Portu Gdynia umożliwia analizę zmiennych w czasie poziomów wody i prądów morskich w oparciu o dane MIROS. Funkcja ta może być przede wszystkim przydatna do oceny prądów morskich w basenie w czasie rzeczywistym, biorąc pod uwagę warunki hydrodynamiczne na granicy portu. Może to uwidocznić, zwłaszcza w ekstremalnych warunkach, czy prądy mogą stanowić zagrożenie dla manewrowania statkami lub wykorzystania infrastruktury portu. Długoterminowe symulacje prądów morskich mogą być również przydatne do analizy trwałości prądu lub czasu przebywania wody w basenie portowym (rysunek 6.6). Wyniki te podkreślają przestrzenne i czasowe wzorce hydrodynamiki akwatorium portu i mogą być wykorzystywane jako wsparcie decyzyjne.



Rysunek 6.6. Czas przebywania (lewy; spadek początkowego stężenia poniżej 20% początkowego poziomu w słupie wody) i utrzymywanie się prądu (prawy; poziom zmian prądu w czasie) w Porcie Gdynia symulowany przez model GEMSS (opracowanie własne)

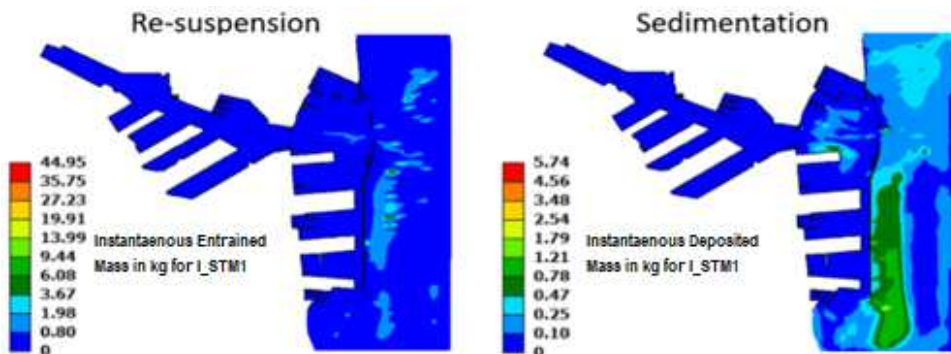
Symulacje jakości wody GEMSS pokazują inne aspekty funkcjonowania portu niż symulacje hydrodynamiki. Jakość wody w GEMSS koncentruje się głównie na cyrkulacji składników odżywczych, stężeniach rozpuszczonego tlenu i pierwotnej produktyw-

ności lub rozwoju glonów. Choć symulacje te charakteryzują się większą niepewnością niż symulacje hydrodynamiczne, ze względu na brak walidacji składników odżywczych (zwalidowano tylko zasolenie i temperaturę), można je wykorzystać w analizie scenariuszy. Taka analiza scenariuszy może być wykorzystana do zilustrowania warunków brzegowych (hydrologicznych, meteorologicznych lub stężeń składników odżywczych), w jakich mogą wystąpić niepożądane warunki na obszarze portu (niedotlenienie, zakwit glonów) (np. rysunek 6.7).



Rysunek 6.7. Przykładowe dane wyjściowe modelu GEMSS ilustrujące wzorce stężenia glonów w warunkach odpływu stosunkowo czystej wody z basenu portowego (opracowanie własne)

Dane o transporcie osadów i erozji mają podobne zastosowanie jak dane wyjściowe GEMSS dotyczące jakości wody. Ponieważ moduł transportu osadów nie został zwalidowany, jest on przydatny tylko w symulacjach scenariuszowych, które mogą podkreślać jedynie ogólne wzorce sedymentacji lub erozji. Niemniej jednak takie dane wyjściowe mogą być bardzo przydatne na przykład do wskazania punktów o dużej intensywności tych procesów lub do określenia ogólnych trendów. Zastosowanie takich analiz polega głównie na optymalizacji lokalizacji i częstotliwości pogłębiania portów (rysunek 6.8).



Rysunek 6.8. Przebieg resuspensji (lewy) i sedymentacji (prawy) chwilowej osadów w Porcie Gdynia dla osadów 500 µm w stężeniu 12 mg/l (opracowanie własne)

Kolejną zaletą modelu GEMSS z modułami hydrodynamicznymi, jakości wody i transportu jest analiza wpływu rozwoju portu na ekosystem morski w bezpośredniej bliskości infrastruktury hydrotechnicznej. Zastosowaniem tego może być na przykład testowanie, w jaki sposób nowe moło lub falochron zakłóci obecne wzorce sedymentacji i erozji lub prądy morskie przy wejściu do portu. Innym zastosowaniem może być testowanie wpływu nowego wlotu wody burzowej na składniki wody i rozwój glonów. W rzeczywistości, w zależności od zastosowania, można opracować wiele podobnych scenariuszy wspomagających podejmowanie decyzji. Należy jednak wziąć pod uwagę wyniki walidacji prądów hydrodynamicznych przedstawione w tym rozdziale, fakt, że moduły sedymentacji i jakości wody nie zostały zwalidowane oraz fakt, że w modelu może brakować niektórych procesów, które są obecne w środowisku, ale nie są zaimplementowane w symulacjach (np. opady deszczu lub ruch statków itp.). Dlatego użytkownik modelu i menedżerowie muszą zawsze brać pod uwagę że przedstawione w niniejszym dokumencie wyniki obarczone są wysokim ładunkiem ryzyka.

Podsumowanie

Wnioski z badań prowadzonych z użyciem modelowania hydrodynamicznego do identyfikacji kierunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w basenach portu w Gdyni wskazują na możliwość szerokiego zastosowanie modelu GEMSS do wspomagania procesów decyzyjnych i analizy scenariuszy w zakresie wykorzystania i planowania rozwoju infrastruktury hydrotechnicznej w porcie. Przedstawione symulacje poziomów wody i prądów morskich pozwalają na ocenę prądów morskich w czasie prawie rzeczywistym, co może być szczególnie ważne dla bezpiecznej nawigacji statków w porcie. Symulacje jakości wody i transportu osadów mogą być użyte do analizy skutków rozwoju portu oraz oceny warunków zanieczyszczenia jego akwatorium. Model GEMSS może być również użytecznym narzędziem do testowania różnych scenariuszy w celu optymalizacji lokalizacji i częstotliwości pogłębiania akwenów portowych.

Użytkownicy modelu i menedżerowie muszą mieć jednak na względzie wysoki poziom ryzyka wynikający z braku możliwości walidacji niektórych modułów oraz z ewentualnego braku uwzględnienia niektórych procesów w symulacjach. Mimo to, dobrze skalibrowany i zwalidowany model GEMSS stanowi wartościowe narzędzie wspierające procesy podejmowania decyzji dotyczących wykorzystania i rozwoju infrastruktury hydrotechnicznej w portach (co wykazano na przykładzie Portu Gdynia).

Bibliografia

- Dargahi, B. (2022). Lagrangian Coherent Structures and hypoxia in the Baltic Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 97, 101–286. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2022.101286>
- Dargahi, B., Kolluru, V., i Cvetkovic, V. (2017). Multi-layered stratification in the Baltic Sea: Insight from a modeling study with reference to environmental conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(1), 2–26. <https://doi.org/10.3390/jmse5010002>
- Edinger, J. E., i Kolluru, V.S. (1999). Implementation of vertical acceleration and dispersion terms in an otherwise hydrostatically approximated three-dimensional model. W: *ASCE*

- estuarine and coastal modeling: Proceedings of the 6th international conference, November 3–5, 1999, New Orleans, Louisiana.* American Society of Civil Engineers: Reston, VA.
- Funkquist, L. (2001). HIROMB, an operational eddy-resolving model for the Baltic Sea. *Biuletyn Instytutu Morskiego w Gdańsku*, 28(2), 7–16. <https://doi.org/01.3001.0008.8044>
- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*. University of Cambridge: Cambridge, England.
- Kolluru, V. S., Buchak, E. M., i Wu, J. (1999). Use of membrane boundaries to simulate fixed and floating structures in GLLVHT, ASCE. W: *Estuarine and Coastal Modeling*, 485–500.
- Reichel, M., Abramowicz-Gerigk, T., Burciu, Z., Burka, M., Czepczynski, M., Hajdel, J., i Tengberg, A. (2015). Safeport: on-board visualization of hydro-meteorological effects on ferries entering and berthing the port of Gdynia, Poland. W: *Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference*. Engineers Australia and IP-ENZ: Auckland, New Zealand, 457–461. <https://search.informit.org/doi/epdf/10.3316/informit.726131019882124>
- Vigouroux, G., Cvetkovic, V., i Jönsson, A. (2016). Carbon-based nutrient cycling modeling of the Baltic Sea: Analysis of twelve basins using three-dimensional flow dynamics for period 2001–2009. W: M. Reckermann, S. Köppen (red.), *Multiple drivers for Earth system changes in the Baltic Sea region*. Geesthacht, Germany, 64–65.
- Wu, J. (1983). Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *Journal of Physical Oceanography*, 13(8), 1441–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1983\)013<1441:SDDCIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<1441:SDDCIB>2.0.CO;2)

Rozdział 7. Problemy związane z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich

Bohdan Pac, Bartosz Langowski

Wprowadzenie

Bezzałogowe platformy nawodne można potraktować jako złożone systemy operujące na powierzchni morza, stanowiące zbiór wewnętrznie uporządkowanych elementów, działających jako funkcjonalna całość. Zastosowanie ich do prowadzenia badań w portach morskich ma swoje uzasadnienie, ponieważ je ułatwiają. Niemniej wdrożenie takich platform do działalności operacyjnej na terenie akwatorium, we wskazanych obszarach zadaniowych, jest związane z rozwiązaniem wielu problemów organizacyjnych, technicznych i administracyjnych. W rozdziale zostaną zaprezentowane potencjalne i rzeczywiste problemy wraz z ich oceną kwalitologiczną, opracowaną na podstawie wyników badań dla projektu pt. *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych*, obejmujących m.in. wykonywanie pomiarów hydrograficznych, badań sonarowych oraz automatyczny pobór próbek wody i osadów.

Identyfikacja i ocena problemów związanych z wykorzystaniem w portach morskich bezzałogowych platform nawodnych wymagały wykonania szeregu zadań badawczych, takich jak:

- analiza i selekcja pozycji literatury przedmiotu w zakresie wykorzystania bezzałogowych platform nawodnych oraz nauk o zarządzaniu i jakości;
- zestawienie i analiza wyników przeprowadzonych badań;
- identyfikacja zbioru problemów związanych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych w realizacji usług zdefiniowanych w ramach realizowanego projektu;
- dobór właściwych metod i narzędzi typowych dla nauk o zarządzaniu i jakości, koniecznych do projekcji problemów oraz ich właściwej oceny kwalitologicznej;
- zastosowanie powyższej metodyki do przedmiotu badań, tj. ocena testowanej platformy w kontekście zdefiniowanych problemów i poszukiwanie metody ich rozwiązania;
- ustalenie wniosków i rekomendacji.

Przegląd literatury przedmiotu

Zagadnienia związane ze szczegółowym wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich oraz rozwiązywaniem związanych z tym problemów nie zostały dotąd opisane szczegółowo w rodzimej literaturze, ze względu na innowacyjny charakter tego rozwiązania. Natomiast informacje dotyczące ogólnej funkcjonalności tych platform dostępne są zarówno w rodzimych pozycjach monograficznych (Miętkiewicz, 2018; Kitowski, 2012), jak i zagranicznych (Roberts

i Sutton, 2006; Hanggi 2009). Odnoszą się one do rozwoju techniki tych platform, jak i ich klasyfikacji ze względu na:

- wyporność jednostek (małe < 1 tony; średnie < 100 ton; duże < 1000 ton; bardzo duże > 1000 ton);
- ich położenie (jednostki nawodne, podwodne i półzanurzalne) (Bremer i in. 2007, s. 1);
- zakres kontroli bezzałogowej (jednostki zdalnie sterowane oraz pojazdy autonomiczne);
- obszar zadaniowy (bojowe, rozpoznawcze i ratownicze).

W zakresie oceny kwalitologicznej problemów wiążących się z wykorzystaniem bezzałogowych platform badawczych w portach morskich należy skorzystać literatury z obszaru nauk o zarządzaniu i jakości (Kolman, 2013; Stabryła, 2006). Identyfikacja problemów związanych z eksploatacją opisywanych urządzeń w portach jest możliwa z wykorzystaniem diagramu Ishikawy, służącego do identyfikacji i grupowania przyczyn występowania problemów (Starzyńska i in., 2010, s. 24). U podstaw jego stosowania leży założenie, iż określony skutek jest wywoływany nie przez jedną, ale przez zbiór przyczyn, które dają się uporządkować w pewne grupy. Oceny istotności poszczególnych problemów w ramach zidentyfikowanych grup można dokonać za pomocą analizy AHP (*Analytic Hierarchy Proces*) (Saaty, 1980). Kolejną kwestią jest kompleksowa ocena prezentowanego rozwiązania, tj. bezzałogowej platformy nawodnej, w kontekście realizowanych zadań, która wymaga określenia, w jaki sposób będą lub są neutralizowane potencjalne lub rzeczywiste problemy związane z jej wykorzystaniem. Przyczyny mogą mieć charakter techniczny, organizacyjny lub prawny. Oceny tej można dokonać za pomocą badania eksperckiego z kontrolą spójności opinii ekspertów, wykorzystując wybrane rozwiązania statystyczne (Wasilewska, 2011, s. 168). Ostatni punkt, to porównanie osiągniętych wyników do wzorcowej oceny sprawdzającej, co można uzyskać m.in. za pomocą wykresu radarowego.

Metodyka postępowania

Do identyfikacji problemów dotyczących wykorzystania bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich zastosowano metodę dedukcji, czyli podejście od ogółu do szczegółu. W związku z powyższym postępowanie podzielono na cztery etapy o różnym stopniu złożoności (rysunek 7.1).

Etap 1 polegał na dokładnym zdefiniowaniu problemu, który należy rozwiązać. Problem ten dotyczył możliwości zastosowania platformy (HydroDron-1) do realizacji zadań badawczych w portach morskich (w szczególności w Porcie Gdynia), które w konwencjonalny sposób są wykonywane przez zespoły odpowiednio wykwalifikowanych pracowników. Problem został zidentyfikowany na podstawie założeń projektu: „System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych”.

Etap 2 polegał na określeniu zespołu przyczyn problemu, jaki występuje w realizowanym procesie, czyli zdefiniowaniu głównych grup przyczyn problemu wykorzystania HydroDronu-1 do badania akwenów portowych w Gdyni. Zakres badań

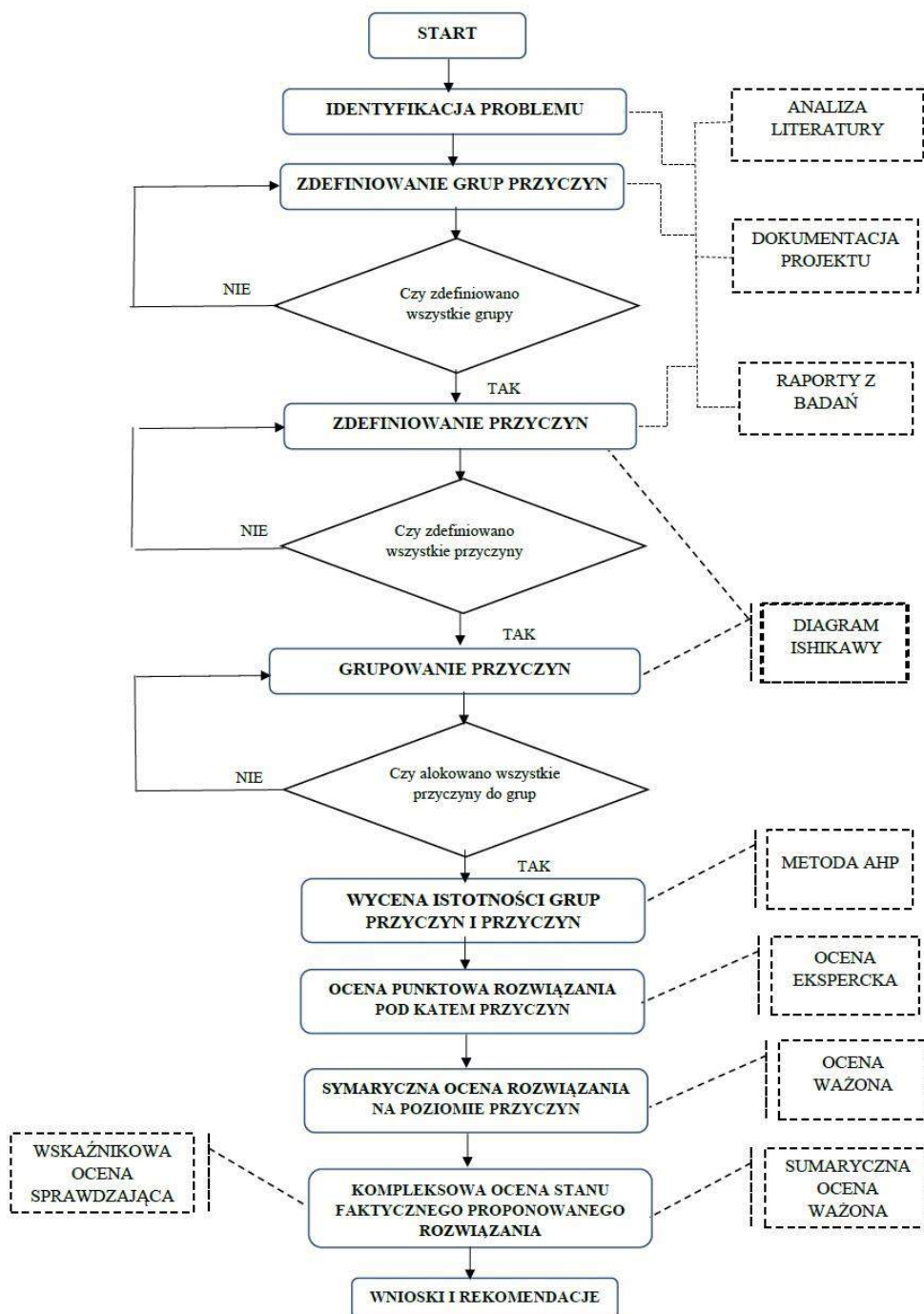
prowadzonych z wykorzystaniem opisywanego urządzenia, w ramach przedmiotowego projektu, umożliwił wyodrębnienie zagadnień (grup przyczyn) (I_i), dotyczących:

- personelu obsługującego urządzenie – I_1 ;
- charakterystyki operacyjno-technicznej urządzenia – I_2 ;
- przepisów i procedur, związanych z wykorzystaniem Hydrodronu-1 – I_3 ;
- wsparcia logistycznego podczas eksploatacji platformy nawodnej – I_4 ;
- środowiska pracy platformy nawodnej – I_5 ;
- obszarów zadaniowych – I_6 .

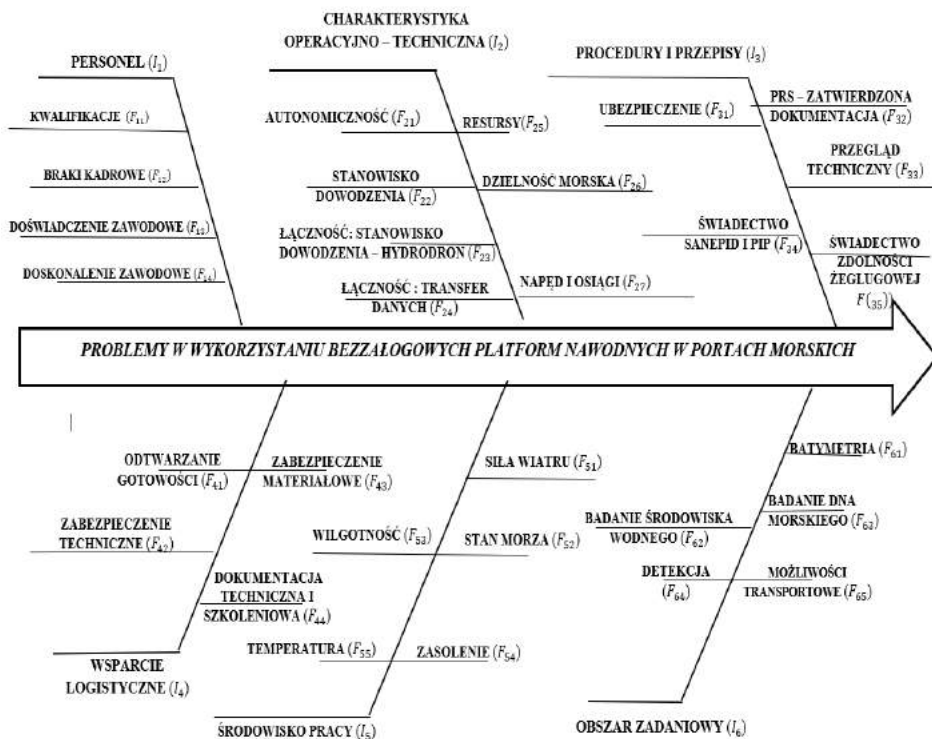
Identyfikację grup przyczyn problemów związanych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych platform badawczych w portach morskich przeprowadzono przy zastosowaniu diagramu Ishikawy. W praktyce zarządzania procesami lub organizacjami spotyka się wiele problemów, których neutralizacja polega na podjęciu działań zapobiegawczych lub/i naprawczych. Niemniej jednak podjęcie tych działań wymaga znajomości przyczyn powstających problemów. Identyfikacja przyczyn musi być odpowiednio uporządkowana. Należy wyodrębnić przyczyny o największym znaczeniu i znaleźć związki między nimi. Zastosowanie przedmiotowej metody ma swój początek w etapie drugim i kontynuację w etapie trzecim, gdzie następuje uszczegółowienie przyczyn.

Etap 3 polegał na uszczegółowieniu przyczyn problemów z eksploatacją Hydrodronu-1. Na podstawie prowadzonych badań, podyktowanych założeniami projektu, ich wyników oraz burzy mózgów w zespole badawczym zidentyfikowano dla każdej grupy (I_i), przyczyny (F_{ij}) mogące być źródłem problemów z wykorzystaniem bezzałogowej platformy nawodnej w zakresie działań zdefiniowanym przez projekt. Proces identyfikacji przyczyn problemów oraz ich alokacji do poszczególnych grup został przedstawiony na rysunku 7.2. Trzeba podkreślić, że najważniejszą cechą diagramu Ishikawy jest graficzna prezentacja wzajemnych powiązań przyczyn wywołujących dany problem. Kompleksowe podejście do zagadnienia pozwala zdefiniować je jako barierę w wykorzystaniu bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich.

Etap 4 polegał na analizie wyników i wnioskowaniu. Po sporządzeniu diagram został poddany szczegółowym analizom z wykorzystaniem narzędzi typowych dla nauk o zarządzaniu i jakości.



Rysunek 7.1. Metodyka postępowania badawczego w procesie identyfikacji przyczyn problemów z wykorzystaniem USV do celów badawczych w portach morskich (opracowanie własne)



Rysunek 7.2. Diagram Ishikawy przedstawiający przyczyny problemów z wykorzystaniem bezałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 do celów badawczych w portach morskich (opracowanie własne)

Tabela 7.1. Przyjęta skala preferencji – analiza AHP (opracowanie własne na podstawie (Bozarth i Handfield, 2006))

Hierarchia pierwszeństwa	Hierarchia podporządkowania
1 – brak pierwszeństwa	1 – brak pierwszeństwa
2 – wartość pośrednia między 1 a 3	$\frac{1}{2}$ – wartość pośrednia między 1 a $\frac{1}{3}$
3 – nieznaczące pierwszeństwo	$\frac{1}{3}$ – nieznaczące podporządkowanie
4 – wartość pośrednia między 3 a 5	$\frac{1}{4}$ – wartość pośrednia między $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{5}$
5 – wyraźne pierwszeństwo	$\frac{1}{5}$ – nieznaczące podporządkowanie
6 – wartość pośrednia między 5 a 7	$\frac{1}{6}$ – wartość pośrednia między $\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{7}$
7 – bardzo wyraźne pierwszeństwo	$\frac{1}{7}$ – bardzo wyraźne podporządkowanie
8 – wartość pośrednia między 7 a 9	$\frac{1}{8}$ – wartość pośrednia między $\frac{1}{7}$ a $\frac{1}{9}$
9 – bezdyskusyjne pierwszeństwo	$\frac{1}{9}$ – bezdyskusyjne podporządkowanie

W pierwszej fazie dokonano oceny istotności poszczególnych grup przyczyn problemów, a następnie alokowanych do nich przyczyn szczegółowych. Oceny tej doko-

nano za pomocą analizy AHP. Analiza AHP polega na zdefiniowaniu współczynników wagowych dla każdej z badanych wielkości, poprzez wzajemne porównywanie ich parami w oparciu o określoną skalę preferencji (tabela 7.1). Do wyznaczenia współczynników wagowych wykorzystano stosowne narzędzie informatyczne, tj. kalkulator AHP.

Definiowanie relacji pomiędzy poszczególnymi grupami przyczyn wymagało zachowania pewnej konsekwencji w stawianych ocenach, które odzwierciedlały opinię na temat istotności badanych grup przyczyn problemów. W związku z powyższym należało zbadać o spójność tych opinii za pomocą indeksów i wskaźników konsekwencji zgodnie z zależnościami:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (1)$$

gdzie:

$C.I.$ – indeks konsekwencji, dla $\lambda_{max} = m$,

λ_{max} – maksymalna wartość własna macierzy porównań dla m porównywanych obiektów (grup przyczyn),

m – liczba porównywanych obiektów (grup przyczyn).

Następnie, na podstawie wyliczonej wartości $C.I.$, obliczono wartość współczynnika konsekwencji $C.R.$:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (2)$$

gdzie $R.I.$ – losowy indeks, którego wartości są uzależnione od liczby porównywanych ze sobą grup przyczyn. Jeżeli relacja $C.R. \leq 0,1$, to warunek konsekwencji porównań jest spełniony (Saaty, 1980).

Identyczną procedurę zastosowano na poziomie poszczególnych przyczyn w ramach zdefiniowanych grup przyczyn, badając wspomniane indeksy i współczynniki dotyczące konsekwencji wyrażonych opinii. W efekcie otrzymano współczynniki wagowe odzwierciedlające istotność poszczególnych przyczyn dla problemów związanych z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych do celów badawczych w portach morskich.

W kolejnej fazie wykorzystano metodykę umożliwiającą ocenę sposobu, w jaki zastosowane rozwiązanie, związane z wykorzystaniem HydroDronu-1 w porcie morskim na obecnym etapie realizacji projektu MPSS, zapobiega lub neutralizuje przyczyny generujące problem z jego wykorzystaniem. Metodyka ta została oparta na ocenie eksperckiej, gdzie stopień zapobiegania/neutralizacji poszczególnych przyczyn został oszacowany na podstawie przyjętej skali (tabela 7.2). Skala ocen skorygowanych wynika z uśrednienia ocen eksperckich.

Tabela 7.2. Przyjęta skala neutralizacji przyczyn problemów związanych z wykorzystaniem HydroDronu-1 w porcie morskim (opracowanie własne)

Ocena eksperta	Ocena skorygowana	Opis oceny
0	0	Brak szansy na likwidację przyczyny
1	$0 < \text{ocena} \leq 1,5$	Mała szansa na neutralizację przyczyny
2	$1,5 < \text{ocena} \leq 2,5$	Średnia szansa na neutralizację przyczyny
3	$2,5 < \text{ocena} \leq 3,5$	Duża szansa na neutralizację przyczyny
4	$3,5 < \text{ocena} \leq 4,5$	Stopień neutralizacji akceptowalny
5	$4,5 < \text{ocena} \leq 5,5$	Stopień neutralizacji dobry
6	$5,5 < \text{ocena} \leq 6,0$	Stopień neutralizacji w pełni zadowalający

W związku z tym, że projekt ma charakter pilotażowy, badanie możliwości neutralizacji przyczyn problemów związanych z eksploatacją urządzenia ma również charakter pilotażowy. Zespół ekspercki składał się z pracowników naukowych i technicznych zaangażowanych w realizację przedmiotowego projektu. Rezultatem zastosowanej metodyki są oceny stopnia zaawansowania neutralizacji poszczególnych przyczyn problemów, wyrażone w postaci średniej arytmetycznej ocen kolejnych ekspertów, która została zweryfikowana w oparciu o wyniki badania spójności ich opinii.

$$\bar{O}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n=10} O_{ij}}{n}, \quad (3)$$

gdzie:

\bar{O}_i – średnia arytmetyczna ocen eksperckich odnosząca się do i -tej przyczyny;

O_{ij} – ocena j -tego eksperta dotycząca i -tej przyczyny, gdzie $j = \overline{1, n}$; n – całkowita liczba ekspertów.

Weryfikację ocen eksperckich przeprowadzono w oparciu o wartość kompleksowego współczynnika zmienności (tabela 7.3), obliczoną według zależności:

$$v_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{O}_i}, \quad (4)$$

gdzie:

v_{ij} – kompleksowy współczynnik zmienności;

σ_{ij} – odchylenie standardowe ocen eksperckich dla i -tej przyczyny (Wasilewska, 2011, s. 168).

Tabela 7.3. Skala akceptacji kompleksowego współczynnika zmienności (opracowanie własne)

Wartość v_i	Interpretacja
$v_{ij} \leq 0,2$	Poziom zadowalający
$0,2 < v_{ij} \leq 0,4$	Poziom akceptowalny
$v_{ij} > 0,4$	Poziom nieakceptowalny

Tabela 7.4. Metodyka obliczeń ocen zweryfikowanych na poziomie przyczyn (opracowanie własne)

		Ocena poziomu neutralizacji poszczególnych przyczyn dla HydroDronu 1																																		
		I ₁				I ₂								I ₃				I ₄				I ₅				I ₆										
		F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₂₁	F ₂₂	F ₂₃	F ₂₄	F ₂₅	F ₂₆	F ₂₇	F ₂₈	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃	F ₃₄	F ₃₅	F ₄₁	F ₄₂	F ₄₃	F ₄₄	F ₅₁	F ₅₂	F ₅₃	F ₅₄	F ₅₅	F ₆₁	F ₆₂	F ₆₃	F ₆₄	F ₆₅				
Eksperci / Oceny ekspertów – O _{ij}																																				
E ₁																																				
E ₂																																				
E ₃																																				
...																																				
E ₁₀																																				
ΣO _{ij}																																				
\bar{O}_i																																				
δ_i																																				
$\delta_{ij} = \frac{\delta_i}{\bar{O}_i} \times 100\%$																																				
$\frac{O_i^{ver}}{O_i}$																																				
(the verified values)																																				

Przy spełnieniu warunku $v_i \leq 0,4$, przyjęto, że wartość średniej arytmetycznej oceny eksperckiej \bar{O}_i jest zweryfikowana i wykorzystana do dalszych obliczeń jako \bar{O}_i^{ver} . Przyjęte zakresy skali akceptacji (tabela 7.3) wynikają z pilotażowego charakteru projektu. Metodykę obliczeń dotyczących fazy 2 zaprezentowano w tabeli 7.4.

Sumaryczna ocena HydroDronu-1 pod względem neutralizacji problemów związanych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych platform badawczych w portach morskich jest możliwa dzięki agregacji ocen cząstkowych na poziomie poszczególnych przyczyn, a następnie na poziomie grup przyczyn. I tak sumaryczna ocena poziomu poszczególnych przyczyn jest obliczana według zależności:

$$WF_{ij} = W_{ij} \bar{O}_{ij}^{ver}, \quad (5)$$

gdzie:

WF_{ij} – wartość ważona w zakresie j -tej przyczyny lokowanej do i -tej grupy przyczyn;

W_j – współczynnik wagowy istotności j -tej przyczyny lokowanej do i -tej grupy przyczyn, wyznaczony wg. analizy AHP, przy warunku C.R. $\leq 0,1$;

\bar{O}_{ij}^{ver} – ocena zweryfikowana j -tej przyczyny w i -tej grupie przyczyn.

Wartość sumaryczna na poziomie grupy przyczyn obliczono z zależności:

$$WI_i = W_i \sum_{j=1}^k WF_{ij}, \quad (6)$$

gdzie:

WI_i – wartość ważona na poziomie i -tej grupy przyczyn;

W_i – współczynnik wagowy istotności i -tej grupy przyczyn, wyznaczony wg analizy AHP, przy warunku C.R. $\leq 0,1$.

$\sum_{i=1}^k WF_{ij}$ – wartość sumaryczna ważonych ocen przyczyn alokowanych do i -tej grupy.

Sumaryczna wartość stopnia neutralizacji problemów związanych z wykorzystaniem HydroDronu-1 w portach morskich została obliczona jako:

$$WP_{total} = \sum_{i=1}^6 WI_i, \quad (7)$$

gdzie WP_{total} – wartość sumaryczna (ocena całkowita) HydroDronu-1 stopnia neutralizacji problemów związanych z jego wykorzystaniem w portach morskich.

Obliczenie wskaźnika jakości dla rozwiązania (HydroDronu-1) na poziomie i -tej grupy przyczyn zgodnie z zależnością:

$$Q_i = \frac{WI_i}{WI_i^{maks}}, \quad (8)$$

gdzie WI_i^{maks} – wskaźnikowa ocena sprawdzająca na poziomie i -tej grupy przyczyn, gdy wszystkie przyczyny osiągają wartość $\bar{O}_{ij}^{ver}=6$;

Q_i – wskaźnik jakości na poziomie i -tej grupy przyczyn.

Obliczenie sumarycznego wskaźnika jakości rozwiązania (problemów HydroDronu-1) w aspekcie neutralizacji problemów związanych z wykorzystaniem w portach morskich zgodnie z zależnością:

$$Q = \frac{WP_{total}}{WP_{total}^{maks}}, \quad (9)$$

gdzie:

Q – sumaryczny wskaźnik jakości rozwiązania;

WP_{total}^{maks} – wskaźnikowa ocena sprawdzająca, dla której wszystkie przyczyny osiągają wartość $\overline{O_{ij}^{ver}} = 6$.

Rezultaty postępowania

Wyniki przeprowadzonego postępowania prezentują dwie tabele, a mianowicie:

1) tabela 7.5 zawierająca:

- zestawienie przyczyn alokowanych do poszczególnych grup;
- współczynniki wagowe W_{ij} na poziomie przyczyn, wyznaczone w oparciu o wyniki analizy AHP;
- oceny zweryfikowane na poziomie przyczyn – $\overline{O_{ij}^{ver}}$, obliczone na podstawie ocen eksperckich, zgodnie z przyjętą procedurą;
- wartości ważone przyczyn WF_{ij} (zob. wzór 10);
- wartości sumaryczne ważonych ocen przyczyn alokowanych do poszczególnych grup;

2) tabela 7.6 zawierająca:

- zestawienie grup przyczyn powodujących problemy z wykorzystaniem pływających bezzałogowych platform badawczych w portach morskich;
- współczynniki wagowe W_i na poziomie grup przyczyn, wyznaczone w oparciu o wyniki analizy AHP;
- wartości sumaryczne ocen ważonych przyczyn alokowanych do poszczególnych grup $\sum WF_{ij}$.
- wartości sumaryczne na poziomie grup przyczyn WI_i (zob. wzór 6);
- sumaryczną ocenę HydroDronu-1 w zakresie neutralizacji problemów z wykorzystaniem tego urządzenia w portach morskich WP_{total} (zob. wzór 7);
- wskaźnikowe oceny sprawdzające na poziomie grupy przyczyn: WI_i^{maks} ;
- wskaźniki jakości rozwiązania (problemów HydroDronu-1) na poziomie grup przyczyn Q_i (zob. wzór 8);
- sumaryczny wskaźnik jakości rozwiązania (problemów HydroDronu-1) w zakresie neutralizacji problemów z wykorzystaniem w portach morskich (zob. wzór 9).

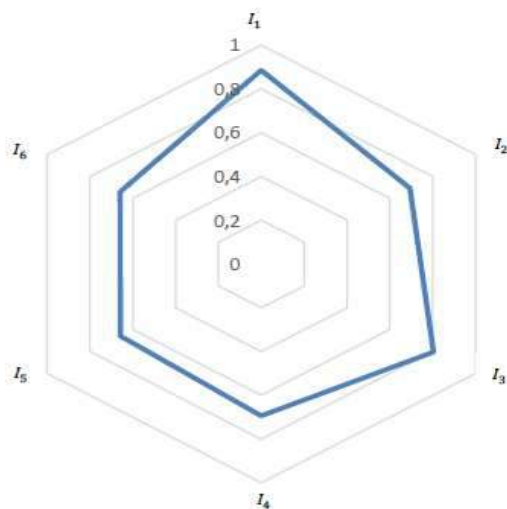
Graficzna interpretacja wyników (rysunek 7.3) została przedstawiona z wykorzystaniem wykresu radarowego (Starzyńska i in., 2010, s. 94–95), który umożliwił monitorowanie osiągniętych przez HydroDron-1 wyników pod kątem neutralizacji przyczyn oraz ich grup, generujących problemy z wykorzystaniem platformy w porcie morskim. Wykres radarowy pozwala określić, jak bardzo osiągnięte wyniki odbiegają od założonego poziomu optymalnego.

Tabela 7.5. Zestawienie wyników na poziomie przyczyn problemów (opracowanie własne)

PRZYCZYNY	WSPÓŁCZYNNIK WAGOWY NA POZIOMIE PRZYCZYNY	OCENA ZWERYFIKOWANA PRZYCZYNY	WARTOŚĆ WAŻONA PRZYCZYNY	PRZYCZYNY	WSPÓŁCZYNNIK WAGOWY NA POZIOMIE PRZYCZYNY	OCENA ZWERYFIKOWANA PRZYCZYNY	WARTOŚĆ WAŻONA PRZYCZYNY
1	2	3	4	5	6	7	8
GRUPA PRZYCZYNY: PERSONEL – I ₁				GRUPA PRZYCZYNY: WSPARCIE LOGISTYCZNE – I ₄			
W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	
FF ₁₁	0,3919	5,9	2,312	FF ₄₁	0,3250	4,6	1,495
FF ₁₂	0,3203	4,9	1,569	FF ₄₂	0,3250	4,7	1,527
FF ₁₃	0,1439	4,8	0,691	FF ₄₃	0,1266	4,1	0,519
FF ₁₄	0,1439	5,1	0,734	FF ₄₄	0,2234	2,8	0,625
$\sum WF_{ij}$			5,306	$\sum WF_{ij}$			4,166
GRUPA PRZYCZYNY: CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNO-OPERACYJNA – I ₂				GRUPA PRZYCZYNY: ŚRODOWISKO PRACY – I ₅			
	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}		W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}
FF ₂₁	0,2386	5,7	1,360	FF ₅₁	0,2085	3,9	0,813
FF ₂₂	0,1323	4,2	0,556	FF ₅₂	0,3697	4,1	1,516
FF ₂₃	0,1411	4,1	0,578	FF ₅₃	0,1831	3,7	0,677
FF ₂₄	0,2386	4,4	1,049	FF ₅₄	0,1284	3,8	0,488
FF ₂₅	0,1151	4,3	0,495	FF ₅₅	0,1103	4,1	0,452
FF ₂₆	0,0518	4,2	0,217				
FF ₂₇	0,0825	4,3	0,354				
$\sum WF_{ij}$			4,609	$\sum WF_{ij}$			3,946
GRUPA PRZYCZYNY: PARAMETRY I PRZEPISY – I ₃				GRUPA PRZYCZYNY: OBSZAR ZADANIOWY – I ₆			
	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}		W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}
FF ₃₁	0,1762	5,1	0,899	FF ₆₁	0,3697	4,2	1,553
FF ₃₂	0,3133	4,2	1,316	FF ₆₂	0,1831	4,0	0,732
FF ₃₃	0,0986	4,0	0,394	FF ₆₃	0,1284	4,0	0,514
FF ₃₄	0,0986	4,1	0,404	FF ₆₄	0,2085	4,0	0,834
FF ₃₅	0,3133	5,8	1,817	FF ₆₅	0,1103	2,9	0,319
$\sum WF_{ij}$			4,830	$\sum WF_{ij}$			3,952

Tabela 7.6. Wskaźniki jakości HydroDronu-1 w obszarze badanych problemów (opracowanie własne)

GRUPY PRZYCZYŹYŃ	WSPÓŁCZYNNIK WAGOWY NA POZIOMIE GRUP PRZYCZYŹYŃ	WARTOŚĆ SUMARYCZNA WAŻONYCH OCEN PRZYCZYŹYŃ W KOLEJNYCH GRUPACH	WARTOŚĆ WAŻONA NA POZIOMIE GRUP PRZYCZYŹYŃ	WSKAŹNIKOWA OCENA SPRAWDZAJĄCA NA POZIOMIE GRUP PRZYCZYŹYŃ	WSKAŹNIK JAKOŚCI NA POZIOMIE GRUP PRZYCZYŹYŃ	SUMARYCZNY WSKAŹNIK JAKOŚCI HYDRIDRONU-1
	W_i	$\sum WF_{ij}$	WI_i	WI_i^{maks}	$Q_i = \frac{w_i}{w_i^{maks}}$	$Q = \frac{WP_{total}}{WP_{total}^{maks}}$
I_1	0,1323	5,306	0,702	0,793	0,885	0,734
I_2	0,2645	4,609	1,219	1,587	0,768	
I_3	0,0825	4,83	0,398	0,495	0,804	
I_4	0,1411	4,166	0,588	0,846	0,694	
I_5	0,1151	3,946	0,454	0,692	0,658	
I_6	0,2645	3,952	1,045	1,587	0,659	
$WP_{total} = \sum WI_i$			4,406	$WP_{total}^{maks} = 6,0$		



Rysunek 7.3. Graficzna interpretacja wyników na poziomie grup przyczyn problemów (opracowanie własne)

Podsumowanie

Podsumowując wyniki przeprowadzonego postępowania badawczego, należy pamiętać, że wykorzystanie bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 do badań batymetrii, środowiska morskiego i dna morskiego na obszarze akwatorium Portu Gdynia odbywa się w ramach realizacji projektu pilotażowego. Uzyskane wyniki w zakresie obszaru zadaniowego ($Q_6 = 0,734$) plasują badane urządzenie na poziomie dobrym. Jediną niezadowolającą jego cechą są możliwości transportowe, co wynika z jego skromnych rozmiarów oraz przeznaczenia. Pozostałe zadania realizowane podczas badań zostały wykonane, mimo pewnych usterek technicznych notowanych na testowanym pojeździe, co nie jest czymś dyskwalifikującym w przypadku tego typu badań.

W zakresie procedur i przepisów zasadniczym problemem, który może budzić pewne zastrzeżenia, jest kwestia ubezpieczenia pojazdu, co wynika z obowiązujących przepisów prawnych i konwencji międzynarodowych. Pojazd został ubezpieczony jako wyposażenie, a nie jako jednostka pływająca. Wynika to z ograniczeń, jakie narzuca Konwencja w sprawie międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu z 1972 r., sporządzona w Londynie dnia 20 października 1972 r. Pozostałe potencjalne przyczyny zostały rozwiązane przez podmiot będący właścicielem testowanego urządzenia na poziomie zadowolającym.

Wsparcie techniczne, realizowane w ramach ewentualnej umowy serwisowej (z wykorzystaniem outsourcingu), wymagałoby stworzenia kompleksowych instrukcji szkoleniowych oraz techniczno-ruchowych, zawierających specyfikę przeglądów technicznych, remontów okresowych, awaryjnych itp. Obecnie, tj. na etapie programu pilotażowego, tego rodzaju działania są wykonywane przez producenta HydroDronu-1.

Czynniki dotyczące środowiska pracy na terenie akwatorium portowego (gdzie jest eksploatowany HydroDron-1) nie stwarzają obecnie większych problemów związanych z realizacją zadań.

Istotnym zagadnieniem są kwalifikacje zaplecza kadrowego. Problemy w zakresie obsady personalnej dotyczą:

- posiadania przez etatową obsadę uprawnień stermotorzysty, łączących specjalności mechanika i nawigatora;
- hydrografa morskiego kategorii A.

Na obecnym etapie problem ten jest rozwiązany dzięki kwalifikacjom posiadanym przez producenta.

Charakterystyka operacyjno-techniczna pojazdu, działającego w środowisku pracy, którym jest akwatorium portowe, pozwala na realizację wyznaczonych zadań. Potencjalnym problemem mogą być pewne zakłócenia w transferze danych między pojazdem a stanowiskiem brzegowym, wynikające ze specyfiki konstrukcji akwatorium.

Podsumowując wyniki badań związanych z wykorzystaniem bezzałogowej platformy nawodnej, jaką jest HydroDron-1, do badań akwatorium w Porcie Gdynia, należy stwierdzić, że mimo pilotażowego charakteru realizowanego projektu, zastosowanie jednostki w przedmiotowym zakresie nie sprawia poważnych problemów. Przede wszystkim specyfika urządzenia umożliwia realizację przewidzianych dla niego zadań

bez angażowania obsady pokładowej. Perspektywicznie autonomiczne wykorzystanie HydroDronu-1 mogłoby odbywać się zwłaszcza w sytuacji skażenia środowiska, ulatniania się substancji niebezpiecznych z instalacji okrętowych lub zbiorników na jednostkach pływających. Zastosowanie proponowanego rozwiązania nie tylko pozwala na realizację przedsięwzięć z obszaru zadaniowego, ale również na elastyczność wykorzystania takiego wyposażenia ze względu na harmonogram planowanych działań.

Wydaje się, że w przyszłości wykorzystanie nawodnych bezzałogowych platform badawczych mogłoby objąć też zakres zadań związany z dozorem przestrzeni akwatorium portowego. Niemniej tego typu przedsięwzięcia wymagają dodatkowego wyposażenia, co może się wiązać ze zwiększeniem gabarytów takiej jednostki pod względem wyporności, a także mocy układu napędowego i zasilania.

Bibliografia

- Bozarth, C., i Handfield, R.B. (2006). *Introduction to operations and supply chain management*. Pearson Education Inc.
- Bremer R.H., Cleophas P.L.H., Fitski H.J., Keus D. (2007). *TNO report: Unmanned Surface and Underwater Vehicles*. TNO Defence Security and Safety The Hague. Netherlands.
- Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., Spidarelli, E., Verrugio, G., Sortini, A., i Capodaglio, G. (2005). Sampling sea Surface with SESAMO: an autonomous craft for the study of sea – air interactions. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12, 95–105.
- Hanggi, T. (2009). *Design of an autonomous Sampling Boat for the study of Algae Bloom in Lake Zurich*. Swiss Federal Institute of Technology: Zurich.
- Kitowski, Z. (2012). Autonomiczny bezzałogowy pojazd nawodny „Edredon”. *Polish Hyperbaric Research*, 3(40), 7–22.
- Kolman, R. (2013). *Różne odmiany jakości i ich praktyczne wykorzystanie*. PWN: Warszawa.
- Miętkiewicz, R. (2018). *Bezzałogowe platformy morskie. Bezzałogowe jednostki nawodne*. AMW: Gdynia.
- Roberts, G.N., i Sutton, R. (2006). *Advances in Unmanned Marine Vehicles*. The Institution of Electrical Engineers, MPG Books Limited, Kornwalia.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Proces*. McGraw-Hill: New York.
- Stabryła, A. (2006). *Zarządzanie projektami organizacyjnymi i ekonomicznymi*. PWN: Warszawa.
- Starzyńska, B., Hamrol, A., i Grabowska, M. (2010). *Poradnik menedżera jakości. Kompendium wiedzy o narzędziach jakości*. Politechnika Poznańska: Poznań.
- Wasilewska, E. (2011). *Statystyka opisowa od podstaw*. SGGW: Warszawa.

Rozdział 8. Użyteczność bezzałogowej platformy nawodnej do pomiarów wybranych parametrów akwenów portowych w Porcie Gdynia

Tomasz Nowosielski, Marzena Delekta, Justyna Policht

Wprowadzenie

Zarząd Portu Morskiego Portu Gdynia S.A. wraz z czterema partnerami realizuje projekt pt. *System nadzoru i obserwacji portu morskiego z wykorzystaniem mobilnych bezzałogowych platform badawczych (Marine port surveillance and observation system using mobile unmanned research units)*. Dane o uczestnikach przedstawiono w tabeli 8.1 (POLNOR, 2019, s. 1–3).

Tabela 8.1. Podmioty uczestniczące w projekcie POLNOR 0037/2019 (NCBiR 2023, s. 1–5)

Projekt	Podmiot prowadzący	Podmioty uczestniczące	Data rozpoczęcia projektu	Data zakończenia projektu
NOR/POLNOR/ MPSS/003 7/2019-00	Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A	Politechnika Gdańska, Uniwersytet Morski w Gdyni (d. Akademia Morska w Gdyni) Norsk Institutt for Vannforskning, MIROS AS	1.02.2021 r.	1.02.2024 r.

Przedmiotem badań w czasie realizacji projektu było wykorzystanie bezzałogowej mobilnej platformy badawczej do cyklicznych pomiarów wybranych parametrów akwenów portowych w gdyńskim porcie. Pomiary objęły obszary związane z bezpieczeństwem żeglugi oraz jakością wód portowych, a w szczególności:

- głębokości basenów portowych;
- zawartości wody i osadów dennych;
- zawartości w wodach mikroplastiku i dioksyn.

Bezzałogową jednostkę badawczą dostarczyło przedsiębiorstwo Marine Technology Sp. z o.o. z Gdyni, które specjalizuje się w opracowywaniu systemów informatycznych i automatycznych przeznaczonych do wykorzystania w gospodarce morskiej i wojskowości. Jednostka bezzałogowa, pływająca pod nazwą HydroDron-1, powstała dzięki wcześniej realizowanemu projektowi badawczemu tego przedsiębiorstwa. W założeniu konstruktorów jednostka ma służyć do realizacji pomiarów hydrograficznych (Marine Technology, 2023b).

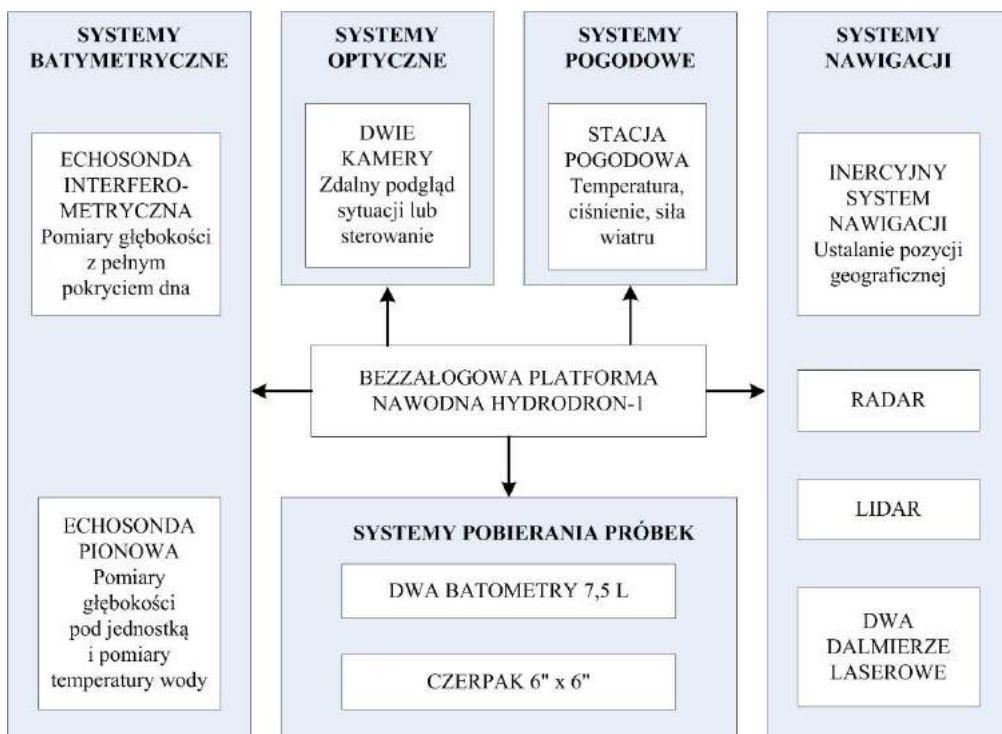
Zasadniczymi celami wykorzystania bezzałogowej platformy nawodnej było zebranie wybranych danych o parametrach akwatorium portowego w Porcie Gdynia i porównanie ich z danymi wzorcowymi, zbieranymi w formie przewidzianej dotychczasowymi akredytowanymi procedurami. Ponadto istotnym zadaniem było też opracowanie metody stałego monitoringu wód portowych przy zastosowaniu tej jednostki.

Charakterystyka bezzałogowej mobilnej platformy badawczej jako narzędzia do zbierania danych hydrograficznych

Jednostka wykorzystywana w projekcie stanowi konstrukcję, która pozwala wykorzystywać różnego rodzaju sensory i czujniki umożliwiające zbieranie danych hydrograficznych. W razie potrzeby może być wyposażona w sprzęt realizujący szersze zadania, np. monitorowanie statków poruszających się po akwenie portu albo kontrolowanie promieniowania radioaktywnego itp. HydroDron-1 jest urządzeniem uniwersalnym, mającym duże możliwości wykorzystania na akwenach niepełnomorskich.

Bezzałogowa platforma nawodna ma, jak wspomniano, charakter uniwersalny, co oznacza, że pozwala na realizację różnych zadań, uwzględniających przemieszczanie się do wyznaczonego rejonu i wykorzystanie sensorów oraz czujników. Dysponuje ona kilkoma systemami umożliwiającymi wykonywanie konkretnych zadań. Podstawowym wymogiem jest możliwość bezpiecznego przemieszczania się po różnych akwenach, którą zapewnia odpowiedni system nawigacyjny (Stateczny i Gierski, 2018, s. 4–5). Dane dostarczane z systemu nawigacji są niezbędne do sterowania jednostką. Jednostka może wykonywać zadania autonomicznie (z wykorzystaniem specjalnie opracowanych algorytmów) lub mogą być wykonywane zdalnie przez jej operatora (Stateczny i Burdziakowski, 2019, s. 33–34). Grupa różnych czujników udostępnia dane w czasie rzeczywistym, co pozwala na bezpieczne nawigowanie na różnych akwenach.

Wyposażenie pokładowe jednostki jest uzależnione od rodzaju prowadzonej misji i może być odpowiednio konfigurowane w zależności od bieżących potrzeb (rysunek 8.1). Jeżeli bezzałogowa platforma nawodna ma prowadzić dozór ruchu statków na danym akwenie, to wykorzystuje się system optyczny i/lub inne urządzenia pozwalające na identyfikację statków. System pogodowy (w oparciu o wskazania pokładowej stacji meteo) przekazuje dane dotyczące podstawowych parametrów charakteryzujących stan pogody (Marine Technology, 2023a). Natomiast w przypadku zadań związanych z pomiarem głębokości akwenów pojazd będzie wykorzystywał do pomiarów odpowiedni system batymetryczny. Podobnie przy zadaniach związanych z dostarczaniem próbek wody i osadów dennych, zostaną użyte systemy przeznaczone do pobierania próbek.



Rysunek 8.1. Systemy pokładowe bezzałogowej platformy nawodnej HydroDron-1 (opracowanie własne na podstawie: (Stateczny i Burdziakowski, 2019, s. 33–36; Stateczny i Gierski, 2018, s. 4–5))

Wielozadaniowość jednostki jest osiągnięta nie tylko poprzez zabudowanie na pokładzie wielu wyspecjalizowanych systemów, ale także dzięki wykorzystaniu modułowej i otwartej architektury oprogramowania (Marine Technology, 2023a). Na podstawie obserwacji działania i zapisanych danych możliwe jest także modyfikowanie oprogramowania, co pozwala wprowadzać usprawnienia funkcjonalne jednostki. Uniwersalność tego urządzenia stanowi ważny atut w procesie długotrwałej eksploatacji, gdyż daje możliwość jej unowocześniania i dostosowywania do zmieniających się wymagań różnych użytkowników. Ponadto zamiana wyposażenia nie stanowi w tym przypadku żadnego problemu, bo samą jednostkę zbudowano w koncepcji modułowej, tzn. w taki sposób, aby przyszłe modyfikacje nie powodowały konieczności głębokiej przebudowy. Na podstawie obserwacji działania i zapisanych danych możliwe jest także modyfikowanie oprogramowania, co pozwala wprowadzać ciągle usprawnienia funkcjonalne pojazdu.

Cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne bezzałogowej mobilnej platformy nawodnej pozwalają na szeroki zakres jej eksploatacji oraz możliwość wykonywania różnych zadań. Jednak ze względu na jej wielkość, rodzaj napędu i system sterowania, istnieją określone ograniczenia związane z dzielnością morską i zasięgiem pływania. HydroDron-1 nie jest dostosowany do akwenów pełnomorskich o dużym falowaniu morza, ponieważ jego masa własna wynosi 300 kg, zaś zanurzenie kadłuba tylko 25 cm

(Marine Technology, 2023a). Ponadto zasięg radiowych systemów sterowania jest ograniczony do 40 km, a transmisja danych pomiarowych do odległości 6 km.

Małe zanurzenie i niewielkie gabaryty własne jednostki pozwalają jej wygodnie manewrować na niewielkiej przestrzeni. Takie zdolności pozwalają realizować różne zadania o charakterze cyklicznym i powtarzalnym, po zakończeniu których konieczne jest uzupełnienie energii elektrycznej w akumulatorach jednostki, wystarczających na ok. 12 godzin rejsu z prędkością 3–4 węzłów. Istotną zaletą HydroDronu-1 są różne tryby sterowania, od autonomicznego, odbywającego się według zaprogramowanej trasy, poprzez tryb autopilota, utrzymującego obrany kurs, na manualnym kończąc, gdzie operator zdalnie przejmuje kontrolę nad pojazdem. Wymienione cechy umożliwiają prowadzenie pomiarów i monitoringu akwatoriów portów morskich, kotwicowisk, zatok, jezior i rzek, gdzie konieczne jest nawigowanie na wcześniej ustalonych trasach, ale z opcją szybkiego przejścia na sterowanie ręczne (Stateczny i Burdziakowski, 2019, s. 2).

Biorąc pod uwagę parametry HydroDronu-1, można wskazać główne obszary jego wykorzystywania na akwenach portowych:

- prowadzenie pomiarów batymetrycznych,
- pobieranie próbek wody i osadów dennych do różnorodnych badań,
- zbieranie danych o zanieczyszczeniu powietrza i poziomie radioaktywności otoczenia,
- pomiary hałasu na terenie portu morskiego,
- monitoring statków w porcie, wspomaganie działań Port State Control,
- monitoring bezpieczeństwa portu pod względem ochrony przeciwpożarowej i koordynacja akcji ratowniczych,
- monitoring bezpieczeństwa portu morskiego.

Prawne aspekty wykorzystywania bezzałogowej jednostki badawczej w pomiarach akwenów portu w Gdyni

W obowiązującej na terenie Rzeczypospolitej Polskiej (RP) ustawie z dnia 18 września 2001 r. – Kodeks morski (t.j. Dz. U. 2023, poz. 1309), a także w innych aktach prawnych regulujących zasady uprawiania żeglugi morskiej i pracy na morzu nie występuje definicja bezzałogowej jednostki morskiej. Stąd też z formalno-prawnej strony wprowadzenie na akwenuy morskie mobilnej platformy badawczej było problemem organizacyjnym. Obowiązujące przepisy nie „nadażają” bowiem za postępem technologicznym. Każdorazowo, przed rozpoczęciem badań, zespół badaczy musiał wypełnić szereg formalności związanych z uzyskaniem zgód na rejsy jednostki bezzałogowej w porcie. Urząd Morski nie ma żadnych przepisów ani procedur regulujących wykorzystanie takich jednostek do badań na akwenach morskich RP. Stąd też w trakcie realizacji projektu pojawiły się pewne trudności z przeprowadzeniem rejsów bezzałogowej mobilnej platformy badawczej, co było związane z ograniczeniami dopuszczenia tego typu urządzeń do żeglugi. Największe zastrzeżenia budził brak operatora na pokładzie jednostki i w związku z tym każdorazowo niezbędny był wniosek do Urzędu Morskiego o zgodę

na rejs. W czasie realizacji projektu zespół badawczy był zmuszony do złożenia 16 wniosków o jednorazową zgodę na rejs HydroDronu-1 po akwenach portu w Gdyni (Raport ZMPG, 2023, s. 1–6). Po rozpatrzeniu wniosków, zgody na poszczególne rejsy wydawał Urząd Morski i jednocześnie nakazywał wprowadzenie specjalnych procedur w trakcie wykorzystywania urządzenia. Trzeba podkreślić, że w trakcie każdej misji bezałogowej platformy nawodnej zamykano dla żeglugi akwen, na którym jednostka się znajdowała, co skutkowało wstrzymaniem normalnego ruchu statków w porcie.

Utrudnienia związane z żeglugą wynikają z braku regulacji dopuszczających żeglugę na akwenach portowych takich urządzeń bezałogowych. Każdorazowo rejsy nietypowych jednostek pływających wymagają zgody Urzędu Morskiego. W czasie realizacji projektu i zbierania danych przez HydroDron-1 konieczne było przygotowanie i złożenie szeregu dokumentów pozwalających na odbycie rejsów.

W przyszłości wykorzystywanie jednostek bezałogowych na akwenach portowych wymaga dostosowania norm prawnych i przygotowania odpowiednich procedur uwzględniających specyfikę techniczną takich pojazdów oraz skutki prawne ich eksploatacji. Istotnym problemem w tym przypadku byłyby skutki prawne kolizji jednostki bezałogowej z innymi statkami lub elementami infrastruktury portowej. Konieczne wydaje się zatem uregulowanie zasad ruchu na morzu jednostek autonomicznych i sterowanych tradycyjnie przez załogę, a także określenie odpowiedzialności cywilnej właściciela albo użytkownika jednostki w razie szkód spowodowanych jej działaniem. Wyniki realizacji projektu mogą stanowić przyczynek do dyskusji nad możliwymi kierunkami rozwoju regulacji prawnych dotyczących jednostek bezałogowych.

Użycie bezałogowej platformy nawodnej do realizacji zaplanowanych badań w czasie realizacji projektu wiązało się z wielokrotnym wodowaniem urządzenia. Jego właściciel, tj. Marine Technology sp. z o.o., wystąpił z inicjatywą zarejestrowania tej jednostki. HydroDron-1 został zarejestrowany 6 lutego 2023 r. w rejestrze administracyjnym polskich statków żeglugi śródlądowej jako łódź z napędem motorowym, która jest przeznaczona do prac hydrograficznych. Jednostka uzyskała numer GD-02-195 i tym samym potwierdzono jej polską przynależność oraz wydano świadectwo zdolności żeglugowej podpisane przez Dyrektora Urzędu Żeglugi Śródlądowej w Bydgoszczy (Ustawa, 2000). Przegląd techniczny jednostki, wykonany 20 lutego 2023 r., zweryfikował stan techniczny jej poszczególnych elementów, w tym między innymi: kadłuba, urządzeń sterowych, kotwicznych, cumowniczych, holowniczych, maszynowych, napędowych i pędników (Rozporządzenie, 2010).

Po stwierdzeniu kompletności i sprawności wyposażenia dronu dopuszczono go do żeglugi, co pozwoliło prowadzić badania na terenie akwenów portowych już bez nadzwyczajnych procedur bezpieczeństwa i każdorazowej zgody Urzędu Morskiego. Jednostkę dopuszczono do żeglugi w czterech rejonach pływania (tabela 8.2).

Tabela 8.2. Dopuszczone rejony pływania bezzałogowej jednostki badawczej HydroDron-1 (Dyrektywa, 2016; Podział europejskich..., 1997, s. 3, 4, 7, 12; Ustawa, 2000, art. 42)

Rejon pływania (UE) 2016/1629	Dokładny obszar (uwzględniono tylko akweny na terytorium Polski)	Wymagania
1.	<p>Część Zatoki:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Pomorskiej - na południe od linii łączącej cypel Nord Perd na wyspie Rugia z latarnią morską Niechorze – Gdańskiej - na południe od linii łączącej latarnię morską Hel z pławą podejściową do portu Bałtyjsk 	<p>Fale o wysokości do 2 m</p> <p>Wykorzystanie jednostki do prac hydrograficznych, hydrotechnicznych</p> <p>Żegluga dzienna</p>
2.	<p>Zalewy: Szczeciński, Kamieński, Wiślany</p> <p>Zatoka Pucka</p> <p>Zbiornik Włocławski</p> <p>Jeziora: Śniardwy, Niegocin, Mamry</p>	<p>Fale o wysokości do 1,2 m</p> <p>Wykorzystanie jednostki do prac hydrograficznych, hydrotechnicznych</p> <p>Żegluga dzienna</p>
3.	<p>Wody portowe w polskich portach morskich</p> <p>Rzeki: Biebrza, Brda, Bug, Nogat, Elbląg, Martwa Wisła, Narew, Noteć, Nysa Łużycka, Odra, Regalica, Parnica, Pisa, Szarpawa, Warta, Przemsza</p> <p>Jeziora: Dąbie, Jeziorak, Szelaż Wielki, Ruda Woda, Bartężek, Ewingi, Gopło, Zegrzyńskie, Dąbie, Roś, Seksty, Mikołajskie, Tałty, Tałtowisko, Kotek, Szymon, Szymoneckie, Jagodne, Boczne, Tajty, Kisajno, Dargin, Łabap, Kirsajty, Ślesińskie, system Wielkich Jezior Mazurskich, Ryńskie, Nidzkie, Beldany, Guzianka Mała, Guzianka Wielka</p> <p>Kanały: Augustowski, Bartnicki, Bydgoski, Elbląski, Gliwicki, Kędzierzyński, Jagielloński, Łączański, Ślesiński, Żerański, Górnonotecki, Węgorzewski, Giżycki, Niegociński, Piękna Góra, w Skawinie</p>	<p>Fale o wysokości do 0,6 m</p> <p>Wykorzystanie jednostki do prac hydrograficznych, hydrotechnicznych</p> <p>Żegluga dzienna</p>
4.	<p>Pozostałe akweny nieuwzględnione w rejonach 1, 2, 3</p>	<p>Wykorzystanie jednostki do prac hydrograficznych, hydrotechnicznych</p> <p>Żegluga dzienna</p>

Rejestracja HydroDronu-1 i dopuszczenie go do żeglugi na wielu akwenach otwiera możliwość wykorzystywania tego urządzenia do różnego rodzaju prac hydrograficznych i hydrotechnicznych. Może prowadzić pomiary głównie na akwenach śródlądowych, rzekach oraz morskich zatokowych i na akwatoriach wszystkich polskich portów morskich. Daje to bardzo szerokie możliwości wykorzystania go już nawet w wersji prototypowej, a w przypadku sprawdzenia się w realizacji różnych zadań istnieje możliwość uruchomienia produkcji seryjnej tego typu jednostek.

Podstawy prawne i metoda pomiarów akwenów portu w Gdyni

Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A. powinien prowadzić cykliczne badania kontrolne stanu wód portowych oraz głębokości akwenów znajdujących się na terenie portu. Obowiązki takie wyznaczają podmiotowi zarządzającemu portem dwa rozporządzenia:

- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem (Rozporządzenie, 2011);
- rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej z dnia 23 października 2006 r. w sprawie warunków technicznych użytkowania oraz szczegółowego zakresu kontroli morskich budowli hydrotechnicznych (Rozporządzenie, 2006).

W pierwszym przypadku zarząd portu jest zobowiązany do prowadzenia okresowych pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku. Obowiązek prowadzenia pomiarów poziomu hałasu w środowisku mają porty morskie, które charakteryzują się roczną zdolnością przeładunkową przekraczającą 10 mln t albo są zlokalizowane na terenach aglomeracji miejskich, czyli sąsiadują z miastami lub/i znajdują się w granicach miast (Rozporządzenie, 2011, §1, §3.1, pkt 1 e). Pomiary hałasu wykonuje się co 5 lat w określonych punktach pomiarowych, zgodnie z rozporządzeniem w sprawie prowadzenia pomiarów wielkości emisji i ilości pobieranej wody (Ustawa 2011, art. 148). Ponadto zarząd portu jest obowiązany do prowadzenia, minimum dwa razy w roku, pomiarów związanych ze wskaźnikiem biologicznego (BZT₅) i chemicznego (ChZT) zapotrzebowania tlenu, wskaźnikiem pH, zawiesiny ogólnej oraz obecności: ołowiu, cynku, kadmu i węglowodorów ropopochodnych w basenach portowych (Rozporządzenie, 2011, §3.1, pkt 2). Oczywiście istnieje także wymóg prowadzenia ewidencji pomiarów substancji i energii w środowisku w formie zestawień tabelarycznych, map wskazujących miejsca pomiaru i opisów sytuacyjnych. Ponadto podmiot zarządzający portem musi dokonywać kontroli obiektów hydrotechnicznych na podstawie rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych użytkowania oraz szczegółowego zakresu kontroli morskich budowli hydrotechnicznych z dnia 23 października 2006 r. oraz ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Ustawa, 1994). Rozporządzenie określa szczegółowo zasady użytkowania i uwarunkowania utrzymania sprawności technicznej budowli hydrotechnicznych. Na zarządy portów nałożone są konkretne obowiązki związane z bieżącą eksploatacją budowli i wszelkimi działaniami powodującymi zmiany parametrów tych obiektów. Ogólne warunki użytkowania budowli hydrotechnicznych, wynikające z rozporządzenia z 2006 r., określają obowiązki zarządów portów w zakresie (Rozporządzenie, 2006, § 5):

- wykorzystywania budowli zgodnie z przeznaczeniem oraz utrzymania odpowiednich parametrów techniczno-użytkowych, włączając w to przepisy przeciwpożarowe, bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony środowiska lądowego i morskiego;

- przeprowadzania bieżących konserwacji konstrukcji budowli oraz ich wyposażenia;
- utrzymania nadzoru nad realizacją wszelkich zmian konstrukcyjnych, technologicznych i funkcjonalnych budowli hydrotechnicznych.

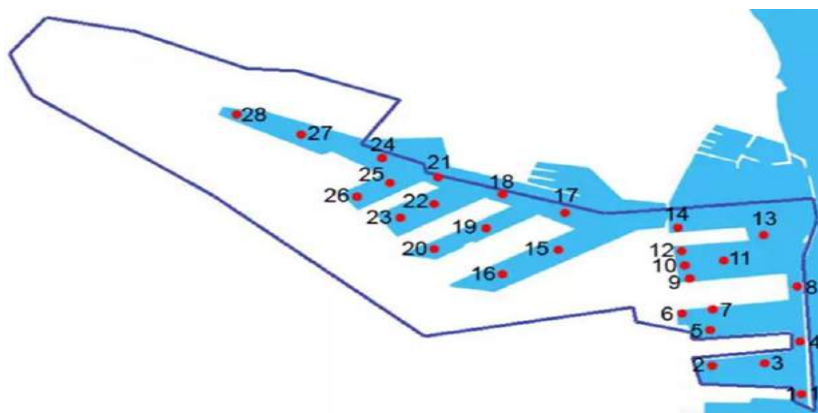
Poza ogólnymi wytycznymi są także wskazane szczegółowe działania, mające między innymi określać zasady użytkowania, konserwacji oraz remontów poszczególnych rodzajów budowli. Ponadto rozporządzenie nakłada na podmiot administrujący portem obowiązek prowadzenia okresowych kontroli całości budowli hydrotechnicznych wraz z przynależnym wyposażeniem. Wyróżnia się cztery rodzaje kontroli, które są prowadzone w zależności od wskazanych okoliczności i uwarunkowań, co dokładnie określa rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej (Rozporządzenie, 2006, § 62, § 63).

Plan batymetryczny jest dokumentem opracowanym na podstawie pomiarów hydrograficznych, pozwalającym określić (Rozporządzenie, 2006, § 88, ust. 1):

- głębokość nawigacyjną, czyli poziom wody liczony od jej powierzchni do najwyższej położonego punktu dna akwenu (Rozporządzenie, 2006, § 34);
- aktualną głębokość nawigacyjną, która oznacza głębokość nawigacyjną określoną przy aktualnym stanie wody w akwenu (Rutkowski i Królikowski, 2009, s. 37);
- przegłębienia dna;
- spłylenia dna.

Wyróżnia się trzy typy planów batymetrycznych: okresowe, kontrolne i awaryjne. Okresowe sporządza się z częstotliwością co 2 lata dla portów nieregularnie użytkowanych, corocznie dla portów towarowych o dużej intensywności ruchu statków i poniżej roku dla portów uniwersalnych, obsługujących pasażerów (dokładne wymagania wskazuje Rozporządzenie z 2006 (§ 90). Natomiast plany kontrolne i awaryjne wykonuje się w przypadku prowadzenia prac czerpalnych lub likwidacji przegłębień, konieczności uzyskania decyzji o zmianie sposobu użytkowania budowli morskiej, awarii budowli hydrotechnicznej, uszkodzeń dna wywołanych przez statki oraz dużego sztormu, który w jakimkolwiek stopniu wpłynął na stan techniczny portu. Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A. jest zatem zobowiązany do prowadzenia regularnych badań parametrów wód portowych i stanu budowli hydrotechnicznych oraz sporządzania planów dna poszczególnych basenów portowych. Realizacja wymogów wskazanych w rozporządzeniach Ministra Środowiska i Ministra Gospodarki Morskiej powoduje konieczność zlecenia przez zarząd portu badań podmiotom zewnętrznym.

W przypadku badań dotyczących wód portowych, w zakresie obejmującym wymienione substancje, są prowadzone badania wody pobranej w 28 punktach pomiarowych, znajdujących się w różnych częściach akwatorium portu. Punkty pomiarowe są wyznaczone na powierzchni akwenów: basenów portowych, kanału portowego, awanportu i wód znajdujących się przed falochronem głównym portu (rysunek 8.2). Woda do badania jest pobierana ręcznie przez osoby prowadzące badania z małej jednostki pływającej, a następnie dostarczana do laboratorium. Proces jest zgodny z wymaganiami normy PN-ISO 5667-9:2005, które określają wytyczne związane z projektowaniem programu pobierania próbek, technik ich pobierania oraz zasad postępowania z uzyskanym materiałem badawczym, na który składają się różnego rodzaju wody morskie.



Legenda:

Numery punktów pomiarowych	Lokalizacja punktów pomiarowych	Numery punktów pomiarowych	Lokalizacja punktów pomiarowych
1, 4, 8	Kanał Południowy	15, 16	Basen IV – Marsz. Piłsudskiego
2, 3	Basen I – Prezydencki	19, 20	Basen V – Min. Kwiatkowskiego
5, 6, 7	Basen II – Wendy	22, 23	Basen VI
9, 10, 11, 12	Basen III – Węglowy	25, 26	Basen VII
13, 14	Awanport	17, 18, 21, 24, 27, 28	Kanał Portowy

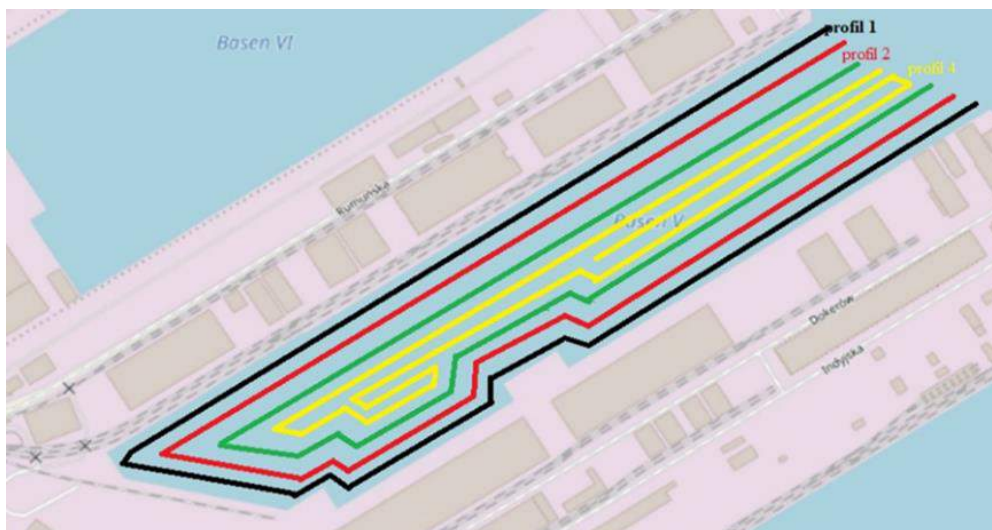
Rysunek 8.2. Punkty pomiarowe na akwenach portowych w Gdyni
(Flasińska i in., 2023, s. 4–5; ZMPG, 2023, s. 1–5)

Kontrola budowli hydrotechnicznych wiąże się także z przygotowywaniem planów batymetrycznych poszczególnych akwenów portu w celu weryfikacji głębokości, identyfikacji przeszkód wodnych i obserwacji zmian głębokości. Głębokości kanałów i basenów portowych są istotne dla bezpiecznego ruchu statków morskich na terenie portu. Dno poszczególnych akwenów może ulegać przegłębieniom na skutek (Hawkswood i in., 2014, s. 229):

- przemieszczania się statków i tworzenia przez nie zaśrubowego strumienia napędowego;
- wytwarzania przez stery strumieniowe dziobowe i rufowe statków silnych prądów wodnych;
- falowania wody na powierzchni akwatorium portowego.

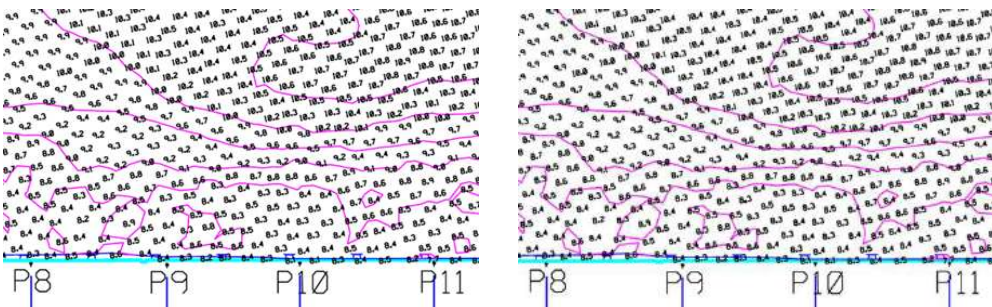
Biorąc pod uwagę konieczność utrzymania sprawności technicznej portu, Zarząd Morskiego Portu Gdynia sporządza okresowe plany batymetryczne częściej niż raz w roku, natomiast plany kontrolne i awaryjne po wykonywaniu robót czerpalnych oraz zasypowych, po sztormach, a także w przypadku wystąpienia różnych awarii. Część działań kontrolnych ma charakter rutynowy i powtarzalny (wymóg narzucony rozporządzeniem), inne zaś są zależne od działań planowanych (np. remonty, rozbudowy, prace hydrotechniczne), a pozostałe to efekt zdarzeń losowych.

Plan batymetryczny jest wykonywany przez jednostkę pływającą, która porusza się po z góry ustalonym profilu (trasie) na wyznaczonym do badań akwenu portowym. W trakcie przemieszczania się jednostki określa ona swoją pozycję i jednocześnie przypisuje wskazanemu miejscu głębokość, która jest podawana przez pokładową echosondę. Mierzone obok siebie wartości głębokości tworzą jeden profil pomiarowy, natomiast do określenia głębokości kanału czy basenu portowego wymagane jest sporządzenie kilku lub kilkunastu takich profili (rysunek 8.3).



Rysunek 8.3. Przykładowe profile badań batymetrycznych w basenie portowym (opracowanie własne)

Wykorzystanie tej metody badania dna basenu portowego ma pewne ograniczenia związane z dokładnością pomiarów pomiędzy profilami, wysokimi kosztami i czasochłonnością całej operacji. Pewnym usprawnieniem jest stosowanie obecnie echosond wielowiązkowych, pozwalających uzyskiwać więcej danych pomiarowych niż w przypadku urządzeń jednowiązkowych starego typu (Pączek, 2005, s. 45). Wykorzystanie takich metod pomiarowych pozwala uzyskiwać plan batymetryczny badanego akwenu, gdzie są widoczne izobaty i izolinie, które pokazują rzeźbę dna (rysunek 8.4).



Rysunek 8.4. Fragment przykładowego planu batymetrycznego (opracowanie własne na podstawie: (ZHB, 2023; ZMPG, 2023))

Gotowy plan batymetryczny pozwala dokładnie opisać charakterystykę powierzchni dna z uwzględnieniem przegłębień i spłyceń dna. Jest to bardzo istotne w przypadku utrzymania sprawności eksploatacyjnej portu.

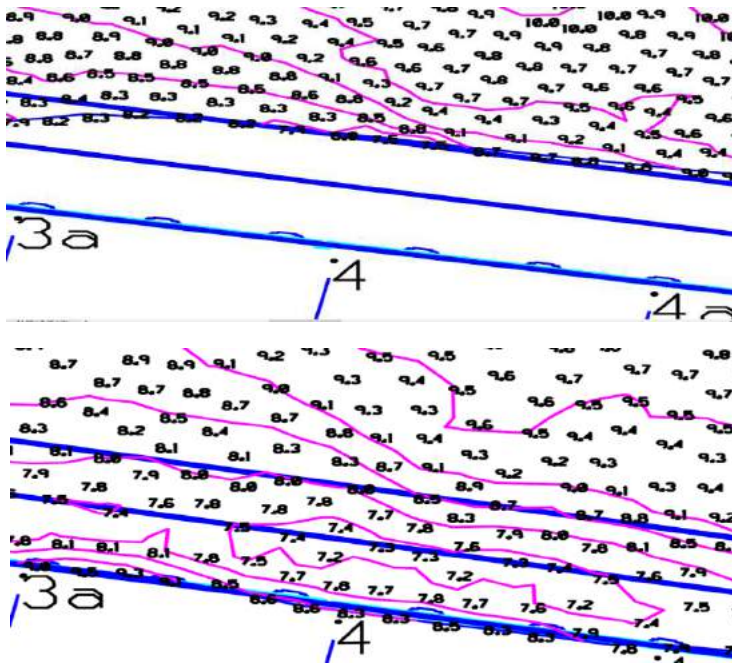
Wyniki pomiarów uzyskane przy wykorzystaniu bezzałogowej jednostki nawodnej i ich weryfikacja

W założeniu projektu MPSS planowano wykorzystanie bezzałogowej platformy nawodnej do wykonywania cyklicznych pomiarów wód w Porcie Gdynia i sporządzania planów batymetrycznych zgodnie z zasadami wskazanymi w rozporządzeniach i według opisanej metody. Założono, że wytypowana jednostka jest w stanie przeprowadzić wymagane pomiary i ma do tego celu wystarczające wyposażenie pokładowe. Program projektu przewidywał wykonanie, na akwenach Portu Gdynia, pomiarów w zakresie:

- sprawdzenia możliwości wykorzystania bezzałogowych platform nawodnych do pobierania próbek wody i osadów dennych (rozdział 3);
- wykorzystania bezzałogowych platform mobilnych do oceny poziomu zanieczyszczenia wody mikroplastikami i dioksynami (rozdział 4);
- przeprowadzenia pomiarów batymetrycznych wybranych akwenów portu z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych.

Prace związane z pozyskiwaniem próbek wody i osadów dennych były prowadzone w czterech cyklach obejmujących okresy: 28.02.–3.03.2022 r., 16–19.05.2022 r., 18–21.07.2022 r., 17–20.10.2022 r. Zaplanowane zadania zostały zrealizowane przez HydroDron-1 bez problemów, a pobrany materiał badawczy nadawał się do dalszych analiz laboratoryjnych. Dla porównania wyników pomiarów pobierano także próbki wody i osadów dennych metodą tradycyjną, czyli za pomocą batometrów i czerpaczy ręcznych (obsługiwanych przez zespół badawczy). Porównanie wyników laboratoryjnych uzyskanych z próbek pobranych na dwa sposoby nie wykazało znaczących różnic (co opisano w rozdziale 3). Wynika z tego, że możliwe jest wykorzystywanie tego rodzaju jednostki do pobierania próbek wody i osadów dennych z basenów portowych. Pojawiły się natomiast uwagi związane z samą procedurą pozyskiwania próbek, która wymaga każdorazowego powrotu HydroDronu-1 z miejsca badań do nabrzeża w celu odbioru próbek. Zespół badawczy zaproponował, w ramach przyszłych udoskonaleń jednostki, zautomatyzowanie systemu pobierania próbek w taki sposób, aby było możliwe ich przechowywanie na pokładzie do czasu powrotu jednostki z całego cyklu pomiarów.

Ocena poziomu zanieczyszczenia akwenów portowych polegała na zbieraniu cząstek tworzyw sztucznych unoszących się przy powierzchni wody za pomocą siatki planktonowej. Bezzałogowa platforma nawodna holowała siatkę w centralnej części akwenów portowych. Złowione plastiki odbierano do statku badawczego, który asystował dronowi w trakcie prac badawczych. Prowadzone badania mikroplastiku w wodzie potwierdziły użyteczność jednostki bezzałogowej w procesie zbierania materiału badawczego.

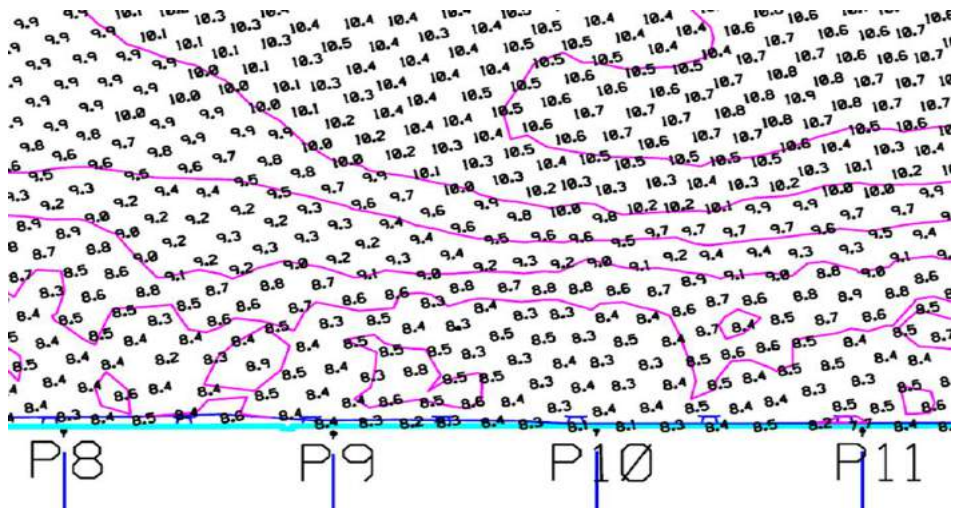


A – Nabrże
Rotterdamskie
Jednostka Załogowa
(3a – 4a)

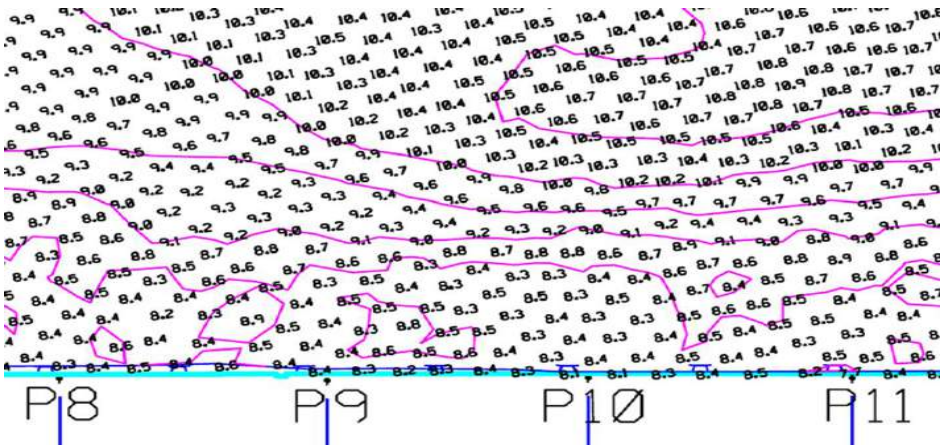
B – Nabrże
Rotterdamskie
HydroDron-1
(3a – 4a)

Rysunek 8.5. Plan batymetryczny basenu VI przy nabrzeżu Rotterdamskim
(opracowanie własne na podstawie: (ZHB, 2023; ZMPG, 2023))

Jednym z elementów projektu było także przeprowadzenie pomiarów batymetrycznych akwenów Portu Gdynia z wykorzystaniem HydroDronu-1. Wyposażenie bezzałogowej platformy nawodnej w dwie echosondy i inne urządzenia nawigacyjne pozwala na badanie dna i prezentację wyników w formie planu batymetrycznego. Uzyskane wyniki pomiarów głębokości przeprowadzone przez HydroDron-1 zestawiono z wynikami badań przeprowadzonych wcześniej, na zlecenie zarządu portu, przez podmioty zewnętrzne posługujące się jednostkami załogowymi. Należy wskazać, że pomiary przeprowadzone przez jednostki załogowe traktowano jako wzorcowe dla sporządzania planu. Porównanie wyników pomiarów w formie planów batymetrycznych ujawniło różnice głębokości basenów wynoszące średnio ok. 50 cm, przy czym plany sporządzone na podstawie danych pochodzących z bezzałogowej platformy nawodnej pokazują mniejszą głębokość basenów portowych (rysunki: 8.5 i 8.6).



A – Nabrzeże Czeskie jednostka załogowa (P8 – P11)



B – Basen V. nabrzeże Czeskie HydroDron-1 (P8 – P11)

Rysunek 8.6. Plan batymetryczny basenu V przy nabrzeżu Czeskim
(opracowanie własne na podstawie: (ZHB, 2023; ZMPG, 2023))

Duże różnice głębokości pomiędzy planami są widoczne w przypadku głębokości basenu VI, przy nabrzeżu Rotterdamskim. W tym przypadku różnice głębokości wynoszą nawet 40 cm. Podobna sytuacja wystąpiła w przypadku porównania planów basenu V i nabrzeża Czeskiego, gdzie pojawiają się różnice w głębokościach dochodzące także do 40 cm.

Podsumowanie

W wyniku realizacji projektu *System nadzoru i obserwacji portu morskiego z wykorzystaniem mobilnych bezzałogowych platform badawczych* można stwierdzić, że wykorzystanie bezzałogowej platformy nawodnej do prac pomiarowych akwenów w portach morskich jest możliwe i celowe. Cele projektu zostały częściowo zrealizowane, gdyż HydroDron-1 wypełnił dwa z trzech zadań:

- sprawdził się jako platforma zdolna do pobierania próbek wody i osadów dennych;
- był przydatny do oceny poziomu zanieczyszczenia wód portowych mikroplastikami i dioksynami;
- nie osiągnął założonych wyników w przypadku pomiarów batymetrycznych w porównaniu do tradycyjnej metody badawczej.

Porównanie wyników badań laboratoryjnych próbek pobieranych przez dron w zestawieniu z wynikami badań próbek uznanych za wzorcowe nie wykazało istotnych różnic, z tego względu wykonał on swoje zadanie prawidłowo. Podobnie w przypadku pozyskiwania próbek mikroplastiku – proces przebiegł sprawnie i bezproblemowo. Natomiast przy pomiarach batymetrycznych wystąpiły duże różnice pomiędzy danymi zebranymi przez HydroDron-1 i danymi pochodzącymi z pomiaru uznanego za wzorcowy. Skala różnic jest na tyle duża, że nie jest możliwe opracowanie prawidłowego planu batymetrycznego na podstawie danych pochodzących z bezzałogowej platformy nawodnej. Nie udało się ustalić przyczyny różnic w wynikach pomiarów głębokości i należałoby je wyjaśnić.

Biorąc pod uwagę całokształt wyników realizacji projektu można uznać wykorzystanie bezzałogowych platform nawodnych do służby w portach morskich za celowe, a ich uniwersalność oraz różnorodność zastosowań i wyposażenia pozwalają na wykorzystanie ich do realizacji różnych zadań. Testowana jednostka badawcza z pewnością będzie udoskonalana i może być szeroko wykorzystywana do realizacji rozmaitych prac badawczych.

Bibliografia

- Flasińska, A., Galer-Tatarowicz, K., Dembska, G., Pazikowska-Sapota, G., Bojke, A., Litwin, M., Ostrowska, D., Jasiński, P., Rudnicka, M., Kobus, A., Grzanka, P., i Kombel, P. (2023). *Ocena czystości wód basenów portowych Morskiego Portu Gdynia*, Uniwersytet Morski w Gdyni: Gdańsk.
- Hawkswood, M. G., Sobolewski, J., i Pilch, M. (2014). Geosyntetyczne maty betonowe w ochronie dna nabrzeży i stanowisk postojowych statków. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 229–238.
- Marine Technology (2023a). *Wykonane prace*. <https://marinetechnology.pl/wykonane-prace>
- Marine Technology (2023b). *HydroDron*. <https://marinetechnology.pl/hydrodron>
- NCBiR (2023). *Lista projektów realizowanych w NCBR*. <https://www.gov.pl/attachment/3fda170e-9f02-412f-8efc-45fc78e3c654>
- Pączek, B. (2005). Współczesne metody prowadzenia prac hydrograficznych. *Przegląd Hydrograficzny*, 1, 44–50.
- Podział europejskich dróg śródlądowych na regiony żeglugi (1997)*. *Polski Rejestr Statków*, nr 15/I. https://www.prs.pl/uploads/p15i_pl.pdf
- POLNOR (2019). Treść wniosku do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NOR/POLNOR/MPSS/003 7/2019-00). www.port.gdynia.pl
- PN-ISO 5667-9:2005. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 9: Wytyczne dotyczące pobierania próbek wód morskich.
- Raport ZMPG (2023). *Raport dotyczący prawnych aspektów funkcjonowania bezzałogowej jednostki badawczej w Porcie Gdynia*. Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.: Gdynia.
- Rutkowski, G., i Królikowski, A. (2009). Ocena głębokości toru podejściowego na południe od Ławicy Słupskiej w aspekcie obsługi jednostek o maksymalnych gabarytach — metody uproszczone. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, r. XLX, nr 4(179), 35–50.

- Stateczny, A., i Burdziakowski, P. (2019). *Universal autonomous control and management system for multipurpose unmanned surface vessel*. *Polish Maritime Research*, 26(1), 30–39.
- Stateczny, A., i Gierski, W. (2018). The concept of anti-collision system of autonomous surface vehicle. *E3S Web of Conferences*, 63, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186300012>
- ZHB (2023). *Dane batymetryczne*. Dział Hydrotechniczny, Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.: Gdynia.
- ZMPG (2023). *Badanie wód portowych*. <https://www.port.gdynia.pl/monitoring-srodowiska/badanie-wod-portowych>

Akty prawne

- (Dyrektywa, 2016). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1629 z dnia 14 września 2016 r. ustanawiająca wymagania techniczne dla statków żeglugi śródlądowej, zmieniająca dyrektywę 2009/100/WE i uchylająca dyrektywę 2006/87/WE. Dz. Urz. UE 252/118. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L1629&from=en>
- (Ustawa 2001). Ustawa z dnia 18 września 2001 r. Kodeks morski. Tekst jednolity Dz. U. 2023, poz. 1309
- (Ustawa, 2001). Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Tekst jednolity Dz.U. 2022 poz. 2556 ze zm.
- (Ustawa, 2000). Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o żegludze śródlądowej. Tekst jednolity Dz. U. 2022 poz. 1097 ze zm.
- (Ustawa, 1994). Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane. Tekst jednolity Dz. U. 2023 682 ze zm.
- (Rozporządzenie, 2011). Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem. Dz.U. 2011 nr 140 poz. 824
- (Rozporządzenie, 2010). Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 5 listopada 2010 r. w sprawie wymagań technicznych i wyposażenia statków żeglugi śródlądowej oraz upoważniania podmiotów do wykonywania przeglądów technicznych statków. Dz.U. 2010 nr 216 poz. 1423
- (Rozporządzenie, 2006). Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej z dnia 23 października 2006 r. w sprawie warunków technicznych użytkowania oraz szczegółowego zakresu kontroli morskich budowli hydrotechnicznych. Dz.U. 2006 nr 206 poz. 1516

Zakończenie

Beata Szymanowska

Wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu pt. *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych* (MPSS), przedstawione w ośmiu rozdziałach monografii pt. *Innowacyjne metody badań akwenów portowych z wykorzystaniem bezzałogowych platform nawodnych*, wyraźnie wskazują na znaczny potencjał oraz użyteczność bezzałogowych platform nawodnych w procesach monitoringu i badania akwenów portowych. Projekt MPSS otworzył nowe horyzonty dla badań w zakresie stanu akwatoriów portowych, stanu środowiska morskiego, a także gospodarowania obiektami infrastruktury portowej w Polsce.

Bezzałogowe platformy nawodne są innowacyjnymi urządzeniami, które z powodzeniem mogą być wykorzystywane do prowadzenia badań wody oraz dna morskiego w basenach portowych. Urządzenia tego typu mogą prowadzić badania w trybie autonomicznym, realizując zaplanowaną trajektorię, lub w trybie zdalnego sterowania. Mogą być szczególnie przydatne na akwenach niedostępnych lub trudno dostępnych dla większych jednostek załogowych.

Badania potwierdziły przypuszczenia grupy entuzjastów (naukowców z trójmiejskich wyższych uczelni, Norwegian Institute of Water Research oraz pracowników Zarządu Morskiego Portu Gdynia S.A. i MIROS AS), że bezzałogowe platformy nawodne mogą być efektywnymi i innowacyjnymi narzędziami wykorzystywanymi do badania akwenów portowych. Dzięki zastosowaniu zaawansowanej aparatury pomiarowej, precyzyjnego planowania misji badawczych oraz wykorzystaniu sztucznej inteligencji możliwe jest zbieranie danych, które stanowią podstawę do podejmowania decyzji zarządczych w portach morskich.

Trzeba podkreślić, że efektem badań prowadzonych w Porcie Gdynia są raporty stanowiące istotny wkład merytoryczny dla dopiero kształtujących się przepisów prawnych dotyczących wykorzystania pływających jednostek bezzałogowych na akwenach portowych. Projekt MPSS wpisuje się w realizację założeń polityki Unii Europejskiej w zakresie ochrony klimatu oraz wód Morza Bałtyckiego poprzez dążenie do wdrożenia proekologicznego systemu monitoringu wód w porcie morskim w Gdyni. Wydaje się, że wdrażane rozwiązanie stanowi atrakcyjną alternatywę dla dotychczas stosowanych metod, zwłaszcza dotyczących badań wody w miejscach niebezpiecznych i trudno dostępnych.

Należy jednak dodać, że wnioski z realizacji projektu MPSS wyraźnie wskazują na potrzebę dalszych badań nad możliwościami doskonalenia funkcjonalności bezzałogowych platform nawodnych. Dalszy rozwój technologii i aparatury pomiarowej, doskonalenie algorytmów analizy danych oraz automatyzacja procesów będą kluczowe dla przyszłego sukcesu badań akwenów portowych prowadzonych z wykorzystaniem tego typu urządzeń.

Można przypuszczać, że trend wykorzystania bezzałogowych platform nawodnych w badaniach akwenów portowych wywrze wpływ na inne ważne trendy innowacyjne w gospodarce. Zintegrowane podejście do monitoringu środowiskowego, efektywność badań akwenów portowych oraz ochrona ekosystemów morskich to nie tylko kluczowe wyzwania w branży morskiej, ale także ważne zagadnienia globalne. Wdrażanie innowacyjnych metod, narzędzi badań i nadzoru akwenów w portach morskich, w tym opartych na zastosowaniu dronów pływających, na pewno przyczyni się do zrównoważonego rozwoju portów, skutecznego zarządzania ruchem morskim oraz ochrony środowiska morskiego na skalę międzynarodową. Osiągnięte wyniki realizacji projektu stanowią fundament dla dalszych badań, które mogą zrewolucjonizować podejście do monitoringu akwenów portowych oraz kształtować bardziej zrównoważoną i inteligentną przyszłość branży morskiej.

O Autorach

Tomasz Berezowski, naukowiec w Politechnice Gdańskiej (PG). Ukończył z wyróżnieniem Międzywydziałowe Studia Ochrony Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego (SGGW) w Warszawie w 2009 roku, specjalizując się w renowacji i zarządzaniu środowiskiem. Obronił doktorat z wyróżnieniem na Vrije Universiteit w Brukseli w 2015 roku. Od 2015 do 2017 roku pracował jako asystent, a następnie adiunkt na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW. Od 2017 roku pracuje jako adiunkt w Katedrze Systemów Geoinformatycznych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki PG.. Podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej odbył staż na Uniwersytecie Flindersa w Australii, zdobył stypendium dla najlepszych doktorantów w dziedzinie GIS i teledetekcji, finansowane przez Fundację Anny Pasek, oraz stypendium badawcze od Rządu Flandrii. Zajmuje się przetwarzaniem danych teledetekcyjnych, w szczególności klasyfikacją i modelowaniem przy użyciu metod uczenia maszynowego oraz stosowaniem technik teledetekcyjnych w modelach procesów środowiskowych (głównie hydrologicznych). Opublikował ponad dziesięć prac naukowych w czasopiśmie z bazy JCR. Jego prace zostały zacytowane ponad 150 razy, a jego indeks Hirscha wynosi 7. Aktywnie współpracuje ze wszystkimi uniwersytetami, gdzie odbywał staże badawcze oraz w ramach działania COST, gdzie pełni funkcję członka MC.

Aleksandra Bojke, naukowiec, pracuje w Laboratorium Ochrony Środowiska Morskiego Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Posiada doświadczenie w analizie chemicznej i monitoringu zanieczyszczeń środowiska przy użyciu technik chromatograficznych i spektrofotometrycznych. Prowadziła badania, wydawała opinie i realizowała prace wdrożeniowe związane z analizą wody morskiej i osadów dennych. Uczestniczyła w wielu międzynarodowych projektach związanych między innymi z farmami wiatrowymi na morzu.

Andrzej Chybicki, naukowiec, pracuje na Politechnice Gdańskiej. Informatyk z wykształcenia, absolwent studiów na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, doktor nauk technicznych w dziedzinie informatyki, specjalizujący się w przetwarzaniu danych przestrzennych w rozproszonych systemach informacyjnych. Skupiony na wykorzystaniu wyników swoich badań w przemyśle. Współpracował z wieloma podmiotami z branży IT, geodezji i technologii satelitarnych, w tym OpeGieKa Elbląg, Reson Inc., Powel Sp. z o.o., Wasat, Better Solutions, Europejską Agencją Kosmiczną i innymi. Menedżer projektów R&D oraz zleconych projektów biznesowych, wykonawca ekspertyz technicznych w systemach informacyjnych. W praktyce pasjonat technologii IT, wizjoner i animator działań mających na celu wprowadzenie nowych rozwiązań w biznesie.

Marzena Delekta, pasjonatka i naukowiec, pracuje jako Kierownik Sekcji Utrzymania w Wydziale Budowli Hydrotechnicznych w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA. Absolwentka Politechniki Gdańskiej o specjalizacji budownictwo hydrotechniczne.

Na co dzień w pracy zawodowej zajmuje się utrzymaniem budowli hydrotechnicznych w zakresie m.in. prac remontowych, inspekcji i batymetrii.

Grażyna Dembska, naukowiec na Wydziale Ochrony Środowiska Morskiego Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (IM UMG). Posiada wieloletnie doświadczenie w badaniu fizycznych i chemicznych zanieczyszczeń środowiska oraz kierowaniu badaniami geochemicznymi i hydrochemicznymi w wielu pracach badawczych i projektach. Jest autorką wielu publikacji, prac naukowych i badawczych, ekspertyz i studiów oraz prac wdrożeniowych w dziedzinie ochrony środowiska. Długoletnia Kierownik Laboratorium Wydziału Ochrony Środowiska, Kierownik Wydziału Ochrony Środowiska IM UMG. Członkini Klubu Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB.

Alina Dereszewska, naukowiec na Wydziale Jakości Produktów Przemysłowych i Chemii Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Ukończyła studia magisterskie z chemii w 1987 roku. W 1999 roku uzyskała stopień doktora na Politechnice Warszawskiej w dziedzinie fizykochemicznych właściwości polimerów. Od 2004 roku jej zainteresowania naukowe skupiają się na badaniach dotyczących wpływu zanieczyszczeń na środowisko Morza Bałtyckiego. Jest autorką 25 publikacji na tematy związane z oczyszczaniem ścieków komunalnych i ochroną wód morskich. Przez ostatnie 15 lat prowadziła badania we współpracy z technologami Oczyszczalni Ścieków Swarzewo. Odbyla tam trzy staże naukowe. Obecnie koncentruje się na badaniach mikrozanieczyszczeń (mikroplastików, farmaceutyków, dioksyn) występujących w środowisku wód morskich.

Tomasz Dziarkowski, naukowiec, pracuje w Laboratorium Ochrony Środowiska Morskiego Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Posiada wieloletnie doświadczenie w pobieraniu próbek z różnych matryc środowiskowych i brał udział w wielu projektach badawczych dotyczących środowiska. Jego zainteresowania badawcze obejmują metodykę pobierania próbek wody, osadów dennych i gleby.

Agnieszka Flasińska, naukowiec, pracuje w Laboratorium Ochrony Środowiska Morskiego Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Posiada wieloletnie doświadczenie w badaniu i interpretacji analiz wody morskiej i osadów dennych pod kątem substancji biogennych i parametrów wpływających na zwiększoną eutrofizację i pogorszenie stanu środowiska morskiego. Uczestniczyła w licznych projektach badawczych, które kończyły się wydawaniem opinii i ocen oddziaływania na środowisko.

Katarzyna Galer-Tatarowicz, naukowiec, pracuje w Laboratorium Ochrony Środowiska Morskiego Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Posiada wieloletnie doświadczenie w badaniu zanieczyszczeń w różnych matrycach środowiskowych i jest autorką wielu prac badawczych, opinii i opracowań wdrożeniowych dotyczących kwestii środowiskowych. Jej zainteresowania badawcze obejmują organiczne zanieczyszczenia i ich rozkład w ekosystemach wodnych, opracowywanie wytycznych do pobierania próbek oraz rozwijanie procedur analitycznych do pomiaru śladowych zanieczyszczeń w wodzie i osadach.

Katarzyna Hlebowicz-Wojciechowska, pracuje w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA, gdzie pełni funkcję Zastępcy Dyrektora ds. Strategii i Rozwoju Portu, odpowiadając za kluczowe aspekty rozwoju portu i ochrony środowiska. Jest absolwentką Politechniki Gdańskiej, gdzie uzyskała tytuł magistra biotechnologii. Jej kariera zawodowa obejmuje prawie 19 lat na stanowisku Kierownika Działu Ochrony Środowiska w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA. Posiada duże doświadczenie w analizowaniu wpływu działalności portowej na środowisko, opracowywaniu innowacyjnych rozwiązań ochrony środowiska i monitorowaniu jego stanu. Jest certyfikowanym menedżerem projektów i wykazuje otwartość umysłu, umiejętności analitycznego myślenia i zdolność do poszukiwania niestandardowych rozwiązań. Jej zaangażowanie w różne projekty badawczo-rozwojowe obejmuje inicjatywy takie jak „Zrównoważone Zarządzanie Zanieczyszczonym Osadem w Regionie Bałtyku” i „Wpływ Niskosiarkowego Paliwa Okrętowego na Środowisko”. Jest także autorką i współautorką licznych publikacji dotyczących ochrony środowiska w działalności portowej. Jej doświadczenie, wiedza i poświęcenie czynią ją ekspertem w dziedzinie ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju,.

Kristoffer Kalbekken, Dyrektor Technologii (CTO), Kierownik Infrastruktury Badawczej, Nauki o Środowisku i Cyfryzacji w Norweskim Instytucie Badań Wodnych (NIVA). Posiada tytuł magistra ekonomii przemysłowej i zarządzania technologią Norweskiego Uniwersytetu Nauki i Technologii (NTNU) w Trondheim, a jego praca dyplomowa koncentrowała się na teorii sieci i strategii biznesowej w sektorze usług komunalnych, obejmując obszary takie jak energia, woda i ścieki oraz gospodarka odpadami. Jego specjalizacja obejmuje informatykę, technologię komunikacyjną, zarządzanie biznesem i zarządzanie strategiczne. Studiował również zarządzanie w Norweskiej Szkole Biznesu BI w Oslo. Jest liderem i doradcą w zakresie nowych technologii, ze szczególnym uwzględnieniem współpracy ludzi i technologii w celu tworzenia innowacji oraz zmian tworzących wartość. Główne obszary jego zainteresowań obejmują zarządzanie w organizacjach opartych na wiedzy obejmujące: zarządzanie zmianą, rozwój zespołu, inicjowanie działań strategicznych i tworzenie wartości oraz korzyści biznesowych poprzez projekty technologiczne. W NIVA kierował sekcją Informatyki Środowiskowej i Nauk o Danych, był dyrektorem ds. badań z naciskiem na technologię cyfrową i infrastrukturę, a obecnie w CTO jest odpowiedzialny za infrastrukturę badawczą, informatykę środowiskową, bazy danych, infrastrukturę cyfrową i IT w całym NIVA.

Hanna Klimek, profesor Uniwersytetu Gdańskiego, pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Transportu i Handlu Morskiego na Wydziale Ekonomicznym Uniwersytetu Gdańskiego. Jest doświadczonym nauczycielem akademickim, autorką i współautorką ponad 120 publikacji. Jej zainteresowania badawcze skupiają się na: ekonomii, organizacji i zarządzaniu (szczególnie strategicznym) portami morskimi, innowacjach w portach morskich, rynkach usług portowych, konkurencji na rynkach usług portowych, konkurencyjności portów morskich, polityce portowej, społecznej odpowiedzialności biznesu, logistyce, logistycznych łańcuchach dostaw.

Katarzyna Krasowska, pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Jakości Produktów Przemysłowych i Chemii na Wydziale Zarządzania i Nauk o Jakości Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. W 2003 roku uzyskała stopień doktora na Uniwersytecie Morskim w Gdyni w dziedzinie wpływu modyfikacji materiałów poliestrowych do pakowania na ich biodegradowalność w naturalnych warunkach. Przez ostatnie 25 lat jej zainteresowania naukowe skupiały się na badaniach biodegradowalności naturalnych i syntetycznych polimerów w różnych środowiskach, takich jak woda morska czy kompost. Jest autorką wielu publikacji na tematy związane z degradacją środowiskową polimerów i wpływem różnych czynników na podatność polimerów na ten proces. Obecnie jej badania koncentrują się na mikroplastikach występujących w wodach powierzchniowych i osadach dennych Morza Bałtyckiego.

Bartosz Langowski, specjalista ds. systemów dronowych i bezałogowych statków powietrznych w Dziale Bezpieczeństwa i Monitoringu Zarządu Morskiego Portu Gdynia SA. Absolwent Uniwersytetu Gdańskiego (Wydział Nauk Społecznych - Nauki Polityczne, Wydział Ekonomiczny - Integracja Europejska). Posiada Certyfikat Kwalifikacji Personelu Lotniczego uprawniający do wykonywania lotów BVLOS bezałogowymi statkami powietrznymi o MTOM do 25 kg. W swojej pracy zajmuje się obsługą lotów UAV w Porcie Gdynia, zarządzaniem ruchem UAV w obszarze portu oraz utrzymywaniem kontaktów z kontrahentami w zakresie bezpieczeństwa portu i przestrzeni powietrznej. Jako kierownik zespołu zadaniowego prowadzi projekty dotyczące wykorzystania dronów w zapewnieniu bezpieczeństwa kluczowych obszarów infrastruktury. Jest ekspertem w zakresie zabezpieczenia kluczowej infrastruktury przed zagrożeniami ze strony dronów.

Barbara Lednicka, pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Fizyki na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Ma dwadzieścia lat doświadczenia w prowadzeniu badań naukowych w regionach: Morza Bałtyckiego, Morza Północnego, Morza Barentsa i Morza Arktycznego. Uczestniczyła w kilku międzynarodowych projektach badawczych, podczas których prowadziła pomiary i analizowała fizyczne i chemiczne właściwości wody morskiej. Ponadto jest kierownikiem projektów badawczo-rozwojowych i zajmuje się zarządzaniem ryzykiem w branżach wydobywania offshore i energetyki wiatrowej.

Tomasz Nowosielski, pracownik naukowo-dydaktyczny (adiunkt) Katedry Transportu i Handlu Morskiego na Wydziale Ekonomicznym Uniwersytetu Gdańskiego, doświadczony nauczyciel akademicki, autor i współautor ponad 100 publikacji. Jego zainteresowania zawodowe obejmują transport morski, systemy transportu lądowo-morskiego, handel morski, spedycję i ochronę środowiska morskiego.

Bohdan Pac, pracownik naukowo-dydaktyczny (adiunkt) na Wydziale Informatyki i Nowych Technologii Uniwersytetu WSB Merito w Gdańsku. Posiada stopień doktora. Jest absolwentem Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni oraz Politechniki Gdańskiej. Ukończył szkolenie w Centre d'Instruction Navale/GEM w Tulonie. Uczestniczył w kursach wojskowych prowadzonych przez Marine Nationale, NATO i UE. Posiada doświadczenie na poziomie taktycznym marynarki wojennej jako główny inżynier.

Pracował jako wykładowca w Akademii Marynarki Wojennej oraz jako adiunkt na Uniwersytecie WSB w Toruniu. Służył jako oficer sztabowy w Dowództwie Połączonych Sił Zbrojnych Brunssum (NATO) / Dziale Logistyki / Oddziale M&T. Uczestniczył w misji ISAF jako członek sztabu / Działu CJ4 w 2004 roku. Pracował jako starszy oficer operacyjny w Dziale J3 Sztabu Generalnego Wojska Polskiego. Pracował nad kilkoma projektami finansowanymi przez Wojskowe Centrum Normalizacji, Jakości i Kodyfikacji, Sztab Generalny Wojska Polskiego i Akademię Obrony Narodowej. Jest autorem 80 publikacji dotyczących logistyki wojskowej i cywilnej oraz operacji informacyjnych.

Grażyna Pazikowska-Sapota, naukowiec w Katedrze Ochrony Środowiska Instytutu Morskiego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Posiada wieloletnie doświadczenie w badaniu fizycznych i chemicznych zanieczyszczeń środowiska oraz kierowaniu badaniami geochemicznymi i hydrochemicznymi w wielu pracach badawczych i projektach. Jest autorką wielu publikacji, prac naukowych i badawczych, ekspertyz i opracowań wdrożeniowych w dziedzinie ochrony środowiska. Kierowała przez wiele lat laboratorium Katedry Ochrony Środowiska, a także Katedrą Ochrony Środowiska IM UMG. Członkini Polskiego Klubu Laboratoriów Badawczych POLLAB.

Justyna Policht, specjalistka ds. kontraktów i zamówień, odpowiadająca za zamówienia publiczne w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA. Ukończyła studia na Wydziale Prawa Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, posiada kilkuletnie doświadczenie w zamówieniach publicznych zdobyte w różnych sektorach, w tym medycznym, gazowym, morskim i samorządowym. Pasjonuje się naturą i podróżami, dzięki którym odkrywa nowe wyzwania.. Uczestniczy w realizacji licznych nowych projektów przyczyniających się do ciągłego rozwoju Portu Gdynia.

Marzena Poppek, profesor nauk technicznych. Doktorat uzyskała w 1999 roku na Uniwersytecie Ekonomicznym w Poznaniu w dziedzinie transportu morskiego towarów masowych sklasyfikowanych jako towary niebezpieczne. Jej zainteresowania naukowe skupiały się na analizie ryzyka związanego z transportem towarów niebezpiecznych. Od 2000 roku pracuje w Grupie Roboczej Kodeksu IMSBC IMO, której celem jest wprowadzenie przepisów poprawiających lub całkowicie zmieniających standardy bezpieczeństwa w transporcie morskim. Stopień doktora habilitowanego uzyskała w 2013 roku. Obecnie jej badania skupiają się na kształtowaniu jakości towarów niebezpiecznych w oparciu o ustalone cele poprawy bezpieczeństwa transportu morskiego i ochrony środowiska. Jest autorką dziesiątek publikacji na tematy związane z transportem morskim i ochroną środowiska morskiego.

Anna Salomon, Kierownik Projektów w Dziale Badań i Rozwoju Technologii w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA. Magisterium uzyskała na Wydziale Ekonomicznym Uniwersytetu Gdańskiego w 2012 roku. Po ukończeniu studiów jej kariera zawodowa jest ściśle związana z zarządzaniem w sektorze transportowym i branży morskiej. Ukończyła liczne specjalistyczne kursy i stale rozwija swoje kompetencje w zakresie zarządzania projektami. Jest kwalifikowanym menedżerem Agile PM, Prince2 PM i ITIL PM, z bogatym doświadczeniem w zaawansowanych procesach zarządzania

wdrożonych na podstawie platform zarządzania projektami. Aktywnie zaangażowana w promowanie roli kobiet w trwających projektach i biznesie. Certyfikowany menedżer projektów z wieloletnim doświadczeniem w prowadzeniu międzynarodowych projektów badawczo-rozwojowych i członkini licznych zespołów projektowych w dziedzinie nowych technologii. Współautorka kilku popularnonaukowych publikacji.

Andrzej Stateczny, profesor nauk technicznych. Prezes Marine Technology Ltd. Jego obecne działania badawcze obejmują nawigację, hydrografię, geoinformatykę, metody sztucznej inteligencji, fuzję danych multisensorycznych i autonomiczną nawigację. Był głównym naukowcem w wielu projektach badawczych. Opublikował ponad 200 prac w wymienionych obszarach, w tym kilka książek, takich jak: „Nawigacja radarowa”, „Nawigacja porównawcza”, „Metody nawigacji porównawczej” i „Sztuczne sieci neuronowe do rozpoznawania celów morskich”. Założył szkołę badawczą, w której 16 młodych naukowców ukończyło doktoraty, wdrażając metody sztucznej inteligencji w nawigacji, hydrografii i geoinformatyce. Został włączony do prestiżowej grupy 2% najlepszych naukowców na świecie pod względem zacytowanych publikacji przez innych autorów opublikowanych przez Uniwersytet Stanforda.

Beata Szymanowska, naukowiec, pracuje w Dziale Badań i Rozwoju Technologii w Zarządzie Morskiego Portu Gdynia SA. Doświadczony menedżer, absolwentka Uniwersytetu Gdańskiego. Doktorat w dziedzinie nauk społecznych w dyscyplinie ekonomia i finanse uzyskała na Uniwersytecie Gdańskim. Jej zainteresowania skupiają się na innowacjach jako czynnika zwiększającym konkurencyjność podmiotów gospodarczych. Jest konsultantką w zakresie wdrażania nowych rozwiązań technologicznych i nietechnologicznych w podmiotach gospodarczych, ze szczególnym uwzględnieniem rynku usług portowych. Jej obszary zainteresowań obejmują rozwój nowych technologii w logistycznych łańcuchach dostaw, szczególnie w portach morskich. Związana z branżą morską i Zarządem Morskiego Portu Gdynia SA od ponad dwudziestu lat.

Eirik Tenningen, pracownik działu badawczego MIROS AS, Kierownik ds. Inżynierii. menedżer inżynieryjny i projektowy. Jest absolwentem Norweskiego Uniwersytetu Nauki i Technologii (NTNU), Wydziału Technologii Informatycznych i Inżynierii Elektrycznej (IE). Posiada doświadczenie w inżynierii i dostarczaniu zaawansowanych systemów radarowych do monitorowania powierzchni oceanu, w tym fal, prądów i systemów wykrywania wycieków oleju. Pracował w MIROS przez 11 lat w dziale operacyjnym.

Podziękowania

Szanowni Członkowie Zespołu realizującego projekt MPSS
oraz Decydenci z przedsiębiorstw Partnerów polskich i zagranicznych,

Z wielką wdzięcznością i szacunkiem składam wyrazy uznania dla Waszej nieocenionej pracy związanej z realizacją projektu pt. *System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych* (MPSS). Wasze, w szczególności Anny Salomon, koordynatora projektu, zaangażowanie w pracę, profesjonalizm i pasja przyczyniły się do osiągnięcia celów tego innowacyjnego przedsięwzięcia. Dzięki Waszemu wysiłkowi projekt MPSS stał się pionierskim krokiem do monitoringu i badania akwenów portowych z wykorzystaniem zaawansowanych technologii bezzałogowych platform nawodnych. Wasza determinacja i umiejętności w zakresie planowania misji badawczych, wykorzystania innowacyjnych technologii, gromadzenia i analizy danych oraz wnioskowania przyczyniły się do sukcesu tego przedsięwzięcia.

Wasza wiedza, wytrwałość i zaangażowanie pozwoliły na rzetelne zbieranie danych, które stanowiły podstawę przygotowania tej monografii. Mają też ogromne znaczenie dla dalszego rozwoju sektora portowego, zarządzania ruchem morskim oraz ochrony środowiska morskiego. Wyniki Waszej pracy na pewno będą inspiracją dla przygotowania przyszłych projektów i badań, które będą kontynuacją tego innowacyjnego podejścia do badań akwenów portowych.

Dziękuję również Decydentom z polskich i zagranicznych przedsiębiorstw – Partnerów projektu MPSS za wsparcie oraz wiarę w umiejętności Członków Zespołu realizujących ten projekt. Wasza otwartość na innowacyjne podejście i gotowość do współpracy przyczyniły się do powodzenia projektu MPSS, zaś Wasza wszechstronna wiedza i doświadczenie były kluczowe w podejmowaniu trafnych decyzji, które pozwoliły nam osiągnąć zamierzone cele.

Dzięki wysiłkom Członków Zespołu i wsparciu Partnerów projektu wyniki badań i innowacyjne metody przedstawione w tej monografii otwierają nowe perspektywy dla rozwoju portów, poprawy bezpieczeństwa żeglugi, ochrony środowiska morskiego oraz wykorzystania najnowocześniejszych technologii.

Z wyrazami uznania i szacunku,
Beata Szymanowska,
Kierownik Projektu MPSS

Zdjęcia Zespołu pracującego nad projektem



Partnerzy w projekcie podczas pracy z wykorzystaniem USV w Porcie Gdynia, maj 2023
Źródło: Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.



Partnerzy w projekcie podczas spotkania konsorcjum, Oslo 2022
Źródło: Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.



„System monitoringu i obserwacji terenów portowych z wykorzystaniem pływających bezzałogowych mobilnych platform badawczych”

Projekt realizowany w Porcie Gdynia
w ramach programu POLNOR 2019
ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju
otrzymał dofinansowanie w wysokości: 5 454 456,03 zł
przy czym 85% środków
pochodzi z Norweskiego Mechanizmu Finansowego
i 15% z budżetu państwa.

Preface

Researching Port Waters Using Unmanned Surface Vehicles is currently a significant trend in the maritime industry. The dynamic advancement of technology and the growing demand for precise research results favor the implementation of innovative solutions in maritime ports. The market for Unmanned Surface Vehicles, intended for both civilian and military tasks, is developing rapidly, driven by the increasing interest of clients from the maritime sector. Investments in research and development enable the construction of units equipped with advanced devices and software, using the potential of artificial intelligence, collecting real-time data, and facilitating the examination of various environmental parameters, which contributes to the rapid acquisition of more accurate results in port waters research.

In practice, the environmental friendliness and high efficiency of Unmanned Surface Vehicles are gaining significance. Their ability to operate in challenging conditions and low negative impact on the natural environment make them increasingly used for various tasks in maritime ports. It seems that continuous technological advancement in this field will lead to breakthrough positive changes in port waters research and the protection of the marine environment.

The monograph titled *Innovative Methods for Research Port Waters Using Unmanned Surface Vehicles* presents the results of the implementation of the project entitled *Marine Port Surveillance and Observation System Using Mobile Unmanned Research Units* (MPSS). Its main objective is to develop innovative methods for researching port waters using advanced technologies, such as Unmanned Surface Vehicles. The realization of the MPSS project represents a significant advancement in the field of monitoring and researching the condition of port waters, enabling precise analysis and data acquisition in a safe, cost-effective, and environmentally friendly manner. The detailed objectives of the MPSS project include:

- 1) analysis of water quality and environmental parameters in port waters, including pollutant levels, water temperature, salt content, and other critical indicators,
- 2) monitoring of meteorological conditions in port areas, enabling better weather forecasting, enhancing navigation safety, and port management,
- 3) examination of vessel traffic and other objects in port areas, facilitating effective maritime traffic management and minimizing collision risks,
- 4) detection and monitoring of underwater structures, which are crucial for maintaining port infrastructure in appropriate technical condition,
- 5) analysis of biodiversity and marine ecosystems, allowing for the assessment of the impact of port activities on the environment and the implementation of conservation measures,
- 6) identification of threats and risks to both port infrastructure and the marine environment, enabling early responses to potential hazards,
- 7) development of sustainable advancement strategies for ports, considering economic, social, and environmental aspects,

8) introduction of innovative technologies and methods for monitoring and managing port waters.

The project titled *The Monitoring and Observation System for Port Areas using Floating Unmanned Mobile Research Platforms* is implemented as part of the POLNOR 2019 Call program, announced by the National Centre for Research and Development, by an international (Polish-Norwegian) consortium consisting of five entities. These are:

- Port of Gdynia Authority S.A. – Lider,
- Gdańsk University of Technology – Partner,
- Gdynia Maritime University – Partner,
- Norwegian Institute for Water Research – Partner,
- MIROS AS – Partner.

The project received funding in the amount of PLN 5,454,456.03, of which 85% came from the Norwegian Financial Mechanism, and 15% from the state budget. The total value of the project was PLN 6,715,051.63.

The monograph consists of eight chapters. Chapter 1 is an introduction to the topic of Unmanned Surface Vehicles, characterizes these devices and presents their classification, emphasizing their diverse applications in maritime ports. Examples of their use for various purposes (including environmental monitoring or transporting goods and people) in selected seaports on various continents were presented.

Chapter 2 describes in detail the Unmanned Surface Vehicles HydroDron-1 used to implement the MPSS project. Its technical equipment and operational capabilities are presented. The potential for its use in bathymetric and sonar measurements is discussed. The focus was on HydroDron-1's role in research of bathymetry, water conditions, and sediments in the waters of the Port of Gdynia, presenting the course of the research process and its results.

Chapter 3 discusses the experiment conducted as part of the MPSS project using the Unmanned Surface Vehicles HydroDron-1. This involved using this device to collect water and sediment samples from the waters of the Port of Gdynia for physico-chemical tests. The sampling process, the condition of the collected samples and its impact on further stages of research were compared with the conventional method of collecting water and sediment samples, which had been used until now in the Port of Gdynia. The results of the experiment with the uncertainty of the sampling process are presented.

Chapter 4 addresses the issue of testing the level of microplastics and dioxins contamination of water and sediment of the Port of Gdynia. The use of the Unmanned Surface Vehicles HydroDron-1 for collecting water and sediment samples is discussed. Pollution of aquatic ecosystems with microplastics is currently a significant global problem due to its negative ecotoxicological effects on marine fauna and flora. The chapter presents the research process (including sampling, extraction, and identification of microplastic particles) and its results. Thanks to the implementation of the MPSS

project, it was established that Unmanned Surface Vehicles can be used to collect microplastic samples, especially from surface seawaters in port basins.

Chapter 5 covers techniques for integrating data from observation systems in monitoring the coastal zones and port areas. It presents observation techniques using satellite systems, as well as bathymetry estimating methods in coastal zones based on point hydroacoustic measurements and multispectral imaging obtained using the Sentinel-1 system (i.e. a system of satellites providing day and night images of the Earth's surface, regularly, regardless of weather conditions). During the implementation of the MPSS project, the possibility of using the Sentinel-1 system to monitor the current state of infrastructure in maritime ports, detecting its changes or damage, was verified, confirming its usefulness.

Chapter 6 focusses on the hydrodynamic modeling of the Port of Gdynia sea area using the GEMSS model, which stands for Generalized Environmental Modeling System for Surface Waters. The Port of Gdynia has monitoring tools and a sensor created by the Norwegian company MIROS AS to measure sea currents, water levels, and conducting meteorological research. MIROS AS conducted new bathymetric measurements and developed a new IT system for data management as a part of the MPSS project. The chapter summarizes the development of the GEMSS model, its calibration and validation, and presents its potential applications and limitations of use.

Chapter 7 identifies actual and potential problems associated with the use of Unmanned Surface Vessels in seaports and seeks the causes of these problems, establishing their hierarchy. A method commonly used in management and quality sciences, the so-called Ishikawa diagram, also known as a fishbone diagram, was used. It was determined that the use of HydroDron-1 for research purposes does not pose significant problems, and the device's specificity and appropriate equipment enable the execution of the tasks assigned to it.

Chapter 8 presents the utility of unmanned surface vessels for measuring selected parameters of port waters in the Port of Gdynia. Taking into account the overall results of the MPSS project, it was acknowledged that the use of unmanned surface vessels in seaports is justified. Their versatility, diverse applications, and equipment allow them to be used for various tasks.

The implementation of the MPSS project has demonstrated that the use of unmanned surface vessels as carriers for specialized measurement equipment enables comprehensive environmental research, port water monitoring, increased safety levels, and efficiency of operations, leading the Port of Gdynia toward sustainable development.

Beata Szymanowska

Chapter 1. The use of unmanned surface vehicles in maritime ports

Hanna Klimek, Tomasz Nowosielski, Anna Salomon

Introduction

The functioning of modern seaports requires the utilization of various advanced technical and technological solutions. The key areas of implementing innovations at these transportation hubs include the primary and auxiliary service operations, managing a variety of processes, ensuring the safety for passengers, cargo, and transport vehicles, as well as environmental protection. Examples of innovative solutions include automated systems, robots, and unmanned mobile platforms (drones) introduced for use in ports.

A brief overview of unmanned surface platforms

Unmanned Surface Vehicles (USVs), called autonomous surface drones, are waterborne devices that operate on or beneath the water's surface. They can exhibit varying degrees of autonomy, ranging from simple humane remote control, through semi-autonomous obstacle avoidance, to fully autonomous end-to-end navigation. Some USVs have all three levels of autonomy. They do not require a crew or onboard pilot and come in various shapes and sizes, mainly dependent on their intended use, from small and portable remotely operated vehicles to large unmanned surface vessels. It is anticipated that in the future, they will perform their tasks entirely autonomously, without human intervention. It's important to note that they are applicable to both civilian and military tasks (Ljulj, Slapničar, Brigić, 2022, p. 135).

Unmanned Surface Vehicles, whether remotely operated or autonomous, offer several advantages. They enable the remote execution of specific tasks, eliminating the need to send crewed units, thus reducing operational costs. They are characterized by relatively low fuel and energy consumption, as well as high operational efficiency. A key benefit of waterborne drones (as well as underwater drones) is their compact size and ability to access challenging and hazardous areas for people, which eliminates risks to human lives and the safety of much more expensive vessels during operations. They can be used for cyclical actions, which is crucial for continuous or periodic monitoring of specific water areas. Due to these features, they can be used to carry out hazardous tasks by the military, border patrol, firefighting, and law enforcement agencies. Units of these type, due to their small size and the mentioned advantages, can be stationed both in commercial ports, providing protection to strategic facilities like fuel terminals or container terminals, and military ports.

In practice, Unmanned Surface Vehicles (USVs) encompass a diverse group of devices with the above-mentioned characteristics and advantages, which can be classified according to various criteria. One of the main criteria for their classification is their purpose. USVs can be used for civilian purposes in commercial shipping and ports, logistics in port cities, maritime search and rescue, monitoring of the marine environ-

ment, collecting data on marine environmental parameters, monitoring of illegal activities in the exclusive economic zone of a coastal state and law enforcement, patrolling and observation of borders and control of ports and other maritime infrastructure, in the aquaculture and fishing sector, and in the marine wind energy sector (Equinor 2023). For military purposes, USVs can be used for military force and port protection, patrols and reconnaissance, mine countermeasure operations, anti-submarine warfare, detection of threats related to chemical, nuclear, and radiological hazards, towing, mine and torpedo laying, support logistics, post-war damage assessment, and reconnaissance.

One of the criteria for classifying such drones is their size. Smaller units (shorter than 10 feet) are generally intended for research purposes (but also in maritime search and rescue). They are equipped with sensors used to conduct measurements above and below the water. Weather research may require the installation of instruments for measuring temperature, wind speed, barometric pressure, and cloud height, while oceanographic measurements may require the installation of instruments to measure wave height and period, tides, seawater conductivity and salinity, as well as ocean currents. Sonar devices measuring underwater movement (e.g., Doppler Velocity Logs – DVL) are used in bathymetric measurements. Smaller drones are typically powered by electricity (with batteries as an integrated component), use a hybrid combustion-electric system, or incorporate solar panels. Figure 1.1. presents the Smart Drifter Cariddi, which employs a unique solution enabling it to track objects in its vicinity, estimate their current and future positions, and account for them using an optimization algorithm, autonomously choosing its route, optimal speed, and data acquisition to the cloud (Calabrò, 2023).



Figure 1.1. Smart Drifter Cariddi, designed by the MDM team (Fairchild 2023)

Medium-sized platforms (ranging from 10 to 30 feet in length) are typically versatile devices used in both scientific research and commercial purposes, such as auto-

mous delivery boats. Larger vehicles (over 30 feet in length), including super tankers, ferries, and large autonomous oceanic vessels, are devices that are being explored for commercial applications. In practice, the technology is already “almost” available, but regulations limit its use. “Almost” means that rigorous testing and refinements are still needed, similar to self-driving cars (Fairchild, 2023).

Another criterion for classifying surface vehicles is the environment in which they operate. Thus, they can be divided into those designed to operate on the surface of bodies of water, carrying out monitoring functions (navigation, environmental monitoring), transportation (passengers, cargo), and other functions (e.g., firefighting, rescue, etc.). The second group of such units are surface vehicles designed for underwater operations, primarily for inspecting shores, underwater installations, port infrastructure, vessel hulls, specific water bottoms, or seawater content. Some platforms are capable of performing tasks both on the water surface and underwater.

There are indeed other criteria for classification, such as power supply or propulsion. It must be acknowledged that the criteria for dividing these units are related. Unmanned Surface Vehicles (USVs) used to perform specific tasks must be of a certain size and be able to operate in a specific environment.

Maritime ports as facilities using unmanned surface vehicles

Currently, flying drones are commonly used in maritime ports and are relatively inexpensive and easy to operate. They are used to inspect maritime traffic in the port and at anchor, measure air quality, and transport small payloads. On the other hand, aquatic versions of drones are still relatively rarely used in practice, meaning they are eagerly tested by port authorities, but implemented quite slowly in maritime ports. Devices built specifically to the order of port entities that meet the specific requirements of the customers, as well as ready-made solutions offered by commercial manufacturers, are being used.

Maritime ports, just like other bodies of water, are interested in the use of various types of Unmanned Surface Vehicles. Depending on the purpose, aquatic drones in ports, similar to other water bodies, can be used for tasks related to: monitoring vessel traffic and other waterborne units (e.g., using the Vessel Traffic Service system and fulfilling Port State Control functions), inspection of underwater parts of hulls ships and port infrastructure objects, extinguishing fires within ports, conducting seabed and water condition surveys (sampling water and sediment), wave and air condition monitoring, tasks involving the collection of pollutants and floating debris in port waters, limiting the spread of oil spills, as well as transporting people or vehicles in port canals (short-range unmanned ferries). They can be particularly useful in areas that are inaccessible or difficult to access for larger crewed vessels.

In maritime ports, drones would be used to perform tasks related to vessel traffic surveillance and to collect information on Port State Control actions. Combining ship identification data from the Vessel Traffic Service system and the records of events

occurring in port waters would enable real and complete control over vessels calling at a particular port. Similar aquatic drones can be used to monitor the state of port waters and air quality, which involves monitoring the emission of oil-based pollutants and air pollutants such as SO_x, NO_x, and particulate matter (PM) from ships. The use of such devices in ports complies with the requirements of the MARPOL 73/78 convention regarding monitoring oil and air pollution, which is especially important for sulfur emission control areas (SECA).

An important technical solution that enhances safety within maritime ports is aquatic fire-fighting vessels, which enable firefighting on objects and vessels from the side of port waters. KONGSBERG offers aquatic fire-fighting drones in its product range, allowing autonomous units to approach the fire as close as possible, without risking the lives of firefighters (see Figure 1.2).



Figure 1.2. Remote-Controlled Fire-Fighting Boat (KONGSBERG, 2023)

It seems that this type of fire-fighting vessels should be equipped with large fuel terminals, as they allow firefighting operations even in situations of significant risk.

In maritime ports, passenger and road traffic is often maintained by ferries connecting the shores of port canals. Unmanned autonomous surface platforms can serve this role. In addition to full automation, units of this type can be equipped with electric propulsion, which is easier to implement and environmentally friendly. Advanced work is currently underway in Norway on autonomous small maritime ferries that will be used to transport truck trailers (Electric, 2022). In September 2022, the first two electric, autonomously controlled aquatic drones were christened there. They are intended for fully autonomous transportation of trailers through the Norwegian Oslofjord. Within two years, these units will be tested to obtain the required certification for unmanned operations, and once the certification process is completed, their movements will be monitored by the land-based center. The units are powered by batteries with a capacity

of 1,846 kWh and will be charged automatically during their stay in port. The use of these devices will not only shift freight traffic from roads to the sea but is estimated to reduce CO₂ emissions by 5,000 tons annually.

In Trondheim, Norway, a small autonomous electric passenger ferry, called milliAmpere 2, was also tested, serving shuttle traffic through the main port canal (both the functionality and efficiency of the device, as well as reactions of passenger, were examined). The use of this technology is intended to revitalize sustainable public transport in the city by utilizing urban waterways in a new way. It is considered to be the first step towards developing a new form of micro-mobility in a city with waterways. This technology is to be developed to create an ecological, flexible and efficient transport system along the entire Norwegian coast. Research has confirmed that autonomous ferries are cheaper to operate than crewed ferries and can be flexibly deployed on multiple routes if needed. In the longer term, these types of ferries could make life in the waterfront districts of port cities more attractive. The devices will be controlled from land (Haugan, 2022, p. 1).

Another application of unmanned aquatic platforms can be supplying ships. Due to the need to isolate ship crews during the COVID-19 pandemic, the Dolphin 1 Remote Control Lifebuoy was tested for delivering supplies to ships to avoid close contact between the supplier's personnel and the ship's crew. The USV has a towing and hauling capacity of up to 150 kg of cargo and a range of 500 m. It is equipped with a backpack system and can be deployed, transported, and retrieved by a single person. It quickly reaches the target ship, guided by a remote control. It is powered by electric propellers. The crew of a ship being supplied can collect the supplies using a hook or link lift, and after receiving the supplies, they can release the device directly into the water and it will reach the control center. Dolphin 1 belongs to the new generation of rescue robots developed by Ocean Alpha (Ocean Alpha, 2023). Unmanned aquatic platforms can also be used to rescue people in maritime accidents. In 2018, two drowning victims were rescued by the Oceanalpha M75 unmanned aquatic vessel and at that time it was a very rare use of USVs, even on a global scale, in maritime search and rescue. An S.O.S. signal was detected by the command center in the South China Sea and the M75 drone was immediately dispatched to the rescue. With autonomous GPS navigation and an intelligent obstacle avoidance function, it quickly arrived at the accident scene. The operator, who remotely controlled its movements using a multi-screen base station on the shore, was able to communicate with the victims through the USV's integrated speaker. A rescue raft was automatically deployed towards the victims, and they were then brought to the shore on this raft towed by the USV (Ocean Alpha, 2023). Today, Dolphin1 and similar devices created by Ocean Alpha are being purchased and used worldwide for water rescue operations. These are compact and versatile devices that can be widely used on offshore oil and gas platforms, government departments, commercial ships and vessels of all sizes, marinas, public beaches, and water recreation areas such as amusement parks, rivers, and dam bathing areas (Ocean Alpha, 2023).

USVs may find application in the aquaculture sector. They are used for more effective (than conventional methods) and automated ways of monitoring and studying the welfare conditions of fish and the environment near fish farms.

An interesting solution for marine environmental research is the so-called observational pyramid (utilized by NTNU scientists from AMOS, the Center for Autonomous Marine Operations and Systems), which can be used to study normal and harmful algal blooms as well as various changes in marine waters caused by global climate warming. It involves a combination of various autonomous devices working simultaneously. It consists of the NTNU research satellite, HYPSO-1, equipped with a hyperspectral imager, an aerial drone with a hyperspectral camera (UAV – Unmanned Aerial Vehicle), unmanned surface vessels with underwater hyperspectral imaging, acoustic sensors, and other types of sensors (USV - Unmanned Surface Vehicles), as well as autonomous underwater robots called AUVs (Autonomous Underwater Vehicles). The solution of simultaneous use of hyperspectral maps and aerial drones in conjunction with unmanned surface platforms and underwater drones enables the collection of a vast amount of data in a short time. Biologists collect water samples to, among other things, provide detailed data on various aquatic plant and animal species or photosynthesis, which is recorded, processed, and interpreted by unmanned platforms (Norwegian, 2022, p. 1).

Examples of the use of unmanned surface vehicles in seaports

The port of Oslo has announced that it will use an autonomous drone, developed in collaboration with the Environment Agency, the Trade and Environmental Protection Fund, Clean Sea Solutions AS, and Maritime Robotics, to clean the port basin and fjord. Clean Sea Solutions and Maritime Robotics have developed the “Oslo Drone” (or Cleaning Drone V1 – CDV1, its preliminary official name) (Port, 2023). The device is a fully electric unmanned surface vessel designed to remove plastic waste at and just below the water surface in ports, canals, river mouths, and other maritime environments. It is controlled through a graphical user interface, the Vehicle Control Station (VCS), developed by Maritime Robotics, or via a mobile application. It can also be equipped with sensors for mapping the seabed and collecting environmental data. According to port authorities, this drone is the world’s first electric eco-friendly boat of its kind and a floating garbage bin that removes plastic and debris from the fjord.

The port of Rotterdam, in cooperation with universities (Port Innovation Lab at Delft University of Technology and Erasmus University Rotterdam) and Dutch startups, including AquaSmartXL, is conducting research on the potential implementation of various innovative solutions, including floating drones (Rotterdam, 2023). The startup AquaSmartXL is developing smart water drones that enable fast and safe inspections of infrastructural constructions and their maintenance (AquaSmartXL, 2023).

Port drones are one of the results of implementing an innovative ecological system. An example is AquaSmartXL, a small unmanned boat equipped with a camera. It sends real-time images to the shore, providing a flexible surface water monitoring and inspec-

tion solution. The port authorities have recognized that using a water drone for inspecting hydraulic structures, especially those that are difficult to access (especially considering the tides in the port), is much safer. The Port of Rotterdam also uses the “Waste Shark”, which is larger than AquasmartXL. It is a floating device the size of a passenger car with “open jaws” that operates at a depth of 35 cm below the water surface and is able to remove up to 500 kg of waste from the water at one time. Then the waste is processed. A waterborne drone in the Port of Rotterdam port checks the concrete structures of an oil terminal and visualizes them in 3D. This is done in places where the use of crewed solutions is too difficult, dangerous or unwanted (including piers, bridges, and other structures).

Drones are also used by port inspectors for supervision, threat detection, inspection of port facilities, incident response, as well as search and rescue operations in the maritime port of Singapore (How Singapore, 2023). In the future, they are also to be used for autonomous urban mobility. An interesting solution are swan-shaped robots testing the water quality in this port (as part of the SWAN (Smart Water Assessment Network project)). They are designed to look like real swans and blend into the environment. They drift on the water surface, but underneath is a system of propellers and water-sampling devices that use wireless technology to send real-time results to the Singapore's National Water Agency, PUB. These devices (see Figure 1.3) are durable enough to withstand encounters with kayaks and small boats.

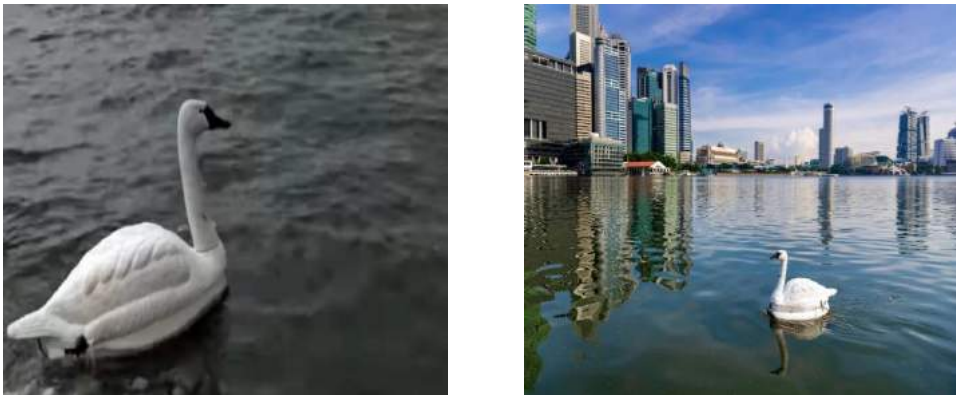


Figure 1.3. Swan Robot in Singapore (Coleman, 2018)

Unmanned Surface Vehicles are also used in the port of Hamburg. Thanks to their shallow draft, they can perform measurements in places that conventional survey ships cannot reach (Surface, 2023). The unmanned, highly maneuverable, and compact water drone “Echo 1” (1.65 m long), equipped with an echo sounder, is designed to measure the water depth and the condition of port quay walls (Yan, 2023). It can reach hard-to-access areas of the harbor. It has a sonar on board and is navigated by cameras and satellite signals. The drone’s movement is monitored from the shore using a monitor.

After a successful functional test in difficult conditions in 2019, the Hamburg Port Authority decided to implement the Kongsberg & OceanAlpha USV for regular meas-

urements of port waters. The SL40 USV (produced by Ocean Alpha) was used as a hardware platform to carry the multi-beam echo sounder Kongsberg M3 and other high-performance sensors. Since 2020, the USV has been supporting the port hydrographic unit in carrying out research tasks, starting from measuring shallow and hard-to-reach areas. This drone was appreciated for its compactness, maneuverability, high-quality construction, good stability in the water, as well as intuitive and safe operation. The SL40 software facilitates route planning from which the USV can depart and navigate autonomously, allowing the operator to keep track of other important systems and measurement data and be in constant control. *The Collision Avoidance* module installed on the drone automatically detects obstacles and stops the unit to minimize the risk of accidents (Figure 1.4).



Figure 1.4. SL40 USV in port of Hamburg (Ocean Alpha 2023d, p. 104; Galdorisi 2023) (the tests of using USV for safety monitoring purposes in the port waters were conducted in 2022 at the Port of Los Angeles)

For now, port security is continuously monitored by 500 cameras placed throughout the port and a fleet of crewed vessels. However, it should be noted that in the port areas there are a large number of shallows that are beyond the reach of these units. This prompted the port authorities to invite Maritime Tactical Systems Inc. (MARTAC) to showcase three units called MANTAS T6, T8, and T12 (high-performance vessels built on a catamaran hull and available in various sizes from 6 feet to 50 feet; one of them is shown in Figure 1.5). MANTAS T6 was used as an intercept vessel to rapidly respond to potential threats at high speeds of up to 55 knots. The unit was equipped with a standard electro-optical camera focused on quickly capturing and identifying threats. MANTAS T8 was equipped with a FLIR M232 thermal imaging camera, and its role was to predict the movement of vessels navigating the port waters. MANTAS T12, tasked with pursuit, conduct surveillance operations above and below the water surface, detect and identify intruder vessels or other threats (such as divers, swimmers) to port resources, can be equipped with various surface and sub-surface sensors (sonars and

echosounders), as well as other devices (chemical, biological, nuclear sensors), water quality monitors, and environmental sensors for air and water research. The demonstration of these devices' capabilities on the waters of the Port of Los Angeles confirmed the validity of using the thoroughly tested and proven USVs. The very positive results of the tests conducted using these small units prompted the port authorities to test larger USVs, specifically 24- and 38-foot ones, which could work for a longer time and carry additional sensors. The T38 MANTAS was demonstrated in several U.S. Navy exercises and conducted additional security monitoring tests at the Port of Tampa Bay with similar results. Tests of these types of drones were positively evaluated by the port authorities, and these devices will probably be put in the operation in the future. The implementation of USVs seems to be an innovative and effective solution, designed to complement the port's current resources.



Figure 1.5. The “Devil Ray” USV (Galdorisi, 2022; Rowley, 2022)

MARTAC currently produces a series of larger expedition-class USVs, including the T38 “Devil Ray,” which was used in tests in the Port of Tampa, and in numerous exercises with the U.S. Navy and international exercises (such as Trident Warrior, IBP-21, IMX-22, Autonomous Warrior 22) (Rowley, 2023).

So far, no floating drones have been used in Polish seaports, both the largest and the smaller ones. Research on the use of such devices for various tasks in port waters (especially water and sediment research) is currently carried out only in Gdynia (as part of the MPSS project). However, it should be noted that in 2022, tests of a semi-autonomous USV took place on the waters of the Motława and Martwa Wisła rivers in Gdańsk. The prototype of the unit is being developed as part of the research and development project *TRANSACT – Transform safety-critical cyber-physical systems into distributed solutions for end-users and partners*. This is an international project implemented as part of the HORIZON 2020 KDT-UJ program by a team of Gdańsk Tech scientists (Gdańsk University of Technology) in collaboration with partners from Germany, Finland, Denmark, Norway, Spain, Austria, Belgium, and the Netherlands. Ultimately, the unit can be used to inspect port channels, water quality assessment, and

patrolling maritime areas such as offshore wind farms. The ship and its basic equipment are now ready. Scientists from Gdańsk Tech are currently working on shore-based and cloud-based technology solutions, utilizing artificial intelligence and machine learning. They plan to develop and implement a reliable wireless communication system (including resistance to signal jamming or interference devices) used for simultaneous communication with multiple autonomous units. The unit named “Hornet” will be equipped with various advanced sensors (such as lidars for precise object shape detection on the water surface), short-range radars, infrared and visual systems, as well as acoustic sonars for detailed underwater imaging. Additionally, it will feature energy-efficient smart antennas (a product of the Gdańsk University of Technology) to enhance wireless communication reliability (Unmanned, 2023).

Summary

The examples described prove that Unmanned Surface Vehicles (USVs) are devices that undeniably find applications in maritime ports around the world. They provide a convenient, efficient, and environmentally friendly alternative to conventional surveys using larger crewed vessels. However, in most cases, we are still dealing with tests and searching for solutions that best meet the expectations of the port authorities. A review of the literature and news on maritime port websites indicates that interest in USVs is growing worldwide. Interestingly and importantly, work on these devices, intended for specific ports, is often carried out within international consortia implementing research projects, involving research centers and institutes, startups, designers and manufacturers of Unmanned Surface Vehicles, as well as manufacturers of the equipment and software installed on them.

References

- AquaSmartXL (b.d.). <https://aquasmartxl.com/about-us/>
- Calabrò, V. (b.d.). https://www.linkedin.com/posts/vcalabro_what-is-autonomy-many-researchers-and-professional-activity-6996940667180494848-ZXis?utm_source=share&utm_medium=member_desktop
- Coleman, A. (2018). *Singapore recruits swanbots to test water quality*. <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-42689027>
- Electric, Autonomous Ro-Ro Freight Ferries Begin Service in Norway* (2022). The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/article/electric-autonomous-ro-ro-freight-ferries-begin-service-in-norway>
- Fairchild, M. (2022). *Types of unmanned underwater vehicles and Unmanned Surface Vehicles*. <https://bluerobotics.com/types-of-unmanned-underwater-vehicles-and-unmanned-surface-vehicles/>
- Galdorisi, G. (2022). *Employing Unmanned Surface Vehicles to guard ports and harbours*. <https://cimsec.org/employing-unmanned-surface-vehicles-to-guard-ports-and-harbors/>
- Gdańsk University of Technology (2022). *Unmanned surface vessel to enhance security of Polish ports and offshore wind farms* (2022). <https://pg.edu.pl/en/news/2022-11/unmanned-surface-vessel-enhance-security-polish-ports-and-offshore-wind-farms>
- Haugan, I. (2022). *NTNU Trials World's First Urban Autonomous Passenger Ferry*. The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/editorials/ntnu-trials-world-s-first-urban-autonomous-passenger-ferry>

- KONGSBERG (n.d.). <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-shipping>
- Lee, A. (2021). *Equinor claims world first with 'sea drone' that checks how fish and floating wind get along*. <https://www.rechargenews.com/technology/equinor-claims-world-first-with-sea-drone-that-checks-how-fish-and-floating-wind-get-along/2-1-1076272>
- Ljulj, A., Slapničar V., & Brigić, J. (2022). Unmanned Surface Vehicle – TRITOR. *Brodogradnja, Vol. 73, No. 3*, 135–150. <https://doi.org/10.21278/brod73308>
- Ocean Alpha (2023a). *Dolphin1 Deliver Supplies Between Ships*. https://www.oceanalpha.com/application_cases/dolphin1-delivery-supplies-between-ships/
- Ocean Alpha (2023b). *M75 / USV Rescues Two Drowning Victims From South China Sea*. https://www.oceanalpha.com/application_cases/m75-%e4%b8%a8usv-rescues-two-drowning-victims-from-south-china-sea/
- Ocean Alpha (2023c). *Dolphin1 Launched in Perth*. https://www.oceanalpha.com/news_list/dolphin1-launched-in-perth/
- Ocean Alpha (2023d). *Hamburg Port Authority Uses USV in Hydrographic Survey*. https://www.oceanalpha.com/application_cases/hamburg-port-authority-uses-usv-in-hydrographic-survey/
- Oftedahl, L. (2022). *Norwegian Researchers Test "Automated Coast Guard" for Data Collection*. The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/editorials/norwegian-researchers-test-automated-coast-guard-for-data-collection>
- Port of Oslo to launch autonomous drone in Fjord clean up drive* (2021). <https://www.porttechnology.org/news/port-of-oslo-to-launch-autonomous-drone-in-fjord-clean-up-drive/>
- Reimer, J. (2022). *Underwater drone technology can enhance port maintenance*. <https://www.here.com/learn/blog/underwater-drone-technology>
- Rotterdam Innovate with New Water Drones* (2016). https://www.porttechnology.Org/news/rotterdam_innovate_with_new_water_drones/
- Rowley, U. H. (2022). *Leveraging USVs to Enhance Port and Harbor Security*. <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/09/leveraging-usvs-to-enhance-port-and-harbor-security/>
- Surface drone in Port of Hamburg* (2020). Hamburg News. <https://www.hamburg-news.hamburg/en/innovation-science/surface-drone-port-hamburg>
- Tay, S. (2020). *How Singapore is gearing up for autonomous shipping*. <https://govinsider.asia/intl-en/article/how-singapore-is-gearing-up-for-autonomous-shipping-mpa>
- Yan, C. (n.d.). *Water Drone Christened in the Port of Hamburg*. <https://trends.nauticexpo.com/oceanalpha/project-65687-331560.html>

Chapter 2. Unmanned surface vehicles HydroDron-1 utilized in the MPSS project

Andrzej Stateczny, Marzena Delekta

Introduction

In the coming years, further dynamic development of unmanned platforms operating in all spheres of human activity should be expected. The trends to reduce the workload of ships' crew and the pursuit of minimizing human errors will strongly influence the continued advancement of unmanned platforms. Unmanned platforms, both flying, driving on land, and sailing, will replace traditional crewed means of transportation in the near future. This largely applies to unmanned maritime platforms operating in inland and maritime waters. The need to keep crews on ships has been put to the test during the pandemic. The current energy and environmental crisis will further enhance the trends of crew reduction and the development of autonomous unmanned platforms in both civilian and military applications. Based on this, a team of scientists along with many employees of various companies (domestic and foreign) decided to carry out a pilot project regarding the operation of an unmanned maritime platform in the conditions of seaports. Conceptual assumptions were prepared, and research was conducted as part of the project called *Monitoring and Observation System of Port Areas Using Floating Unmanned Mobile Research Platforms*, hereinafter referred to as MPSS. The unmanned maritime platform used in this project was named HydroDron-1. The research was carried out based on the experience that has been described in the literature (Stateczny, 2019a, Stateczny, 2019b, Stateczny 2019c, Stateczny, 2019d, Stateczny, 2019e, Stateczny, 2020, Stateczny, 2021, Stateczny, 2022).

As mentioned earlier, unmanned maritime platforms can be used for a variety of purposes, depending on their size, function, or unique characteristics. They can be classified in the following aspects:

- a) application: research, commercial, military;
- b) size: small, medium, large;
- c) hull: single, catamaran, trimaran;
- d) power supply: electric, wind and solar, combustion;
- e) propulsion: sail, screw, jet;
- f) communication: radio, Wi-Fi/WLAN, satellite.

Using the classifications provided above, the HydroDron-1 unmanned water platform used in the MPSS project can be classified as a medium-sized, research and commercial unit with a catamaran hull design (featuring two floats 4 m long and 0.5 m wide placed at a distance of 1 m, resulting in an external dimension of 2 m wide). It is powered by electricity and solar, equipped with a screw propulsion, and communicates via radio and Wi-Fi/WLAN. The technical specifications and functionalities of the HydroDron-1 unmanned research platform used in the MPSS project, are described below.

Technical specification of the HydroDron-1 unmanned surface vehicles

The HydroDron-1 was designed as an Unmanned Surface Vehicles intended to carry out measurement missions (both research and commercial) in inland and nearshore marine waters. Due to the size of the platform's hulls, its missions in the open sea is not intended. A significant feature of the platform is its mobility, defined as the ability to be launched in any location accessible by car with a trailer or on water equipped with a hoist for yachts or motorboats. The platform can perform a variety of missions depending on the user's needs. Measurement missions include bathymetric surveys using multi-beam or single-beam echosounders, 3D sonar surveys, nearshore zone scanning using optoelectronic methods, including lidar and metric cameras, environmental measurements, including recording of physicochemical water parameters, and collecting water and sediment samples. The platform can also be equipped with other sensors and effectors as per user requirements.

The basic operating mode of the HydroDron-1 platform is autonomous mode, in which the platform independently executes trajectories planned by the system operator, such as measurement profiles in confined waters. In situations requiring direct human control, the platform operator can take control at any time and switch to remote control mode from a shore-based station. This is particularly useful in situations of increased traffic in the water area or when mooring or approaching another watercraft. In the case of loss of communication with the shore station, the platform is programmed to switch to engine stop mode to avoid potential accidents involving the platform when the operator cannot intervene. Such a situation may theoretically occur in the event of a failure of the communication system or when leaving the range of the maneuvering console, which is designed for maneuvering in close proximity to the operator and does not require shore antenna systems. It may occur when controlling from another crew unit, for example, when moving the platform between measurement areas or when landing in a measurement area. The unit is transported from place to place on a car trailer. The mobility of the platform is ensured by a car trailer with an aluminum floor, capable of launching from an unarmored shore or slip, while appropriate slings (straps for suspending the unit) enable the use of a hoist from the shore or the ship's base.

The platform is equipped with actuators and a winch to lift and lower sensors or measuring devices. All these elements are operated from the shore station. The anchor winch is used to lower the anchor, profiler, bathymeters, or other measuring devices. It has an automatic stop function when the suspended element reaches the bottom of the water. The multi-beam echosounder head mounted on a movable actuator can be raised to a safe position above the water surface during work on the measurement area or lowered to the working depth for bathymetric and sonar measurements. GNSS antennas, communication antennas, lidar, weather station, and a rotating camera are placed on a folding antenna mast. When working in the measurement area, the antenna mast is raised, and during transport and platform parking on the trailer, it is folded.

The following diagrams show the HydroDron-1 platform schematics with marked sensors and effectors (top view in Figure 2.1, bow view in Figure 2.2, and perspective view in Figure 2.3).

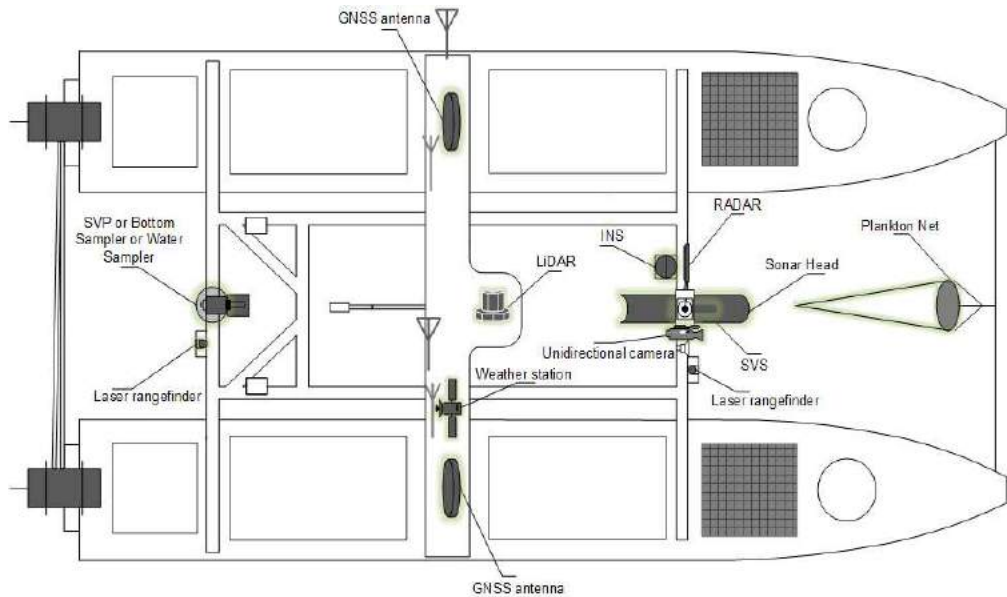


Figure 2.1. The diagram of the construction and equipment of the HydroDron-1 unmanned water platform – top view (Author's work (HydroDron, 2023))

The platform has the ability to monitor the full sphere around: both surface and underwater. This means that the sensors installed on it can monitor underwater conditions (including bathymetry and seafloor coverage) as well as conditions above the water (terrain shape and coverage).

In order to enhance the navigation safety, numerous sensors were installed on the platform to detect potential underwater and surface obstacles, as well as avoiding excessive proximity to these obstacles. For tasks related to avoiding excessive proximity to other objects and defining the permissible maneuvering area concerning surface objects, radar, lidar, two laser rangefinders, and two vertical echo sounders for measuring the depth under the bow section of the hulls are used. The software in place provides collision avoidance and preventive measures, including stopping the platform's movement when necessary.

Video cameras installed on the platform enable the operator to remotely control and real-time monitoring through a Wi-Fi connection, which transmits data to the shore station. Additionally, the operator receives weather information from the meteorological station and data on the battery voltage and voltage supplied to the motors. The position of the mast, hydrographic head, and anchor winch is crucial information for the operator. Data from hydroacoustic sensors (multibeam echosounder) and optoelectronic sensors (lidar) is locally recorded on the platform's two onboard industrial computers. The operator has complete remote control and data viewing capabilities, as well as the

ability to launch software on both industrial computers: one for hydrography and the other for navigation.

The platform is remotely controlled by the operator, either from a shore-based station or from a station on the base ship. The operator can take control and stop the platform's movement or manually steer it at any point during the measurement mission. Remote control is facilitated by dedicated consoles located at the shore station. The operator's workstation (either on the shore or on the base ship) is equipped with two basic consoles: one for hydrography and the other for navigation, as well as two maneuvering consoles. All consoles are protected against weather conditions, and the basic consoles are built on the basis of portable industrial computers and placed in sealed, waterproof enclosures. The consoles are connected to the Wi-Fi network through a special shore-based radio module with communication devices and antennas. The maneuvering consoles are intended for manual control of the unit at a short distance from the shore or pier, including mooring and operate independently of the radio module communication system, which allows the platform to be controlled from any location, including one placed on a crewed floating unit.

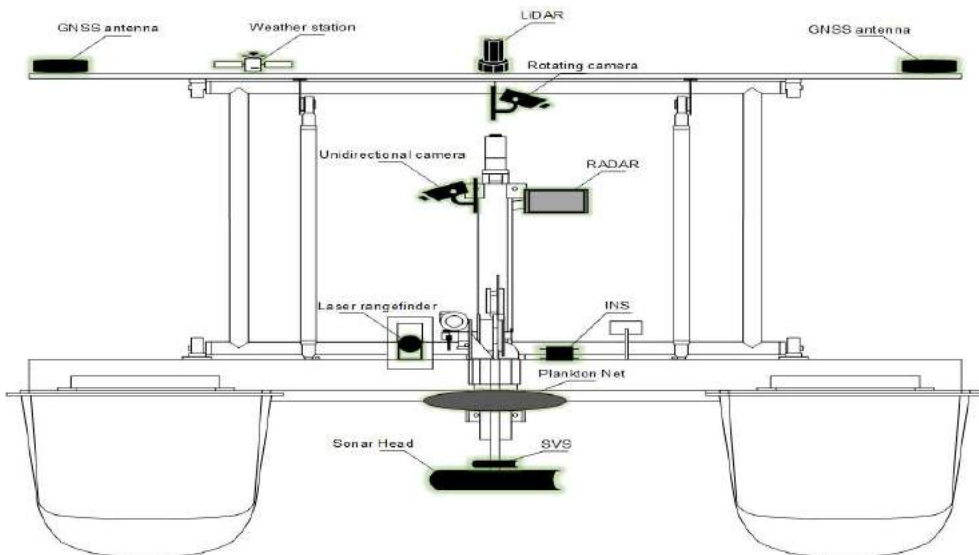


Figure 2.2. Schematic of the structure and equipment of the unmanned HydroDron-1 water platform – view from the bow (Author's work (HydroDron, 2023).

The basic software for planning, data acquisition, and processing of both hydroacoustic and optoelectronic measurement data until obtaining the final product in the form of a bathymetric plan of the water body, a sonar survey report, and data processing from lidar, is HYPACK MAX with the HYSWEEP extension. HYPACK software is the most widely recognized and extensively used worldwide. One of its significant advantages is the capability to process various types of data, including hydrographic, lidar, and magnetometric data, as well as performing necessary calculations, including volumetric calculations (related to differences between surfaces), in one coherent appli-

cation. Operators also have access to tool-specific software from manufacturers of measurement sensors (software from companies such as SBG, AML, Velodyne) installed on the platform, used to control and calibrate devices.

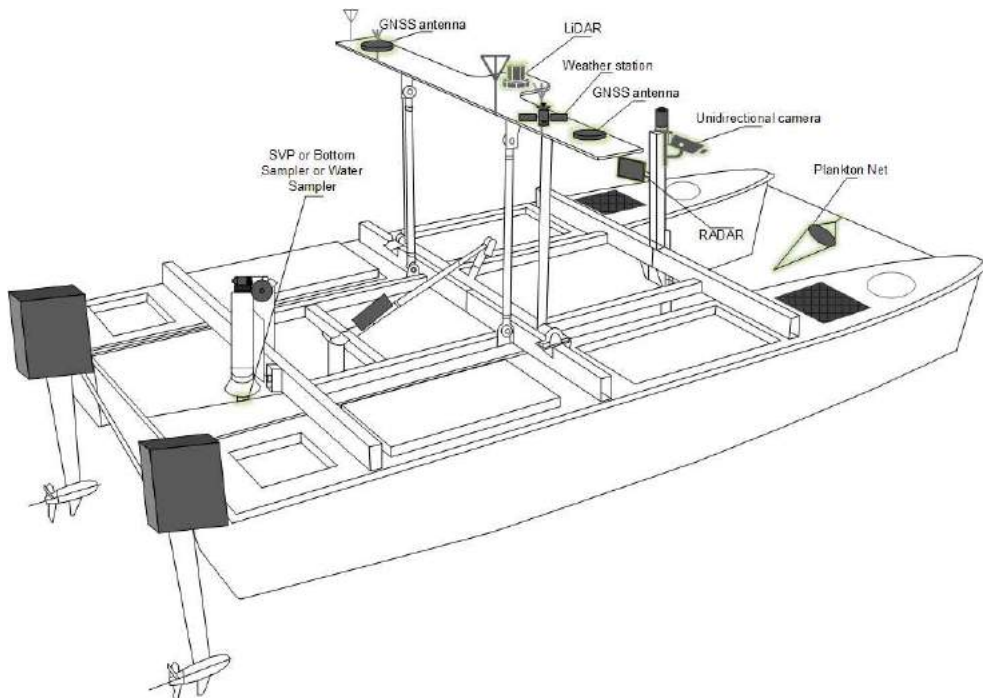


Figure 2.3. The diagram below presents a perspective view of the construction and equipment of the unmanned water platform HydroDron-1 (Author’s work (HydroDron, 2023))

Table 2.1 presents individual parameters of the unmanned water platform HydroDron-1 and their technical specifications.

Table 2.1. The technical specification of the HydroDron-1 platform (Author’s work (HydroDron, 2023))

Parameter	Specification of the parameter
Construction	– floats: fiberglass – other components: stainless steel
Dimensions	length: 4 meters, width: 2 meters, height: 1 meter (antenna gate lowered), height: 1.40 meters (antenna gate raised)
Weight	approximately 300 kilograms
Engines	Torqeedo Cruise 4.0RL with a power range of 0–4 kW x 2
Speed	maximum – 14 knots, cruising – 6 knots, survey – 3–4 knots
Draft	hulls – 0.25 meters, engines – 0.5 meters, MBES head – 0.5 meters (in the lowered position)
Autonomy	a set of lithium-ion batteries allowing for up to 12 hours of operation at the measurement speed, additionally supported by two photovoltaic panels.

Parameter	Specification of the parameter
Communication	remote control up to 40 km, onboard data transmission up to 6 km
Multi-functional equipment	retractable sonar head, raised mast, 20 m winch with a line for lowering sound profiler or other measurement devices
Chassis	submersible trailer with an aluminum floor, suitable for amphibious operations

Equipment of the unmanned water platform HydroDron-1

The composition of the technical equipment of the platform has undergone a thorough analysis aimed at ensuring the capability to perform all planned measurement functions. This includes typical hydrographic equipment as well as remote sensing and oceanographic equipment. High versatility of the platform has been achieved, which means its ability to carry out various measurement missions while ensuring high navigational safety.

The hydrographic equipment of the unmanned water platform HydroDron-1 includes:

- PING 3DSS-DX-450: Multibeam echosounder utilizing interferometric technology and advanced signal processing techniques to obtain bathymetry and three-dimensional sonar images up to a depth of 50 meters;
- SBG Ekinox2-D: Maritime version of a dual-antenna GNSS RTK inertial navigation system providing precise positional and platform motion information;
- AML SVP Base X2: Sound velocity profiler in water. The device can record sound velocity directly and calculate it throughout the water column by measuring conductivity, temperature, and water density. It has a battery life of 11 hours on a full charge and can be lowered up to 100 meters. The winch used for deploying the profiler is adapted for depths of up to 20 meters with the option of changing this parameter. The operator can read and transfer the measured sound velocity profile to hydrographic software via a Wi-Fi connection;
- AML SV Xchange: Sound velocity sensor integrated with the 3DSS-DX-450 multibeam sonar head;
- 2x EchoRange 200 kHz: Two single-beam echosounders for depth control below the platform floats. The software developed by Marine Technology also allows to identify the type of seabed. The operator receives real-time depth information on the navigation console.

The following images show photos of the HydroDron-1 platform, respectively from the front (Figure 2.4) and from the stern (Figure 2.5).



Figure 2.4. The unmanned surface platform HydroDron-1 with the multibeam sonar head in the upper position and the sound sensor mounted above the head – a view from the front at an angle (A. Stateczny)

The observation needs of the navigation situation around the platform were met by installing numerous sensors and detectors. The remote sensing sensors selected for installation on the HydroDron-1 platform include:

- UMRR 0C Type 42, 24GHz radar: weather-resistant stationary radar operating up to 300 meters;
- Velodyne Puck VLP-16 lidar: a popular laser sensor widely used for acquiring point clouds, operating up to 100 meters. Popular in autonomous vehicles;
- 2 LW20 laser rangefinders: designed to detect navigational obstacles up to 100 meters from the platform;
- 2 Hikvision one-way cameras – Model DS-2CD1143GO: one-way cameras placed in the direction of the bow and stern of the platform;
- PTZ Hikvision camera – Model DS-2DE3304W-DE: operator-controlled rotating camera, allowing for a full overview of the situation around the platform;
- WX Ultrasonic WeatherStation: Airmar brand weather station for measuring hydro-meteorological parameters.

Another set of measurement equipment for the HydroDron-1 platform consists of oceanographic measurement devices. They have been precisely selected to fulfill the measurement tasks specified in the MPSS project. The oceanographic equipment of the HydroDron-1 platform includes:

- 2 NISKIN-type bathometers with a capacity of 7.5 liters, designed for automatic sampling of surface and deep water;
- A Petite Ponar 6" × 6" sampler adapted for automatic sampling from the seabed.



Figure 2.5. Unmanned surface vessel HydroDron-1 – view from the stern with electric motors
(A. Stateczny)

The HydroDron-1 platform can operate in various operating modes selected by the operator. These may include the following modes:

- Autonomous Mode: This is the basic autonomous mode for following a pre-planned trajectory. The platform can execute measurements on planned measurement profiles;
- Adaptive Course Control: In this mode, the platform maintains a specified course relative to the seabed, adaptively compensating for hydro-meteorological conditions. This mode is selected automatically when the operator chooses the “go here” function;
- Dynamic Positioning: The platform maintains a given position relative to the seabed with a predefined tolerance radius. This mode is selected automatically after reaching the endpoint of the planned trajectory;
- Manual Mode: The operator can switch to manual control at any time, controlling the platform motion parameters from the shore station. An active anti-collision module signals threats and prevents collisions with the seabed or other vessels;
- Hold Mode: This is a safety mode in which the engines and steering are immobilized. The platform automatically enters Hold mode in case of loss of communication with the shore station concerning the currently used console (including when controlling from a maneuvering console)..

Bathymetric and sonar measurements carried out using the HydroDron-1 unmanned surface vehicles

As part of the MPSS project in 2023, a series of 12 soundings and sonar surveys were conducted at selected quays in the seaport of Gdynia. The measurements were carried out in three measurement sessions at the following quays: Hungarian Quay, Slovak Quay, Romanian Quay, Czech Quay, United States Quay, Rotterdam Quay, Finnish Quay.

All measurements of the basic profiles (parallel to the quays) were conducted in the autonomous mode, while the control profiles (perpendicular to the quays) were performed in manual mode. Figure 2.6 shows the HydroDron-1 platform during measurements at the Rotterdam Quay (performed during the measurement session in May 2023).



Figure 2.6. The HydroDron-1 unmanned water platform during measurements at the Rotterdam Quay in the Gdynia seaport, conducted in May 2023 year (A. Stateczny)

The figure 2.7 shows fragment of the bathymetric plan of the water area at the Rotterdam quay, and figure 2.8 presents fragment of a sonar mosaic with detected underwater objects.

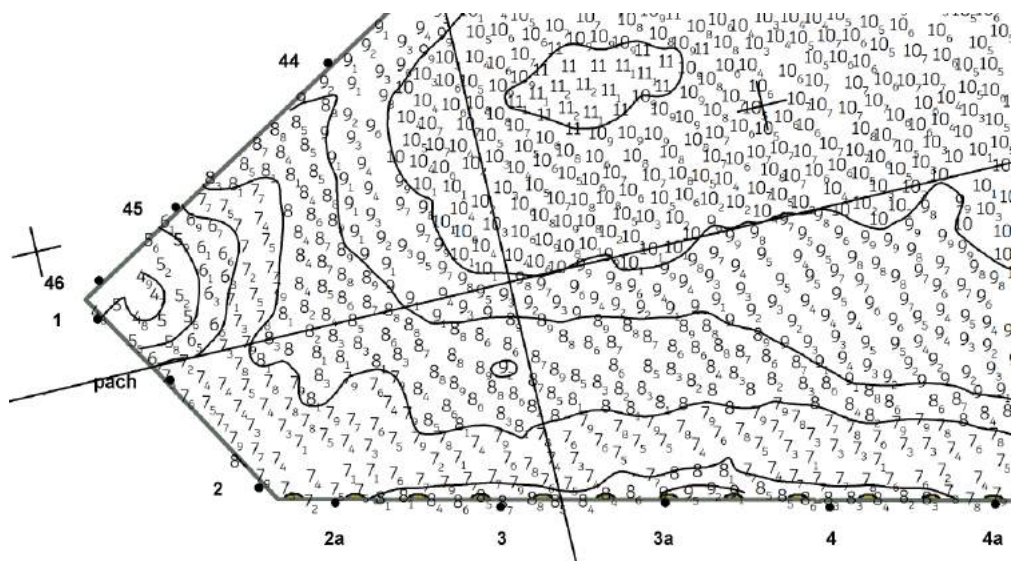


Figure 2.7. Fragment of the Bathymetric plan of the water area at the Rotterdam Quay in the Gdynia seaport (Author's work (Plan ... 2023, p. 1))

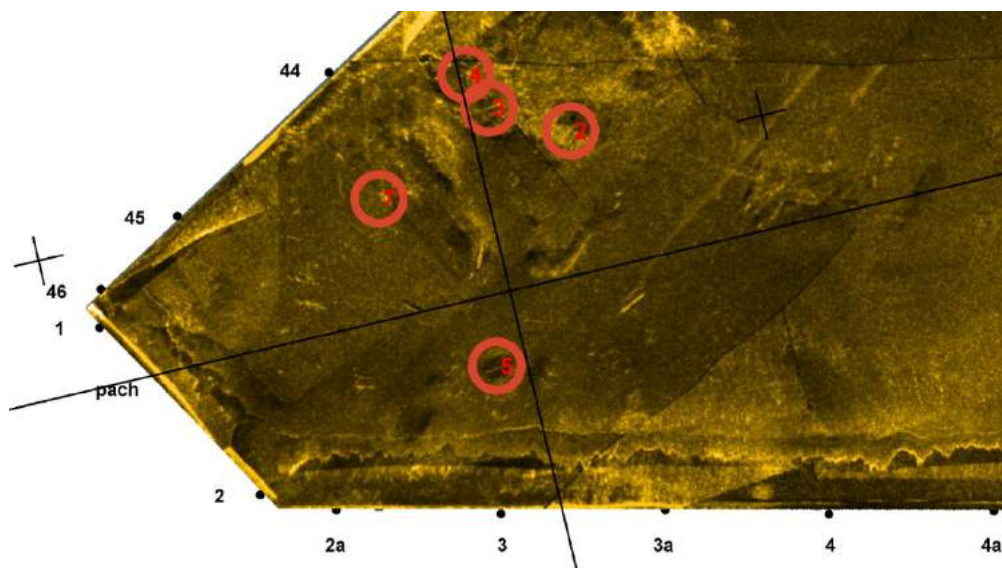


Figure 2.8. Fragment of the Sonar Mosaic with underwater objects detected near the Rotterdam Pier in the Port of Gdynia (Author's work (Mozaika ... 2023, p. 1))

Summary

During the implementation of the MPSS project, all planned tasks were successfully completed. This means that oceanographic tasks related to water sampling, sediment sampling, and recording water physicochemical profiles, as well as hydrographic tasks related to bathymetric and sonar measurements were executed. Oceanographic tasks were carried out throughout the year, each time at seven selected measurement points. Two water samples, each with a volume of 7.5 liters, were taken at each point: one at

a depth of 1 meter above the bottom and the other 1 meter below the water surface. Sediment samples were also taken, and physicochemical profiles of the water were determined, including salinity, temperature, and additionally, the pH of the collected water sample. The collected samples and recorded profiles were submitted for analysis to an authorized laboratory.

For the 12 hydrographic measurements, bathymetric plans were prepared, and reports on sonar seabed surveys were generated. The results of the bathymetric surveys were compared with the results of previous measurements, revealing certain discrepancies that will be subject to further analysis, including within the scope of other projects.

Throughout the project's implementation, the operators of the HydroDron-1 platform continuously have been analyzing the platform's behavior and introducing procedural improvements and technical modifications. This led to better adaptation of the platform to tasks in port waters and other restricted water areas. The valuable experiences gained during this project can also be applied in the implementation of other projects in various aquatic environments.

References

- Mozaika sonarowa z obiektami dennymi wykrytymi przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni* (2023). Marine Technology: Gdynia
- Plan batymetryczny akwenu przy nabrzeżu Rotterdamskim w porcie morskim w Gdyni* (2023). Marine Technology: Gdynia
- HydroDron* (2023). Marine Technology: Gdynia. <https://marinetechnology.pl/hydrodron/>
- Stateczny, A., Kazimierski, W., Burdziakowski, P., Motyl, W., & Wisniewska, M. (2019a). Shore construction detection by automotive radar for the needs of Autonomous Surface Vehicle navigation, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (2), 80. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020080>
- Stateczny, A., & Burdziakowski, P. (2019b). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, Vol. 26 No. 1(101), 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>
- Stateczny, A., Kazimierski, W., Gronska-Sledz, D., & Motyl, W. (2019c). The Empirical Application of Automotive 3D Radar Sensor for Target Detection for an Autonomous Surface Vehicle's Navigation. *Remote Sensing*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs11101156>
- Stateczny, A., Gronska-Sledz, D., & Motyl, W. (2019d). Precise bathymetry as a step towards producing bathymetric electronic navigational charts for comparative (terrain reference) navigation. *Journal of Navigation*, 72 (5), 1623–1632. <https://doi.org/10.1017/S0373463319000377>
- Stateczny, A., Blaszcak-Bak, W., Sobieraj-Zlobinska, A., Motyl, W., & Wisniewska, M. (2019e). Methodology for Processing of 3D Multibeam Sonar Big Data for Comparative Navigation. *Remote Sensing*, 11(19), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs11192245>
- Stateczny, A., Burdziakowski, P., Najdecka, K., & Domagalska-Stateczna, B. (2020). Accuracy of Trajectory Tracking Based on Nonlinear Guidance Logic for Hydrographic Unmanned Surface Vessels. *Sensors*, 20, 832. <https://doi.org/10.3390/s20030832>
- Stateczny, A., Specht, C., Specht, M., Brčić, D., Jugović, A., Widźgowski, S., Wiśniewska, M., & Lewicka, O. (2021). Study on the Positioning Accuracy of GNSS/INS Systems Supported by DGPS and RTK Receivers for Hydrographic Surveys. *Energies*, 14 (21), 7413. <https://doi.org/10.3390/en14217413>

Stateczny, A., Gierlowski, K., & Hoefl, M. (2022). Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Surface Unmanned Vehicles. *Sensors*, 22(2), 655. <https://doi.org/10.3390/s22020655>

Chapter 3. Assessing the feasibility of using unmanned surface vehicles for water and sediment sampling: a case study the Port of Gdynia

Katarzyna Galer-Tatarowicz, Aleksandra Bojke, Grażyna Dembska, Grażyna Pazikowska-Sapota, Agnieszka Flasińska, Tomasz Dziarkowski, Barbara Lednicka

Introduction

Port areas belong to zones where the main source of pollution is related to service production, industry (including shipbuilding), and the operation of municipal infrastructure. Anthropogenic influences are reflected in monitoring data for these areas. Additionally, these basins often constitute dynamic regions where processes occur over very limited space and time. Due to the significant diversity of these areas, the method of water and sediment sampling in port basins has a significant impact on the research results obtained.

Marine waters and sediments are essential components of the environment, the condition of which should be monitored both in terms of quality and the potential for contamination due to anthropogenic activities. One of the challenges when conducting water and sediment analyses is the inability to examine their entire volume. Therefore, it is necessary to use sampling programs and methods that will provide the most representative results, and the equipment used will enable sampling from areas that are inaccessible or difficult to reach for crewed vessels.

Environmental research, especially in natural ecosystems that are heavily influenced by anthropogenic factors, poses a significant challenge for analytical chemists. Their tasks go beyond ensuring the quality of chemical analyses and also require knowledge and experience in fieldwork, including sampling. Each of the above-mentioned stages may be a source of errors, hence the need to ensure the quality control of the sampling process at the same level as the analytical measurement itself (Ellison and Williams, 2012, p. 4–101; Ramsey and Thompson, 2007, p. 1–99).

Currently, performing chemical analysis using instrumental methods is the most repeatable and precise part of the measurement process. Errors made at this stage are easy to identify and eliminate. An essential consideration is obtaining results with an acceptable level of reliability, i.e., minimizing uncertainty in the entire measurement process, including the sampling process. If the sampling uncertainty has a predominant share in the overall measurement uncertainty, the use of highly precise and accurate analytical methods will not improve the quality of the analysis results and will not reduce the final uncertainty value (Ramsey et al., 2019, p. 1–105; Ramsey and Thompson, 2007, p. 1–99; Thompson 1998, p. 117–121). This means that even if the best possible analytical methods are applied, if the sampling process is inappropriate and characterized by significant error, the quality of the final analysis results will be questionable.

According to the Polish Centre for Accreditation, the sampling process is a defined procedure for collecting a part of a specified substance, material, or product for testing

purposes to ensure a representative sample for the whole. Such a representative sample should be a source of information necessary for determining the state (quality) of the object under investigation, confirming a research hypothesis, or making the appropriate decision (administrative, economic, and legal). The sample collection process also includes the preparation of samples for testing, which involves their preservation, protection, transportation, and storage, i.e., “ensuring the validity of test results” (Bodnar et al., 2015, p. 1385–1400; Czechowicz 2014, p. 2–8).

Port of Gdynia, due to its location, is a maritime port because no river water flowing through its basins, as is the case with other Polish ports. In such a situation, when collecting samples, reference is made to regulatory standards for seawater and marine sediments. The methods for collecting such samples are mainly regulated by three standards. The first standard is “Water Quality – Sampling – Part 9: Guidelines for Sampling of Marine Waters” (PN-EN ISO 5667-9:2005). The second standard is “Water Quality – Sampling – Part 1: Guidelines for the Design of Sampling Programs and the Sampling Techniques” (PN-EN ISO 5667-1:2008). The third standard is “Water Quality – Sampling – Part 19: Guidelines for Sampling Marine Sediments” (PN-EN ISO 5667-19:2006).

Sampling of water and bottom sediments for physicochemical analysis

The PN-EN ISO 5667-1:2022-07 standard, which pertains to the development of sampling programs and techniques, emphasizes the importance of carefully defining the objectives of the sampling process. These objectives are the primary factors that determine various aspects of sampling, including sampling site locations, frequency, timing, procedures, transportation options, and analytical requirements (Bodnar et al., 2015; PN-EN ISO 5667-1:2008).

The choice of an appropriate sampling method should align with the research goals. Factors such as water depth, sediment type, and required sediment penetration depth can influence the selection of the most suitable method. Selecting the right method ensures that the collected samples will accurately represent the studied environment and contributes to obtaining high-quality data.

Key issues in this process include cost, equipment availability, and the representativeness of the samples collected. Inappropriate sampling methods may lead to non-representative samples or systematic errors, which in turn can affect the quality of the analysis results (Tuit and Wait, 2020).

It's important to ensure that the volume of the sample collected is sufficient for the planned analyses. Sampling equipment and containers should meet specific requirements. According to the PN-ISO 5667-9:2005 standard regarding marine water sampling, containers should be chemically inert, durable, easy to seal and reopen, have a wide neck, and be designed for cleaning and reuse. For collecting water samples from specific depths, tube-like instruments equipped with valves or stoppers, such as NISKIN bottles or Van Dorn samplers, are often used (Apeti et al., 2012; Fornai et al., 2012; PN-EN ISO 5667-9:2005). These samplers are compatible with Unmanned

Surface Vehicles (USVs) and can be adapted for various depths. However, they are typically operated remotely by personnel controlling the USV, indicating which sampler to use and at what depth (Fornai et al., 2012).

For surface sediment samples collected during pilot or basic research, grab samplers and box samplers designed for gravitational or lever penetration can be used (Apeti et al., 2012; PN-EN ISO 5667-1:2008; PN-EN ISO 5667-19:2006). Grab samplers have a relatively shallow penetration depths (3–30 cm) but can collect larger sample volumes (0.5–70 liters), making them well-suited for surface sediment sampling (Tuit and Wait, 2020). These samplers are also relatively quick and easy to use, and their sizes can be adjusted to the capabilities of unmanned surface platforms (PN-EN ISO 5667-19:2006).

Sampling with the use of unmanned surface vehicles

Unmanned surface vehicles have recently become an important auxiliary tools for mapping marine areas, used in research of inland water transport, water and sediment quality research, and other areas of research. Currently, water quality monitoring can be carried out manually by humans, but it can also be done autonomously and just as effectively using robotic systems (Babic et al. 2020, pp. 4439–4446; De Sousa and Andrade Gonçalves 2011, pp. 369–380; Deusdado et al. 2016, pp. 1–31) as well as various mobile remotely controlled platforms (Autonomically Surface Vehicle – ASV) and (Unmanned Surface Vehicle – USV) (Bae et al. 2019, pp. 542–554; Codiga 2015, pp. 627–641; Demetillo and Taboada 2019, pp. 3959–3964; Jo et al. 2019, pp. 1–13; Manley 2016, pp. 1–6; Xiong et al. 2022, pp. 1–26). Such platforms can be equipped with sensors enabling direct acquisition of data from measurements of pH, temperature, dissolved oxygen, or conductivity, as well as devices for collecting water and sediment samples (Bae et al. 2019, pp. 9860–9869; Bae et al. 2021, pp. 542–554; Demetillo and Taboada 2019, pp. 3959–3964; Fornai et al. 2012, pp. 1–6; Fornai et al. 2016, pp. 1–8). As part of the MPSS project, tests were conducted on the unmanned surface watercraft USV – HydroDron-1 to verify its suitability for collecting water and sediment samples in the basins of the Port of Gdynia

Uncertainty of the sampling process

Systematic quality control of the sampling process enables real-time monitoring and the elimination of errors related to its individual stages (sampling, transportation, storage), the conditions under which the sample is taken, and the potential changes in the sample itself (Gryniewicz et al., 2008, pp. 513–528). To achieve this, it is necessary to determine quality assurance requirements, including the competency requirements of individuals involved in the sampling process, validation, and quality control of this process (Bodnar et al., 2013, pp. 117–126). Sampling process validation alone is not sufficient to ensure the quality of a given analytical procedure. The heterogeneity of the sample, the location and conditions of sampling have the greatest impact on the uncertainty value. Additionally, improper methods of sample transport and storage can cause

irreversible changes in its parameters, leading to obtaining false results. In addition to validating the sampling process itself, internal quality control at the sampling stage is also very important (Bodnar et al., 2015, pp. 1385–1400; Gryniewicz et al., 2008, pp. 513–528).

The uncertainty of sampling refers to the contribution of sampling errors to the combined uncertainty associated with the analytical measurement, where the quantity being measured is the analyte concentration in the sample (Ramsey and Thompson, 2007, pp. 503–513; Thompson, 1998, pp. 117–121). According to Thompson, sampling errors can only be quantified after the sample has been analysed, so routine measurement results include both sampling errors and analytical errors. As a result, results used to estimate sampling uncertainty must come from planned experiments (Thompson, 1998, pp. 117–121).

The experimental method of determining measurement uncertainty allows for a quick and relatively straightforward assessment of all sources of uncertainty associated with sample collection (Giercuszkiwicz-Bajtlik and Gworek, 2014, pp. 21–25). Applying the sampling procedure twice allows for checking the precision of sample collection and determining the variance of the entire sample collection process. In the MPSS project, samples were collected from a given location by different individuals using different sampling techniques. In this case (according to theory), the combined uncertainty was determined as the difference between measurement results obtained using different techniques by different individuals. Conclusions are drawn based on variance analysis (ANOVA).

Materials and research methods in the MPSS project

The presented research was based on the results of analyses of marine water and sediment samples collected from the Port of Gdynia's five port basins (I – Prezydenta, III – Węglowy, IV – Marszałka Piłsudskiego, V – Ministra Kwiatkowskiego, and VI) at seven measurement points (Figure 3.1). Four measurement campaigns were conducted throughout the year during the four seasons of 2022 (winter campaign: February 28 – March 3, spring campaign: May 16–19, summer campaign: July 18–21, autumn campaign: October 17–20, 2022). Empirical data were collected using the IMOS 2 unit of the Maritime Institute of the University of Gdańsk (IM UMG) and the unmanned surface research platform HydroDron-1. Both units are presented in Figure 3.2. Both the accredited laboratory samplers and the unmanned unit were equipped with bathymetry systems for sampling water from the surface and bottom layers, as well as a Van Veen sampler for collecting sediment samples (Figure 3.3).

Sampling points were selected taking into account various factors such as the analysis of historical results from the researched region, availability, depth, and sediment quality. The frequency of sampling was determined regularly in an annual cycle, taking into account seasonal changes in the tested parameters, and the potential impact of meteorological conditions on the sampling process, as well as the results of historical water quality research in port basins from 2012–2019 (Popek et al. 2022, pp. 167–173).

Experimental tests were conducted in calm water conditions, with an approximate sea state approximately 2 (on the Beaufort scale).

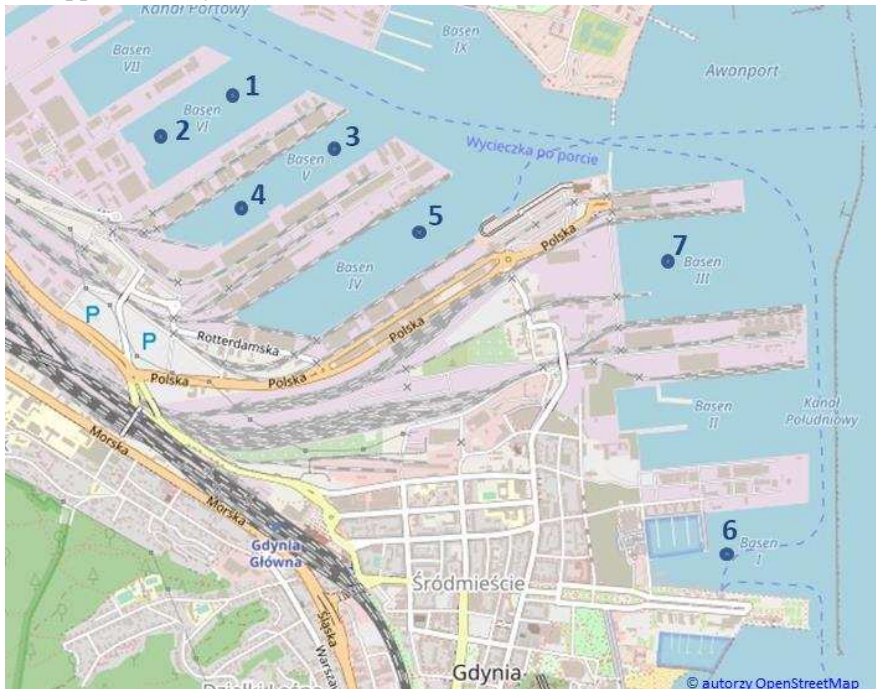


Figure 3.1. Sampling locations for water and sediment samples – Port of Gdynia port basins (Autor’s work on OpenStreetMap 2023, pp.1–4))



Figure 3.2. The floating unit of the University of Maritime in Gdynia - IMOS-2, and HydroDron-1 on the waters of the Port of Gdynia's harbor basin (A. Bojke)

The HydroDron-1 unmanned surface vehicles is equipped with two NISKIN-type bathometers with a capacity of 7.5 liters, designed for automatic sampling of surface

and deep water, as well as a suction sampler designed for automatic sampling of surface sediments from the seabed. The platform also has a profiling device equipped with sensors and a sound velocity meter (SVP and SVS) for in-situ measurements of electrical conductivity, temperature, depth, and salinity in the water column.



Figure 3.3. The equipment used for sampling marine waters in the basins of the Port of Gdynia includes a bathometer (on the left), while for sampling marine sediments, a Van Veen grab sampler is used (on the right) (B. Lednicka)

In each of the measurement campaigns, water and sediment samples were collected from a maximum of two measurement and research points per day. Marine water samples were gathered using a bathometer (Figure 3.3), following the requirements of the PN-EN ISO 5667-9:2005 standard. Sediment samples were collected using a Van Veen grab sampler or a Ponar sampler, in accordance with the PN-EN ISO 5667-19:2006 standard.

Figure 3.4 shows the procedure for collecting surface sediment samples using a grab sampler. The operation is ensured by the winch mounted on the HydroDron-1 platform. The procedure for remotely sampling surface sediments using a grab sampler involves submerging the sampler into the seabed in the open position (A). Then, when the sampler touches the seabed, the latch holding the jaws open is released (B), at which point the sampler closes automatically. The USV then begins to retrieve the sampler along with the sample (C).

A similar process was used to collect marine water samples using a bathometer (Figure 3.5). The procedure for remotely collecting water samples with a bathometer involves submerging the bathometer to the desired depth in the open position (A). When the bathometer reaches the desired depth, the release mechanism is triggered, releasing the locks and closing the bathometer cover (C). The USV then starts to retrieve the closed bathometer along with the collected water sample (C). At each meas-

urement point, marine water was sampled from the surface layer (up to 30 cm below the surface) and the sub-bottom layer (from a depth of 1 m above the seabed).

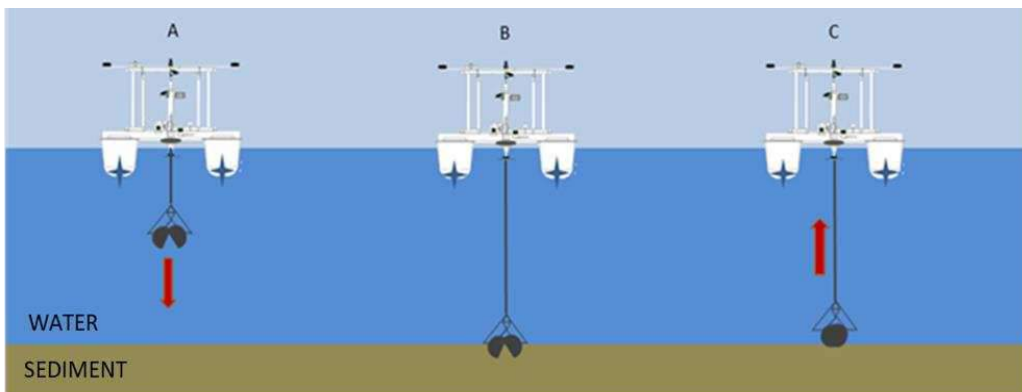


Figure 3.4. The procedure for remote collection of surface sediment samples using a grab sampler (A) submerging the sampler; (B) closing the jaws of the sampler; (C) retrieving the sampler along with the sample (Author's work)

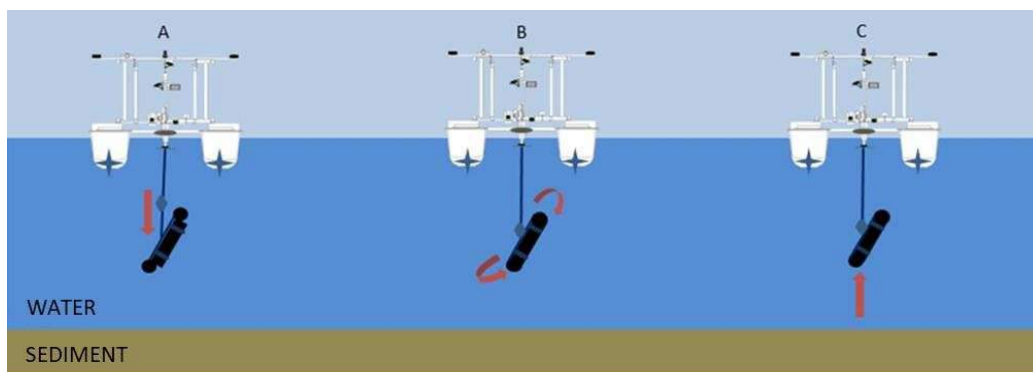


Figure 3.5. The procedure for remote water sampling using a bathometer (A) submerging the bathometer; (B) releasing the locks and closing the bathometer cover; (C) retrieving the collected water sample (Author's work)

After collecting the sample, HydroDron-1 was to return to the shore. There, the water sample was poured into previously prepared bottles, and the sediment sample, after being placed in a chemically neutral container and averaged, was transferred to glass containers and polypropylene bags using a spatula. Samples were stored in refrigerators at a temperature not exceeding 4°C, and transported to the research laboratory. The same procedure was followed for samples collected manually from the IMOS-2 floating unit.

Results of the experiment in the MPSS project

HydroDron-1 was tested while collecting samples of seawater and surface sediment in the port basins of the Port of Gdynia. Water samples were taken from the surface layer and at depths ranging from 9 to 15 meters. The experiments were conducted over four research seasons, and the sampling system was assessed to be functioning correctly.

Testing the chemical neutrality of the entire system, which involved determining whether the samples were contaminated during their collection and assessing the uncertainty of the sampling process, was conducted at the accredited Laboratory of the Department of the Environmental Protection of the Maritime Institute of the University of Gdańsk. The reference samples were seawater and sediment samples collected simultaneously manually by a team of samplers from the Laboratory of the Department of the Environmental Protection of the Maritime Institute of the University of Gdańsk (PCA certificate No. AB 646). The following pollution indicators were determined in samples taken from the port basins:

- in surface and bottom waters: petroleum hydrocarbons (mineral oil index), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), BTEX (benzene, ethylbenzene, toluene, m- + p-xylene, o-xylene, styrene), bisphenol A, nitrate nitrogen (N-NO₃), nitrite nitrogen (N-NO₂), ammonium nitrogen (N-NH₄), phosphate phosphorus (P-PO₄), total nitrogen (N_{og}), total phosphorus (P_{og}), dissolved oxygen, total suspended solids, pH, and Total Organic Carbon (TOC), salinity;
- in bottom sediments: mineral oils, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), tributyltin (TBT), total nitrogen (N_{og}), and total phosphorus (P_{og}).

Table 3.1 presents sample test results of water samples collected using the two methods described above..

Table 3.1. Sample results of water sample analyses collected on July 18–21, 2022 (Author's work)

Measurement station number	Type of analysis/ Unit	Result (sample collected manually)	Result (sample collected by HydroDron-1)	% error	Difference
1.	Mineral Oil Index [mg·dm ⁻³]	<0,01	<0,01	0,00	0,00
2.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
3.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
4.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
5.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
6.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
7.		<0,01	<0,01	0,00	0,00
1.	N _{tot} [mg·dm ⁻³]	0,30	0,29	3,45	0,01
2.		0,30	0,28	7,14	0,02
3.		0,27	0,26	3,85	0,01
4.		0,26	0,25	4,00	0,01
5.		0,25	0,28	10,71	0,03
6.		0,24	0,26	7,69	0,02
7.		0,24	0,22	9,09	0,02
1.	pH	8,11	8,09	0,25	0,02
2.		8,06	8,01	0,62	0,05

Measurement station number	Type of analysis/ Unit	Result (sample collected manually)	Result (sample collected by HydroDron-1)	% error	Difference
3.		8,11	8,06	0,62	0,05
4.		8,09	8,09	0,00	0,00
5.		8,30	8,24	0,73	0,06
6.		8,45	8,33	1,44	0,12
7.		8,46	8,42	0,48	0,04

Based on the data presented in Table 3.1, it can be concluded that the sample collection system installed on the HydroDron-1 platform does not significantly affect the contamination levels of the tested water samples in relation to the analyzed parameters. The percentage difference between the two sampling methods shows minimal errors. The results obtained for the compared indicators: mineral oil index, total nitrogen, and pH are similar, and the differences fall within the uncertainty range of the applied analytical methods.

Summary

The results of the experiment confirmed that the automatic sampling system does not cause any contamination during the process of collecting water and sediment samples. The system installed on the HydroDron-1 Unmanned Surface Vehicles operates correctly and does not significantly affect the subsequent measurement process in the laboratory. The characteristics of samples collected manually and those collected from the unmanned platform are comparable, and the uncertainty of the sampling process remains without significant differences at the maximum level for the most variable parameter: 20% for seawater and 30% for surface sediment samples. Detailed results of the sampling validation process and determination of its uncertainty will be presented in a separate study. In the future, the possibility of operating the unmanned unit at rougher sea conditions will be investigated, and more sensors for direct measurements (e.g., pH, dissolved oxygen, chlorophyll, etc.) may be added. The potential for automating the process of pouring water samples collected by HydroDron-1 into laboratory bottles will be examined. Additionally, the feasibility of placing the collected sediment samples in appropriate containers on the HydroDron-1 device will be assessed. Implementing these solutions would significantly reduce the sample collection time and eliminate the need for the unit to return to the shore with each individual water or sediment sample in order to transfer and secure it.

References

- Apeti, D. A., Hartwell, S. I., Johnson, W. E., & Lauenstein, G. G. (2012). *National Status and Trends Bioeffects Program: Field methods*. NOAA/National Centers for Coastal Ocean Science: Silver Spring. <http://hdl.handle.net/1834/30540>

- Babić, A., Vasiljević, G., & Mišković, N. (2020). Vehicle-in-the-Loop Framework for Testing Long-Term Autonomy in a Heterogeneous Marine Robot Swarm. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 4439–4446. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3000426>
- Bae, J. H., Jo, W., Park, J. H., Voyles, R. M., McMillan, S. K., & Min, B. C. (2021). Evaluation of Sampling Methods for Robotic Sediment Sampling Systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(2), 542–554. <https://doi.org/10.1109/JOE.2020.3005576>
- Bae, J. H., Min, B. C., Luo, S., Kannan, S. S., Singh, Y., Lee, B., Voyles, R. M., Postigo-Malaga, M., Zenteno, E. G., & Aguilar, L. P. (2019). Development of an unmanned surface vehicle for remote sediment sampling with a van veen grab sampler, *OCEANS 2019 MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2019*. <https://doi.org/10.23919/OCEANS40490.2019.8962837>
- Bodnar, M., Konieczka, P., & Namieśnik, J. (2015). Sampling Strategies: Statistics of Sampling. W: J. L. Anderson, A. Berthod, V. Pino (red.), *Analytical Separation Science*. Apryll Stalcup Verlag: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2015, 1385–1399. <https://doi.org/10.1002/9783527678129.assep051>
- Bodnar, M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. (2013). Validation of a sampling procedure. *TrAC-Trends in Analytical Chemistry*, 51, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.06.011>
- Codiga, D. L. (2015). A marine autonomous surface craft for long-duration, spatially explicit, multidisciplinary water column sampling in coastal and estuarine systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(3), 627–641. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00171.1>
- Czechowicz, B. (2014). Proces pobierania próbek – plany, procedury, zapewnienie jakości i dokumentowanie. W: *Pobieranie próbek w działalności akredytowanych jednostek oceanicznych zgodność*, s. 2–8. Polskie Centrum Akredytacji. https://www.pca.gov.pl/download/gfx/pca/pl/defaultaktualnosci/36/20/1/euro-lab2014_prezentacja.pdf
- De Sousa, J. B., & Andrade Gonçalves, G. (2011). Unmanned vehicles for environmental data collection. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0313-5>
- Demetillo, A. T., & Taboada, E. B. (2019). Real-Time Water Quality Monitoring for Small Aquatic Area Using Unmanned Surface Vehicle. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 3959–3964. <https://doi.org/10.48084/etasr.2661>
- Deusdado, P., Guedes, M., Silva, A., Marques, F., Pinto, E., Rodrigues, P., Lourenço, A., Mendonça, R., Santana, P., Corisco, J., Almeida, S. M., Portugal, L., Caldeira, R., Barata, J., & Flores, L. (2016). Sediment sampling in estuarine mudflats with an aerial-ground robotic team. *Sensors*, 16(9), 1–31. <https://doi.org/10.3390/s16091461>
- Ellison, S. L. R., & Williams, A. (Ed.) (2012). *EURACHEM/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements*. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf
- Fornai, F., Bartaloni, F., Ferri, G., Manzi, A., Ciuchi, F., & Laschi, C. (2012). An autonomous water monitoring and sampling system for small-sized ASVs operations. *Oceans*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405015>
- Fornai, F., Ferri, G., Manzi, A., Ciuchi, F., Bartaloni, F., Laschi, C., & Member, S. (2016). An Autonomous Water Monitoring and Sampling System for Small-Sized ASVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42, 5–12. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2552818>
- Giercuskiewicz-Bajtlik, M., & Gworek, B. (2014). Experimental methods of evaluating measurement uncertainty resulting from sample collection and preparation for analysis in chemical laboratories / Niepewność pomiaru wynikająca z poboru i przygotowania próbek do badań w laboratorium chemicznym oszacowana. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 25(3), 21–25. <https://doi.org/10.2478/oszn-2014-0016>
- Grynkiewicz, M., Dembska, G., Sapota, G., Flasińska, A., Wisniewski, S., & Aftanas, B. (2008). The quality during the collecting of underground waters samples. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 15(4), 513–528.

- Jo, W., Hoashi, Y., Paredes Aguilar, L. L., Postigo-Malaga, M., Garcia-Bravo, J. M., & Min, B. C. (2019). A low-cost and small USV platform for water quality monitoring. *HardwareX*, 6, e00076. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00076>
- Manley, J. E. (2016). *Unmanned Maritime Vehicles, 20 years of commercial and technical evolution*. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761377>
- OpenStreetMap (2023). *Baseny portowe Portu Gdynia*. <https://www.openstreetmap.org/copyright> [openstreetmap.org]
- PN-EN ISO 5667-1:2008. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 1: Wytyczne opracowania programów pobierania próbek i technik pobierania, (2008).
- PN-EN ISO 5667-19:2006. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 19: Wytyczne dotyczące pobierania próbek osadów morskich (2006).
- PN-EN ISO 5667-9:2005. Jakość wody – Pobieranie próbek – Część 9: Wytyczne dotyczące pobierania próbek wód morskich (2005).
- Popek, M., Dereszewska, A., Dembska, G., & Pazikowska-Sapota, G. (2022). The Impact of Transport on the Quality of Water in the Port of Gdynia. *TransNav*, 16(1), 167–173. <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.20>
- Ramsey, M. H., i Ellison, S. L. R. (Ed.). (2007). *Eurachem / CITAC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling. A guide to methods and approaches*. https://eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/UfS_2007.pdf
- Ramsey, M. H., Ellison, S. L. R., & Rostron, P. (red.). (2019). *EURACHEM / CITAC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches*. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/UfS_2019_EN_P2.pdf
- Ramsey, R. H., & Thompson, M. (2007). Uncertainty from sampling, in the context of fitness for purpose. *Accreditation and Quality Assurance*, 12, 503–513. <https://doi.org/10.1007/s00769-007-0279-0>
- Thompson, M. (1998). Uncertainty of sampling in chemical analysis. *Accreditation and Quality Assurance*, 3, 117–121. <https://doi.org/10.1007/s007690050202>
- Tuit, C. B., & Wait, A. D. (2020). A review of marine sediment sampling methods. *Environmental Forensics*, 21(3–4), 291–309. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1771630>
- Xiong, Y., Zhu, H., Pan, L., & Wang, J. (2022). Research on Intelligent Trajectory Control Method of Water Quality Testing Unmanned Surface Vessel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1252. <https://doi.org/10.3390/jmse10091252>

Chapter 4. The use of unmanned surface vehicles to assess the level of microplastics and dioxin contamination in water and sediments using the Port of Gdynia as an example

Marzenna Popek, Katarzyna Krasowska, Alina Dereszewska,
Katarzyna Hlebowicz-Wojciechowska

Introduction

The intensification of human activity associated with new technologies, industrial progress, and the increasing needs of advancing civilization has led to an increase in anthropogenic pressure on the ocean and seas (Zalewska et al., 2015, pp. 32–43). Marine pollution encompasses all materials that enter the marine environment as a result of human activities. Currently, marine pollution from waste, sewage, and transport emissions has become one of the most significant environmental issues. It occurs in all marine habitats and poses a growing threat to the marine environment worldwide (Haseler et al., 2020, pp. 1–15). It covers all sizes ranges, from commercial shipping containers, through plastic bottles, industrial and agricultural waste, to nanometer-sized particles. Plastic, as one of the dominant anthropogenic pollutants, is found on the surface of the open sea, marine sediments, and beaches worldwide, including the Arctic (Peng et al., 2020, p. 1, Tekman et al., 2017, pp. 88–92, Eriksen et al., 2014, pp. 1–16).

Due to the nature of their operations, seaports are sources of environmental pollution, especially in terms of water bodies and sediment. Pollutants enter the aquatic environment during cargo loading, dredging of waterways, ship traffic, and through discharges, sewage effluents, dust, etc. Maintenance dredging is an operation necessary for the proper functioning of ports and ensuring safe navigation. However, it causes sediment contaminated with chemical substances to rise and mix with the water column (Guerra-Garcia and Garcia-Gomez, 2005, pp. 1–11).

The presence of plastics, especially granules and fibers, is often observed in sediments near ports (UNEP, 2016, p. 88, Browne et al., 2010, p. 3406). Although it's not possible to provide exact numerical data on the introduction of plastics into the environment through migration from ports, it can be assumed that their quantity will vary depending on factors such as the dynamics of work in port waters and sediments, shipping intensity, and the level of industrialization of the coastline. Contamination of aquatic ecosystems with microplastics is a significant global problem due to its negative ecotoxicological effects on fauna and flora. Harmful substances released as a result of anthropogenic activities accumulate in marine organisms through the food chain, potentially endangering human health through the consumption of seafood contaminated with toxic substances (Copat et al., 2012, pp. 78–83).

The Baltic Sea is a semi-enclosed shallow area of approximately 374,000 square kilometers, connected to the Atlantic Ocean by the North Sea. This limited water exchange makes the Baltic Sea more vulnerable to pollution than other marine areas.

The Baltic Sea is one of the world's largest brackish water areas and an ecologically unique ecosystem. The coastal zone of the southern Baltic Sea is heavily impacted by anthropogenic factors originating from industry, tourism, and shipping (Lang et al., 2018, pp. 886–894).

One of the most polluted areas of the Baltic Sea is the Gulf of Gdańsk, where wastewater from two major Polish cities, Gdańsk and Gdynia, is discharged, which indicates the presence of micropollutants in the port basins. The Gulf of Gdańsk is relatively shallow, with a densely populated coastline. The slow renewal and exchange of its waters, as well as the dominant inflow of the Vistula River, which delivers about 7% of the freshwater to the Baltic Sea, make it a significant source of pollution in the Gulf of Gdańsk. The course of the Vistula River through the most industrialized regions of Poland makes it one of the significant sources of pollution in the Gulf of Gdańsk.

Gdynia is the third-largest port in Poland, engaging in diverse service and commercial activities. The main sources of its pollution come from urban and port activities. Various sources of pollution mean that pollution levels do not change at the same rate over time.

The Port of Gdynia is protected by an external breakwater, but the intense water movement during strong winds or storms leads to mixing of port waters and sediments with the waters of the Gulf of Gdańsk, potentially causing the migration of contaminants accumulated in port basins (Radtke et al., 2012, pp. 57–66). Therefore, the quality of the sediment at the port basin significantly affects the Baltic Sea ecosystem adjacent to the port.

It is now known that recording any changes occurring in the environment requires monitoring specific parameters corresponding to anthropogenic pressure. The chapter discusses the current degree of pollution with microplastic particles and dioxins in the basins of the Port of Gdynia, with a focus on the presence of microplastics in the waters and sediments of the Port of Gdynia. Microplastics particles ranging from 0.3 mm to 5 mm were determined in selected five port basins..

Microplastics in the marine environment

Due to the increasing annual production of synthetic polymers and their low biodegradability, plastic pollution has become a significant environmental issue (Graca et al., 2017, p. 7651). Public awareness that plastics as a major marine waste category is growing rapidly, as available data indicate that they constitute from 60% to 80% of all marine litter and over 90% of all floating particles (Setälä et al., 2014, pp. 77–84, de Lucia et al., 2014, pp. 10–16). Various definitions of microplastics can be found in the literature, including not only the upper but also the lower size limits of their particles.

Plastics in the form of small particles are called microplastics and are currently considered the primary component of marine plastic pollution (Beer et al., 2018, p. 1272). Some researchers define microplastics as barely visible particles that pass through a 500 μm sieve but are retained by a 67 μm sieve (Gregory and Andrady, 2003, pp. 379–401). Imhof and others classified microplastic particles as those smaller than

1 mm (Imhof et al., 2013, pp. 867–868). However, there is still no universally accepted, clear definition of microplastic particle size ranges. Most researchers define microplastics as persistent environmental contaminants in the form of small plastic particles with a diameter smaller than 5 mm (Yu et al., 2018, pp. 1–14).

Primary microplastics are plastic particles that have micro-sized dimensions from their inception. The main sources of its include washing processes of synthetic clothes (35% of primary microplastics), tire abrasion during driving (28%), and urban dust (24%). Microbeads, most commonly added to cosmetics, constitute only 2% of these materials. Microplastics can be transported by rivers, wind, and surface runoff into marine ecosystems. Wastewater treatment plant effluents may also play a significant role in delivering plastic micro-particles to the marine environment (Frias and Nash, 2019, pp. 145–147). Secondary microplastics, on the other hand, are created as a result of the gradual degradation of large plastic fragments due to water exposure or sunlight. They can also be generated during the use of products such as tires, textiles, or paints, so degradation processes may occur before plastics are released into the environment (Imhof et al., 2013, pp. 867–868). Marine pollution with microplastics is increasing sharply, and these particles are now found in surface waters, fish, deep-sea sediments, and Arctic water and ice.

Most plastics are extremely durable in the environment, so it is expected that the quantity of these plastic micro-particles will continue to increase due to the fragmentation of macroplastics present in the environment (Rogowska et al., 2012, pp. 109–116).

An important challenge is understanding how plastics circulate and degrade in the marine environment and what they role is in ecosystems. This knowledge will allow for a quantitative assessment of the role and impact of plastics on the food chain. Currently, it is not possible to determine the origin of microplastic particles detected in environmental samples. Microplastics in the marine environment can break down into smaller fibers and plastic fragments, even nanoplastics, which can be easily ingested by many organisms, including marine invertebrates. The research is expected to provide a better understanding of the toxicological consequences of plastic micro-particles on both marine organisms and human health (Koelmans et al., 2015, pp. 325–340).

Since microplastics can be present both in the water column and in sediments, quantitative assessments of their content should be conducted for surface water and surface sediments collected from their upper layers. Various methods are used for microplastic identification. The analysis of sediment samples typically consists of several stages: sieving, drying, density separation, oxidation of organic matter, filtration, and visual sorting. One of the most significant challenges when assessing the extent of marine environmental pollution by microplastics is the non-standardized procedure for sampling, preparation, and identification of microplastic particles (Zobkov and Esiukova, 2017, pp. 724–732). Researchers from different scientific centers use a combination of two or more analytical methods for the physical and chemical characterization of microplastics. Recently, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and

Raman spectroscopy are being utilized in research (Cutroneo et al., 2020, pp. 8938–8952).

Marine environment pollution by dioxins

The term ‘dioxins’ is commonly used to refer to toxic chemical substances with a similar chemical structure and a common mechanism of toxic action. This group includes 75 polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and 135 polychlorinated dibenzofurans (PCDF). Dioxins also includes the so-called dl-polychlorinated biphenyls (PCB) (Ogura et al., 2001, pp. 173–183).

The emission of dioxins into the environment has both natural sources (e.g., volcanic, fires) and anthropogenic sources. The latter are most commonly associated with by-products of industrial processes, especially combustion processes. Dioxins are released in transportation, ironworks, pulp mills, and through leaks from industrial installations. Uncontrolled waste burning (e.g., in landfills) and household coal burning also contribute to these emissions. Volatile organic compound emissions come mostly from anthropogenic sources and only to a small extent from natural processes (Dobrzycka-Krahel, Bogalecka, 2022, p. 3773). Dioxins accumulate in sediments near their main sources, such as pulp and paper mills, chemical plants producing vinyl chloride or biocides, and in port areas. In port areas, dioxins may flow with oils and lubricants when rainwater washes away concrete surfaces and steel structures. Dioxins enter the sea from the atmosphere as a result of the interaction of water with air, from land with river water, and can also get there due to accidents and leaks in maritime transport (HELCOM, 2010, p. 74). When they penetrate into the sea, they form very muddy bottoms. Restriction on water flow (e.g., water dams, port basins) increase the toxicity of sediments because it causes the concentration of dioxins deposited on the bottom (Niemirycz, Jankowska, 2011, pp. 525–532).

Dioxins are persistent compounds that are difficult to biodegrade and have the ability to accumulate in living organisms. Their lipophilicity means that they easily penetrate from water into organic matter, and at a later stage of the trophic chain accumulate in the tissues of both marine organisms and humans (McLachlan, Udemann, 2020, pp. 1–24). They also have relatively good volatility, enabling atmospheric transport. In the marine environment, dioxins can penetrate organisms through digestive or respiratory tract, or accumulate on their surfaces through sorption processes. A significant amount of dioxins is adsorbed (surface-attached) by phytoplankton. As we move up the food chain, the concentration of dioxins in organisms intensifies. The degree of eutrophication of a water body also affects the accumulation of dioxins. The decrease in the concentration of biogens reduces the density of dioxin carriers, thereby limiting their accumulation in fish (Kowalewska et al., 2003, pp. 703–718).

The Baltic Sea is a brackish sea with limited water exchange, a high input of anthropogenic pollution, and high level of water eutrophication. The significant dioxin pollution in the air over Northern Poland promotes the migration of dioxins to the marine environment. Port channels, which are dredged to fully utilize the port’s potential,

may also be a source of pollution. Continuous dredging of the bottom of channels and port basins is associated with the deposition of spoil in adjacent ecosystems, in specially designated land or marine areas (Lewandowski et al., 2014, pp. 312–323). Therefore, it is essential to monitor the concentrations of environmentally hazardous substances, including dioxins, in port sediments adjacent to the Baltic Sea ecosystem.

Research methodology in the MPSS

Based on the adopted standards for the determination of microplastics in marine and oceanic waters (GESAMP, 2019, pp. 37–47; Masura et al., 2015, pp. 3–12), a research methodology tailored to the project's requirements was developed. Four measurement sessions were conducted in each season; in each of them, research samples were collected from surface waters in five selected port basins (Basins I, III, IV, V, VI), as well as from surface sediments at measurement points in the analyzed port basins.

Microplastics ranging in size from 0.3 mm to 5 mm were extracted from the collected samples using the developed separation methodology within the project. For particles within this size range, which allowed for qualitative analysis, the type of plastic material was identified (Dereszewska et al., 2023, pp. 6–13).

To analyze microplastics, one control sample was taken. This sample was collected in the field without contact with port water in order to assess the impact of atmospheric deposition in the port basins. The field control consisted of an empty, pre-rinsed jar opened during the collection of the test samples. Control measurements allowed for checking the cleanliness of the sample collection and analysis process. A blind sample was used to account for procedural contamination resulting from sample collection. To minimize contamination from the laboratory, test samples were covered with glass instead of plastic, and all reusable equipment was thoroughly cleaned with ethanol and rinsed with distilled water before use.

Surface sediments collected at measurement points were also subjected to external laboratory analysis standardized for the presence of microplastics and dioxins. The presence of 8 types of mini-microplastics (PA 6, PE, PET, PP, PS, PMMA, PVC, PC) ranging in size from 0.027 mm to 1 mm was analyzed.

Collecting microplastics from surface waters and sediments of port basins

As part of the MPSS project *Monitoring and analysis of the impact of selected substances and materials in terms of environmental protection*, microplastics, as mentioned earlier, were collected in five selected port basins (Basins I, III, IV, V, VI). The HydroDron-1 mobile unmanned research platform was used to collect plastic particles floating at the surface of the seawater. HydroDron-1 moved in the central part of selected port basins. A plankton net was used as the tool for collecting microplastics from port waters, and it was towed 2 meters behind the stern of HydroDron-1. The net inlet was submerged below the water surface, and samples were collected horizontally. To collect microplastic samples in large bodies of water, especially from surface of seawater or port channels, mesh sizes such as 200, 330, and 350 μm are recommended and

have been used as standard sampling tools in microplastic research in recent years (Cutroneo et al. 2020, pp. 8938–8952). In the project, a plankton net with a mesh size of 300 μm (HydroBios), an inlet diameter of 25 cm, and a length of 50 cm was used. The mesh size of the net represents the lower limit of the size of collected microplastics. During the entire research period, over 4,510 m^3 of water from the Port of Gdynia basins was filtered through the plankton net and analyzed for the presence of microplastics. The volumes of individual samples ranged from 89 m^3 to 471 m^3 . After sampling in the port channels, the nets were transported in airtight stainless steel containers to the research vessel to avoid contamination of the nets in which microplastics were collected. Samples were collected by personnel wearing cotton clothing and latex gloves. After sampling, the nets were sealed and stored again in airtight containers.

Surface bottom sediments at the analyzed measurement points were collected in accordance with the PN-EN ISO 5667-19:2006 standard using a Vanveen grab sampler. The collected sediment was placed in labelled glass jars disinfected with ethanol and stored at 5°C until further analysis.

Isolating microplastic particles collected from port waters and sediments

The extraction of microplastic particles collected as part of the MPSS project from surface seawater and surface bottom sediments consisted of several main stages: drying, extraction, wet hydrogen peroxide oxidation, density separation, filtration, and visual sorting.

Solid particles collected using a plankton net from the surface waters in the examined port basins were rinsed through stainless steel sieves (Retsch, mesh sizes 5 and 0.3 mm). Shells, plants, and living organisms larger than 5 mm were removed manually. Subsequently, the collected material was dried to a constant mass. After drying, organic matter was removed from the samples (using a chemical digestion method). Various types of sample digestion (oxidative, acidic, basic, and enzymatic) can be used to separate microplastics from organic matter (Cutroneo et al., 2020, p. 8938–8952, Miller et al., 2017, p. 6–18). In the project, the digestion of labile organic matter was performed using 30% hydrogen peroxide in the presence of Fe(II) catalyst (0.05 M solution). The digestion process was repeated until all organic matter was completely removed. Plastic particles do not react chemically with the applied reagents and remain unchanged after digestion.

In the next step, sodium chloride (NaCl) was added to the mixture to increase the density of the aqueous solution to about 1.2 g/cm^3 . This solution causes low-density plastics to float to the surface. It allows the extraction of all polymer particles floating on the surface and in the seawater. The obtained mixture was transferred to a glass density separator to isolate plastic particles through flotation. All floating plastic particles collected in the density separator were separated using a vacuum filtration system (WaterVac 100-MB, Rocker Scientific) with a 0.3 mm nylon filter. The density separator was rinsed several times with distilled water to transfer all solid particles to the filtration set. In the final stage of the filtration process, the filters were rinsed with

distilled water to prevent the formation of salt crystals on their surfaces. Filters with plastic particles were transferred to glass Petri dishes and covered with aluminium foil. They were left to dry at room temperature to be used later for analysis.

In order to extract microplastics from the collected surface bottom sediments, two samples weighing 400 g each were weighed from each sample collected in the port, and dried for 24 hours at 90°C. Then, the sediments were preliminarily disaggregated using potassium metaphosphate. The prepared sediments were sieved through stainless steel sieves (Retsch, mesh sizes 5, 1, and 0.3 mm), obtaining two sediment fractions: <0.3 mm – 1 mm> and <1 mm – 5 mm>. Next, each sediment was treated with 300 cm³ of 55% zinc chloride (ZnCl₂) solution with a density of 1.6 g/cm³ in order to isolate plastics through flotation. Zinc chloride solution is commonly used to densify the solution and extract even the densest microplastics. Floating solid parts were collected using a 0.3 mm sieve. After drying, organic matter was removed by digestion with 30% hydrogen peroxide in the presence of Fe(II) catalyst (0.05 M solution), similar to the process of separating microplastics collected in port waters. The digestion process was repeated until no biological material was visible. In the next step, sodium chloride (NaCl) was added to the mixture to increase the density of the aqueous solution (density of about 1.2 g/cm³) and to separate undigested plastic particles using a glass density separator. All floating plastic particles collected in the density separator were separated using a vacuum filtration system (WaterVac 100-MB, Rocker Scientific) with a 0.3 mm nylon filter. At the final stage of the filtration process, the filters were rinsed with distilled water to prevent the formation of salt crystals on dry filters. Filters with plastic particles were transferred to glass Petri dishes and covered with aluminium foil. They were left to dry at room temperature. The dried filters with isolated microplastics collected in port waters and bottom sediments were weighed to determine the mass of microplastics. Individual particles were further analyzed to identify color, shape, and polymer type (Krasowska et al., 2022, p. 133–142). Simultaneously, density fractionation of microplastics collected in the blind sample was carried out.

Identification of microplastics collected from port waters and sediments

Plastic particles collected in the five port basins examined were identified using microscopic and spectroscopic methods.

Plastics were observed at macro and micro scales. Macroscopic observations were carried out using a FujiFilm FinePix S2500 HD camera, while microscopic observations were conducted using a Nikon AL-PHAPHOT-2YS2-H metallographic microscope connected to a Delta Optical DLT-Cam PRO 6.3MP USB 3.0 camera. Microphotographs of the analyzed plastic particles were taken in reflected light.

Chemical identification of the collected plastic particles was performed using Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and OMNIC software. FTIR spectra were recorded in Attenuated Total Reflectance (ATR) mode using a diamond cell on a Nicolet 380 FTIR spectrometer (Thermo Scientific). The particles were manually mounted on the diamond crystal and scanned with

a resolution of 4 cm^{-1} within the IR range of $4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$, and 32 scans were performed for each measurement. Only plastic particles larger than $500\text{ }\mu\text{m}$ can be analysed using ATR-FTIR (Preston-Whyte et al., 2021, pp. 1–13). The obtained spectra were automatically compared with reference spectra from 20 spectral libraries containing over 11,300 spectra, encompassing synthetic, natural, and compound materials. According to the procedure for identifying plastic particles, if the polymer type match exceeded 60%, the match was considered reliable; otherwise, it was evaluated critically (Aigars et al., 2021, pp. 4–8; Lindeque et al., 2020, pp. 1–12; Jeong et al., 2022, pp. 22–34).

Research results and discussion

Urbanized water reservoirs used for economic purposes, such as port basins, can serve as sources of microplastics entering the marine environment. Relatively many research have been conducted on the presence, quantity, and distribution of microplastics in sediment and marine and oceanic waters. Unfortunately, information regarding the sources, detection, and quantities of microplastics in port basins is still limited.

Compared to marine or inland waters, the waters of port basins are characterized by a low degree of colonization by plant and animal organisms. However, these waters may contain flocculating particles originating from cargo handling operations in ports. As part of the MPSS project, based on the sampling of solid particle using a plankton net, a relatively high content of plant-derived particles was detected. The recommended method for removing plant material is the Fenton reaction using a mixture of hydrogen peroxide with iron Fe(II) catalyst. In the case of significant amounts of animal tissue, potassium hydroxide (KOH) digestion should be used (Szymańska, Obolewski, 2020, pp. 333–345).

In most of the solid particles collected in this study, wet hydrogen peroxide oxidation effectively decomposed organic matter. Only samples collected in port basin No. IV, located near the Baltic Grain Terminal, were characterized by a significant content of hard shells seeds. These particles contained a substantial amount of fiber that was resistant to digestion. Therefore, after the filtration stage, they were manually removed using tweezers. Due to the presence of atypical contaminants in the examined samples, likely related to cargo handling, it is necessary to develop a more effective method for digesting organic matter when extracting microplastics in port waters.

Research of microplastics in ports show varying concentrations in surface sediments and surface waters. Using the HydroDron-1 mobile unmanned surface vehicle, microplastics ranging from 0.3 mm to 5 mm were collected and identified in the five examined basins of the Port of Gdynia. The concentrations were as follows: $280\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Basin I, $82\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Basin III, $524\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Basin IV, $440\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Basin V, and $410\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Basin VI. Lower concentrations of microplastics were observed in Basins I and III, which might be associated with their more open location. No microplastics sized from 0.3 to 5 mm were detected in the blank sample.

Comparing the obtained results with previous research results conducted in other ports is challenging due to differences in sampling methods, analytical procedures, and reporting units. A global comparisons suggest a lower microplastic content in the surface waters of the Port of Gdynia compared to other ports, such as Durban Port (South Africa), Suva Port (Fiji), Gothenburg Port (Sweden), Turku Port (Finland), Melbourne Port (Australia), and the industrial Stenungsund Port in Sweden (Preston-Whyte et al., 2021, pp. 1–13; Ferreira et al., 2020, pp. 1–13; Magnusson et al., 2016, pp. 67–73; Magnusson, 2014, pp. 1–17; Su et al., 2020, pp. 4–8; Noren, 2007, pp. 173–183).

In the studies carried out on sediment from the Port of Gdynia basins, microplastic concentrations ranged from 12,392 to 24,330 $\mu\text{g}/\text{kg}$ d.w., primarily consisting of microplastics in the 1 mm to 5 mm size range.

Considering that a relatively small amount of microplastics sized from 0.3 mm to 1 mm was isolated, the collected sediment samples underwent analysis in an external standardized laboratory equipped for mini-microplastic detection. The research included the analysis of the presence of 8 types of mini-microplastics: polyamide 6 (PA 6), polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polypropylene (PP), polystyrene (PS), polymethyl methacrylate (PMMA), polyvinyl chloride (PVC), and polycarbonate (PC) with sizes ranging from 0.027 mm to 1 mm. Based on the results obtained from an external laboratory, the presence of mini-microplastics was found in all analyzed sediments from the five basins of the Port of Gdynia. Figure 4.1 presents the cumulative content of mini-microplastics determined in sediment samples from five port basins.

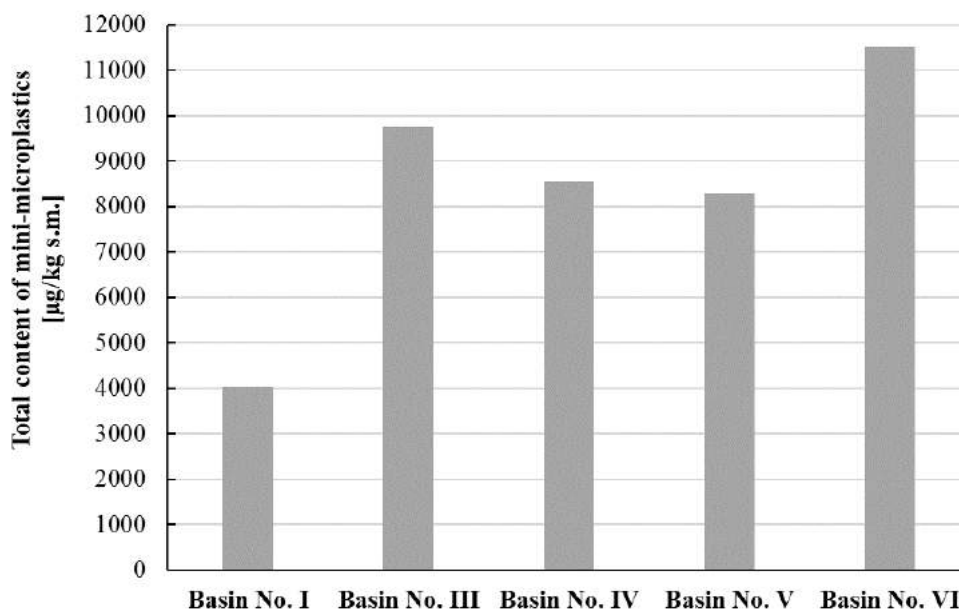


Figure 4.1. The content of mini-microplastics with a size from 0.027 mm to 1 mm collected in surface bottom sediments of the basins of the Gdynia Port (Author's work)

As part of the study, it was found that the seabed sediments of Basin No. VI of the Port of Gdynia had the highest quantity of microplastics in both the $<0.027 \text{ mm} - 1 \text{ mm}>$ and $<1 \text{ mm} - 5 \text{ mm}>$ size fractions.

Microplastic particles can be divided into four main shape categories: fragments, films, fibers, and spheres (Xu et al., 2018, pp. 647–654). The toxicity of non-spherical microplastics (i.e., fragments and fibers) is higher than of spherical microplastics (Jung et al., 2021). Fragments are defined as pieces of all dimensions roughly comparable, films as thin sheets, fibers as thin elongated particles with one dimension significantly larger, and spheres as spherical particles. In both marine and oceanic areas, fibers have been estimated to be the most abundant shape category detected in surface waters and seabed sediments, making up about half of the microplastics detected and reported in the literature (Aigars et al., 2021, pp. 4–8; Ugwu et al., 2021, pp. 1–11; Zobkov and Esiukova, 2017, pp. 724–732).

The most common colors of plastic particles are black, white, transparent, red, blue-green, and multicolored. Color is one of the indicators in identifying the source of plastic particles. Color identification of plastic particles can be challenging because microplastics lose their original color. The color change is caused by the conditions in the aquatic environment to which plastics are exposed (e.g., biofilm formation, aging). Color identification by humans is also subjective and may be hindered by visual impairments (Frias and Nash, 2019, pp. 145–147; GESAMP, 2019, p. 90; Xu et al., 2018, pp. 647–654).

Plastic particles collected in the waters and seabed sediments of the Port of Gdynia were sorted and categorized based on color and shape. Figure 4.2 presents the four categories of microplastics identified in port waters and seabed sediments: films, fragments, fibers, and spheres. Fragments and fibers dominated among the categorized shapes. Fibers and fragments were also the dominant microplastic type in the Port of Suva (Fiji) and Port Baseco (Philippines), while in the Swedish industrial port of Stenungsund, spherical particles predominated (Noren, 2007, pp. 1–11; Ferreira et al., 2020, pp. 1–13; Castro et al., 2021, pp. 1–7). The predominant colors in both the waters and sediments detected in the canal waters of the Port of Gdynia were black and white; There were also numerous transparent, colorless particles.

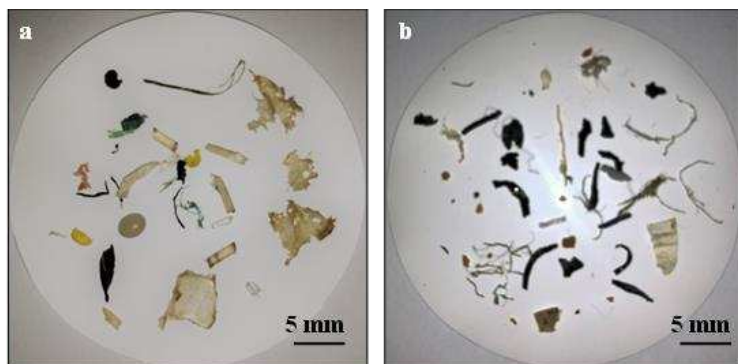
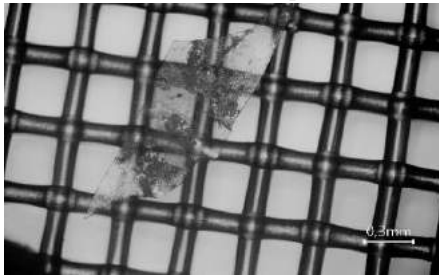


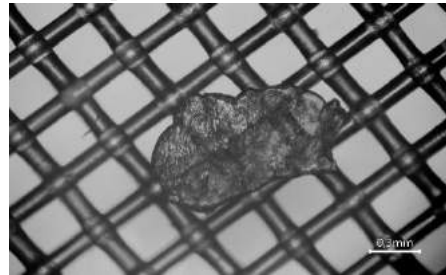
Figure 4.2. Photographs of microplastics ranging in size from 0.3 mm to 5 mm collected in the waters (a) and bottom sediments (b) of the Gdynia Port (Author's work)

The macroscopic observations were confirmed by microscopic observations. The microphotographs presented in Figure 4.3 illustrate various examples of microplastic shapes collected in the examined port basins.

Microplastics (0.3 – 5 mm) collected in port waters



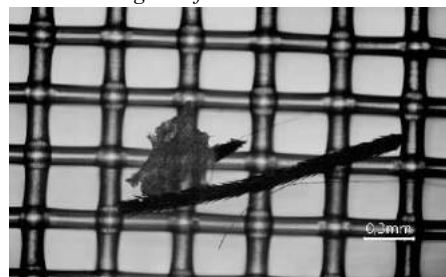
Film from Basin No. VI



Fragment from Basin No. V

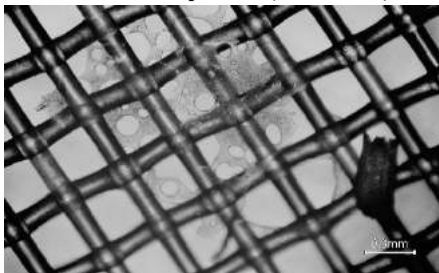


Fibre from Basin No. I

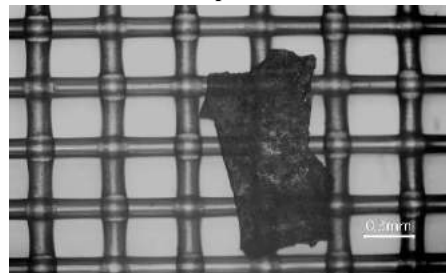


Fibre and film from Basin No. III

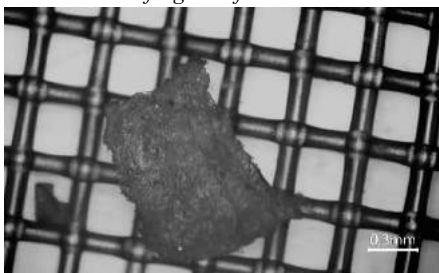
Microplastics (0.3 – 5 mm) collected in bottom sediments of port basins



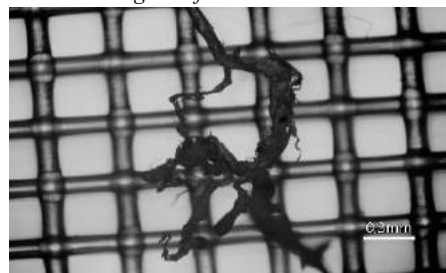
Film and fragment from Basin No. I



Fragment from Basin No. V



Fragment from Basin No. III



Fibres from Basin No. IV

Figure 4.3. Examples of microphotographs of plastic particles ranging in size from 0.3 mm to 5 mm collected in the waters and bottom sediments of the Gdynia Port (Author's work)

In the MPSS project, a total of 90 particles larger than 500 μm were extracted from water and port sediments, enabling a qualitative identification of polymers. Using infrared spectroscopy, the spectrum of each analyzed particle was obtained and compared to a reference to determine what polymer each particle was made of. The ATR-FTIR technique allows for unambiguous determination of whether the particles are made of plastic.

Polyolefins and their derivatives predominated among the identified plastic particles present in waters and sediments of the Port of Gdynia. The most commonly identified polymers in the waters of the Port of Gdynia were polyethylene (PE) and polypropylene (PP). The identification of these two polymers is consistent with polymers typically found in marine environment. The main polymers detected in the surface waters of the Port of Durban (South Africa) were polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), and polystyrene (PS), while in the Port of Suva (Fiji), polypropylene (PP), and polyethylene (PE) were predominant (Ferreira et al., 2020, p. 1–13; Preston-Whyte et al., 2021, p. 1–13). In addition to PE and PP, in the sediments of the Port of Gdynia, poly(ester urethane), cellophane, polyamide 6, and acrylamide were also identified.

Based on the results obtained from a standardized external laboratory, plastics such as PE, PP, and PS dominated among the mini-microplastics ranging from 0.027 mm to 1 mm extracted from the five basins of the Port of Gdynia. These results clearly indicate the presence of low-density plastics in marine sediments, which is probably caused by biofouling, i.e., the covering of these plastics with organic matter, and their subsequent sedimentation (Graca et al., 2017, p. 7650–7661).

In the external laboratory, sediment samples from all measurement points were also tested for the presence of dioxins. Measurements were conducted at different times of the year. The results varied depending on the sampling location and time of year. The results obtained for samples collected in the autumn session are presented in Table 4.1.

Table 4.1. Dioxin content [ng/kg d.m.] recorded at individual measurement points of the Port of Gdynia basins in autumn session 2022 (Author's work)

Parameter	Basin VI point 1	Basin VI point 2	Basin V point 3	Basin V point 4	Basin IV point 5	Basin I point 6	Basin III point 7
dry mass	97.7	98.0	96.7	98.3	97.6	96.2	98.1
2,3,7,8-TetraCDD	0.235	< 0.165	< 0.170	< 0.180	0.274	< 1.91	< 0.172
1,2,3,7,8-PentaCDD	0.981	0.297	< 0.226	< 0.240	0.968	< 2.55	< 0.230
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	1.65	0.547	< 0.452	< 0.481	1.81	< 5.09	< 0.460
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	8.56	2.42	0.895	0.973	8.50	9.37	< 0.460
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	3.32	1.27	0.523	0.612	2.85	< 5.09	< 0.460
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	191	66.4	35.2	38.5	199	185	6.61
OctaCDD	902	328	164	144	962	882	36.6
2,3,7,8-TetraCDF	8.47	2.44	1.68	2.02	9.11	7.21	0.508
1,2,3,7,8-PentaCDF	3.07	0.645	< 0.415	< 0.441	3.00	< 4.67	< 0.421
2,3,4,7,8-PentaCDF	6.40	1.94	1.02	1.14	6.91	5.95	< 0.421
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	9.25	3.20	1.19	1.08	9.89	13.3	< 0.383
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	4.91	1.66	0.476	0.512	3.05	5.21	< 0.383
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	< 0.40	< 0.36	< 0.377	< 0.401	< 0.401	< 4.25	< 0.383
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	2.13	0.792	< 0.377	< 0.401	2.05	< 4.25	< 0.383
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	31.7	10.8	4.29	4.10	32.1	39.2	1.29
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	2.73	0.999	0.520	0.494	2.39	< 4.03	< 0.364
OctaCDF	33.1	12.3	3.49	3.36	30.4	< 34.0	< 3.07
WHO(2005)-PCDD/F TEQ (upper-bound)	9.63	3.22	1.76	1.90	9.81	14.3	0.978

In the surface layer of bottom sediments, high concentrations were obtained for two polychlorinated dibenzo-p-dioxins: OctaCDD (5.5–869 ng/kg d.w.) and 1-, 2-, 3-, 4-, 6-, 7-, 8-HeptaCDD (0.9–172 ng/kg d.w.). The predominance of PCDDs over PCDFs indicates that the main source of dioxins in the Port of Gdynia basins is the atmosphere. The significant presence of these chlorinated derivatives suggests that their source is combustion processes (Sundqvist 2009, pp. 396–409). The total concentration of 17 dioxin derivatives (presented in the last row as WHO-TEQ) did not exceed 21.5 ng/kg d.w. at any point, which is considered the minimum concentration level of dioxins that can cause adverse biological effects (Canadian Council of Ministers of the Environment 2001, pp. 1–7). The results indicate that the bottom sediments from the Port of Gdynia do not pose a threat to the environment.

Summary

Taking into account the fact that the Port of Gdynia conducts diverse commercial and service activities, it can be concluded that the main sources of pollution of its waters come from such activities, and additionally from municipal activities. Unfortunately, there is still relatively little data available on the recognition of pollution in port waters. There is also a lack of information on the extent to which port waters, the pollution of which can be relatively easily and regularly monitored, serve as an indicator of pollution in the surrounding coastal waters.

New directions in marine environmental research include the assessment of pollution by synthetic plastics and dioxins. The research carried out as part of the project provided preliminary data on the presence of microplastics in surface waters and surface sediments of the Port of Gdynia waters, as well as the contamination of sediments with dioxins. The research results indicate relatively low contamination of surface waters and sediments of the Port of Gdynia with microplastics ranging in size from 0.3 mm to 5 mm. In port sediments, a fairly high concentration of mini-microplastics ranging in size from 0.027 mm to 1 mm was observed. Regardless of the season, the dominant plastic particles in both port waters and sediments are polyethylene and polypropylene.

The analysis of dioxin pollution in the sediments of the Port of Gdynia area showed that their main source is atmospheric pollution from combustion processes. The penetration of dioxins from the atmosphere into the bottom sediments occurs through various physicochemical processes (e.g., atmospheric deposition and adsorption processes).

As part of the MPSS project, it was found that mobile unmanned aquatic platforms can be used to collect microplastic samples, especially from surface seawater in the port basin. Research has shown that plankton nets are a useful tool for collecting microplastics in port conditions.

In an era of growing interest in the state of the natural environment, it is essential to monitor, preserve, and manage the marine ecosystem in a sustainable manner for the benefit of contemporary societies and future generations. Research conducted as part of

the project *Monitoring and Observation System for Port Areas using Mobile Unmanned Research Platforms* meets these needs.

References

- Aigars, J., Barone, M., Suhareva, N., Putna-Nimane, I., & Dimante-Deimantovica I. (2021). Occurrence and spatial distribution of microplastics in the surface waters of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112860>
- Beer, S., Garm, A., Huwer, B., Dierking, J., & Nielsen, T.G. (2018). No increase in marine microplastic concentration over the last three decades – A case study from Baltic Sea. *Science of The Total Environment*, 621, 1272–1279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.101>
- Browne, M. A., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2010). Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3404–3409. <https://doi.org/10.1021/es903784e>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2001). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Polychlorinated dioxins and furans (PCDD/Fs)*. Winnipeg: Canadian Environmental Quality Guidelines, 1–7.
- Castro, L. J. A., Monsada, A. M., & Cruz, K. D. (2022). Occurrence of microplastics in the sediments of Baseco Port area at Manila Bay, Philippines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 958, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012009>
- Copat, Ch., Bell, F., Castaing, M., Fallico, R., & Sciacca, M. (2012). Heavy Metals concentrations in fish from Sicily (Mediterranean Sea) and Evaluation of Possible Health Risks to Consumers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88 (1), 78–83. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0433-6>
- Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., Lenoble, V., Malatesta, A., Mounier, S., Petrillo, M., Rovetta, R., Stocchino, A., Tesan, J., Vagge, G., & Capello, M. (2020). Microplastics in seawater: sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8938–8952. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07783-8>
- de Lucia, G.A., Caliani, I., Marra, S., Camedda, A., Coppa, S., Alcaro, L., Campani, T., Gianetti, M., Coppola, D., Cicero, A. M., Panti, C., Baini, M., Guerranti, C., Marsili, L., Massaro, G., Fossi, M. C., & Matiddi, M. (2014). Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian coast (Central-Western Mediterranean Sea). *Marine Environmental Research*, 100, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.017>
- Dereszewska, A., Krasowska, K., & Popek, M. (2023). Microplastics in harbour sewaters: a case study in the Port of Gdynia, Baltic Sea. *Sustainability*, 15(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su15086678>
- Dobrzycka-Krahel, A., & Bogalecka, M. (2022). The Baltic Sea under anthropopressure – the sea of paradoxes. *Water*, 14(22), 3772, 1–20. <https://doi.org/10.3390/w14223772>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P., & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One*, 9:e111913, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Ferreira, M., Thompson, J., Paris, A., Rohindra, D., & Rico, C. (2020). Presence of microplastics in water, sediments and fish species in an urban coastal environment of Fiji, a Pacific small island developing state. *Marine Pollution Bulletin*, 153:110991, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110991>

- Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- GESAMP (2019). *Guidelines for the monitoring & assessment of plastic litter in the ocean*. Report and Studies No. 99. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. <http://www.gesamp.org/site/assets/files/2002/rs99e.pdf>
- Graca, B., Szewc, K., Zakrzewska, D., Dolega, A., & Szczerbowska-Boruchowska, M. (2017). Surface and fate of microplastics in the marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea – a preliminary study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 7650–7661. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8419-5>
- Gregory, D. A., & Andrady, A. L. (2003). *Plastic in the marine environment*. Wiley & Sons.: New Jersey
- Guerra-Garcia, J. M., & Garcia-Gomez, J. C. (2005). Assessing pollution levels in sediments of a harbour with two opposing entrances. Environmental implications. *Journal of Environmental Management*, 77, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.01.023>
- Haseler, M., Balciunas, A., Hauk, R., Sabaliauskaite, V., Chubarenko, M., Ershova, A., & Schernewski, G. (2020). Marine Litter Pollution in Baltic Sea Beaches-Application of the Sand Rake Method. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599978>
- HELCOM (2010). Hazardous substances in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of hazardous substances in the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings 2010 120b*. <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP120B.pdf>
- Imhof, H. K., Ivleva, N. P., Schmid, J., Niessner, R., & Laforsch, C. (2013). Contamination of beach sediments of subalpine lake with microplastics debris. *Current Biology*, 23(19), R867-R868. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.09.001>
- Jeong, H., Kusano, T., Addai-Arhin, S., Nugraha, W. C., Novirsa, R., Phan Dinh, Q., Shirotsaki, T., Fujita, E., Kameda, Y., Cho, H. S., Ishibashi, Y., & Arizono, K. (2022). Differences in microplastic distributions on the surface freshwater collected using 100 and 355 µm meshes. *Environmental Monitoring and Contaminants Research*, 2, 22–34. <https://doi.org/10.5985/emcr.20210008>
- Jung, J. W., Park, J. W., Eo, S., Choi, J., Song, Y. K., Cho, Y., Hong, S. H., & Shim, W. J. (2021). Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape. *Environmental Pollution*, 270, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116217>
- Koelmans, A. A., Besseling, E., & Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review. In: M. Bergmann, L. Gutow, i M. Klages (Eds). *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Cham: London, 325–340. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>
- Kowalewska, G., Konat-Stepowicz, J., Wawrzyniak-Wydrowska, B., & Szymczak-Zyła, M. (2003). Transfer of organic contaminants to Baltic in Odra Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 703–718. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00062-6)
- Krasowska, K., Dereszewska, A., & Popek, M. (2022). Preliminary approach to ecological risk assessment of microplastics in selected coastal regions of Baltic Sea. In: K. Kołowrocki, M. Bogalecka, E. Dabrowska, B. Magryta-Mut (Eds), *Safety and Reliability of Systems and Processes, Summer Safety and Reliability Seminar*. Gdynia Maritime University: Gdynia, 133–142. <https://doi.org/10.26408/srsp-2022>
- Lang, S. C., Mayer, P., Hurtsthouse, A., Kötker, D., Hand, I., Schulz-Bull, D., & Witt, G. (2018). Assessing PCB pollution in the Baltic Sea – an equilibrium partitioning based study. *Chemosphere*, 191, 886–894. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.073>
- Lewandowski, K., Witt, M., Kobusińska, M., & Niemirycz, E. (2014). Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and pentachlorophenol (PCP) in bottom sediments of the Port of Gdansk. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 43, 312–323. <https://doi.org/10.2478/s13545-014-0146-7>

- Lindeque, P. K., Cole, M., Coppock, R. L., Lewis, C. N., Miller, R. Z., Watts, A. J. R., Wilson-McNeal, A., Wright, S. L., & Galloway, T. S. (2020). Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size. *Environmental Pollution*, *65*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>
- Magnusson, K. (2014). *Microplastic and other microscopic anthropogenic particles in the sea area off Rauma and Turku, Finland*. Swedish Environmental Institute: Stockholm, Sweden.
- Magnusson, K., Eliasson, K., Fråne, A., Haikonen, K., Hultén, J., Olshammar, M., Stadmark, J., & Voisin, A. (2016). *Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment. A review of existing data. Report C 183*. Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, Sweden. <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473b16/1628417679619/FULLTEXT01.pdf>
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., & Herring, C. (2015). *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*. NOAA Marine Debris Division: Silver Spring. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-604>
- McLachlan, M., & Undeman, E. (2020). *Dioxins and PCBs in the Baltic Sea*. HELCOM Baltic Sea Environment Proceedings, no. 171. https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/06/Helcom_171_Dioxins_PCBs.pdf
- Miller, M. E., Kroon, F. J., & Motti, C. A. (2017). Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Maritime Pollution Bulletin*, *123(1–2)*, 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.058>
- Niemirycz, E., & Jankowska, D. (2011). Concentrations and profiles of PCDD/Fs in sediments of major Polish rivers and the Gdansk Basin-Baltic Sea. *Chemosphere*, *85(3)*, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.08.014>
- Noren, F. (2007). *Small plastic particles in coastal Swedish waters*. KIMO Sweden
- Ogura, I., Masunaga, S., & Nakanishi, J. (2001). Congener-specific characterization of PCDDs/PCDFs in atmospheric deposition: Comparison of profiles between deposition, source and environmental sink. *Chemosphere*, *45(2)*, 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00584-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00584-1)
- Peng, G., Bellerby, R., Zhang, F., Sun, X., & Li, D. (2020). The ocean's ultimate trashcan: Hadal trenches as major depositories for plastic pollution. *Water Research*, *168*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115121>
- Preston-Whyte, F., Silburn, B., Meakins, B., Bakir, A., Pillay, K., Worship, M., Paruk, S., Mdazuka, Y., Mooi, G., Harmer, R., Doran, D., Tooley, F., & Maes, T. (2021). Meso- and microplastics monitoring in harbour environments: A case study for the Port of Durban, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, *163*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111948>
- Radtke, B., Wasik, A., Jewell, L., Pączek, U., Gałuszka, A., & Namieśnik, J. (2012). The seasonal changes of organotin compounds in water and sediments samples collected from the area of Port of Gdynia. *Science of The Total Environment*, *441*, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.006>
- Rogowska, W., Skorbiłowicz, E., Skorbiłowicz, M., i Trybułowski, L. (2021). Microplastic in costal sediments of Elćkie Lake (Poland). *Studia Quaternaria*, *38*, 109–116. <https://doi.org/10.24425/sq.2021.136827>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, *185*, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- Su, L., Sharp, S. M., Pettigrove, V. J., Craig, N. J., Nan, N., Du, F., & Shi, H. (2020). Superimposed microplastic pollution in a coastal metropolis. *Water Research*, *168*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115140>

- Sundqvist, K. L., Tysklind, M., Cato, I., Bignert, A., & Wiberg, K. (2009). Levels and homologue profiles of PCDD/Fs in sediments along the Swedish coast of the Baltic Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, *16*, 396–409. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0110-z>
- Szymańska, M., & Obolewski, K. (2020). Microplastics as contaminants in freshwater environments: A multidisciplinary review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *20*(3), 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.05.001>
- Tekman, M. B., Krumpfen, T., & Bergmann, M. (2017). Marine litter on deep Arctic seafloor continues to increase and spreads to the North at the HAUSGARTEN observatory. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *120*, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.12.011>
- Ugwu, K., Herrera, A., & Gomez, M. (2021). Microplastics in marine biota: a review. *Marine Pollution Bulletin*, *169*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112540>
- UNEP (2016). *Marine plastic debris and microplastics. Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. United Nations Environment Programme: Nairobi. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7720/-Marine_plastic_debris_and_microplastics_Global_lessons_and_research_to_inspire_action_and_guide_policy_change-2016Marine_Plastic_Debris_and_Micropla.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Xu, P., Peng, G., Su, L., Gao, Y., Gao, L., & Li, D. (2018). Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, *133*, 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.020>
- Yu, Y., Zhou, D., Li, Z., & Zhu, Ch. (2018). Advancement and Challenges of Microplastic Pollution in the Aquatic Environment: A Review. *Water, Air & Soil Pollution*, *229*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3788-z>
- Zalewska, T., Woroń, J., Danowska, B., & Suplińska, A. (2015). Temporal changes HG, Pb, Cd, Zn environmental concentrations in the southern Baltic sediments dated with 210 Pb method. *Oceanologia*, *57*(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2014.06.003>
- Zobkov, M., & Esiukova, E. (2017). Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results. *Marine Pollution Bulletin*, *114*(2), 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.060>

Chapter 5. Integration techniques for data from observational systems in coastal zone and port area monitoring

Andrzej Chybicki, Beata Szymanowska

Introduction

Geographic Information Systems (GIS) are fundamental tools for processing spatial data, enabling their collection, analysis, storage, and visualization. Thanks to the systematic development of information and telecommunications technologies, current trends in the development of GIS systems encompass a wide range of methods and techniques of acquiring and sharing spatial data. The key factors driving GIS development include advancements in such fields as electronics, surveying, telecommunications, communication systems, signal processors, and sensors. Furthermore, with the advancement of computational techniques and the emergence of supercomputers, GIS systems increasingly use techniques for processing large datasets (big data) (Graham and Shelton, 2013, pp. 255–261; Pijanowski et al., 2014, pp. 250–268), artificial intelligence algorithms (Tien Bui et al., 2017, pp. 32–44), machine learning (Kobler and Adamic, 2000, pp. 291–300; Pradhan, 2013, pp. 350–365), and modeling of business and environmental processes (Bhatt et al., 2014, pp. 70–84; Formetta et al., 2014, pp. 190–200; Tavares et al., 2009, pp. 1176–1185).

This chapter focuses on data integration techniques that allow for the extraction of new knowledge about observed phenomena or improve the quality of the analyzed observations, measurements, or data processing results. In particular, observation techniques using satellite systems and methods for estimating bathymetry in the coastal zones based on point hydroacoustic measurements and multispectral Sentinel imagery will be present.

Satellite observation systems - general characteristics of European Observation Systems

The European Earth observation Copernicus Programme (Bruniecki et al., 2014, p. 67–70; ESA, 2015a) encompasses a range of activities of the European Space Agency (ESA) in the field of Earth monitoring (ESA, 2015b). Fundamentally, the Copernicus Programme consists of a collection of observation systems and services that gather, store, process, and disseminate data from various sources, including satellites, in situ measurements, ground stations, airborne and maritime sensors (Chybicki et al., 2013, p. 19–28). Through sensor sets and data acquisition stations operating within the program, measurement results are provided to users through a suite of services related to environmental protection and security matters.

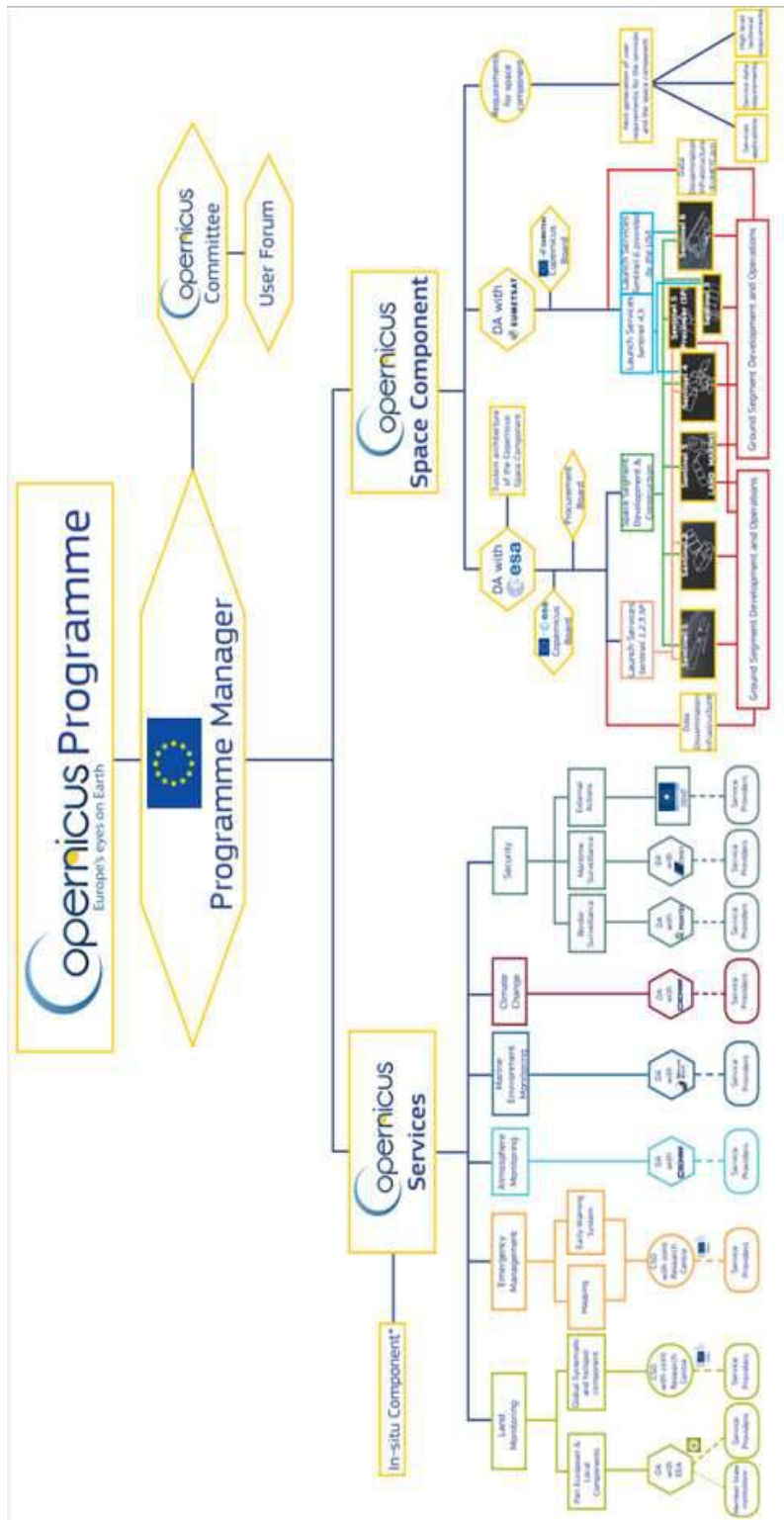


Figure 5.1. Diagram of the Copernicus program (based on materials from the European Space Agency (Chybicki et al., 2015, p. 27

The application of the Copernicus Programme may encompass the following key issue groups (Figure 5.1):

- land observation;
- sea and ocean observation;
- atmospheric observation;
- climate change observation;
- crisis management and security.

Products from the Copernicus Programme and other Earth observation systems can also be used in environmental protection, urban area management, regional and local planning, agriculture, forestry, fisheries, healthcare, transportation, climate change, sustainable development, population protection, and tourism (Żróbek-Sokolnik et al., 2014, pp. 1–2). Essential components of the Copernicus Programme infrastructure are the so-called Nearly Real-Time Services (NRT) that provide valuable information for making critical operational decisions in the event of an emergency, such as natural disasters or humanitarian crises. Copernicus Programme is coordinated and managed by the European Commission, and the development of the observational infrastructure is carried out under the auspices of the European Space Agency for the space components and the European Environment Agency and Member States for in situ measurement components.

Sentinel-1 (S-1) is the first satellite system used in the Copernicus Programme (ESA 2015c; Torres 2012, pp. 19–24). It features an advanced radar instrument that provides regular day and night Earth surface imaging independently of weather conditions (Figure 5.2). In practice, S-1 is a satellite system composed of two orbiting units separated by 180°, with a revisit time of six days.



Figure 5.2. The Sentinel-1 satellite during testing (based on materials from the European Space Agency (Chybecki et al., 2015, p. 2)

The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite imagery in monitoring the coastal zone and port infrastructure

Marine observations

In order to illustrate the capabilities of Synthetic Aperture Radar (SAR) systems in the context of observations, an analysis of imagery obtained through a set of services

available on the ESA Sentinel-1 website (ESA 2015d) can be conducted. This website provides free and open access to an updated archive of S-1 data. S-1 data is provided in the form of monochromatic images containing information about the backscattering coefficient of a given area. These images are supplemented with additional information collected using various advanced data processing methods, including imagery obtained using different antenna polarizations or interferometric techniques.

The S-1 satellites are equipped with a C-SAR sensor that offers medium to high-resolution imagery regardless of weather conditions. The C-SAR sensor can also provide night-time imagery and detect small movements on land or water (e.g., ships), making it particularly useful for monitoring coastlines and land.

As previously mentioned, data in the S-1 is acquired using the Synthetic Aperture Radar (SAR) technique for microwave imaging. The primary advantage of this method is the ability to virtually narrow radar beams in order to obtain data with higher spatial resolution than that obtained in traditional radars. In SAR, improved resolution is achieved by transmitting and receiving an active radar beam from a moving platform, with received signals being combined together as if they were received by a much larger antenna (“virtual” increase in antenna size). Another important aspect of S-1 data is the polarization type, which allows obtaining information from the acquired images regarding the type of surface from which the radar beam is scattered. Typical SAR sensors transmit beams with vertical (V) and horizontal (H) polarizations. When both signals are received by the sensor, four different sets of polarization data can be generated, i.e., VV, HH, VH, and HV.

The previous section discussed aspects related to the physical layer of signals emitted and received in the Sentinel-1 system. Equally important is the further processing of the received information to generate observational products that can be used by end-users. The Sentinel-1 system offers various data products categorized by levels and processing modes, depending on the purpose of the data, their parameters, and the size of the analyzed area. In the nomenclature used for Sentinel-1 data, Level-0 data refers to data in a raw (unprocessed) format that is compressed and unsharp. This format is the basis for all other higher-level products. Level-1 (L-1) products are intended for most users and applications. The first type of L-1 data is Ground Range Detection (GRD) imagery, which is obtained by projecting a radar beam toward the Earth’s surface, using the Earth ellipsoid model. The second type is Single Look Complex (SLC) data, which are additionally geographically linked to the satellite orbit data. Level-2 data is used to create ocean products to measure wave, wind, and sea current.

Sentinel-1 also enables data acquisition in four different modes. The first mode, Strip Map, is intended for specific cases, such as emergencies or disasters. It has an imaging width of 80 km and a spatial resolution of $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. It is obtained by emitting a sequence of signal pulses, with the antenna oriented at a specific observation angle in the azimuth plane. The Interferometric Wide Swath (IW) mode is the primary and most frequently used acquisition mode, fulfilling most service requirements. It collects data in a swath width of 250 km with a spatial resolution of $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$. It is obtained using

the Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR) technique. In this case, the observation beam is emitted in the direction of the sensor motion, which reduces measurement errors and results in spatial uniformity in terms of the quality of the acquired imagery. The Extra Wide Swath (EW) mode is similar in principle to the IW mode, except that it acquires data over a larger area, with a single-pass observational swath width of 400 km and a resolution of $20 \text{ m} \times 40 \text{ m}$. The last mode, Wave, is used for oceanic data analysis and features a specific acquisition pattern designed to monitor wave height and direction, as well as water level.

These features of the Sentinel-1 system, including the variety of data products and acquisition modes, make it a valuable tool for monitoring and observing various Earth phenomena and areas, including coastal zones and port infrastructure.

The area of the Gdańsk Bay

After introducing the general specifics of measurements with SAR systems, selected results of observations made using the S1 system for marine and port areas are presented below. In particular, the results of measurement and data analysis of S-1 data were presented for an example image recorded on December 23, 2014 in VH polarization (Figure 5.3a) and VV polarization (Figure 5.3b) of the Gdańsk Bay area. The same area was also observed during the satellite pass on January 4, 2015 (Figures 5.4a and 5.4b). Additionally, a statistical-spatial analysis of the presented data was conducted. The analysis method was as follows: first, a mask dividing the sea and land areas was generated using the S-1 Toolbox (ESA, 2015e), and then calculations were made to obtain the basic statistical parameters: mean values, standard deviation, and minimum and maximum values, for land and water respectively.

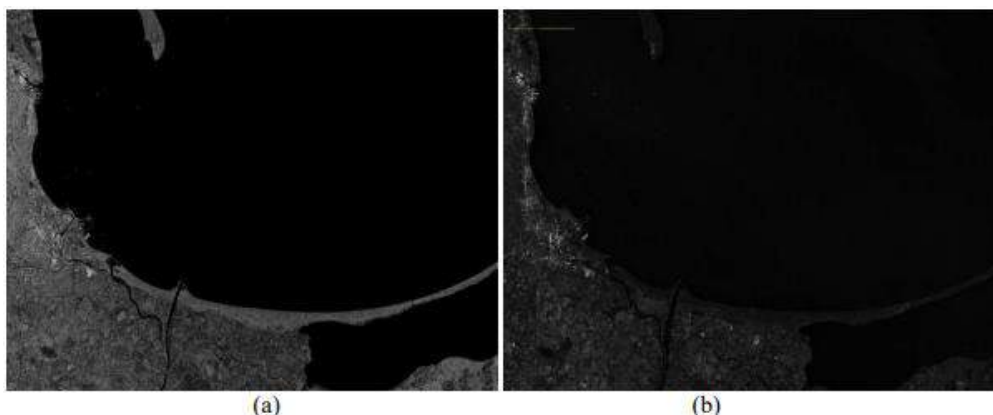


Figure 5.3. Study area 1 – Gdańsk Bay (December 23, 2014), VH polarization (a) and VV polarization (b) (Chybicki et al. 2015, p. 29)

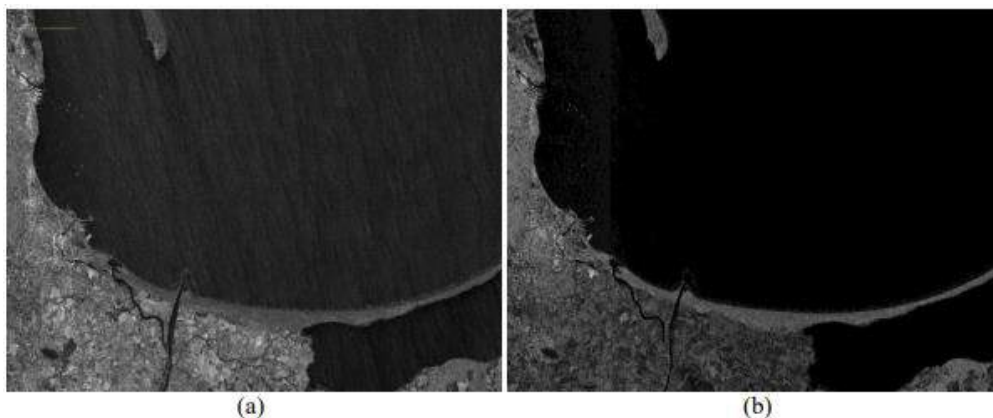


Figure 5.4. Study area 3 – Gdańsk Bay (January 4, 2015), VH polarization (a) and VV polarization (b) (Chybicki et al. 2015, p. 29)

In addition to the spatial analysis of the S-1 data, a histogram analysis was also conducted for data obtained on January 4, 2015. As can be seen in the histograms, for VH polarization (Figure 5.5a) and VV polarization (Figure 5.5b), the distributions are clearly distinguishable, and the value distribution for the land and marine area differs not only in terms of the mean value, but also in the distribution of values.

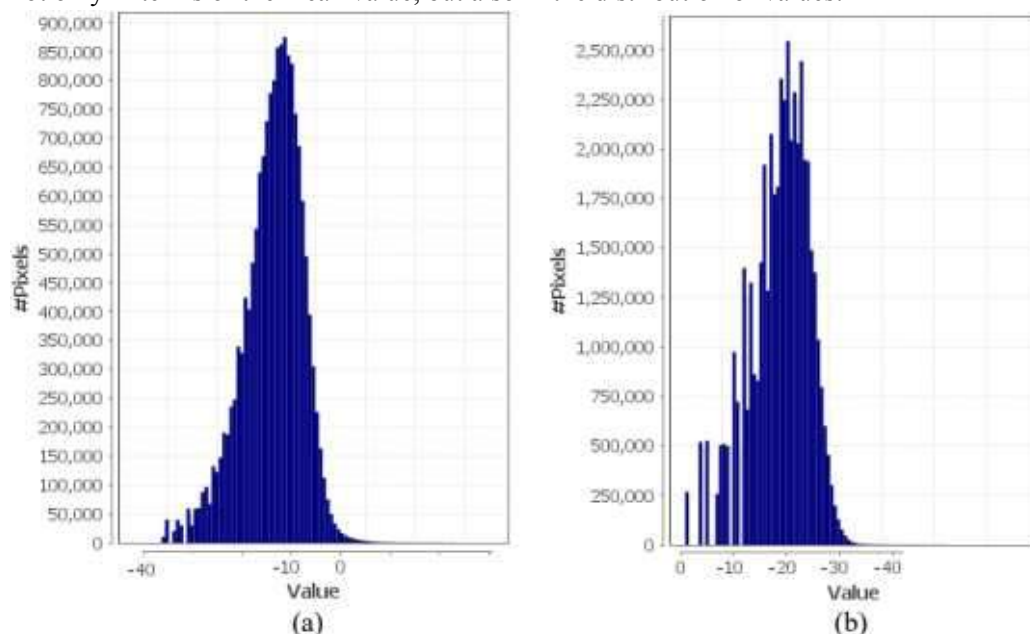


Figure 5.5. The distribution of values on the image representing the analyzed area for January 4, 2015, for land in VH polarization (a) and for the sea in VV polarization (b) (Chybicki et al. 2015, p. 30)

Additionally, Table 5.1 presents the cumulative analytical results of both acquisitions shown in Figures 5.4 and 5.5. Similar to the spatial analysis, these results also demonstrate that the average pixel intensity representing marine areas is significantly lower than that of land. This phenomenon can also be observed for minimum and max-

imum values represented as the 3rd and 97th percentiles of the data. As expected, the standard deviation for the marine area is also significantly smaller than for the land. This phenomenon can be explained by the fact that the land, especially for the Gdańsk Bay, is much more diverse than the sea (Bossard, 2000).

Table 5.1. Statistics of SAR data analysis for the Gdańsk – Bay area (Chybicki et al. 2015, p. 30)

SAR Image (acquisition date, area, polarization)	Intensity mean value [dB]	Standard deviation	Percentile 3% [dB]	Percentile 97% [dB]
23.12.2014, land, VH	-9.84	1.14	-23.64	-2.40
23.12.2014, land, VV	-17.86	1.07	-30.57	-9.35
23.12.2014, sea, VH	-20.11	0.21	-22.58	-1.80
23.12.2014, sea, VV	-28.16	0.10	-30.56	-9.46
04.01.2015, land, VH	-9.51	0.95	-23.57	-2.69
04.01.2015, land, VV	-2.88	0.74	-16.45	-0.74
04.01.2015, sea, VH	-17.69	0.23	-30.57	-11.68
04.01.2015, sea, VV	-8.15	0.47	-20.35	-0.84

Observation of critical port infrastructure in the MPSS project

The results of similar experiments for critical infrastructure objects in maritime ports, on the example of the port of Gdynia, are presented in Figures 5.6 and 5.7. As part of their work, the authors (Chybicki et al., 2015, pp. 25–32) also verified whether the accuracy and spatial resolution of Sentinel-1 data allow for the analysis of critical infrastructure, particularly relevant to transportation and maritime economy. In this case, the focus was on the Port of Gdynia area, as its specificity well demonstrates the usefulness of Sentinel-1 data. In this context, the Sentinel-1 system can be used to monitor the current state of infrastructure, detect changes or damage to infrastructure, such as breakwaters, docks, or other objects related to maritime infrastructure.

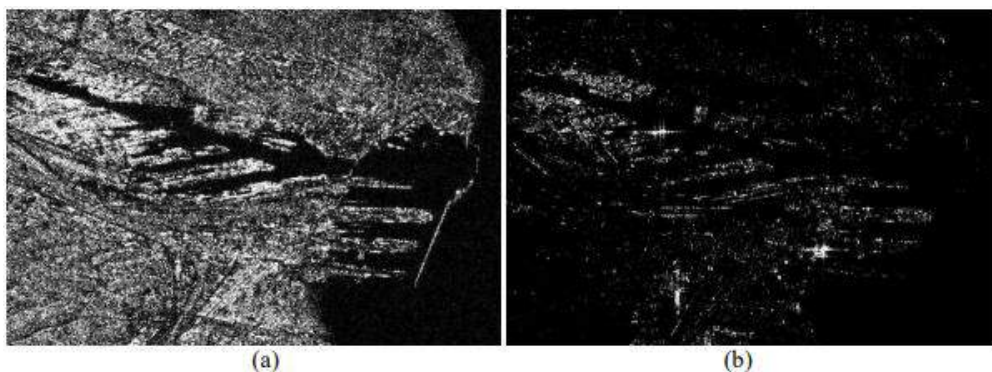


Figure 5.6. Area of analysis: Port of Gdynia (acquired on: December 23, 2015), polarization VH (a), and polarization VV (b) (Chybicki et al. 2015, p. 31)

Observation of marine areas in the MPSS project

The last presented application of S-1 data is the detection of maritime vessels conducted for the area of the Gdańsk Bay on January 4, 2015. As can be seen from the example shown in Figure 5.7, VH polarization imaging is better suited for ship detection than VV polarization because the resulting contrast between maritime areas and ships is much clearer. It's also worth noting that this application of S-1 data may provide additional information to systems already in operation, including ARPA (Bin et al., 2006, pp. 182–189; IMO, 2015), and others.

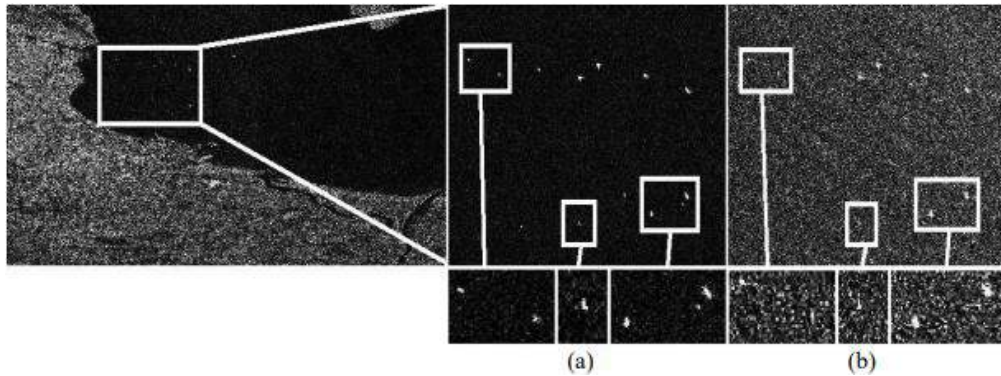


Figure 5.7. Object detection using SAR data – Port of Gdynia (access: 4.01.2015), VH polarization (a) and VV polarization (b) (Chybicki 2015, p. 31)

Integration of satellite imagery and hydroacoustic measurements for bathymetry estimation in the shallow coastal zone

In the context of satellite observations, an interesting and rapidly developing area of monitoring using satellite observations is the so-called Satellite-Derived Bathymetry (SDB). This section of the monograph presents the basics of how this technique works, its scope of utility, as well as its advantages and disadvantages in the context of coastal zone monitoring.

First, it is important to note a significant difference between the approach presented in the above subsection and the SDB technique. SAR techniques operate on an active principle, meaning they emit a radar beam, and the monitoring process is based on the analysis of signals scattered from the Earth's surface, which are emitted by the sensor. SAR observation methods fall under the category of active observations and require a greater demand for energy supplied to the sensor due to the necessity of emitting a signal toward the Earth. SDB methods, on the other hand, are classified as passive observation techniques. This means that they do not emit energy from the observation sensor but rather utilize energy generated by the Sun.

It is worth noting that for the purposes of this study, the scope of considerations regarding coastal observation systems or satellite systems has been significantly narrowed. The focus will be solely on observations using multispectral imaging of the Sentinel-2 system to estimate bathymetry in optically shallow waters. In essence, this section contains a description of the results and conclusions from the works described

in the literature (including Chybicki, 2017a, pp. 15–25; Chybicki, 2017b, pp. 1–23), encompassing their implementation, performance evaluation, and optimization of bathymetry estimation models in the coastal zone.

Models SDB

Typically, all currently used SDB models are based on the radiative transfer equation for optically shallow waters (equation 6):

$$L_{TOA} = L_{\infty}[1 - e^{-kz}] + A_d e^{-2kz} + L_A + L_S, \quad (1)$$

where, $L_{\infty}[1 - e^{-kz}]$ represents the reflectance effect for optically deep waters (i.e., without interactions related to bottom reflectance), A_d is the radiance incident directly on the water surface (before interacting with the overlying water column), k is the attenuation coefficient (absorption) of radiation in the water column of depth z , L_A represents the effect of light absorption in the atmosphere, and L_S represents the surface reflectance effect. Hence, the expression $A_d e^{-2kz}$ represents the attenuation effect of energy resulting from light transfer in a water column of depth z . SDB models allow extracting information about water depth based on the energy recorded by a sensor after interactions with the atmosphere, water surface, water column, and bottom reflectance.

There are two fundamental approaches to obtaining Satellite Derived Bathymetry (SDB), both use mechanisms to remove the surface light scattering effect, providing depth information from the optical properties of the water column. These approaches are:

- Stumpf Model (Stumpf et al., 2003, s. 547–556).
- Lyzenga Model (Lyzenga, 1978, s. 379–383; Lyzenga, 1981, s. 71–82).

Stumpf Model (Log-Ratio Model)

The first of the discussed approaches is described by the equation relating the estimated depth (z_{est}) to the logarithmic ratio of reflectance in two selected sensor channels:

$$z_{est} = m_1 \frac{\ln(R(\lambda_i))}{\ln(R(\lambda_j))} + m_0, \quad (2)$$

where z_{est} is the estimated depth being sought, m_0 and m_1 are model coefficients, and $R(\lambda_i)$ and $R(\lambda_j)$ represent the recorded reflectance in channels with central wavelengths λ_i and λ_j . Since universal calibration coefficients for this model are not currently available in the literature, the model should be calibrated each time, i.e., for each observation, using available measurement points (Pe'eri et al. 2014, pp. 293–314; Su et al. 2008, pp. 281–298). The model calibration method involves creating a pair of <observation, model value> for each analyzed pixel of the image. For each pair, the model value is calculated using equation (7) with initial values $m_1 = 1$ and $m_0 = 0$. Then, the resulting set of pairs undergoes regression to obtain optimal values of m_0 and m_1 which allows to obtain an optimized SDB model. The results of this process are presented in Figures 5.8 and 5.9.

Figure 5.8 illustrates the relationship between the obtained depth values in the SDB model at specific points compared to the actual measured values acquired using a traditional hydroacoustic measurements. Figure 5.9 visually represents a bathymetry map for the calibrated Stumpf model, where the color of each pixel in the image corresponds to the estimated depth.

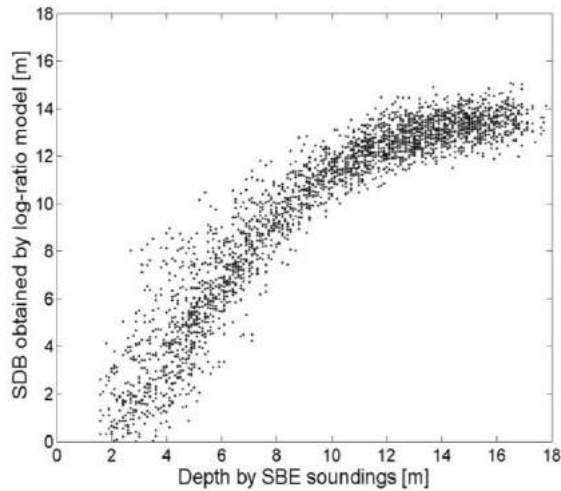


Figure 5.8. A scatter plot illustrating the relationship between measurement samples obtained from hydroacoustic soundings (x-axis) and the calibrated Stumpf model (y-axis). This is a test case for May 6, 2016, using imagery obtained through the Sentinel-2 system (Author's work)

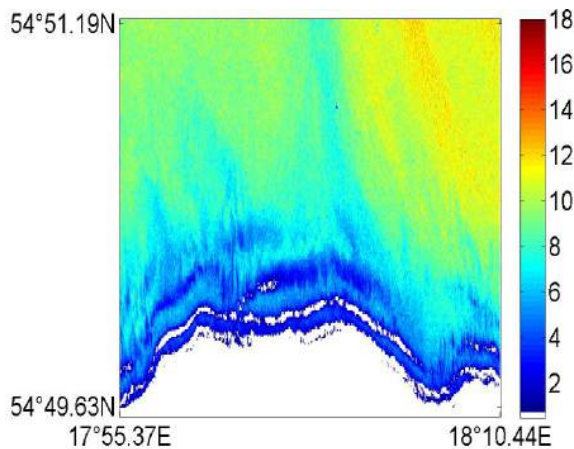


Figure 5.9. Result of the model - bathymetry estimation based on the calibrated Stumpf model. Pixel color represents depth in meters. White spots indicate pixels removed from the analysis, i.e., classified as land. (Author's work)

Lyzenga Model (Analytical Model)

The analytical model is a generalization of the approach used in the Stumpf model, assuming that the ratio of the backscattering coefficient from the bottom between two

spectral bands is constant for all types of bottoms, and the variability of light attenuation due to atmospheric effects is negligible for a given area. The estimated depth using the model can then be expressed as:

$$z_{\text{est}} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \ln[R(\lambda_i) - R_{\infty}(\lambda_i)] \quad (3)$$

where N is the number of channels recorded by the sensor, α_i ($i = 1, 2, \dots, N$) are the model parameters, and $R_{\infty}(\lambda_i)$ represents the reflectance for an area characterized by no bottom reflection. The assumptions regarding the need to calibrate the analytical model are similar. The difference in the calibration methods lies in the fact that this model consists of at least four parameters ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$), which undergo calibration using observations made in the Sentinel-2 visible range (R, G, B). In this case, having a set of calibration points M , the calibration of the model is performed based on the equation:

$$SDB_{M(k)} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \ln[R(\lambda_i)_{M(k)} - R_{\infty}(\lambda_i)] \quad (4)$$

where $SDB_{M(k)}$ is the result of the model for the k -th calibration point in the imagery, where k ($1, 2, \dots, K$), K is the total number of calibration points, and $R(\lambda_i)_{M(k)}$ is the reflectance corresponding to point $M(k)$. Finding the set of optimal parameters is achieved by solving a set of linear equations, which can be represented in matrix form as follows:

$$\hat{\alpha} = [L^T W L]^{-1} L^T z \quad (5)$$

where $\hat{\alpha}$ is a column vector of length N consisting of the optimal model parameters (α_i), W is an optional matrix of size $K \times K$, L is a matrix with dimensions $K \times N$, and z is a K -element column vector containing the values of $SDB_{M(k)}$.

In the research conducted during the MPSS project and described in the literature (Chybicki, 2017a, pp. 25–32), a series of experiments were carried out to evaluate the models in the context of their application for monitoring bathymetry in the coastal zone. The conclusions from this research can be summarized as follows:

- Both models, i.e., the Stumpf model (log-ratio mode) (Figure 5.9) and the LyZenga model (analytical) (Figure 5.11), exhibited similar limitations regarding their ability to estimate maximum depth. This phenomenon was repeatable for many test cases, indicating that the main limitation of the models lies in the physical (optical) properties of the water column being estimated;
- The maximum estimation depth for the presented test site is variable and depends on local conditions, but generally does not exceed 16 meters. However, for all test cases (as described in more detail in Chybicki, 2017a), it is over 12 meters;
- In the process of model calibration using pixels corresponding to greater depths, the calculated depth estimator becomes independent of the actual depth (Figure 5.10). As a result, the level of errors introduced during the calibration process increases, and training the model using the mentioned calibration points reduces its overall quality.

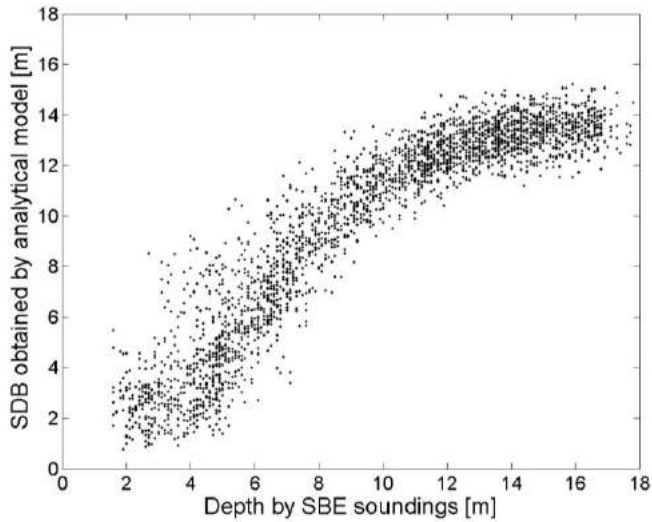


Figure 5.10. Scatter plot illustrating the relationship between measurement samples obtained from hydroacoustic soundings (x-axis) and the calibrated analytical model (Lyzenga) (y-axis). This is a test case for May 6, 2016, using imagery obtained through the Sentinel-2 satellite (Chybicki, 2017a, pp. 25, 32)

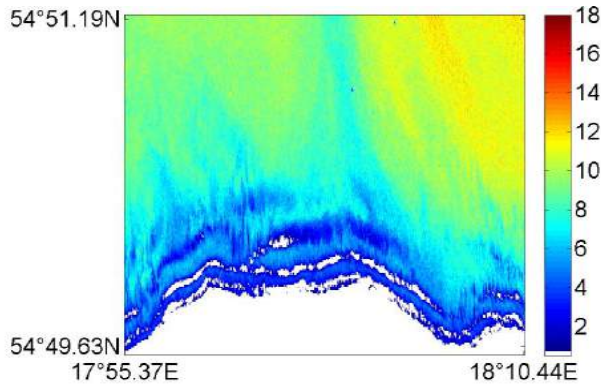


Figure 5.11. Result of the model – bathymetry estimation based on the calibrated analytical model (Lyzenga). Pixel color represents depth in meters. White pixels, classified as land, have been removed from the analysis (Chybicki, 2017a, pp. 25–32)

Local models SDB

The bathymetry estimation models in the coastal zone presented above did not take into account the local variability of water optical properties and could only be applied to relatively small areas. An important advancement in bathymetry modeling was the development of Shallow Water Bathymetry (SDB) models that consider the local spatial autocorrelation of their properties. In contrast to global learning systems, local approaches break down the global optimization problem into multiple learning sub-problems (Stulp and Sigaud, 2015). In the context of the discussed issue, one of the most commonly used approaches is Geographically Weighted Regression (GWR) (Fotheringham et al., 1998, pp. 1905–1927).

In general, Geographically Weighted Regression (GWR) involves adapting the model to incorporate the local (geographical) dependence of parameters, as follows:

$$z(x, y) = \alpha_0(x, y) + \sum_j \alpha_j(x, y) \hat{B}(x, y) \quad (6)$$

where $\hat{B}(x, y)$ is the estimated bathymetry based on the initial parameters of equation (7), and j is the number of selected remote sensing channels. In this case, optimizing the model (determining the optimal weights) requires transforming the global cost function J'_G into a sum of independent local functions J_l :

$$\begin{aligned} J'_G &= E \left[\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N [w_{l,i} (z_i - \Phi(o_i)^T \alpha_k)^2] \right] = \\ &= \sum_{l=1}^L E \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_{l,i} (z_i - \Phi(o_i)^T \alpha_k)^2 \right] = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L J_l \end{aligned} \quad (7)$$

where $E[\cdot]$ is the expectation operator, z_i is the value (depth) of the i -th calibration point, $\Phi(o_i)^T$ is the observation vector o_i corresponding to the i -th computed point based on the initial conditions of equation (12), and $w_{l,i}$ is the weight of the i -th observation in the l -th ($l = (1, 2, \dots, L)$) local model. In a locally optimized SDB model, the weight values $w_{l,i}$, which define the geographic locations of local models, must be defined a priori in such a way that the farther away from the center of a given local model, the less important calibration at a given point is. In this case, the optimal model weights are determined by a set of L equations:

$$\hat{\alpha}_l = [X^T W_l X]^{-1} X^T W_l Z \quad (8)$$

where $W_l \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is a diagonal matrix in which individual elements represent the "significance" of each observation, inversely proportional to its distance from the geographic center of the local model.

An important step in the development of the GWR approach is the extension to the Three-Dimensional Geographically Weighted Regression (3GWR) model. This approach goes beyond using local regression only in the horizontal (geographic) plane, as demonstrated in previous research (Su et al., 2014, 2015), and extends it to the vertical (depth) plane of the analyzed region (Chybicki, 2017a, p. 25–32). The 3GWR approach involves introducing an additional set of local models connected with the GWR model. This is achieved by using a two-step procedure in the pixel depth determining process. In the first step, the depth is determined based on locally optimized models dependent on depth. Then, the final pixel depth is determined as the weighted average of the locally dependent estimates. This means that the local regression coefficients depend not only on the geographic location of the point, as in the GWR model, but also on its depth.

In this case, the cost function J''_G of the local problem set is formulated as follows:

$$J''_G = E \left[\frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N [w_{l,i} w_{l,d,i} (z_i - \Phi(o_i)^T \alpha_d)^2] \right] = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D J_{d,l} \quad (9)$$

where D is the total number of depth-dependent local models, $d = (1, 2, \dots, D)$. In this case, finding the estimation $\hat{\alpha}_d$ for which J''_G takes the minimum value requires con-

structuring an additional set of matrix equations, similarly to the case of GWR. In this case, the local model determined by the depth parameters α_d , s defined using the following additional set of equations:

$$\hat{\alpha}_d = [X^T W_d X]^{-1} X^T W_d z \quad (10)$$

where W_d s the depth-dependent weight matrix for the central depth d , with values along its diagonal representing weights inversely proportional to the distance from the center of the local depth model.

The 3GWR method allows for a significant improvement in the model's performance, which has been verified based on imagery obtained through the Sentinel-2 satellite system. The model's quality was assessed using two measures, namely the Pearson correlation coefficient (R) and the Root Mean Square Error (RMSE). The results of the model's performance are presented in Table 5.2.

Table 5.2. Comparison of results obtained using the proposed 3GWR model and comparison to the GWR model (Chybicki 2017b, p. 1–23)

Test set/ Measurement date	The proposed method 3GWR		GWR		Relative reduction in error RMSE
	R (min-max)	RMSE [m] (min-max)	R (min-max)	RMSE [m] (min-max)	[%]
March 4, 2016	0,91–0,93	1,07–1,23	0,9–0,91	1,31–1,46	17
March 9, 2016	0,95±0,005	0,88–0,95	0,94	1,16–1,24	23
March 27, 2016	0,93–0,94	1,01–1,07	0,91–0,92	1,45–1,5	29
May 6, 2016	0,95±0,004	1,08–1,14	0,93–0,94	1,53–1,62	30

The increase in the correlation coefficient between the reference hydroacoustic measurements and the bathymetry estimator obtained in this way can be observed for all test cases. The proposed 3GWR approach was also compared with the GWR model in terms of basic statistical measures. In this case, it can be seen that the application of the proposed approach significantly improves the overall model quality compared to the standard GWR technique, resulting in a relative reduction in the RMSE from 17% to 30% (the last column of the table) depending on the test case.

As part of the research, the utility of the above methods was also verified by assessing their applicability for observing changes in bathymetry at the entrance to the port of Jastarnia (54° 41'46.2" N 18° 40'30.5" E) located in the Puck Bay (south side of the Hel Peninsula). The analysis of this location is particularly important because it concerns an important maritime route for numerous tourist ships and fishing boats. This location is also specific because most of the area is characterized by a sandy, homogeneous bottom type and is susceptible to the migration of bottom sediments, which pose a navigational hazard.

Figure 5.12 shows two successive observations made on March 4 and May 6, 2016, in which the estimated depth (in the range of 0–15 [m]) in the surveyed area is

marked using a color scale. As can be seen, the entrance to the port is approximately 150 m wide and is located between two shallow water areas.

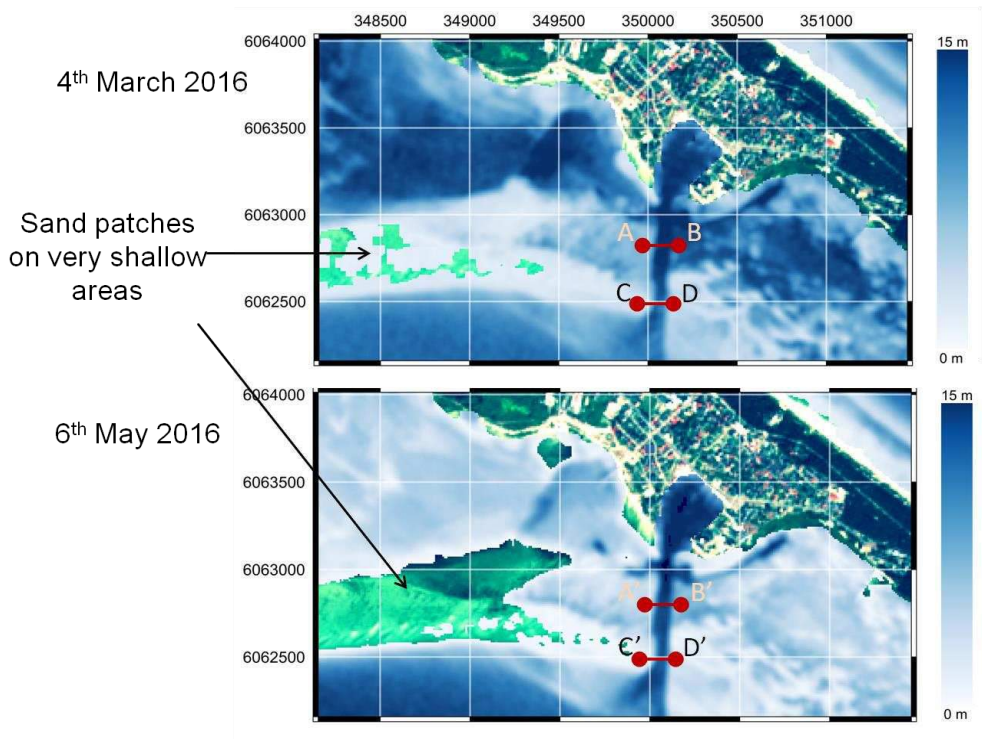


Figure 5.12. An example of applying the developed 3GWR model for bathymetry observations in the coastal zone (with UTM 34N projection) – the vicinity of the entrance to the port in Jastarnia (Hel Peninsula) (Chybicki, 2017a, pp. 25–32).

For the purpose of a more precise analysis, four control points (A, B, C, and D) were defined, which determine the course of the seabed profiles based on the S2 imagery taken on March 4, 2016, and their corresponding points (A', B', C', and D') on the imagery from May 6, 2016. Figure 5.13 shows the course of the estimated bathymetry determined along the profiles AB (on the left) and CD (on the right) based on the two images presented earlier, which show the result of sediment deposition along the lines presented. The presented results clearly depict the process of shoaling of maritime routes near the port, which is the result of sediment migration along the southern part of the Hel Peninsula (Łabuz, 2015, pp. 381–396; Szmytkiewicz et al., 2000, pp. 119–139).

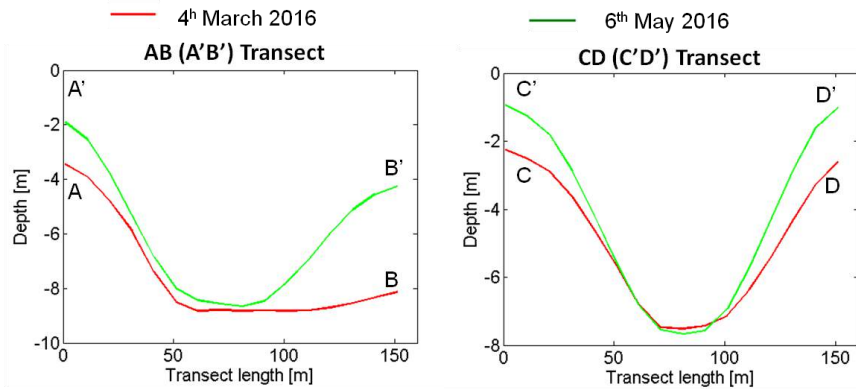


Figure 5.13. Bathymetry profiles along selected transects for March 4, 2016 (in red) and May 6, 2016 (in green) (Chybicki, 2017a, pp. 25–32)

According to the proposed SDB model, in the case of profile AB (A'B'), it can be observed that the depth at point A (A') decreased from 3.75 meters to 1.9 meters between March and May, while at point B (B'), this difference is nearly 4 meters (a drop from 8 meters to 4.1 meters). It's also worth noting that the depth of the profiles in the central part (middle of the waterway) is similar (total depth of about 8–8.5 meters), and the difference between observations is relatively small, approximately 20–30 cm. Similar conclusions can be drawn for profile CD (C'D'), where the observed difference in the estimated depth on the profile's edges was about 1–1.5 meters, with relatively small changes observed in its middle (i.e., close to the axis of the waterway).

Summary

Since the 1940s, marine telemonitoring systems have relied on in situ measurements and hydroacoustic observations. In recent years, with the development of satellite technologies, the potential for observing marine and coastal areas has increased. Comprehensive satellite observations provide more valuable information, enabling scientists, industry representatives, and administrators to analyze marine processes. Undoubtedly, the challenge in the coming years will be the skillful integration of new and classic observation techniques, computational tools (IT systems), and empirical models, which will offer new capabilities for monitoring and predicting changes in marine ecosystems.

Additionally, the research introduced models to estimate bathymetry in coastal zones, addressing the limitations of previous models. These models, including the Stumpf and LyZenga models, improved the accuracy of bathymetric estimates but still had limitations in accounting for the local optical water properties. Geographically Weighted Regression (GWR) and Three-Dimensional Geographically Weighted Regression (3GWR) approaches were developed to address these limitations by accounting for local spatial autocorrelation and depth dependence. These advancements have demonstrated significant enhancements in bathymetric modeling quality, as verified through satellite imagery from the Sentinel-2 system.

References

- Bhatt, G., Kumar, M., & Duffy, C. J. (2014). A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework. *Environmental Modelling & Software*, 62, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.003>
- Bin, L., & Chih-Hao, H. (2006). Comparison between ARPA radar and AIS characteristics for vessel traffic services. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(3), 182–189. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2072>
- Bossard, M., Faranec, J., & Otahel, J. (2000). Raport: *Corine land cover technical guide – Addendum 2000. Technical report No 40*. EEA: Copenhagen.
- Bruniecki, K., Stepnowski, A., Moszyński, M., Łubniewski, Z., Drypczewski, K., Markiewicz, Ł., Kulawiak, M., & Bieliński, T. (2014). Using EO satellite data in Safe City and Coastal Zone web-GIS. *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON), Gdansk, Poland, 2014*. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2014.6899843>
- Chybicki, A. (2017a). Mapping South Baltic Near-Shore Bathymetry Using Sentinel-2 Observations. *Polish Maritime Research*, 3(95), 15–25. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0086>
- Chybicki, A. (2017b). Three-dimensional geographically weighted inverse regression (3GWR) model for satellite derived bathymetry using Sentinel-2 observations. *Marine Geodesy*, 41(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/01490419.2017.137317>
- Chybicki, A., Kulawiak, M., & Łubniewski, Z. (2016). Surface and Air Temperature in the Baltic Sea Coastal Area Using Remote Sensing Techniques and GIS. *Polish Maritime Research*, 23 (1), 3–11. <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0001>
- Chybicki, A., Kulawiak, M., & Zinkiewicz, D. (2017). Satellite Remote Observation Data Dissemination For Mobile Devices Using ESA HMA Standards. W: *Geographic Information Systems Conference and Exhibition “GIS ODYSSEY 2017”*, 95–101.
- Chybicki, A., & Łubniewski, Z. (2017). Optimized AVHRR land surface temperature downscaling method for local scale observations: case study for the coastal area of the Gulf of Gdańsk. *Open Geosciences*, 9(1), 419–435. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0032>
- Chybicki, A., Łubniewski, Z., Niedzielko, J., & Ruciński, D. (2013). Application of satellite imagery and GIS tools for land surface temperature estimation and verification. *Hydroacoustics*, 16, 19–28.
- Chybicki, A., & Markiewicz, Ł. (2015). Coastal zone monitoring using Sentinel-1 SAR polarimetry data. *Hydroacoustics*, 18, 25–32
- De Zan, F., & Monti Guarnieri, A., (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2352–2360. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>
- ESA (2015a). *Copernicus Programme overview*, <http://www.copernicus.eu/main/copernicus-brief>
- ESA (2015b). *ESA Sentinel-1 overview*. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1
- ESA (2015c). *ESA Sentinel-1 Scientific Data Hub*. <https://scihub.esa.int>
- ESA (2015d). *GMES programme*. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3
- ESA (2015e). *S-1 Toolbox software*, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>
- Formetta, G., Antonello, A., Franceschi, S., David, O., & Rigon, R. (2014). Hydrological modeling with components: A GIS-based open-source framework. *Environmental Modelling & Software*, 55, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.019>
- Fotheringham, A. S., Charlton, M. E., & Brunson, C. (1998). Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 30(11), 1905–1927. <https://doi.org/10.1068/a301905>

- Graham, M., & Shelton, T. (2013). Geography and the future of big data, big data and the future of geography. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 255–261. <https://doi.org/10.1177/2043820613513121>
- IMO (2015). *AIS system overview*. International Maritime Organization. <http://www.imo.org/OurWork/Safety/Navigation/Pages/AIS.aspx>
- Kobler, A., & Adamič, M. (2000). Identifying brown bear habitat by a combined GIS and machine learning method. *Ecological Modelling*, 135, 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00384-7)
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Appl. Opt.* 17(3), 379–383. <https://doi.org/10.1364/AO.17.000379>
- Lyzenga, D. R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and Water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1), 71–82. <https://doi.org/10.1080/01431168108948342>
- Łabuz, T. A. (2015). Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer: Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 381–396
- Moszyński, M., Kulawiak, M., Chybicki, A., Bruniecki, K., Bieliński, T., Łubniewski, Z., & Stepnowski, A. (2015). Innovative Web-based Geographic Information System for Municipal Areas and Coastal Zone Security and Threat Monitoring Using EO Satellite Data. *Marine Geodesy*, 38(3), 203–224. <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.969459>
- Pe’eri, S., Parrish, C., Azuiké, C., Alexander, L., & Armstrong, A. (2014). Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. *Marine Geodesy*, 37, 293–314.
- Pijanowski, B. C., Tayyebi, A., Doucette, J., Pekin, B. K., Braun, D., & Plourde, J. (2014). A big data urban growth simulation at a national scale: Configuring the GIS and neural network based Land Transformation Model to run in a High Performance Computing (HPC) environment. *Environmental Modelling & Software*, 51, 250–268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.015>
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350–365. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.023>
- Stulp, F., & Sigaud, O. (2015). Many regression algorithms, one unified model: A review. *Neural Network*, 69, 60–79. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2015.05.00>
- Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48, 547–556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Su, H., Liu, H., & Heyman, W. D. (2008). Automated Derivation of Bathymetric Information from Multi-Spectral Satellite Imagery Using a Non-Linear Inversion Model. *Marine Geodesy*, 31, 281–298. <https://doi.org/10.1080/01490410802466652>
- Szmytkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L. M., Okrój, T., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Różyński, G., & Skaja, M. (2000). Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data. *Coastal Engineering*, 40(2), 119–139. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00008-9)
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modeling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013>
- Tien Bui, D., Bui, Q.-T., Nguyen, Q.-P., Pradhan, B., Nampak, H., & Trinh, P. T. (2017). A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.002>
- Torres, R. et al. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

Żróbek-Sokolnik, A., Dynowski, P., Stańczuk-Gałwiaczek, M., Kryszk, H., Kurowska, M., Duzińska, M., Kocur-Bera, K., Chybicki, A., Bruniecki, K., & Kulawiak, M. (2014). *Application of geographic information system tools in a broad natural science*. Nacionalna knjižnica: Zagreb, Croatia.

Chapter 6. Hydrodynamic modeling of the Gdynia seaport area using the GEMSS Model

Tomasz Berezowski, Kristoffer Kalbekken, Eirik Tenningen

Introduction

Port management requires appropriate tools for real-time port status assessment and realistic scenario analysis. One of the most commonly used tools for this purpose is a hydrodynamic model with transport simulation functions. Currently, there are several model packages that allow for such analyses; the most popular are: DELFT-3D, MIKE 3, and GEMSS. Although there are many applications for each of these models in various aspects of coastal and port modeling, the GEMSS model (Generalized Environmental Modelling System for Surface Waters) was selected due to its previous applications in the Port of Gdynia and the Baltic Sea.

The GEMSS model was used to assess various aspects of modeling in the Baltic Sea. An important application has been to expand our knowledge of thermal stratification and salinity in the Baltic Sea (Dargahi et al., 2017). Additionally, Dargahi (2022) used GEMSS to evaluate dissolved oxygen (DO) levels. As shown in this study, DO levels vary seasonally and with water depth, while these simulated patterns align with algal blooms detected through remote sensing. Vigouroux et al. (2016) simulated nutrient cycling in twelve basins of the Baltic Sea using hydrodynamics simulated by the GEMSS model. Although the spatial resolution of the analysis was limited, the results displayed a very good temporal agreement in nitrogen and phosphorus concentrations.

Until now, there has been only one application of the GEMSS model in the Port of Gdynia basin (Reichel et al., 2015). This case study showed that the GEMSS model can simulate marine currents with low error and can be incorporated into a real-time operational system. Since then, the Port of Gdynia has updated its monitoring tools, incorporating MIROS sensors to measure marine currents, water levels, and meteorological data. MIROS has conducted new bathymetric measurements and developed a new IT system for data management as part of the Maritime Ports Surveillance and Observation System using Mobile Unmanned Research Units (MPSS) project. Due to all these changes, a new version of the GEMSS model was required. This chapter summarizes its development, calibration, and validation, as well as its potential applications and limitations when using the latest model.

Model development

Model grid and bathymetry

The first step in developing a model is always constructing a modeling grid. In this project, the modeling grid was built in two water bodies: the waters of the Port of Gdynia and the Bay of Gdańsk. Extending the modeling grid beyond the Port of Gdynia to the Bay of Gdańsk was necessary to maintain proper hydrodynamics of the water area near the port boundary and the breakwaters. The modeling grid is presented in Figure

6.1. It consists of 3,077 elements in the upper layer and a total of 15 vertical layers. Each vertical layer has a depth of 1.227 meters, which allows it to cover the entire bathymetry of the Port of Gdynia and its surroundings.

Bathymetric data for the Port of Gdynia were provided by the Management of the Maritime Port of Gdynia S.A. (ZMPG S.A.) as a dense point cloud of measurement results in *.xyz format. In areas not covered by these measurements, bathymetric data from the Central Geological Database of the State Geological Institute – National Research Institute were used. Bathymetry was interpolated in the GEMSS model using the Kriging method with a point selection limit of 500 meters and a factor of 1.5. Bathymetry smoothing was applied to prevent gaps in the model grid.

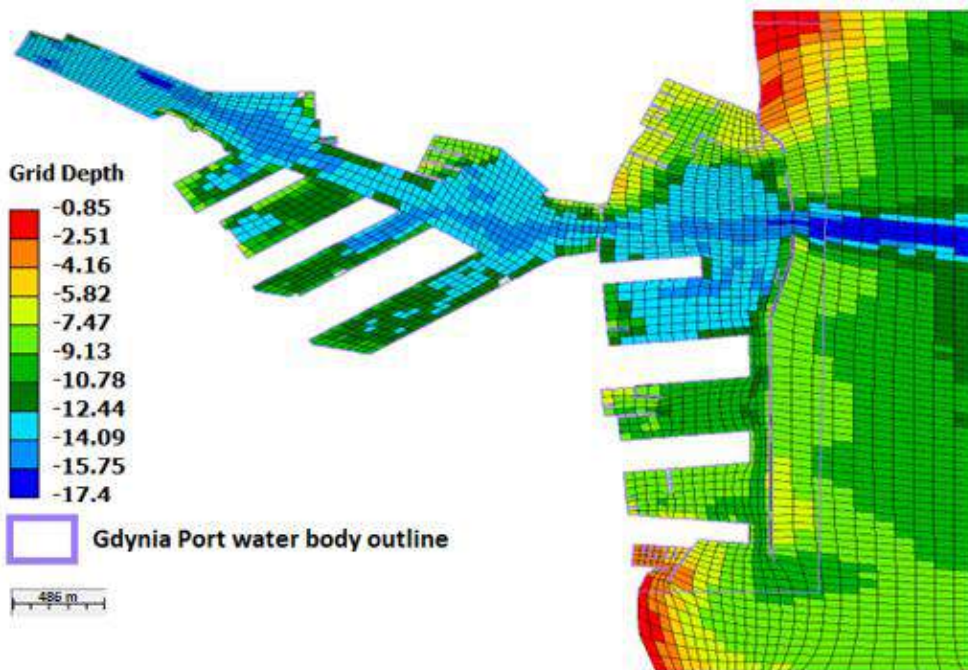


Figure 6.1. GEMSS model grid for the Port of Gdynia along with bathymetry (compiled based on data obtained from ZMPG S.A.)

Boundary conditions

In the model, two types of boundary conditions were applied. Firstly, time-varying water levels were applied at the eastern, southern, and northern boundaries of the section of the Bay of Gdansk outside the port area (Figure 6.2). In this boundary condition, water level data was provided at each time step based on measurements from the MIROS sensor. Changes in water level over time forced the influence of water quality compounds into the model domain and also induced water currents. Water levels at the start of the simulation were initialized uniformly from the respective boundary condition.

The second type of boundary condition used in the model was the internal membrane boundary. This is the wall inside the grid cells that blocks the flow of water. This

boundary condition was used to model small breakwaters and piers in the port (Kolluru et al., 1999). The advantage of this boundary condition is that it allows for simulating the absence of water flow through small features, which would not be possible with a standard grid size. The locations of both boundary conditions are shown in Figure 6.2.

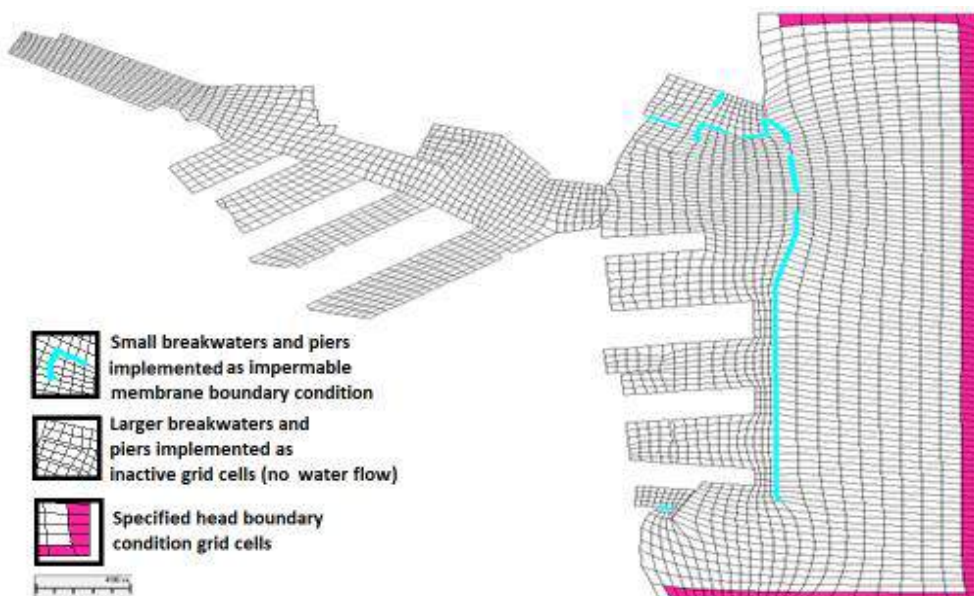


Figure 6.2. Locations of boundary conditions and grid features (Authors' own work)

The model utilized meteorological data from the MIROS-Edge station located within the port area. They included air temperature, air pressure, wind direction, wind speed, and relative humidity. This formulation of meteorological data allowed for the consideration of surface heat exchange calculations using the “Term by Term” method. The wind was incorporated into the hydrodynamic calculations, enabling the modeling of wave effects.

The initial conditions for the transport module were extracted from the initial time step of the boundary condition for each simulation. Temperature and salinity were used in the model directly to simulate water properties, while dye concentration was used to simulate water exchange times in the port area. Time-varying water salinity and temperature were provided in the boundary conditions based on measurements conducted within the project in the port area. To increase the temporal resolution of the boundary condition dataset, it was enhanced using output data from the HIROMB model (Funkquist, 2001) for the Baltic Sea.

Hydrodynamic processes

Detailed simulation of three-dimensional (3D) hydrodynamic processes in GEMSS is carried out using the Generalized, Longitudinal-Lateral-Vertical Hydrodynamic and Transport (GLLVHT) model (Edinger & Kolluru, 1999). The model incorporates vertical acceleration conditions and Coriolis forces. The wind stress coefficient was com-

puted using the Wu method (1983). The transport modeling scheme is Upwind First Order. Water density was calculated using Gilla's method (1982, pp. 599–603) taking into account compressibility. Bottom friction was calculated using Chezy's method with a constant Chezy coefficient estimated during model calibration. Vertical momentum dispersion was computed using the 0-Equation scheme, and mixing length was estimated using the Von Karman relationship. The momentum dispersion coefficients in the X and Y directions were calculated using Okubo's relationship with a coefficient of 0.00584 and an exponent of 1.1. The transport diffusion coefficient in the X and Y directions was determined using Prandtl's relationship, with a Prandtl number of 10. The wave model was computed using the Wave Theory with the Rooss Method.

Transport and water quality

Water quality in the GEMSS model was assessed using three modules: transport, sediment transport, and water quality. The transport module was the default module of the model, allowing for the simulation of water temperature, salinity, and dye concentration. The sediment transport module enabled the simulation of sediment concentration resulting from sediment influx and bottom processes such as sedimentation and resuspension. The water quality module utilized a modified WASP5 WQDPM model. It allows the simulation of primary productivity based on the concentration of chemical components such as ammonia (NH_3), nitrates (NO_3), phosphates (PO_4), dissolved oxygen, and their derivatives, as well as the physical properties of the atmosphere and water. This model effectively calculates all essential processes required in the project, such as nitrification, denitrification, mineralization, and phytoplankton growth.

Model calibration and validation

Forcing data

The forcing data for the boundary conditions during the calibration period (from June 16, 2022, to June 30, 2022) were based on measurements conducted as part of the project within the port area using MIROS sensors. Two verification periods were applied. The first one, in which water levels and currents were verified, lasted from July 1 to July 22, 2022. During this period, the forcing dataset was the same as during the calibration period. The length of this period was limited by the availability of continuous data on water current data from the MIROS sensor and could not be extended.

The second verification period relied on the availability of water sampling data in the Port of Gdynia basin. Water samples were collected during four campaigns from February 28, 2022, to October 20, 2022. Due to the lack of data in MIROS measurements, the simulations during this validation period were forced solely by time-varying salinity, temperature, and water level from the HIROMB model output for the Baltic Sea.

Calibration procedure

The model calibration was carried out from June 16, 2022, to June 30, 2022. The parameter calibrated in the model was the Chezy coefficient [$\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$], which represents bottom friction and is the most crucial parameter for simulating hydrodynamics. The calibration procedure involved running the model multiple times with Chezy values ranging from $C = 10$ to $C = 90$. The objective of the calibration was to minimize the Mean Absolute Error (MAE) between observed and simulated current velocities and water levels at the MIROS-Wavex sensor field of view (water currents) and at the MIROS-Rangefinder sensor location (water levels). MAE is defined as follows:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |v_i^o - v_i^s|}{N}$$

where v_i^o is the observed value, v_i^s is the simulated value at time step i , and N is the total number of time steps. Among all the MIROS water current measurements, only those with a Signal-to-Noise Ratio (SNR) greater than or equal to 7 were selected for calibration. This was done to calibrate the model using the highest-quality data. After filtering by SNR, 892 MIROS measurements remained for calibration. All water level measurements were used because they were not affected by low SNR level. The MIROS measurements and model output data were averaged over a 1-hour time intervals, as in the GEMSS model, in order to use exactly the same time intervals in both variables for calculating the MAE

Calibration results

The resulting MAE for each variable differing in the values of the Chezy coefficients is shown in Figure 6.3. Different water properties behaved slightly differently with changing in the Chezy coefficients, but the MAE values were small across the entire range. Therefore, the Chezy coefficient of $30 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ was selected as optimal value for all variables.

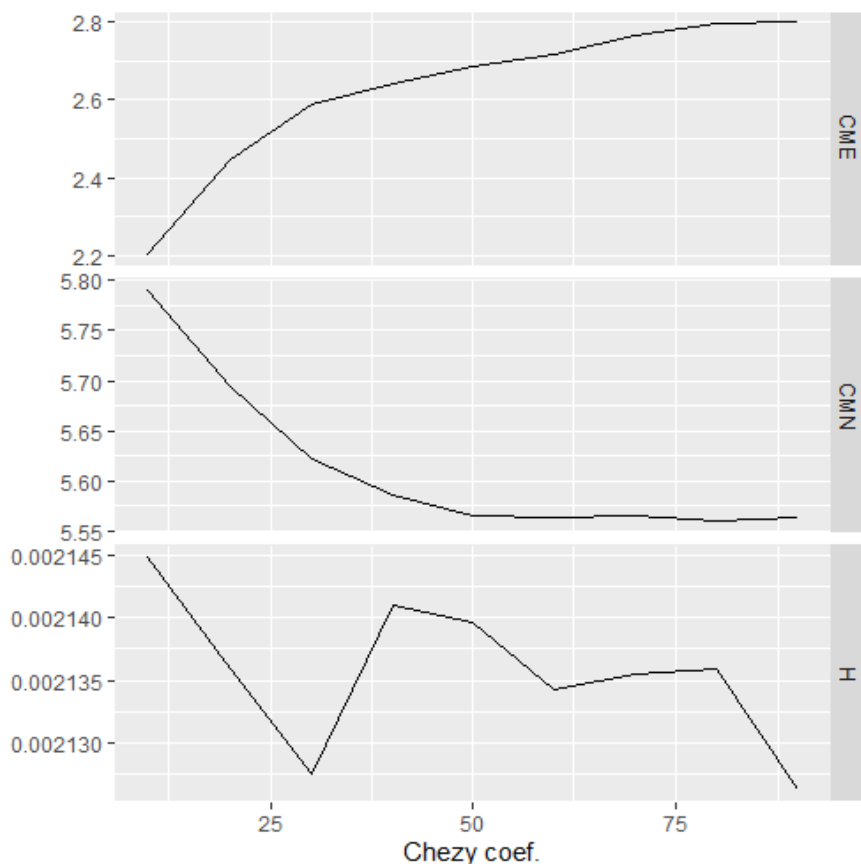


Figure 6.3. The Mean Absolute Error (MAE) for the calibration of eastward water current (CME) [cm s⁻¹], northward water current (CMN) [cm s⁻¹] and water level (H) [m] as a function of the Chezy's coefficient MAE was calculated between MIROS observations and GEMSS model simulations for the period from June 16, 2022, to June 30, 2022 (Author's work)

Validation of simulated water levels and currents

The validation of simulated water levels and currents was conducted using MAE, similar to the calibration process, but the validation period ran from July 1, 2022 to July 22, 2022. The error values were as follows: for eastward water current MAE = 3.67 cm/s, for northward water current MAE = 7.23 cm/s, and for water level MAE = 0.0024 m (or 0.24 cm). The model matched the MIROS observations very well over time, except for the periods of the greatest height change at the beginning of the simulation (Figure 6.4). The reason why the error in northward water currents is about twice as large as in the eastward direction is that most of the water currents on the boundary between the Gulf of Gdańsk and the Port of Gdynia run east-west, while north-south currents are a minority. This behavior is partially due to the dominance of westerly winds and the location of the port in the Gulf of Gdańsk. As a result, less variability in northward currents was simulated with greater errors by the GEMSS model.

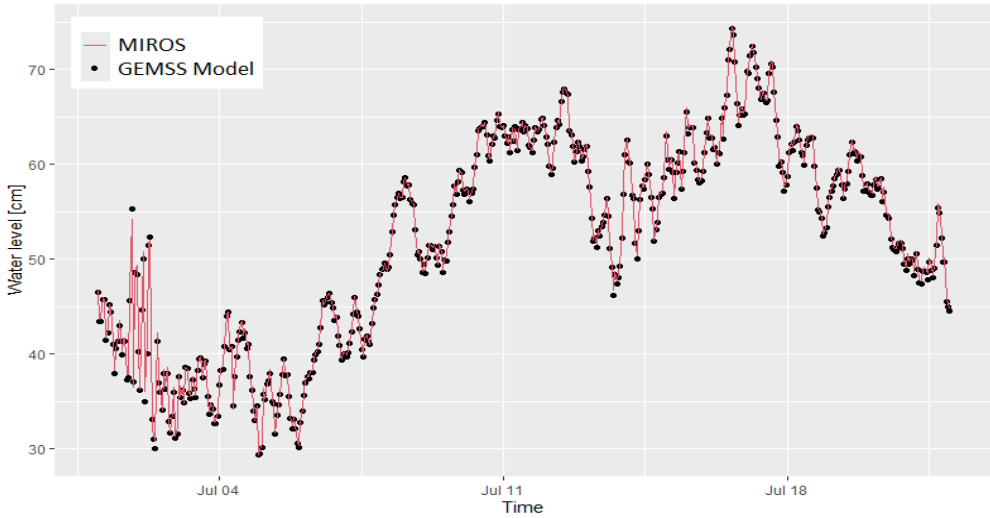


Figure 6.4. Simulated (GEMSS) and observed (MIROS) time series of water level data at the MIROS measurement point in the uniform part of the waters of the Port of Gdynia during the validation period from July 1 to July 22, 2022 (Author's work)

Validation of simulated salinity and water temperature

The validation of simulated water salinity and temperature was conducted using MAE, similar to the calibration process, but the validation period extended from February 28, 2022 to October 20, 2022. The MAE for salinity was 0.258 ppt, and for water temperature, it was 1.05°C. The simulated water temperature and salinity reflected very well the temporal changes in water sample measurements (Figure 6.5).

In contrast to temperature, salinity simulations exhibited five outlier values in port basins III, V, and VI for the May 2023 measurement campaign (Figure 6.5 – rectangle).

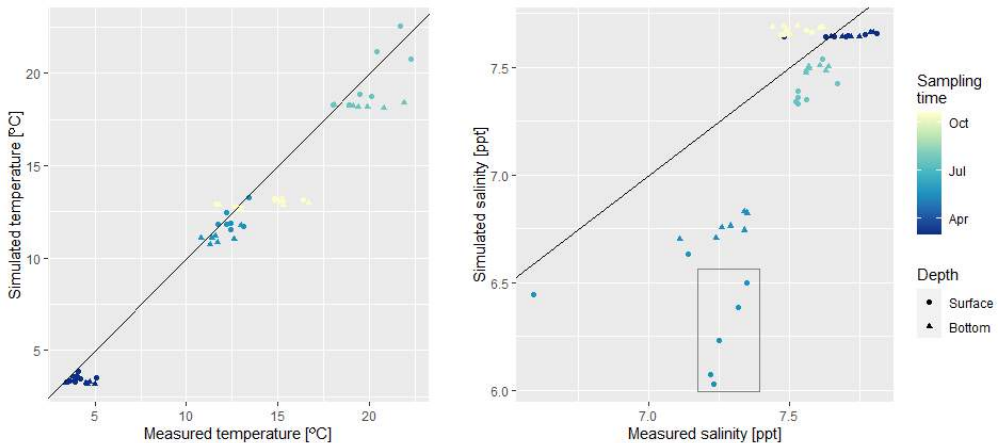


Figure 6.5. Comparison of simulated and measured water temperature and salinity in the Port of Gdynia from February 28, 2022, to October 20, 2022. The rectangle in the right panel indicates outlier salinity values. The 1:1 line is marked in black (Author's work)

These underestimated outlier values only occurred in the salinity simulations, in the surface layer, and in a single measurement campaign. Therefore, their likely cause may be local water contamination, which affected the measurements through increased salinity, but was not simulated by the model.

Applications of the model

A properly calibrated model can serve as a valuable tool for port management, decision support, and scenario analysis. Considering that the model modules are appropriately validated, and data is available, the GEMSS model allows for the analysis of various factors, including flow velocity and water level variability, water quality and algae growth, sedimentation and erosion, and other parameters in a spatially distributed manner and at selected water depths.

The GEMSS model for the Port of Gdynia enables the analysis of time-varying water levels and marine currents based on MIROS data. This function can be particularly useful for assessing real-time marine currents in the basin, taking into account the hydrodynamic conditions at the port's boundary. This can be especially crucial in extreme conditions, to determine whether currents may pose a threat to the maneuvering of ships or the utilization of port infrastructure. Long-term simulations of marine currents can also be valuable for analyzing current persistence or water residence times in the port basin (Figure 6.6). These results highlight the spatial and temporal patterns of hydrodynamics in the port area and can serve as decision support tools.

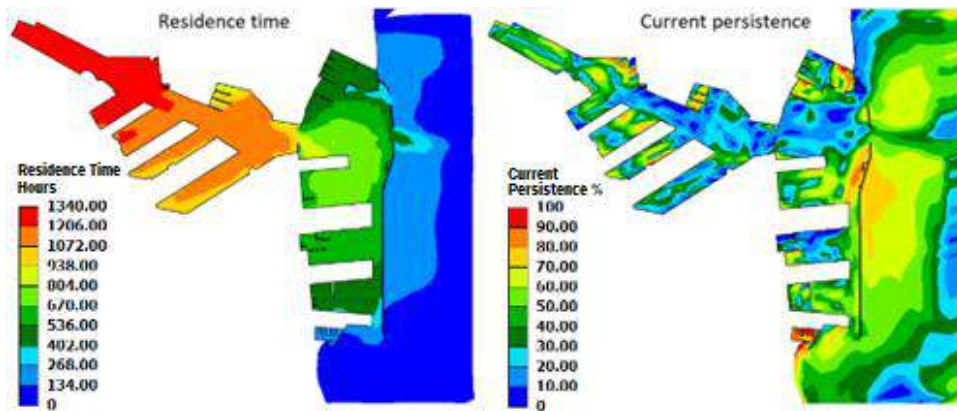


Figure 6.6. Time of residence (left; decrease of initial concentration below 20% of the initial level in the water column) and current persistence (right; level of current changes over time) in the Port of Gdynia simulated by the GEMSS model (Author's work)

GEMSS water quality simulations provide insights into different aspects of port operations compared to hydrodynamic simulations. The focus of GEMSS water quality is mainly on nutrient circulation, dissolved oxygen concentrations, and primary productivity or algae development. While these simulations carry more uncertainty than hydrodynamic ones due to the lack of nutrient validation (only salinity and temperature

were validated), they can be used in scenario analysis. Such scenario analysis can be used to illustrate boundary conditions (hydrological, meteorological, or nutrient concentrations) under which adverse conditions might occur within the port area (hypoxia, algal blooms) (e.g., Figure 6.7).

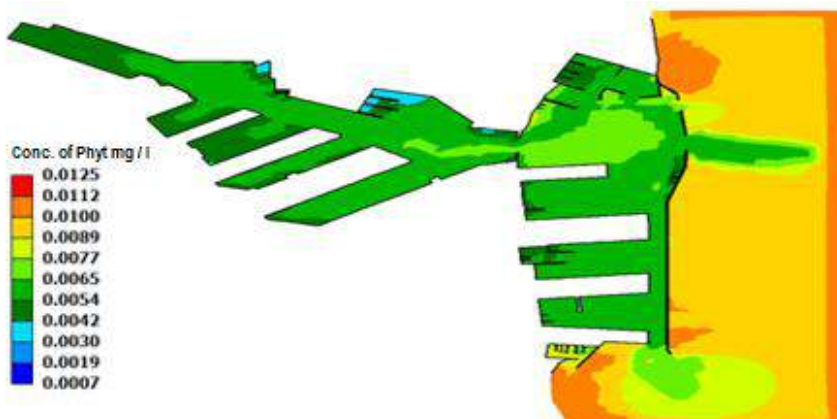


Figure 6.7. Sample GEMSS model output data illustrating algal concentration patterns under conditions of relatively clean water outflow from the port basin (Author's work)

Sediment transport and erosion data have similar applications to GEMSS output data on water quality. Since the sediment transport module has not been validated, it is only useful in scenario simulations that can highlight overall sedimentation or erosion patterns. Nevertheless, such output data can be very useful, for example, in identifying points with high intensity of these processes or in determining general trends. The application of such analyses mainly involves optimizing the location and frequency of port dredging (Figure 6.8).

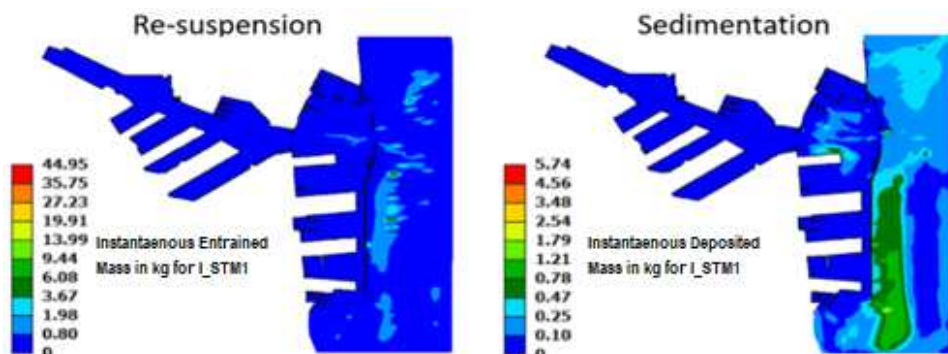


Figure 6.8. The graph shows the transient resuspension (left) and sedimentation (right) of sediment particles with a diameter of 500 μm and a concentration of 12 mg/l in the Port of Gdynia (Author's work)

Another advantage of the GEMSS model with hydrodynamic, water quality, and transport modules is the analysis of the impact of port development on the marine ecosystem in the immediate vicinity of hydrotechnical infrastructure. This can be applied, for example, to test how new breakwaters or jetties might disrupt current sedi-

mentation and erosion patterns or marine currents at the port entrance. Another application could be testing the impact of a new stormwater inlet on water constituents and algae growth. In fact, depending on the application, many similar decision-support scenarios can be developed. However, it's important to consider the results of hydrodynamic current validation presented in this chapter, the fact that the sedimentation and water quality modules have not been validated, and that the model may lack certain processes that exist in the environment but are not implemented in the simulations (e.g., rainfall or vessel traffic, etc.). Therefore, the model users and managers must always take into account the uncertainty of the results presented in this document.

Summary

The conclusions drawn from the research conducted using hydrodynamic modeling to identify the spread of pollutants in the port basins of Gdynia suggest the wide applicability of the GEMSS model in supporting decision-making processes and scenario analysis in the use and planning of the development of hydrotechnical infrastructure in ports. The presented simulations of water levels and marine currents enable the assessment of marine currents in almost real-time, which can be particularly important for the safe navigation of ship in port. Water quality and sediment transport simulations can be used to analyze the impacts of port development and assess the pollution conditions in its waters. The GEMSS model can also be a useful tool for testing various scenarios to optimize the location and frequency of dredging in port areas.

However, model users and managers must keep in mind the uncertainties arising from the inability to validate some modules and the potential omission of certain processes in simulations. Nonetheless, a well-calibrated and validated GEMSS model serves as a valuable tool to support decision-making processes related to the utilization and development of hydrotechnical infrastructure in ports (as demonstrated by the example of the Port of Gdynia).

References

- Dargahi, B. (2022). Lagrangian Coherent Structures and hypoxia in the Baltic Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 97, 101–286. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2022.101286>
- Dargahi, B., Kolluru, V., & Cvetkovic, V. (2017). Multi-layered stratification in the Baltic Sea: Insight from a modeling study with reference to environmental conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(1), 2–26. <https://doi.org/10.3390/jmse5010002>
- Edinger, J. E., & Kolluru, V.S. (1999). Implementation of vertical acceleration and dispersion terms in an otherwise hydrostatically approximated three-dimensional model. W: *ASCE estuarine and coastal modeling: Proceedings of the 6th international conference, November 3–5, 1999, New Orleans, Louisiana*. American Society of Civil Engineers: Reston, VA.
- Funkquist, L. (2001). HIROMB, an operational eddy-resolving model for the Baltic Sea. *Biuletyn Instytutu Morskiego w Gdańsku*, 28(2), 7–16. <https://doi.org/01.3001.0008.8044>
- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*. University of Cambridge: Cambridge, England.

- Kolluru, V. S., Buchak, E. M., & Wu, J. (1999). Use of membrane boundaries to simulate fixed and floating structures in GLLVHT, ASCE. *W: Estuarine and Coastal Modeling*, 485–500.
- Reichel, M., Abramowicz-Gerigk, T., Burciu, Z., Burka, M., Czepczynski, M., Hajdel, J., & Tengberg, A. (2015). Safeport: on-board visualization of hydro-meteorological effects on ferries entering and berthing the port of Gdynia, Poland. *W: Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference*. Engineers Australia and IP-ENZ: Auckland, New Zealand, 457–461.
<https://search.informit.org/doi/epdf/10.3316/informit.726131019882124>
- Vigouroux, G., Cvetkovic, V., & Jönsson, A. (2016). Carbon-based nutrient cycling modeling of the Baltic Sea: Analysis of twelve basins using three-dimensional flow dynamics for period 2001–2009. In: M. Reckermann, S. Köppen (Eds), *Multiple drivers for Earth system changes in the Baltic Sea region*. Geesthacht, Germany, 64–65.
- Wu, J. (1983). Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *Journal of Physical Oceanography*, 13(8), 1441–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1983\)013<1441:SSDCIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<1441:SSDCIB>2.0.CO;2).

Chapter 7. Challenges related to the use of unmanned surface vehicles for research purposes in maritime ports

Bohdan Pac, Bartosz Langowski

Introduction

Unmanned Surface Vehicles (USVs) can be considered complex systems operating on the sea surface, consisting of internally organized components that function as a whole. Their use for research purposes in maritime ports is justified because they facilitate make it easier. However, implementing of such platforms for operational purposes within specific task areas in the aquatic environment poses various organizational, technical, and administrative challenges. This chapter presents potential and actual problems, along with a quality-based assessment, based on research conducted for the project titled *Monitoring and Observation System for Port Areas Using Unmanned Mobile Research Platforms*. The project involves activities such as hydrographic measurements, sonar surveys, and automatic water and sediment sampling.

Identifying and evaluating issues related to the use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in maritime ports required several research tasks, including:

- Analyzing and selecting relevant literature on the use of USVs and management and quality sciences;
- Compiling and analyzing the results of conducted research;
- Identifying a set of problems related to the use of unmanned mobile research platforms in providing services defined within the project;
- Choosing appropriate methods and tools typical of management and quality sciences to project and assess these problems adequately;
- Applying the above methodology to the research subject, i.e., evaluating the tested platform concerning the defined problems and seeking methods to address them;
- Formulating conclusions and recommendations.

The research aims to understand and resolve the challenges associated with deploying USVs for various maritime applications, including hydrography, sonar surveys, and water sampling, in a port environment. It involves a comprehensive analysis of the problems and the development of strategies to overcome them, ultimately improving the effectiveness of USV operations in ports.

Review of the literature on the subject

Issues related to the specific use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) for research purposes in maritime ports and solving associated problems have not yet been described in detail in the domestic literature due to the innovative nature of this solution. However, information regarding the general functionality of these platforms is available in both domestic monographs (Miętkiewicz, 2018) and foreign sources (Roberts, Sutton,

2006). They refer to the development of the technology of these platforms, and classify them based on:

- Displacement of units (small < 1 ton; medium < 100 tons; large < 1000 tons; very large > 1000 tons)¹;
- Their position (surface, underwater, semi-submersible units)²;
- The scope of unmanned control (remotely operated units and autonomous vehicles);
- Task areas (military, reconnaissance, and rescue).

In terms of quality-based assessment of issues related to the use of unmanned research platforms in maritime ports, literature from the field of management and quality sciences should be used. Identifying issues associated with operating these devices in ports is possible using the Ishikawa diagram, which is used to identify and group the causes of problems (Starzyńska et al., 2010, p. 24). It is based on the assumption that a particular effect is caused not by a single factor, but by a set of causes that can be organized into specific groups. The importance of individual problems within identified groups can be assessed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1980).

Another aspect is a comprehensive assessment of the presented solution, i.e., the unmanned surface vehicle, in the context of the tasks it is designed to perform. This requires determining how potential or actual issues related to its use are or will be neutralized. These issues may have technical, organizational, or legal aspects. Expert opinions can be collected and assessed for consistency to evaluate these issues (Wasilewska, 2011, p. 168).

Finally, a comparison of the achieved results with benchmark assessments can be conducted, which can be achieved, among other methods, through radar chart visualization. This allows to gauge the overall performance and quality of the unmanned platform in addressing identified problems and fulfilling its intended tasks.

Procedure methodology

A deductive method was used to identify the issues related to the use of Unmanned Surface Vehicles for research purposes in seaports, the, which involves moving from general to the specific. The process was divided into four stages of varying complexity (Figure 7.1).

Stage 1 involved precisely defining the problem that needed to be solved. This problem concerned the potential use of the platform (Hydrodron-1) for conducting research tasks in seaports (particularly in the Port of Gdynia), which are conventionally carried out by teams of appropriately qualified personnel. The problem was identified based on the assumptions of the project *Monitoring and Observation System for Port Areas Using Unmanned Floating Mobile Research Platforms*.

¹ The classification adopted according to the Carderock Naval Laboratory.

² Classification according to the TNP report: Unmanned Surface and Underwater Vehicles, 2007.

Stage 2 involved determining the set of causes of the problem that occurs in the implemented process, i.e., defining the main groups of causes of the problem related to the use of Hydrodron-1 for studying port waters in Gdynia. The scope of research conducted using the described device, as part of the project in question, allowed for the identification of issues (groups of causes) (I_i) related to:

- personnel operating the device – I_1 ;
- operational and technical characteristics of the device – I_2 ;
- regulations and procedures related to the use of Hydrodron-1 – I_3 ;
- logistic support during the operation of the surface platform – I_4 ;
- working environment of the surface platform – I_5 ;
- task areas – I_6 .

The identification of the groups of causes of issues related to the use of unmanned surface research platforms in seaports was carried out using the Ishikawa diagram. In the practice of managing processes or organizations, many problems requiring preventive and/or corrective actions are encountered. However, taking these actions requires knowledge of the causes of the problems. The identification of causes must be appropriately structured. It is necessary to isolate the most significant causes and find connections between them. The application of the method begins in the second stage and continues in the third stage, where the causes are detailed.

Stage 3 involved a detailed analysis of the causes of issues with the operation of Hydrodron-1. Based on the research conducted, driven by the project assumptions and their outcomes, along with brainstorming within the research team, causes (F_{ij}) that could potentially be a source of problems with the use of the unmanned surface platform in the scope defined by the project were identified for each group (I_i). The process of identifying the causes of problems and allocating them to specific groups is illustrated in Figure 7.2. It's worth noting that the most significant feature of the Ishikawa diagram is the graphical representation of the interrelationships among causes that lead to a particular problem. A comprehensive approach to the issue allows us to define it as a barrier to the utilization of unmanned surface platforms for research purposes in seaports.

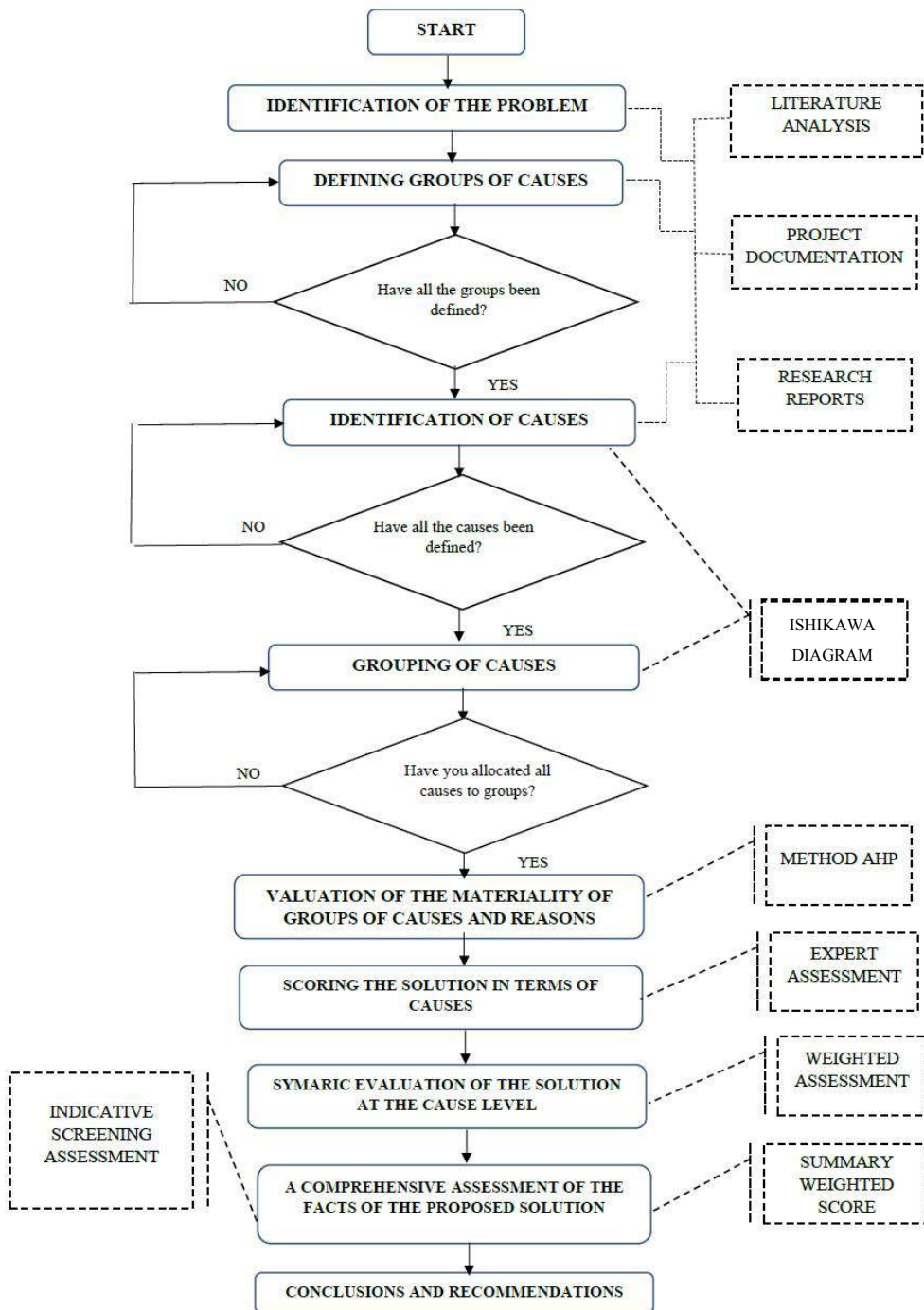


Figure 7.1. Methodology for Research Procedures in the Process of Identifying Causes of Issues with the Use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) for Research Purposes in Seaports (Author's work)

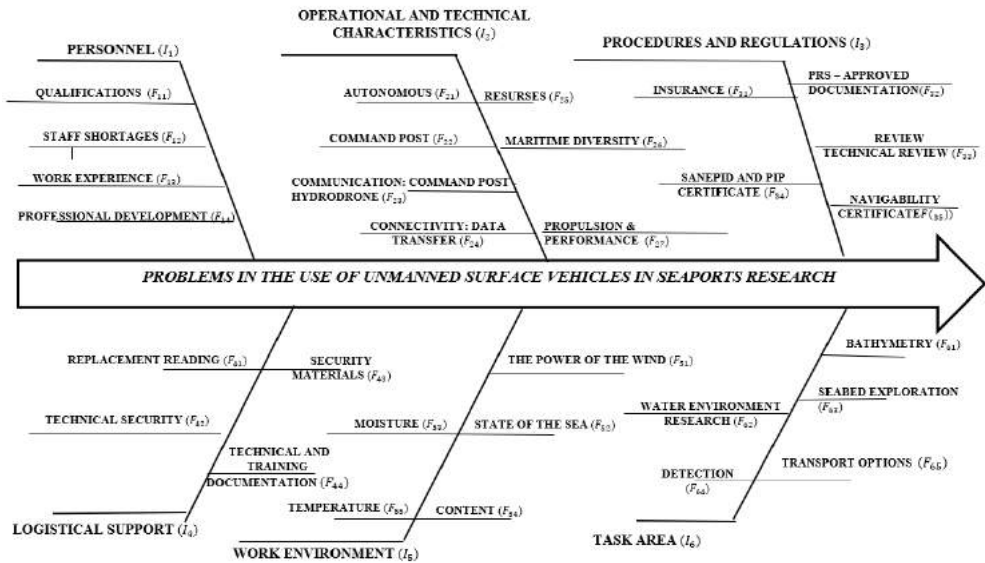


Figure 7.2. Ishikawa Diagram depicting the causes of issues with the utilization of the unmanned surface vehicle HydroDron-1 for research purposes in seaports (Author's work)

Stage 4 involved analyzing the results and drawing conclusions. After creating the diagram, it underwent detailed analysis using tools typical for management and quality sciences.

In the first phase, the significance of individual groups of causes of problems, as well as the specific causes allocated to them was assessed. This assessment was done using the Analytic Hierarchy Process (AHP) analysis, which involves defining weight coefficients for each of the examined variables by comparing them pairwise based on a specified preference scale (Table 7.1). An appropriate software tools, i.e. the AHP calculator, was used to determine the weight coefficients.

Table 7.1. The adopted preference scale – AHP analysis (own elaboration based on: (Bozarth, Handfield, 2006)).

Hierarchy of precedence	Hierarchy of subordination
1 – lack of priority	1 – lack of priority
2 – an intermediate value between 1 and 3	$\frac{1}{2}$ – an intermediate value between 1 and $\frac{1}{3}$
3 – slight priority	$\frac{1}{3}$ – slight subordination
4 – intermediate value between 3 and 5	$\frac{1}{4}$ – intermediate value between $\frac{1}{3}$ and $\frac{1}{5}$
5 – clear priority	$\frac{1}{5}$ – slight subordination
6 – intermediate value between 5 and 7	$\frac{1}{6}$ – intermediate value between $\frac{1}{5}$ and $\frac{1}{7}$
7 – very clear priority	$\frac{1}{7}$ – very clear subordination

8 – intermediate value between 7 and 9	$\frac{1}{8}$ – intermediate value between $\frac{1}{7}$ and $\frac{1}{9}$
9 – unquestionable priority	$\frac{1}{9}$ – undisputed subordination

Defining the relationships between individual groups of causes required maintaining a certain consistency in the assessments made, which reflected the opinion on the significance of the researched groups of causes of problems. Therefore, it was necessary to examine the consistency of these opinions using indices and indicators of consistency according to the formula:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max}}{m-1} \tag{1}$$

where:

C.I. – the consequence index, for $l_{max} = m$.

l_{max} – the maximum eigenvalue of the comparison matrix for m compared objects (groups of causes).

m – the number of compared objects (groups of causes).

Then, based on the calculated value of *C.I.*, the value of the consequence factor *C.R.* was calculated, where:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I} \tag{2}$$

R.I. - a random index whose values depend on the number of groups of causes being compared with each other. If the relation $C.R. \leq 0.1$, the condition of consistency of comparisons is satisfied (Saaty, 1980).

The same procedure was applied at the level of individual causes within defined groups of causes, examining the mentioned indices and consistency coefficients for expressed opinions. As a result, weight coefficients were obtained reflecting the significance of individual causes for problems related to the use of Unmanned Surface Vehicles for research purposes in seaports.

In the next phase, a methodology was used to assess how the solution applied, related to the use of HydroDron-1 in the seaport at the current stage of the MPSS project, prevents or neutralizes the causes generating problems with its use. This methodology was based on expert assessment, where the degree of prevention/neutralization of individual causes was estimated based on the adopted scale (Table 7.2). The scale of corrected ratings results from averaging expert ratings.

Table 7.2. Accepted scale for neutralizing the causes of problems related to the use of HydroDron-1 in the seaport (Author's work)

Expert evaluation	Revised evaluation	Description of evaluation
0	0	No chance to eliminate the cause
1	$0 < \text{evaluation} \leq 1.5$	Low chance of neutralizing the cause
2	$1.5 < \text{evaluation} \leq 2.5$	Medium chance of neutralizing the cause
3	$2.5 < \text{evaluation} \leq 3.5$	High chance of neutralizing the cause

4	3,5<evaluation≤ 4,5	Degree of neutralization acceptable
5	4,5<evaluation≤ 5,5	Degree of neutralization good
6	5,5<evaluation≤ 6,0	Degree of neutralization fully satisfactory

Due to the fact that the project is of a pilot nature, the study of the possibility of neutralizing the causes of problems related to the operation of the device is also of a pilot nature. The expert team consisted of scientific and technical staff involved in the implementation of the project in question. The results of the applied methodology are assessments of the level of advancement of neutralization of individual causes of problems, expressed as the arithmetic mean of the assessments by successive experts, which was verified based on the results of the consistency of their opinions.

$$\bar{O}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n=10} O_{ij}}{n} \quad (3)$$

where:

\bar{O}_i - the arithmetic average of expert evaluations relating to the i -th cause;

O_{ij} - the evaluation of the j -th expert relating to the i -th cause, where $j=1, n$; n - the total number of experts.

Verification of expert evaluations was carried out based on the value of the comprehensive coefficient of variation (Table 7.3), calculated according to the relationship:

$$v_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{O}_i} \quad (4)$$

where:

v_{ij} - complex coefficient of variation;

σ_{ij} - standard deviation of expert evaluations for the i -th cause (Wasilewska, 2011, s. 168).

Table 7.3. Acceptance scale of the comprehensive coefficient of variation (Author's work)

Value v_i	Interpretation
$v_{ij} \leq 0.2$	Satisfactory Level
$0,2 < v_{ij} \leq 0.4$	Acceptable Level
$v_{ij} > 0.4$	Unacceptable Level

When the condition $v_i \leq 0,4$, is met, it was assumed that the average value of expert assessment \bar{O}_i is verified and used for further calculations as \bar{O}_i^{ver} . The adopted acceptance scale ranges (Table 7.3) result from the pilot nature of the project. The calculation methodology for phase 2 is presented in Table 7.4.

Table 7.4. Methodology of calculations assessed at the level of causes (Author' s work)

		Evaluation of the level of neutralization of individual causes for HydroDron 1																															
		I ₁				I ₂				I ₃				I ₄				I ₅				I ₆											
Experts / Expert evaluations – O _{ij}		F11	F12	F13	F14	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F31	F32	F33	F34	F35	F41	F42	F43	F44	F51	F52	F53	F54	F55	F61	F62	F63	F64	F65	
E ₁																																	
E ₂																																	
E ₃																																	
...																																	
E ₁₀																																	
ΣO_{ij}																																	
\bar{O}_i																																	
δ_i																																	
v_i																																	
$= \frac{\delta_{ij}}{\bar{O}_i} \times 100\%$																																	
O_i^{per}																																	
$\frac{O_i}{O_i^{per}}$																																	
(the verified values)																																	

The overall assessment of HydroDron-1 in terms of neutralizing issues related to the use of unmanned floating research platforms in seaports is possible through the aggregation of partial assessments at the level of individual causes and then at the level of groups of causes. Thus, the overall assessment of the level of individual causes is calculated according to the equation:

$$WF_{ij} = W_{ij} \overline{O_{ij}^{ver}} \quad (5)$$

where:

WF_{ij} – weighted value in the range of the j -th cause allocated to the i -th cause group;
 W_j – weighting coefficient of the significance of the j -th cause allocated to the i -th group of causes, determined according to the AHP analysis, with the condition $C.R. \leq 0.1$;
 $\overline{O_{ij}^{ver}}$ – verified assessment of the j -th cause in the i -th group of causes.

The aggregated value at the cause group level was calculated using the formula:

$$WI_i = W_i \sum_{j=1}^k WF_{ij} \quad (6)$$

where:

WI_i – weighted value at the i -th cause group level;
 W_i – the weighting coefficient of the significance of the i -th cause group, determined by AHP analysis, with the condition $C.R. \leq 0.1$;
 $\sum_{j=1}^k WF_{ij}$ – total value of weighted assessments of causes allocated to the i -th cause group.

The total value of the degree of neutralization of problems related to the use of HydroDron-1 in seaports was calculated as:

$$WP_{total} = \sum_{i=1}^6 WI_i, \quad (7)$$

WP_{total} – total value (overall assessment) of the degree of neutralization of problems related to use of HydroDron-1 in seaports.

The calculation of the quality index for the solution (HydroDron-1) at the i -th cause group level is done according to the equation:

$$Q_i = \frac{WI_i}{WI_i^{maks}} \quad (8)$$

WI_i^{maks} – the benchmark assessment at the i -th cause group level when all causes reach a value of $\overline{O_{ij}^{ver}}=6$;

Q_i – the quality index at the i -th cause group level.

Calculation of the overall quality index of the solution (HydroDron-1) regarding the neutralization of problems related to its use in seaports is done according to the equation:

$$Q = \frac{WP_{total}}{WP_{total}^{maks}} \quad (9)$$

where:

Q – the overall quality index of the solution.

WP_{total}^{maks} – the benchmark assessment where all causes reach a value of $\overline{O_{ij}^{ver}}=6$.

Results of the proceedings

The results of the conducted procedure are presented in two tables:

1. Table 7.5 includes:
 - a breakdown of causes allocated to specific groups;
 - weighting coefficients W_{ij} at the cause level, determined based on the results of the AHP analysis;
 - verified ratings at the cause level – $\overline{O_{ij}^{ver}}$, calculated based on expert assessments, following the adopted procedure;
 - weighted cause values WF_{ij} (see equation 10);
 - cumulative values of weighted cause assessments allocated to specific groups.
2. Table 7.6 includes:
 - a breakdown of cause groups causing problems in the use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in seaports;
 - weighting coefficients W_i at the cause group level, determined based on the results of the AHP analysis;
 - total values of assessments of weighted causes allocated to specific groups $\sum WF_{ij}$;
 - cumulative values at the cause group level WI_i (see equation 6);
 - the overall assessment of HydroDron-1 regarding the neutralization of problems with its use in seaports WP_{total} (see equation 7);
 - benchmark quality assessments at the group cause level – WI_i^{maks} ;
 - quality indices of the solution (problems of HydroDron-1) at the cause group level Q_i (see equation 8);
 - the overall quality index of the solution (HydroDron-1 problems) regarding the neutralization of problems with its use in seaports (see equation 9).

The graphical interpretation of the results (Figure 7.3) was presented using a radar chart, which allows monitoring the results achieved by HydroDron-1 in terms of neutralizing the causes and their groups that generate problems with the platform use in seaports. The radar chart helps to determine how much the achieved results deviate from the assumed optimal level.

Table 7.5. Summary of results at the level of problem causes (Author's work)

REVIEWS	WEIGHTING FACTOR AT THE CAUSAL LEVEL	ASSESSMENT VERIFIED REASON	WEIGHTED VALUE OF THE CAUSE	REVIEWS	WEIGHTING FACTOR AT THE CAUSAL LEVEL	ASSESSMENT VERIFIED REASON	WEIGHTED VALUE OF THE CAUSE
1	2	3	4	5	6	7	8
GROUP OF CAUSES: PERSONNEL – I ₁				GROUP OF CAUSES: LOGISTICAL SUPPORT – I ₄			
W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	W_{ij}	
FF ₁₁	0.3919	5.9	2.312	FF ₄₁	0.3250	4.6	1,495
FF ₁₂	0.3203	4.9	1.569	FF ₄₂	0.3250	4.7	1.527
FF ₁₃	0.1439	4.8	0,691	FF ₄₃	0.1266	4.1	0.519
FF ₁₄	0.1439	5.1	0,734	FF ₄₄	0.2234	2.8	0,625
$\sum WF_{ij}$			5.306	$\sum WF_{ij}$			4.166
GROUP OF CAUSES: TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS – I ₂				GROUP OF CAUSES: WORK ENVIRONMENT – I ₅			
	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}		W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}
FF ₂₁	0.2386	5,7	1,360	FF ₅₁	0.2085	3.9	0.813
FF ₂₂	0.1323	4.2	0.556	FF ₅₂	0.3697	4.1	1.516
FF ₂₃	0.1411	4.1	0.578	FF ₅₃	0.1831	3.7	0.677
FF ₂₄	0.2386	4.4	1.049	FF ₅₄	0.1284	3.8	0,488
FF ₂₅	0.1151	4.3	0.495	FF ₅₅	0.1103	4.1	0.452
FF ₂₆	0.0518	4.2	0.217				
FF ₂₇	0.0825	4.3	0.354				
$\sum WF_{ij}$			4.609	$\sum WF_{ij}$			3.946
GROUP OF CAUSES: PARAMETERS AND REGULATIONS – I ₃				GROUP OF CAUSES: TASK AREA – I ₆			
	W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}		W_{ij}	O_{ij}^{ver}	WF_{ij}
FF ₃₁	0.1762	5.1	0.899	FF ₆₁	0.3697	4.2	1.553
FF ₃₂	0.3133	4.2	1.316	FF ₆₂	0.1831	4.0	0.732
FF ₃₃	0.0986	4.0	0.394	FF ₆₃	0.1284	4.0	0.514
FF ₃₄	0.0986	4.1	0.404	FF ₆₄	0.2085	4.0	0.834
FF ₃₅	0.3133	5.8	1.817	FF ₆₅	0.1103	2.9	0.319
$\sum WF_{ij}$			4.830	$\sum WF_{ij}$			3.952

Table 7.6. HydroDron-1 quality indicators in the area of the examined problems (Author's work)

GROUPS OF CAUSES	WEIGHTING FACTOR AT THE LEVEL OF CAUSE GROUPS	THE SUM VALUE OF WEIGHTED CAUSE RATINGS IN THE FOLLOWING GROUPS	WEIGHTED VALUE AT THE CAUSE GROUP LEVEL	INDICATIVE SCREENING ASSESSMENT AT THE CAUSE GROUP LEVEL	QUALITY INDICATOR AT CAUSE GROUP LEVEL	TOTAL HYDRODRONE QUALITY INDEX
	W_i	$\sum W_{F_{ij}}$	WI_i	WI_i^{maks}	$Q_i = \frac{WI_i}{WI_i^{maks}}$	$Q = \frac{WP_{total}}{WI_{D_{total}}^{maks}}$
I_1	0.1323	5,306	0.702	0.793	0.885	0.734
I_2	0.2645	4.609	1.219	1.587	0.768	
I_3	0.0825	4.830	0.398	0.495	0.804	
I_4	0.1411	4.166	0.588	0.846	0.694	
I_5	0.1151	3.946	0.454	0.692	0.658	
I_6	0.2645	3.952	1.045	1.587	0.659	
$WP_{total} = \sum WI_i$			4.406	$WP_{total}^{maks} = 6,0$		

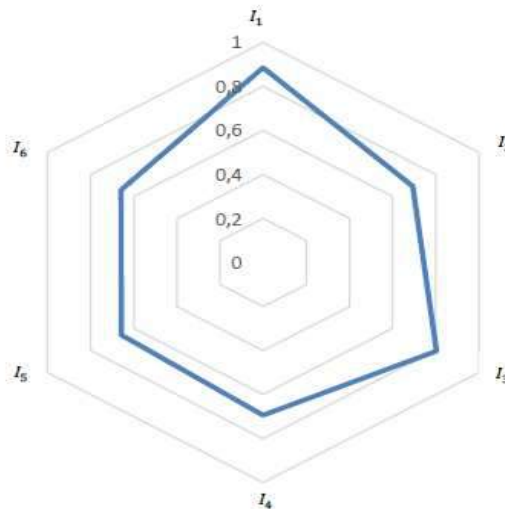


Figure 7.3. Graphical interpretation of results at the level of problem cause groups (Author's work)

Summary

Summarizing the results of the research procedure, it is important to note that the use of the unmanned surface vehicle HydroDron-1 for research on bathymetry, marine environment, and seabed in the Port of Gdynia waters is part of a pilot project. The obtained

results in terms of the task area ($Q_6 = 0.734$) place the tested device at a good level. The only unsatisfactory aspect is its limited transport capabilities, which results from its small size and purpose. The remaining tasks carried out during the research were completed despite some technical issues observed in the tested vehicle, which is not a disqualification in this type of research.

Regarding procedures and regulations, a significant issue that may raise concerns is the vehicle insurance, which is influenced by applicable legal regulations and international conventions. The vehicle was insured as equipment, not as a floating unit. This stems from the limitations imposed by the *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972* signed in London on October 20, 1972. Other potential causes were resolved satisfactorily by the entity that owns the tested device.

Technical support, provided under a potential service agreement (utilizing outsourcing), would require the creation of comprehensive training and technical-operational instructions, including the specifics of technical inspections, periodic maintenance, emergency procedures, etc. Currently, during the pilot program phase, such activities are carried out by the manufacturer of HydroDron-1.

Factors related to the working environment in the port waters (where HydroDron-1 is operated) do not currently pose significant problems for task execution. Staffing issues involve:

- the requirement for full-time staff to have a motorboat operator qualifications combining the specialties of a mechanic and a navigator;
- the need for a marine hydrographer of category A.

At this stage, this issue is resolved thanks to the qualifications of the manufacturer. The operational and technical characteristics of the vehicle operating in the working environment, such as port waters, allow for the execution of assigned tasks. A potential issues might arise from data transfer disruptions between the vehicle and the shore station due to the specific construction of the port basin.

Summarizing the results of research related to the use of the HydroDron-1 unmanned surface vehicle for studying the waters of the Port of Gdynia, it can be stated that despite the pilot nature of the project, the use of the unit in the specified scope does not pose any significant problems. The specificity of the device, above all, allows for the execution of its designated tasks without involving onboard crew. Prospectively, the autonomous use of HydroDron-1 could especially come in handy in situations involving environmental contamination or the release of hazardous substances from ship installations or onboard tanks. The proposed solution not only enables the execution of tasks within the designated area, but also offers flexibility in utilizing such equipment according to the schedule of planned activities.

It seems that in the future, the use of unmanned surface research platforms could extend to the domain of monitoring the port waters. However, such endeavors would require additional equipment, which may potentially lead to an increase in the size of such a unit in terms of buoyancy, as well as the power and power supply of the propulsion system.

References

- Bozarth, C., & Handfield, R.B. (2006). *Introduction to operations and supply chain management*. Pearson Education Inc.
- Bremer R.H., Cleophas P.L.H, Fitski H.J., Keus D. (2007). *TNO report: Unmanned Surface and Underwater Vehicles*. TNO Defence Security and Safety The Hague. Netherlands.
- Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., Spidarelli, E., Verrugio, G., Sortini, A., & Capodaglio, G. (2005). Sampling sea Surface with SESAMO: an autonomous craft for the study of sea – air interactions. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12, 95–105.
- Hanggi, T. (2009). *Design of an autonomous Sampling Boat for the study of Algae Bloom in Lake Zurich*. Swiss Federal Institute of Technology: Zurich.
- Kitowski, Z. (2012). Autonomiczny bezzałogowy pojazd nawodny „Edredon”. *Polish Hyperbaric Research*, 3(40), 7–22.
- Kolman, R. (2013). *Różne odmiany jakości i ich praktyczne wykorzystanie*. PWN: Warszawa.
- Miętkiewicz, R. (2018). *Bezzałogowe platformy morskie. Bezzałogowe jednostki nawodne*. AMW: Gdynia.
- Roberts, G.N., & Sutton, R. (2006). *Advances in Unmanned Marine Vehicles*. The Institution of Electrical Engineers, MPG Books Limited, Kornwalia.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Proces*. McGraw-Hill: New York.
- Stabryła, A. (2006). *Zarządzanie projektami organizacyjnymi i ekonomicznymi*. PWN: Warszawa.
- Starzyńska, B., Hamrol, A., & Grabowska, M. (2010). *Poradnik menedżera jakości. Kompendium wiedzy o narzędziach jakości*. Politechnika Poznańska: Poznań.
- Wasilewska, E. (2011). *Statystyka opisowa od podstaw*. SGGW: Warszawa.

Chapter 8. The utility of unmanned surface vehicles for measuring selected parameters of port waters in the Port of Gdynia

Tomasz Nowosielski, Marzena Delekta, Justyna Policht

Introduction

The Port of Gdynia Authority S.A., along with four partners, is implementing a project titled *Marine Port Surveillance and Observation System Using Mobile Unmanned Research Units* (MPSS). Information about the participants is presented in Table 8.1 (POLNOR 2019, pp. 1–3).

Table 8.1. Entities participating in the project POLNOR 0037/2019 (NCBiR 2023, pp. 1–5)

Project	Leading Entity	Participating Entities	Project Start Date	Project End Date
NOR/POLNOR/ MPSS/003 7/2019- 00	Port of Gdynia Authority S.A.	Gdańsk University of Technology University of Gdynia Maritime Norwegian Institute of Water Research, MIROS AS	1.02.2021 r.	1.02.2024 r.

The subject of research during the project was the utilization of an unmanned mobile research platform for cyclical measurements of selected parameters in the waters of the Port of Gdynia. The measurements included areas related to navigation safety and the quality of port waters, in particular:

- depths of port basins;
- water and sediment content;
- content of microplastics and dioxins in the water.

The unmanned research unit was provided by Marine Technology Sp. z o.o., a company based in Gdynia, which specializes in developing IT and automatic systems intended for use in maritime and military sectors. The unmanned floating unit, called HydroDron-1, was created as a result of a previous research project of this company. The fundamental purpose envisioned by the unit designers is to carry out hydrographic measurements (Marine Technology, 2023a, pp. 1–3).

The main objectives of using the Unmanned Surface Vehicles were to collect specific data on the parameters of the Port of Gdynia waters and compare them with reference data gathered using previously accredited procedures. Furthermore, a significant task was the development of a method for continuous monitoring of port waters using this unit.

Characteristics of the unmanned mobile research platform as a tool for collecting hydrographic data

The unit used in the project is a structure that enables the utilization of various types of sensors facilitating the collection of hydrographic data. If necessary, it can be supplied with equipment that performs broader tasks, such as monitoring vessels moving within the port waters or controlling radioactive radiation, and more. HydroDron-1 is a versatile device with significant potential for use in non-marine waters.

The Unmanned Surface Vehicles, as previously mentioned, is universal, which allows it to perform various tasks, including moving to a designated areas and using sensors. It is equipped with several systems that enable it to perform specific tasks. The fundamental requirement is the ability for safe navigation across various waters, which is ensured by an appropriate navigation system (Stateczny, Gierski, 2018, pp. 4–5). The data provided by the navigation system are essential to control the unit. The unit can perform tasks autonomously (using specially developed algorithms) or can be operated remotely by its operator (Stateczny, Burdziakowski, 2019, pp. 33–34). A group of various sensors provides real-time data, which allows for safe navigation across different waters.

The onboard equipment of the unit depends on the type of mission being conducted and can be configured accordingly based on current needs (Figure 8.1). If an Unmanned Surface Vehicle is intended for vessel traffic monitoring in a given water area, an optical system and/or other devices enabling vessel identification are used. A weather system (based on the onboard weather station readings) provides data concerning basic weather conditions (Marine Technology, 2023b, pp. 1–5). In tasks related to measuring water depth in water bodies, the vehicle employs an appropriate bathymetric system. Similarly, for tasks related to the delivery of water and sediment samples, sampling systems are used.

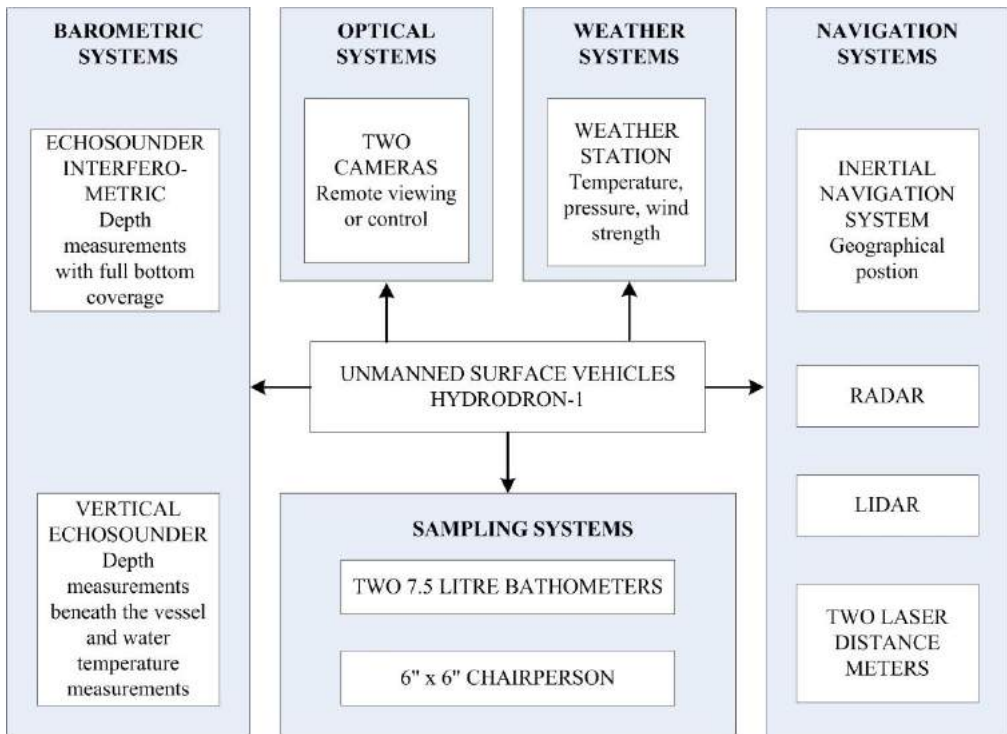


Figure 8.1. Onboard systems of the unmanned surface vehicles HydroDron-1 (own compilation based on: Stateczny & Burdziakowski, 2019, p. 33–36; Stateczny & Gierski, 2018, p. 4–5)

The versatility of the unit is achieved not only by integrating various specialized systems on board, but also by using a modular and open software architecture (Marine Technology, 2023b, p. 1–5). Observations of its operation and recorded data also allow for software modifications, which allows for functional improvements to the vehicle. The versatility of this device is a significant advantage for long-term use, as it provides the capability for upgrades and adaptation to the changing requirements of various users. Furthermore, changing the equipment poses no issue in this case, because the unit itself was built in a modular concept, ensuring that future modifications do not require extensive reconstruction. Observations of its operation and recorded data also allow for software modifications, facilitating continuous functional enhancements of the vehicle.

The structural and operational characteristics of the unmanned mobile surface vehicles allow for a wide range of applications and the execution of various tasks. However, due to its size, propulsion type, and control system, there are specific limitations related to its maritime capabilities and sailing range. HydroDron-1 is not adapted to open-sea areas with high waves due to its own weight of 300 kg and the hull draft of only 25 cm (Marine Technology, 2023b, p. 1–5). Additionally, the range of radio control systems is limited to 40 km, and data transmission for measuring purposes extends up to 6 km.

The unit’s shallow draft and compact dimensions enable it to maneuver comfortably in confined spaces. Such capabilities facilitate the execution of various cyclical and

repetitive tasks, after which it requires recharging its batteries, sufficient for approximately 12 hours of sailing at a speeds of 3–4 knots. An essential feature of HydroDron-1 is its various control modes, ranging from autonomous operation along a programmed route to autopilot mode, maintaining the set course, and ending with manual control, where the operator remotely takes control of the vehicle. These features enable hydrographic measurements and monitoring of water bodies in maritime ports, anchorages, bays, lakes, and rivers, where predefined routes are necessary, but with the option of quickly switching to manual control (Stateczny, Burdziakowski 2020, p. 2).

Considering the parameters of HydroDron-1, the main areas of its utilization in port waters can be identified as follows:

- conducting bathymetric measurements;
- collecting water and sediment samples for various research purposes;
- gathering data on air pollution and radiation levels in the environment;
- noise measurements within the port area;
- vessel monitoring in the port, supporting Port State Control activities;
- port safety monitoring, including fire protection, and coordinating rescue operations;
- maritime port security monitoring.

Legal aspects of using an unmanned research unit for port aquatic surveys in Gdynia

In the current legal framework of the Republic of Poland, specifically the Maritime Code dated September 18, 2001 (consolidated text Journal of Laws 2023, item 1309), and in other legal acts regulating the principles of maritime navigation and work at sea, there is no definition of an unmanned maritime unit. Consequently, from an organizational and legal perspective, introducing a mobile research platform to maritime waters presented challenges. Existing regulations do not keep pace with technological advancements. Therefore, prior to commencing research activities, the research team had to complete a number formalities related to obtaining permissions for the unmanned unit's voyages within the port area. The Maritime Office has no regulations or procedures governing the use of such units for research purposes in Polish maritime areas. Therefore, during the project's implementation, difficulties arose regarding the conduct of voyages of the unmanned mobile research platform due to restrictions on the approval of this type of equipment for navigation. The most significant concerns related to the absence of an onboard operator, necessitating the submission of applications to the Maritime Office for each voyage. Throughout the project, the research team was compelled to submit 16 applications for a one-time approval of HydroDron-1's cruises in the waters of the Port of Gdynia (Report ZMPG 2023, p. 1–6). After reviewing these applications, the Maritime Office granted approvals for specific voyages while simultaneously prescribing special procedures for utilizing the device. It is worth noting that during each mission of the Unmanned Surface Vehicle, the water area in which the unit

was located was closed to navigation, resulting in the suspension of normal vessel traffic in the port.

Navigational hindrances stem from the lack of regulations allowing the operation of unmanned devices in port waters. Every time voyages of such unconventional waterborne units are planned, approval from the Maritime Office is required. Throughout the project and data collection by HydroDron-1, it was necessary to prepare and submit a number of documents to allowing for the cruises.

In the future, the use of unmanned units in port waters requires adapting legal standards and the development of appropriate procedures taking into account the technical specifics of such vehicles and the legal consequences of their operation. A significant challenge in this regard would be addressing the legal consequences of collisions involving unmanned units with other vessels or elements of port infrastructure. Therefore, it appears necessary to regulate, first of all, the rules of navigation for autonomous and traditionally crewed vessels and defining the civil liability of the owner or user of the unit in case of damages caused by its operation. The results of the project may contribute to discussions on possible directions of development of legal regulations pertaining to unmanned units.

Utilizing an Unmanned Surface Vehicles for conducting planned research during the project involved multiple launches of the device. Its owner, Marine Technology Sp. z o.o., initiated the registration of this unit. HydroDron-1 was registered on February 6, 2023 in the administrative register of Polish inland waterway vessels as a motor-powered boat designed for hydrographic work. The unit received the registration number GD-02-195, confirming its Polish affiliation, and a certificate of navigation ability signed by the Director of the Inland Navigation Office in Bydgoszcz (Act, 2000). The technical inspection of the unit, conducted on February 20, 2023, verified the technical condition of its various components, including the hull, steering, anchoring, mooring, towing, machinery, propulsion, and thrusters (Regulation, 2010). After confirming the completeness and functionality of the drone's equipment, it was cleared for navigation. This permit made it possible to conduct research within port waters without the need to apply extraordinary safety procedures and the Maritime Office's approval. The unit was cleared for navigation in four navigation areas (Table 8.2).

Table 8.2. The approved cruising regions of the unmanned research vessel HydroDron-1 (Directive, 2016; Division of European..., 1997, pp. 3, 4, 7, 12; Act, 2000, Article 42)

Cruising Area (UE) 2016/1629	Exact Area (only waters bodies included on Polish territory)	Requirements
1.	Part of the Bay: <ul style="list-style-type: none"> – Pomorska, south of the line connecting the Nord Perd cape on the island of Rugia with the Niechorze light-house, – Gdańsk, south of the line connecting the Hel light-house with the approach buoy to the Bałtijsk port. 	Waves up to 2 m height; use of the unit for hydrographic and hydrotechnical works; daytime navigation
2.	Lagoons: Szczeciński, Kamieński, Wiślany; Puck Bay; Włocławek Reservoir; Lakes: Śniardwy, Niegocin, Mamry.	Waves up to 1.2 m height; use of the unit for hydrographic and hydrotechnical works; daytime navigation
3.	Waters in Polish seaports; Rivers: Biebrza, Brda, Bug, Nogat, Elbląg, Martwa Wisła, Narew, Noteć, Nysa Łużycka, Odra, Regalica, Parnica, Pisa, Szkarpawa, Warta, Przemsza; Lakes: Dąbie, Jeziorak, Szelał Wielki, Ruda Woda, Bartężek, Ewingi, Gopło, Zegrzyńskie, Dąbie, Roś, Seksty, Mikołajskie, Tałty, Tałtowisko, Kotek, Szymon, Szymoneckie, Jagodne, Boczne, Tajty, Kisajno, Dargin, Łabap, Kirsajty, Ślesieńskie, Wielkie Jeziora Mazurskie system, Ryńskie, Nidzkie, Bełdany, Guzianka Mała, Guzianka Wielka; Canals: Augustowski, Bartnicki, Bydgoski, Elbląski, Gliwicki, Kędzierzyński, Jagielloński, Łaczański, Ślesieński, Żerański, Górnonotecki, Węgorzewski, Giżycki, Niegociński, Piękna Góra, in Skawina.	Waves up to 0.6 m height; use of the unit for hydrographic and hydrotechnical works; daytime navigation
4.	Other waters not included in regions 1, 2, 3	Use of the unit for hydrographic and hydrotechnical works; daytime navigation

Registration of HydroDron-1 and approval for navigation in multiple waters opens the potential for utilizing this device for various hydrographic and hydrotechnical operations. It can conduct measurements primarily on inland waters, rivers, as well as in maritime bays and within the waters of all Polish seaports. This provides very extensive possibilities for using it even in its prototype version. If the various tasks are successfully completed, there is potential to start mass production of such units

Legal Basis and Method of Measurements in the Waters of the Gdynia Port

The Port of Gdynia Authority S.A. is required to conduct periodic inspections of the condition of port waters and the depths of the basins located within the port area. Such

obligations are assigned to the port managing by two regulations (Regulation, 2011, pp. 1–5):

- Regulation of the Minister of Environment dated June 16, 2011 on the requirements for measuring the levels of substances or energy in the environment by entities managing roads, railway lines, tram lines, airports, or ports;
- Regulation of the Minister of Maritime Economy dated October 23, 2006, specifying the technical conditions for use and the detailed scope of control of maritime hydrotechnical structures.

In the first case, the port management is obliged to carry out periodic measurements of the levels of substance or energy in the environment. The requirement to measure the noise level in the environment applies to maritime ports characterized by an annual throughput capacity exceeding 10 million tons or located in urban agglomerations, i.e., those adjacent to cities or within city limits (Regulation, 2011, §1, §3.1, item 1e). Noise measurements are conducted every 5 years at specified measurement points, in accordance with the Regulation on measuring emissions and water intake (Law 2011, Art. 148). Additionally, the port management is mandated to conduct measurements associated with the biological (BOD_5) and chemical (COD) oxygen demand indicators, pH levels, total suspended solids, and the presence of lead, zinc, cadmium, and petroleum hydrocarbons in the port basins at least twice a year (Regulation, 2011, §3.1, item 2). Furthermore, there is a requirement to maintain records of substance and energy measurements in the environment in the form of tabular summaries, maps indicating measurement locations, and situational descriptions. Additionally, the entity managing the port is obliged to carry out inspections of hydrotechnical structures based on the Regulation of the Minister of Maritime Economy on the technical conditions for use and the detailed scope of control of maritime hydrotechnical structures dated October 23, 2006, as well as the Building Act of July 7, 1994 (Law, 1994). The regulation precisely defines the rules for the use and maintenance conditions to ensure the technical efficiency of hydrotechnical structures. Port authorities have specific responsibilities related to the ongoing operation of these structures and any actions that might alter their parameters. The general terms of use for hydrotechnical structures, stemming from the regulation issued on October 23, 2006, specify the duties of port authorities in terms of (Regulation, 2006, Chapter 1, § 5):

- use of facilities in accordance with their intended purpose and maintaining appropriate technical and operational parameters, including fire safety regulations, occupational health and safety, as well as the protection of both the land and marine environment;
- carrying out regular maintenance of the construction of these structures and their equipment;
- supervising the execution of any structural, technological, or functional changes to hydrotechnical structures.

In addition to these general guidelines, specific actions are indicated to define principles for the use, maintenance, and renovation of various types of structures.

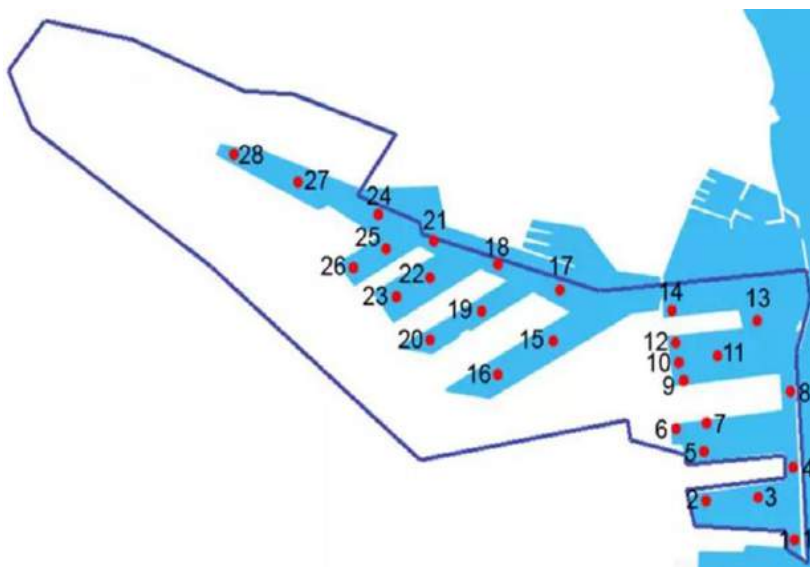
Furthermore, the regulation imposes an obligation on the port managing body to conduct periodic inspections of the entire hydrotechnical structure along with its associated equipment. Four types of inspections are distinguished, conducted depending on specific circumstances and conditions, as precisely defined by the Minister of Maritime Economy's Regulation (Regulation, 2006, Chapter III, § 62, § 63).

A bathymetric plan is a document developed on the basis of hydrographic measurements, allowing for the determination of (Regulation, 2006, § 88, para. 1):

- navigational depth, which is the water level measured from its surface to the highest point on the seabed (Regulation, 2006, § 34);
- current navigational depth, meaning the navigational depth determined according to current water conditions in a given area (Rutkowski, Królikowski 2009, p. 37);
- seabed depressions;
- shallows.

Three types of bathymetric plans are distinguished: periodic, control, and emergency. Periodic plans are prepared every 2 years for irregularly used ports, annually for cargo ports with high ship traffic, and less than a year for universal ports serving passengers (detailed requirements are specified in the Regulation, 2006, § 90). Control and emergency plans are prepared in cases involving dredging operations, the elimination of depressions, the need to obtain a decision on changing the use of a maritime structure, damage to hydrotechnical structures caused by ships, and significant storms that have affected the technical condition of the port in any way. Therefore, the Port of Gdynia Authority S.A. is obligated to conduct regular tests of water parameters in port waters and the condition of hydrotechnical structures, and to prepare bathymetric plans for individual port basins. Compliance with the requirements set forth in the regulations of the Minister of the Environment and the Minister of Maritime Economy necessitates the outsourcing of research to external entities.

In the case of studies related to port waters, covering the above-mentioned substances, water samples are taken at 28 measuring points located in various parts of the port area. Measuring points are designated on the surface of water bodies, including port basins, the port channel, the harbor area, and waters in front of the main breakwater of the port (see Figure 8.2). Water for testing is collected manually by individuals conducting research from a small floating unit, and then transported to the laboratory. The process complies with the requirements of the PN-ISO 5667-9:2005 standard, which defines guidelines for the design of sampling programs, sampling techniques, and procedures for handling the obtained research material, consisting of various types of seawater.



Legend for the drawing:

Measuring point numbers	Location of measurement points	Measuring point numbers	Location of measurement points
1, 4, 8	Kanał Południowy	15, 16	Basen IV – Marsz. Piłsudskiego
2, 3	Basen I – Prezydencki	19, 20	Basen V – Min. Kwiatkowskiego
5, 6, 7	Basen II – Wendy	22, 23	Basen VI
9, 10, 11, 12	Basen III – Węglowy	25, 26	Basen VII
13, 14	Awanport	17, 18, 21, 24, 27, 28	Kanał Portowy

Figure 8.2. Measurement points in the waters of the Port of Gdynia (Flasińska et al., 2023, pp. 4–5; ZMPG, 2023, pp. 1–5)

The control of hydrotechnical structures also involves the preparation of bathymetric plans for individual port basins to verify depths, identify underwater obstacles, and observe depth changes. The depths of port channels and basins are essential for the safe navigation of seafaring vessels within the port area. The bottom of individual basins may undergo changes in depth due to (Hawkswood, Sobolewski, Pilch 2014, p. 229):

- movement of vessels and the creation of propeller-induced water streams,
- generation of strong water currents by the rudders of vessels,
- water surface turbulence within the port area..

Considering the necessity to maintain the technical efficiency of the port The Port of Gdynia Authority S.A. prepares periodic bathymetric plans more frequently than once a year. Additionally, control and emergency plans are prepared after dredging and filling works, storms, and in the event of various breakdowns. Some of the control activities are routine and repetitive (a requirement imposed by regulations), while

others depend on planned actions (such as repairs, expansions, or hydrotechnical works), and the remaining ones result from random events.

The bathymetric plan is carried out by a floating unit that moves along a pre-defined profile (route) in the designated port area scheduled for examination. While the unit is moving, it determines its location and simultaneously associates the depth in the indicated location, as provided by the onboard echo sounder. Measured depth values, recorded side by side, form a single measurement profile. To determine the depth of a port channel or basin, several such profiles need to be compiled (see Figure 8.3).

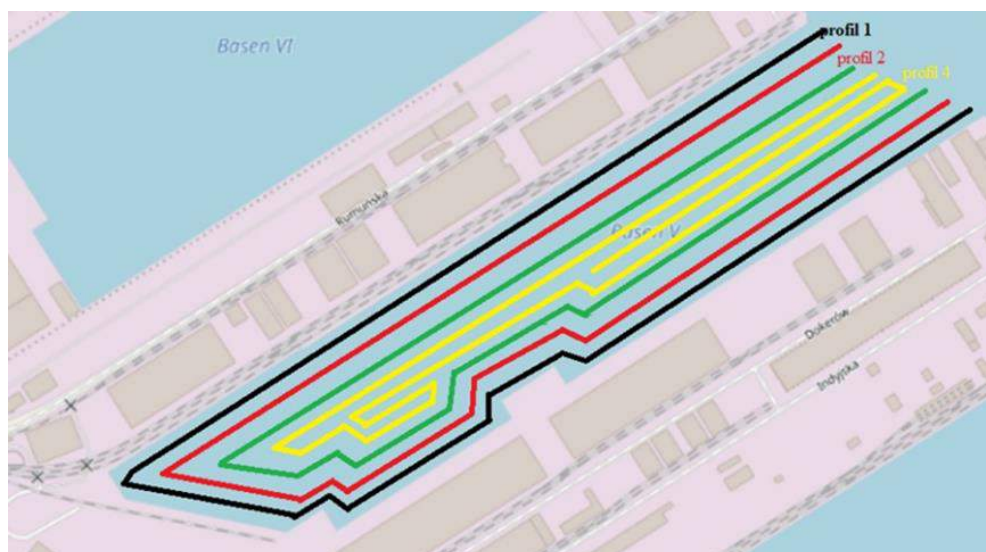


Figure 8.3. Example profiles of bathymetric research in the port basin (Author's work)

The use of this method for examining the bottom of a port basin has certain limitations related to measurement accuracy between profiles, high costs, and the time-consuming nature of the entire operation. An improvement in this regard is the current use of multibeam echosounders, which allow obtaining more measurement data compared to old-type-single-beam devices (Paćzek, 2005, p. 45). Utilizing such measurement methods enables the creation of a bathymetric plan for the examined water area, where isobaths and contour lines are visible, illustrating the underwater topography (see Figure 8.4).

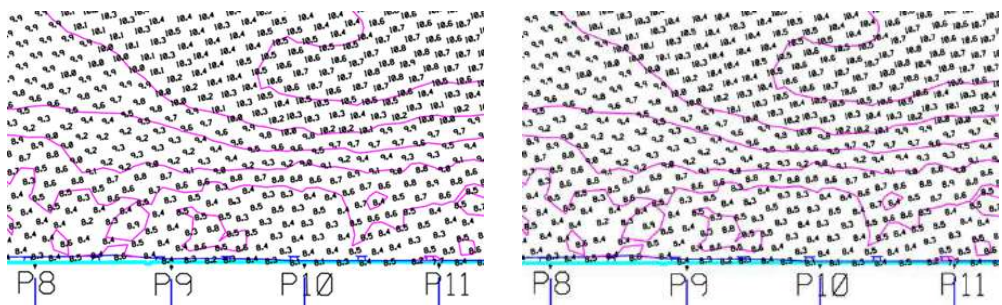


Figure 8.4. An example of a bathymetric plan (own compilation based on materials: *(Bathymetric data obtained from the Hydrotechnical Department (ZHB, 2023), Port of Gdynia Authority SA.)*

The finished bathymetric plan allows for a detailed description of the seabed surface characteristics, taking into account both deep areas and shallow parts, which is crucial for maintaining the operational efficiency of the port.

Results of measurements obtained using an unmanned surface vessel and their verification

The MPSS project envisaged the use of an unmanned surface platform to conduct periodic measurements of the waters in the Port of Gdynia and create bathymetric plans in accordance with the principles outlined in the regulations and following the described method. It was assumed that the selected unit is capable of conducting the required measurements and has sufficient onboard equipment for this purpose. The project program included measurements in the Port of Gdynia waters in the following areas:

- checking the feasibility of using unmanned surface platforms for water and sediment sampling (Chapter 3);
- using unmanned mobile platforms to assess water pollution levels with microplastics and dioxins (Chapter 4);
- conducting bathymetric measurements of selected port basins using unmanned surface platforms.

Work related to water and sediment sampling was carried out in four cycles during the following periods: February 28 – March 3, 2022, May 16–19, 2022, July 18–21, 2022, October 17–20, 2022. HydroDron-1 completed the planned tasks successfully and without any issues, and the collected research material was suitable for further laboratory analysis. For comparison purposes, water and sediment samples were also taken using the traditional method, i.e., with bathymeters and manual samplers (operated by the research team). Comparing the laboratory results obtained from samples taken in two ways did not show significant differences (as described in Chapter 3). This indicates that this type of unit can be used for water and sediment sampling from port basins. However, there were comments related to the sample acquisition procedure itself, which requires HydroDron-1 to return to the shore each time to collect the

samples. As part of future improvements to the unit, the research team proposed automating the sample collection system so that they could be stored onboard until the unit returns from the entire measurement cycle.

Assessment of the contamination level of port basins involved collecting of plastic particles floating on the water surface using a plankton net. An unmanned surface platform towed the net in the central part of the port basins. The collected plastics were transferred to a research vessel that assisted the drone during research activities. The conducted studies on microplastics in water confirmed the utility of the unmanned unit in the process of collecting research material.

One of the project’s elements was also to conduct bathymetric measurements of the Port of Gdynia basins using HydroDron-1. Equipped with two echosounders and other navigation devices, the unmanned surface platform allows for the examination of the seabed and the presentation of results in the form of a bathymetric plan. The results of depth measurements conducted by HydroDron-1 were compared with the results of previous measurements carried out, at the port authority’s request, by external entities using manned vessels. It should be noted that measurements conducted by manned vessels were considered as reference data for creating the plan. Comparison of the measurement results in the form of bathymetric plans revealed differences in the basin depths, averaging around 50 cm, with plans based on data from the unmanned surface platform showing shallower depths of the port basins (Figure 8.5, Figure 8.6).

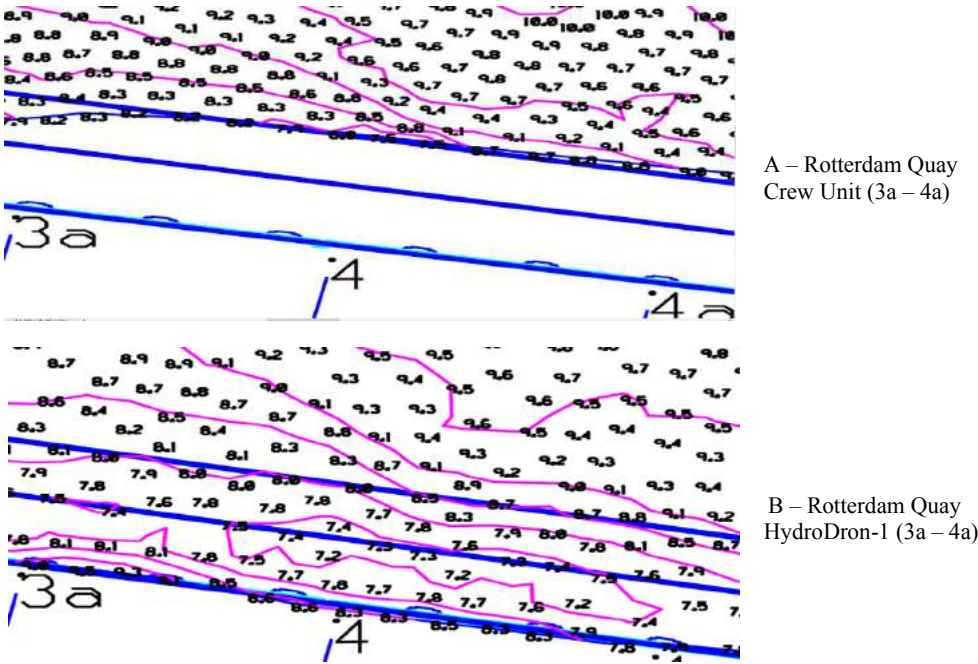
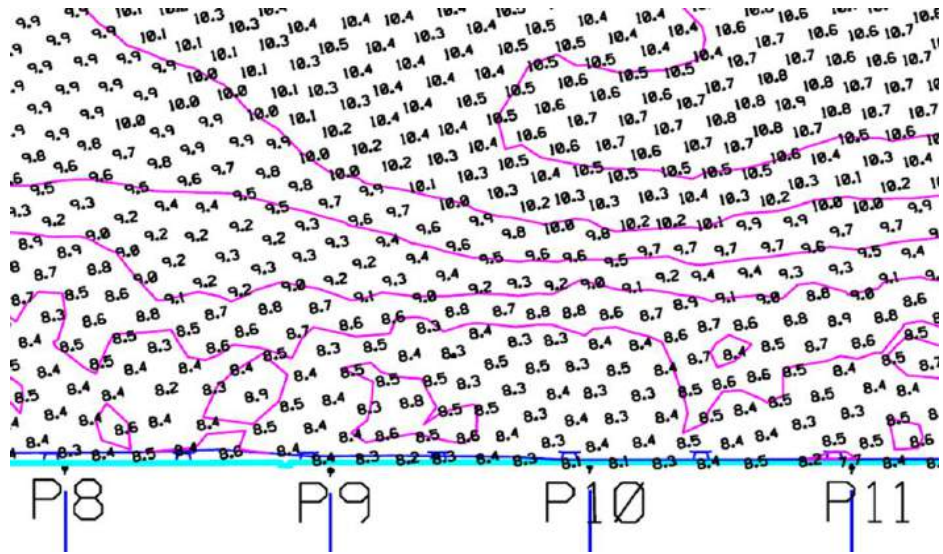
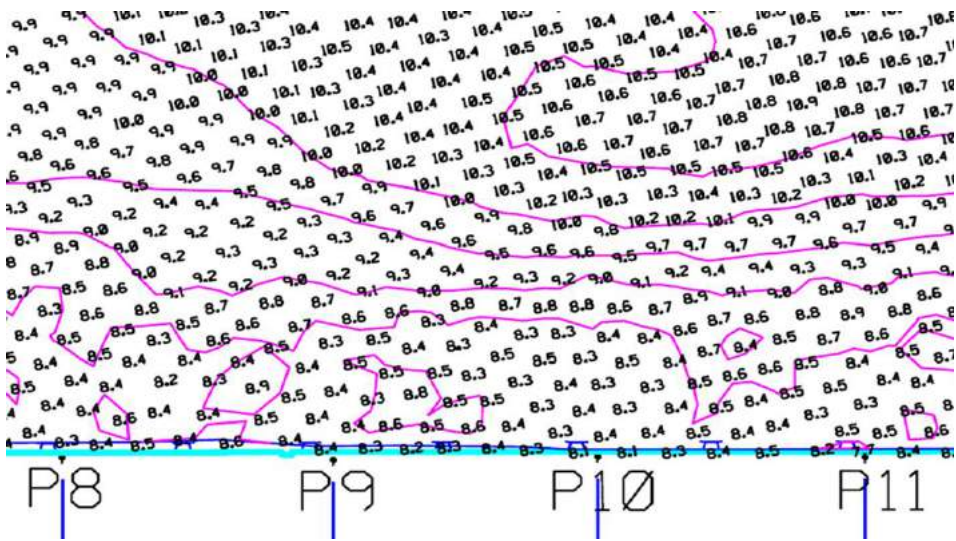


Figure 8.5. Bathymetric plan of basin VI at the Rotterdam Quay (own study based on materials: (*Bathymetric data* obtained from the Hydrotechnical Department (ZHB, 2023), Port of Gdynia Authority S.A.).

Significant differences in depth between the plans are evident in the case of Basin VI, near the Rotterdam quay. In this case, the depth differences can reach up to 40 cm. A similar situation occurred when comparing the plans of Basin V and the Czech Quay, where depth differences of up to 40 cm were also observed.



A – Czech Quay Crew Unit (P8 – P11)



B – Basin no. V. Czech Quay HydroDron-1 (P8 – P11)

Figure 8.6. Bathymetric plan of Basin V at the Czech Quay (own elaboration based on materials: bathymetric data, obtained from the Hydrotechnical Department (ZHB, 2023), Port of Gdynia Authority SA.)

Summary

As a result of the project *Port Monitoring and Observation System Using Mobile Unmanned Research Platforms*, it can be concluded that the use of unmanned surface plat-

forms for measuring aquatic environments in seaports is both possible and worthwhile. The project's objectives were partially achieved, as HydroDron-1 successfully fulfilled two out of three tasks:

- proved to be a capable platform for collecting water and sediment samples;
- was useful for assessing the level of microplastics and dioxin contamination in port waters;
- did not achieve the intended results in the case of bathymetric measurements compared to traditional research methods.

Comparison of laboratory test results of samples collected by a drone with the results of samples considered as reference did not reveal any significant differences. Therefore, it can be concluded that the drone performed its task correctly. Similarly, in the case of microplastic sampling, the process ran smoothly and without any issues. However, significant differences in bathymetric measurements were observed between the data collected by HydroDron-1 and data from the reference measurement. The scale of these differences is so large that it is not possible to develop an accurate bathymetric plan based on data from the unmanned surface platform. The cause of these differences in depth measurements was not determined and should be investigated.

Considering the overall results of the project, the use of unmanned surface platforms for service in seaports can be considered purposeful. Their versatility, variety of applications, and equipment allow them to be used for various tasks. The tested research unit will undoubtedly be improved and can be widely utilized for various research activities.

References

- Flasińska, A., Galer-Tatarowicz, K., Dembska, G., Pazikowska-Sapota, G., Bojke, A., Litwin, M., Ostrowska, D., Jasiński, P., Rudnicka, M., Kobus, A., Grzanka, P., & Kombel, P. (2023). *Ocena czystości wód basenów portowych Morskiego Portu Gdynia*. Uniwersytet Morski w Gdyni: Gdańsk.
- Hawkswood, M. G., Sobolewski, J., & Pilch, M. (2014). Geosyntetyczne maty betonowe w ochronie dna nabrzeży i stanowisk postojowych statków. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 229–238.
- Marine Technology (2023a). *Wykonane prace*. <https://marinetechnology.pl/wykonane-prace>
- Marine Technology (2023b). *HydroDron*. <https://marinetechnology.pl/hydrodron>
- NCBiR (2023). *Lista projektów realizowanych w NCBR*. <https://www.gov.pl/attachment/3fda170e-9f02-412f-8efc-45fc78e3c654>
- Pączek, B. (2005). Współczesne metody prowadzenia prac hydrograficznych. *Przegląd Hydrograficzny*, 1, 44–50.
- Podział europejskich dróg śródlądowych na regiony żeglugi (1997)*. Polski Rejestr Statków, nr 15/I. https://www.prs.pl/uploads/p15i_pl.pdf
- POLNOR (2019). Treść wniosku do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NOR/POLNOR/MPSS/003 7/2019-00). www.port.gdynia.pl
- Raport ZMPG (2023). *Raport dotyczący prawnych aspektów funkcjonowania bezzałogowej jednostki badawczej w Porcie Gdynia*. Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.: Gdynia.
- Rutkowski, G., & Królikowski, A. (2009). Ocena głębokości toru podejściowego na południe od Ławicy Słupskiej w aspekcie obsługi jednostek o maksymalnych gabarytach — metody uproszczone. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, r. XLX, nr 4(179), 35–50.

- Stateczny, A., & Burdziakowski, P. (2019). *Universal autonomous control and management system for multipurpose unmanned surface vessel*. *Polish Maritime Research*, 26(1), 30–39.
- Stateczny, A., Burdziakowski, P., Najdecka, K., & Domagalska-Stateczna, B. (2020). Accuracy of Trajectory Tracking Based on Nonlinear Guidance Logic for Hydrographic Unmanned Surface Vessels. *Sensors*, 20, 832. <https://doi.org/10.3390/s20030832>
- Stateczny, A., & Gierski, W. (2018). The concept of anti-collision system of autonomous surface vehicle. *E3S Web of Conferences*, 63, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186300012>
- ZHB (2023). *Dane batymetryczne*. Dział Hydrotechniczny, Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A.: Gdynia.
- ZMPG (2023). *Badanie wód portowych*. <https://www.port.gdynia.pl/monitoring-srodowiska/badanie-wod-portowych>

Laws

- (Directive, 2016). Directive of the European Parliament and of the Council (EU) 1629.
- (Law, 2001). Act of April 27, 2001, on environmental protection, Journal of Laws 2001, No. 62, item 627, Art. 148.
- (Law, 2000). Act of December 21, 2000, on inland navigation, Journal of Laws 2001, No. 5, item 43, as amended.
- (Law, 1994). Construction Law, dated July 7, 1994 (Journal of Laws 1994, No. 89, item 414).
- (Regulation, 2011). Regulation of the Minister of the Environment on the requirements for conducting measurements of substance or energy levels in the environment by the entity managing roads, railways, tramlines, airports, or ports dated June 16, 2011 (Journal of Laws 2011, No. 140, item 824).
- (Regulation, 2010). Regulation of the Minister of Infrastructure on the technical requirements and equipment of inland navigation vessels and authorizing entities to perform technical inspections of vessels dated November 5, 2010 (Journal of Laws 2010, No. 216, item 1423).
- (Regulation, 2006). Regulation of the Minister of Maritime Economy on the technical conditions for the use and detailed scope of control of maritime hydrotechnical structures dated October 23, 2006 (Journal of Laws 2006, No. 206, item 1516).

Conclusion

Beata Szymanowska

The results of the research carried out within the project titled *Marine Port Surveillance and Observation System Using Mobile Unmanned Research Units* (MPSS), presented in eight chapters of the monograph *Innovative Methods for Research Port Waters Using Unmanned Surface Vehicles*, clearly indicate the significant potential and utility of unmanned surface platforms in the processes of monitoring and researching port waters. The MPSS project has opened new horizons for research on the state of port waters, the marine environment, and the management of port infrastructure in Poland.

Unmanned surface platforms are innovative devices that can be effectively used for water and seabed research in port basins. Such devices can conduct research in autonomous mode, following a planned trajectory, or in remote control mode. They can be particularly useful in waters that are inaccessible or difficult to reach for larger crewed vessels.

The research confirmed the assumptions of a group of enthusiasts (scientists from universities in the Tri-City area, the Norwegian Institute for Water Research, and employees of the Port of Gdynia Authority S.A. and MIROS AS) that unmanned surface platforms can be efficient and innovative tools for studying port waters. Through the use of advanced measurement equipment, precise planning of research missions, and the application of artificial intelligence, it is possible to collect data that forms the basis for management decisions in seaports.

It should be emphasized that the research conducted in the Port of Gdynia has resulted in reports that constitute a significant substantive contribution to the emerging legal regulations concerning the use of unmanned floating units in port waters. The MPSS project aligns with the implementation of the European Union's climate protection and Baltic Sea water policy by aiming to implement an eco-friendly water monitoring system in the Gdynia seaport. The solution being implemented appears to be an attractive alternative to traditional methods, especially regarding water testing in hazardous and hard-to-reach locations.

However, it should be added that the conclusions from the implementation of the MPSS project clearly indicate the need for further research into improving the functionality of unmanned surface platforms. Continued technological development and improvement of measurement equipment, data analysis algorithms, and process automation will be crucial for the future success of port water research using such devices.

It can be assumed that the trend of using unmanned surface platforms in port water research will have an impact on other important innovative trends in the economy. An integrated approach to environmental monitoring, the efficiency of port water research, and the protection of marine ecosystems are not only key challenges in the maritime industry but also significant global issues. The implementation of innovative methods and tools for researching and monitoring port waters, including the use of

unmanned surface drones, will undoubtedly contribute to the sustainable development of ports, efficient maritime traffic management, and the international protection of the marine environment. The achieved results of the project provide the foundation for further research that may revolutionize the approach to port water monitoring and shape a more sustainable and intelligent future for the maritime industry.

Acknowledgments

Dear Members of the MPSS Project Team and Decision-Makers
from our Polish and International Partner Companies,

I would like to express my sincere appreciation and respect for your invaluable work in carrying out the project titled *Monitoring and Observation System for Port Areas Using Unmanned Mobile Research Platforms* (MPSS). Your dedication, professionalism, and passion have contributed to the achievement of the goals of this innovative endeavor. Thanks especially for Anna Salomon, project coordinator, to your efforts, the MPSS project has become a pioneering step in monitoring and researching port waters using advanced unmanned surface platform technologies. Your determination and skills in planning research missions, utilizing innovative technologies, collecting and analyzing data, and drawing conclusions have all played a significant role in the success of this project.

Your knowledge, perseverance, and commitment allowed for the meticulous collection of data, forming the basis for the preparation of this monograph. They are also of great importance for the further development of the port sector, maritime traffic management, and marine environmental protection. The results of your work will undoubtedly serve as inspiration for future projects and research that will be based on this innovative approach to the study of port waters.

I would also like to extend my gratitude to the decision-makers from our Polish and international partner companies for their support and faith in the abilities of the team members implementing this project. Your openness to innovative approaches and willingness to collaborate have contributed to the success of the MPSS project. Your comprehensive knowledge and experience were crucial in making informed decisions that allowed us to achieve our goals.

Thanks to the efforts of the project team members and the support of our project partners, the research findings and innovative methods presented in this monograph open new perspectives for the development of ports, improving navigation safety, protection of the marine environment, and the utilization of cutting-edge technologies.

With sincere appreciation and respect,
Beata Szymanowska, Project Manager MPSS

About the Authors

Berezowski Tomasz, Researcher at the Gdansk University of Technology. He graduated in 2009 with honors from the Interfaculty Study of Environmental Protection at the Warsaw University of Life Sciences (SGGW), specializing in Restoration and Management of Environment. In 2015, he defended his PhD with distinction at Vrije Universiteit Brussels. In the years 2015–2017 he worked as an assistant and then an adjunct professor at the Faculty of Construction and Environmental Engineering at SGGW. In 2017, he was employed as an adjunct professor at the Faculty of Electronics, Telecommunications and Computer Science of Gdańsk University of Technology (PG) in the Department of Geoinformatics Systems, where he currently works. During his PhD, he interned as a visiting scholar at Flinders University (Australia), won a scholarship for the best doctoral students in the field of GIS AND remote sensing funded by the Anna Pasek Foundation, and a research scholarship from the Government of Flanders. He works on remote sensing data processing, in particular classification and modeling using machine learning methods, as well as the application of remote sensing techniques to models of environmental processes (mainly hydrological). He has published several scientific papers in journals from the JCR database. His works have been cited over 150 times, and his Hirsch index is 7. He actively cooperates with all universities where he completed research internships and as part of the COST campaign, where he serves as a member of the MC.

Bojke Aleksandra, Researcher at the Laboratory of the Department of Environment Protection of the Maritime Institute of Gdynia Maritime University. She has experience in chemical analytics and environmental pollution monitoring using chromatographic and spectrophotometric measurement techniques. She conducted research, opinion and implementation work related to the analysis of sea water and bottom sediments. She has participated in many international projects related to, among others, offshore wind farms.

Chybicki Andrzej, Researcher at the Gdansk University of Technology. Computer scientist by education, graduate of the Faculty of Electronics, Telecommunications and Informatics, doctor of technical sciences in computer science specializing in spatial data processing in distributed information systems. Oriented to use the achievements and knowledge of the scope of his research in industry. Cooperated with a number of IT, surveying and satellite technology industry entities, including OpeGieKa Elbląg, Reson Inc., Powel Sp. z o. o., Wasat, Better Solutions, European Space Agency and others. Manager of R&D and contracted business projects, contractor of technical expertise in information systems. In practice, he is passionate about IT technology, a visionary and animator of activities aimed at applying new solutions in business..

Delekta Marzena, Head of the Maintenance Section in the Department of Hydraulic Structures, Port of Gdynia Authority SA. Graduate of Gdansk University of Technology, specialization: hydrotechnical construction. In her daily work, she deals with the

maintenance of hydrotechnical structures, including: renovation works, inspections and bathymetry.

Dembska Grażyna, Researcher at the Department of Environment Protection of the Maritime Institute of Gdynia Maritime University. She has many years of experience in researching physical and chemical environmental pollution, and managing geochemical and hydrochemical studies in many works and research projects. She is the author of many publications, scientific and research papers, expert reports, studies, and implementation works in the field of environmental protection. Long-time head of the Laboratory of the Department of Environment Protection, head of the Department of Environment Protection of the Maritime Institute of the Gdynia Maritime University (IM UMG). Member of the POLLAB Polish Laboratories Club.

Dereszewska Alina, Researcher at the Department of Industrial Products Quality and Chemistry, Gdynia Maritime University. She graduated with a master's degree in chemistry in 1987. In 1999, she obtained a PhD from the Warsaw University of Technology in the field of physicochemical properties of polymers. Since 2004, her scientific interests have focused on research areas concerning the impact of pollution on the Baltic Sea environment. She is the author of 25 publications on topics related to municipal wastewater treatment and the protection of sea waters. For the last 15 years, she has been conducting research in close cooperation with the technologists of the Swarzewo Wastewater Treatment Plant, where she has held three scientific internships. Currently, her research is focused on the study of micropollutants (microplastics, pharmaceuticals, dioxins) presented in the sea water environment.

Dziarkowski Tomasz, Researcher at the Laboratory of the Department of Environment Protection of Marine Institute at Gdynia Maritime University. He has many years of experience in sampling various environmental matrices and has participated in many environmental research projects. His research interests include sampling methodology for water, bottom sediments and soils.

Flasińska Agnieszka, Researcher at the Environmental Protection Laboratory of the Marine Institute of Gdynia Maritime University. She has many years of experience in research and interpretation of analyses of seawater and bottom sediments for biogenic substances and parameters influencing increased eutrophication and deterioration of the marine environment. She participated in a number of research projects resulting in the issuance of opinions and EIAs.

Galer-Tatarowicz Katarzyna, Researcher at the Laboratory of the Department of Environment Protection of the Marine Institute of Gdynia Maritime University. She has many years of experience in pollutant research in various environmental matrices and is an author of many research, opinion and implementation papers related to environmental issues. Her research interests include organic pollutants and their distribution in aquatic ecosystems, preparation of sampling guidelines and development of analytical procedures for the measurement of trace pollutants in water and sediments.

Hlebowicz-Wojciechowska Katarzyna, Deputy Director for Port Development in Port of Gdynia Authority SA. Since January 2023, she has been serving as the Deputy

Director, where she is responsible for key aspects of port development and environmental protection. She is a graduate of Gdansk University of Technology, where she earned a Master's degree in Biotechnology. Her professional career spans nearly 19 years in the position of Head of the Environmental Protection Department at the Management Board of the Gdynia Maritime Port SA. She possesses extensive experience in analyzing the impact of port activities on the environment, developing innovative environmental protection solutions, and monitoring its condition. Katarzyna is a certified project manager and demonstrates an open mind, analytical thinking skills, and the ability to seek unconventional solutions. Her involvement in various R&D projects includes initiatives such as "Sustainable Management of Contaminated Sediment in the Baltic Sea Region" and "Environmental Impact of Low Sulphur Ship Fuel." She is also an author and co-author of numerous publications on environmental protection in port activities. Her experience, knowledge, and dedication make her a valuable expert in the field of environmental protection and sustainable development, as well as a key player in the development of the Port of Gdynia.

Kalbekken Kristoffer, Chief Technology Officer (CTO), Head of Research Infrastructure, Environmental Data Science and Digitalization at NIVA Norwegian Institute for Water Research. Kristoffer holds a MSc in Industrial Economics and Technology Management from the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in Trondheim, a thesis-work focusing on network theory and business strategy in the utilities sector, covering areas such as energy, water and wastewater, and waste management. His specialization includes computer science, communication technology, as well as business administration and strategic management. He later pursued additional studies in management at the BI Norwegian Business School in Oslo. He is a leader and advisor focused on how technology and people can collaborate to drive value-creating innovation and change. Kristoffer's primary areas of interest include leadership and management in knowledge-based organizations, encompassing change management, team development, initiating strategic activities, and driving value and business benefits through technology projects. At NIVA, he led the Environmental Informatics and Data Science section, served as Research Director with a focus on digital technology and infrastructure, and is currently the CTO responsible for research infrastructure, environmental informatics, data science, digital infrastructure, and IT across NIVA.

Klimek Hanna, Associate Professor of the University of Gdansk, research and teaching employee of the Department of Maritime Transport and Seaborne Trade, Faculty of Economics, academic teacher with many years of experience, author and co-author of over 100 publications. Her research interests focus on: economics, organization and management (especially strategic) of seaports, innovation in seaports, port services markets, competition in port services markets, competitiveness of seaports, port policy, logistics, logistics supply chains. She cooperates with the Port of Gdynia Authority SA.

Krasowska Katarzyna, Research and teaching staff member at Gdynia Maritime University, Department of Industrial Products Quality and Chemistry. She obtained her PhD at Gdynia Maritime University in 2003 in the field of the influence of modifica-

tions to packaging polyester materials on their biodegradability under natural conditions. For the last 25 years, her scientific interests have focused on research of biodegradability of natural and synthetic polymers in natural weather conditions in various environments, such as the sea water or compost. She is the author of several dozen publications on topics related to the environmental degradability of polymers and the influence of various factors on the susceptibility of polymers to this degradation process. Her current research focuses on examining microplastics found in surface water and bottom sediments of the Baltic Sea.

Langowski Bartosz, Specialist in anti-drone systems and unmanned aerial vehicles in Security and Monitoring Department, Port of Gdynia Authority SA. Graduate of the University of Gdańsk (Faculty of Social Sciences – Political Sciences, Faculty of Economics – European Integration. European Union Aid). He holds an Aviation Personnel Qualification Certificate entitling him to perform BVLOS flights with unmanned aerial vehicles with a MTOM of 25 kg. He works in the Security and Monitoring Department of the PGA S.A. as a Specialist for anti-drone and UAV systems. In his work, he handles UAV flights at the Port of Gdynia, manages UAV traffic within the port area and maintains contacts with entities competent in the field of port and airspace security. As head of the task force, he leads drone projects in key infrastructure areas. He has participated in conferences and meetings many times as an expert in securing key infrastructure against threats from drones.

Lednicka Barbara, Research and teaching employee of the Department of Physics, Faculty of Mechanical Engineering of Gdynia Maritime University. She has twenty years of experience in conducting research work in the regions of Baltic Sea, North Sea, Barents Sea and Arctic Sea. She has participated in several international research projects, during which she measured and analysed the physical and chemical properties of seawater. In addition, she is a Research and Development Project Manager and deals with risk management in the offshore extraction and wind energy industries.

Nowosielski Tomasz, Assistant Professor, employed at the Faculty of Economics, University of Gdańsk, research and teaching employee of the Department of Transport and Maritime Trade, academic teacher with many years of experience, author and co-author of over 100 publications. His professional interests include maritime transport, land-sea transport systems, maritime trade and protection of the marine environment.

Pac Bohdan, Research and teaching employee at the Faculty of the Informatics and New Technologies of WSB Merito at University in Gdansk. PhD Bohdan Pac graduated the Polish Naval Academy in Gdynia and the Gdańsk University of Technology. He completed his education at the Centre d’Instruction Naval/ GEM of Toulon. He attended the military courses conducted by Marine Nationale, NATO and EU. As the chief engineer he has experience at the naval tactical level. He worked as a lecturer at the Polish Naval Academy and as the Assistant Professor in the WSB University in Torun. He served as the staff officer in the Joint Force Command Brunssum (NATO)/ Logistics Division/ M&T Branch. He participated in the ISAF Mission as the member of HQ/ CJ4 Division in 2004. He worked as the Senior Ops Officer in J3 Divi-

sion of the Polish General Staff. He currently works as an Assistant Professor at the Faculty of the Informatics and New Technologies of WSB Merito University in Gdansk. He worked on several projects granted by the Military Centre for Standardization, Quality and Codification, the Polish General Staff and the National Defense University. He is an author of 80 publications concerning the military and civil logistics and information operations.

Pazikowska-Sapota Grażyna, Researcher at the Department of Environment Protection of the Maritime Institute of Gdynia Maritime University. She has many years of experience in studying physical and chemical environmental pollution and managing geochemical and hydrochemical studies in many research works and projects. She is the author of many publications, scientific and research papers, expert reports and studies and implementation works in the field of environmental protection. Long-time Head of the Laboratory of the Department of Environment Protection, Head of the Department of Environment Protection of the IM UMG. Member of the POLLAB Polish Laboratories Club.

Policht Justyna, Public Procurement Specialist, Port of Gdynia Authority SA. She graduated from the Faculty of Law at Maria Curie-Skłodowska University in Lublin and has several years of experience in public procurement gained in various sectors, including: medical, gas, maritime and local government. She is passionate about nature and loves to travel, thanks to which she discovers new challenges. Currently, Contract and Procurement Specialist at the Port of Gdynia Authority S.A., where she is responsible for public procurement. She participates in a number of new projects contributing to the continued expansion of the Port of Gdynia, including being part of the team implementing the project: Monitoring and observation system for port areas using floating unmanned mobile survey platforms.

Popek Marzenna, Professor of technical science. She obtained a PhD from the Poznan University of Economics and Business in the field of maritime transport of solid bulk cargo, classified as dangerous goods in 1999. Her scientific interests focused on research areas concerning the analysis of risks related to the transport of dangerous goods. Since 2000, she has been working in the IMO IMSBC Code Working Group, which aims to introduce regulations that improve or completely change safety standards in maritime transportation. She received her habilitation in 2013. Currently, her research focuses on shaping the quality of dangerous goods based on the set goals of improving marine transportation safety and environmental protection. She is the author of several dozen of publications on topics related to maritime transportation and marine environmental protection.

Salomon Anna, Project Manager in Research and Technology Development Department, Port of Gdynia Authority SA. She obtained MSc at the Faculty of Economics at the University of Gdansk in 2012. After graduation, her professional career is closely related to management in the transport sector and maritime industry. She has completed numerous specialized courses and is constantly developing her competencies in the area of project management. She is a qualified Agile PM, Prince2 PM and ITIL PM, with

extensive experience in advanced management processes implemented based on project management platforms. Actively involved in enhancing the role of women in ongoing projects and business. Certified project manager with many years of experience in leading international R&D projects and member of numerous project teams in the area of new technologies. Co-author of several popular science publications.

Stateczny Andrzej, Professor of technical science. President of Marine Technology Ltd. Current research activities include navigation, hydrography, geoinformatics, artificial intelligence methods, multisensory data fusion and autonomous navigation. He was the Principal Investigator on a wide range of research projects. He has published over 200 papers in the above areas, including several books such as: “Radar Navigation”, “Comparative Navigation”, “Methods of Comparative Navigation” and “Artificial Neural Networks for Marine Target Recognition”. He founded a research school where 16 young scientists completed their PhDs, implementing artificial intelligence methods in navigation, hydrography and geoinformatics. He is in the prestigious group of 2% of the best scientists in the world in terms of citation of publications by other authors published by Stanford University.

Szymanowska Beata, Head of Department of Research and Technological Development, Port of Gdynia Authority SA. Experienced manager, graduate of the University of Gdansk and PhD student at the Faculty of Economics of the University of Gdansk. She received PhD at the University of Gdansk. Her interests focus on innovation as a factor increasing the competitiveness of business entities. She is a consultant in the implementation of new technological and non-technological solutions in business entities, with a special focus on the port services market. Her interests include the development of new technologies in logistic supply chains, especially in seaports. She has been associated with the maritime industry and Port of Gdynia Authority SA for more than twenty years.

Tenningen Eirik, Engineering Manager, research staff member at MIROS AS. Engineering and project manager, MSc graduate from the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Information Technology and Electrical Engineering (IE). He is experienced in engineering and delivering advanced radar-based monitoring systems for measuring the ocean surface including waves, currents and oils spill detection systems. He has worked at MIROS AS for 11 years in the Operations department.

Photos of the Team that worked on the project



Project Partners during work using USVs in the Port of Gdynia, May 2023
Source: Port of Gdynia Authority S.A.



Project partners at consortium meeting, Oslo 2022
Source: Port of Gdynia Authority S.A.



"Marine port surveillance and observation system using mobile unmanned research units"

is a project implemented in the Port of Gdynia.

The project, implemented under the POLNOR 2019 Call program, announced by the National Research and Development Center, has received funding in the amount of: PLN 5,454,456.03 with 85% of the funds coming from the Norwegian Financial Mechanism and 15% from the Polish state budget.

Automatyzacja i robotyzacja są naturalnym trendem rozwojowym w przemyśle i obejmują w dzisiejszych czasach coraz większą część działalności człowieka. W zakresie szeroko pojętego monitoringu różnego rodzaju obszarów, przejawem tego jest w szczególności stosowanie pojazdów bezzałogowych pozwalających na pomiary i obserwacje bezpośrednie, a także wykorzystanie metod i technik teledetekcyjnych. Autorzy monografii proponują i opisują innowacyjny pomysł wykorzystania bezzałogowego pojazdu pływającego do monitoringu akwenu portowego. Zadania wyznaczone jednostce bezzałogowej obejmują zarówno pomiary hydroakustyczne, jak i pobieranie próbek wody oraz dna. Jest to podejście unikatowe w skali kraju oraz innowacyjne w skali międzynarodowej. Zakres badań został dodatkowo poszerzony o analizę metod integracji danych z pomiarów satelitarnych oraz modelowania hydrodynamicznego akwatorium na podstawie pomiarów z systemu czujników hydrometeorologicznych. Praca prezentuje podejście interdyscyplinarne, zaś poziom merytoryczny monografii jest wysoki. Każdy z rozdziałów opisuje różne wyzwania badawcze, składając się na całość przedstawianego zagadnienia. Jednocześnie praca jest napisana w sposób interesujący i może być ciekawa również dla czytelnika nieakademickiego, oczekującego bardziej popularno-naukowego podejścia.

prof. Witold Kazimiński
Politechnika Morska w Szczecinie

Automatyzacja i robotyzacja są dynamicznymi i ciągle ewolucyjnymi obszarami przemysłu morskiego, które w coraz większym stopniu są wykorzystywane w zakresie badania i monitoringu różnych parametrów jakości wód wewnątrzportowych przy wykorzystaniu bezzałogowych pojazdów nawodnych i podwodnych. Pojazdy te w dalszej perspektywie mogą być wykorzystane do badania stanu mórz i oceanów, jak również przyczynić się do monitoringu eksperymentalnego wydobycia złóż i minerałów z dna oceanów. Wszystkie te rozwiązania innowacyjne w zakresie automatyzacji i robotyzacji niosą za sobą liczne problemy natury technicznej i prawnej, co wykazano w monografii.

W opracowaniu nie tylko wskazano na problemy występujące w badaniach różnych parametrów istotnych dla utrzymania wód portowych w należyłym stanie jakościowym, ale również opisano szczegółowo jak te problemy można rozwiązać, na przykładzie Portu Morskiego w Gdyni.

Opracowanie skierowane jest do szerokiego grona osób, które zajmują się problematyką wykorzystania bezzałogowych platform nawodnych oraz do osób, którym czystość wód portowych, a tym samym nadmorskich, nie jest obojętna.

dr Robert Marek
Uniwersytet Morski w Gdyni

ISBN 978-83-87193-14-0

