



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr Maria Justyna Kubacka

Wpływ warunków środowiska morskiego na ryzyko prowadzenia badań w projektach offshore w rejonie południowego Bałtyku

dziedzina nauk: Nauki ścisłe i przyrodnicze
dyscyplina naukowa: Nauki o Ziemi i środowisku

Promotor:
prof. dr hab. Adam Krężel

Promotor pomocniczy:
dr Jarosław Nowak

Gdynia 2025

Wpływ warunków środowiska morskiego na ryzyko prowadzenia badań w projektach offshore w rejonie południowego Bałtyku

Streszczenie

Warunki środowiskowe są kluczowym i zarazem najbardziej nieprzewidywalnym czynnikiem decydującym o powodzeniu projektów offshore. Ze względu na ich zmienność oraz ograniczoną możliwość dokładnego prognozowania, stworzenie realistycznego harmonogramu prac na morzu stanowi istotne wyzwanie. Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu warunków hydrometeorologicznych na realizację badań w projektach offshore w południowej części Bałtyku oraz opracowanie metody zarządzania ryzykiem pogodowym.

Badania obejmowały trzy główne etapy: (1) identyfikację kluczowych ryzyk pogodowych wpływających na harmonogram i bezpieczeństwo operacji morskich, (2) analizę ich wpływu na prowadzenie badań offshore w kontekście zmienności warunków hydrometeorologicznych oraz (3) opracowanie metody szacowania dostępnego czasu pracy na morzu, uwzględniającej lokalizację, termin realizacji projektu oraz dzielność jednostek pomiarowych. Analiza opierała się na danych projektowych oraz wynikach ankiety przeprowadzonej wśród specjalistów offshore, co pozwoliło na doprecyzowanie zależności między warunkami pogodowymi a realizacją działań badawczych. Ponadto przeprowadzono szczegółowe analizy danych numerycznych uwzględniających parametry hydrometeorologiczne, takie jak wysokość fali znacznej oraz długość dostępnych okien pogodowych.

W toku analiz zidentyfikowano pięć ryzyk związanych z pogodą. Badania wykazały, że kluczowym czynnikiem wpływającym na ryzyko operacyjne są okresy sztormowe, które znacząco ograniczają czas dostępny na realizację działań. W pracy podkreślono również znaczenie zastosowania rezerw czasowych oraz uwzględnienia specyficznych warunków lokalnych w planowaniu harmonogramów. Wyniki analiz przedstawiono w czterech artykułach naukowych i jednym rozdziale w monografii, które dostarczają kompleksowego spojrzenia na problematykę zarządzania ryzykiem pogodowym w środowisku morskim.

Przeprowadzone badania mają istotne znaczenie praktyczne, oferując narzędzia i rekomendacje wspierające podejmowanie decyzji w projektach offshore. Rozprawa stanowi wkład w rozwój wiedzy z zakresu zarządzania ryzykiem w warunkach morskich, a jej wyniki mogą być wykorzystane w przyszłych inwestycjach w rejonie południowego Bałtyku i w innych akwenach o zbliżonych warunkach.

Słowa kluczowe: ryzyko pogodowe, projekty offshore, wysokość fali znacznej, oceanografia fizyczna, południowy Bałtyk.

The Impact of Marine Environmental Conditions on the Risk to Conducting Research in Offshore Projects in the Southern Baltic Sea Region

Abstract

Environmental conditions are a key and, simultaneously, the most unpredictable factor determining the success of offshore projects. Due to their variability and the limited ability to make accurate forecasts, creating a realistic work schedule for offshore projects presents a significant challenge. This doctoral thesis aims to assess the impact of hydrometeorological conditions on the implementation of survey in offshore projects in the southern Baltic Sea and to develop a method for managing weather-related risks.

The research included three main stages: (1) identification of key weather risks affecting the schedule and safety of marine operations, (2) analysis of their impact on offshore research in the context of hydrometeorological variability, and (3) development of a method for estimating the available working time at sea, considering location, project timeline, and the operational capabilities of survey vessels. The analysis was based on project data and the results of a survey conducted among offshore specialists, which helped to clarify the relationship between weather conditions and the execution of research activities. Additionally, detailed analyses of numerical data were performed, taking account of hydrometeorological parameters such as significant wave height and the duration of available weather windows.

The analysis identified five weather risks. The research showed that storm periods are a key factor affecting operational risk, significantly reducing the available time for conducting activities. The thesis also emphasises the importance of applying time reserves and considering local conditions when planning schedules. The analysis results are presented in four scientific papers and one monograph chapter, providing a comprehensive view of weather risk management in the marine environment.

The research conducted has significant practical implications, offering tools and recommendations to support decision-making in offshore projects. The thesis contributes to the development of knowledge in risk management in marine conditions, and its findings can be applied in future investments in the southern Baltic Sea region and other areas with similar environmental conditions.

Keywords: weather risk, offshore projects, significant wave height, physical oceanography, southern Baltic Sea.

Spis treści

CZEŚĆ I	5
Wstęp.....	5
Cel badań	9
Zarys pracy	10
Problem badawczy.....	11
Hipotezy badawcze.....	12
Realizowane zadania.....	13
Wykorzystane metody badawcze.....	15
Uzyskane wyniki	20
Podsumowanie i wnioski.....	26
Wykaz literatury.....	28
CZEŚĆ II	31
Publikacja nr 1	31
Publikacja nr 2	45
Publikacja nr 3	69
Publikacja nr 4	84
Publikacja nr 5	115
Załącznik	144
Publikacja nr 1	145
Publikacja nr 2	150
Publikacja nr 3	156
Publikacja nr 4	160
Publikacja nr 5	164

CZEŚĆ I

Wstęp

Badania i pomiary morskie odgrywają kluczową rolę na etapach planowania, rozwoju oraz eksploatacji projektów offshore. Działania te dostarczają niezbędnych danych, które wspierają bezpieczeństwo, wykonalność i zrównoważony rozwój środowiskowy morskich farm wiatrowych (MFW), platform naftowych i gazowych czy instalacji podmorskich, np. kabli i rurociągów. Ten proces obejmuje szereg działań, takich jak badania geofizyczne, geotechniczne, środowiskowe, dostarczając informacji, które wspierają projektowanie, analizę oddziaływania na środowisko, wybór lokalizacji oraz strategie zarządzania ryzykiem. Badania geofizyczne są niezbędne w dostarczaniu szczegółowych informacji o dnie morskim, obejmując batymetrię, rodzaj powierzchni dna morskiego, typ podłoża, a także obecność odsłoniętego podłoża skalnego (jeśli występuje). Celem tych badań jest również identyfikacja potencjalnych przeszkód, które mogłyby wpłynąć na bezpieczeństwo inwestycji offshore: istniejących rurociągów, kabli, wraków, niewybuchów i niewypałów (UXO, ang. *Unexploded Ordnance*). Szczególnie ważna jest lokalizacja aktywnych lub porzuconych kabli energetycznych i komunikacyjnych. Standardowo badania geofizyczne obejmują badania batymetryczne, sejsmiczne, magnetometryczne i sonarowe i są realizowane w ramach większych kampanii badań środowiskowych. Podstawowe urządzenia do badań geofizycznych to przede wszystkim: sonar boczny (ang. *Side Scan Sonar*), echosonda wielowiązkowa (ang. *Multibeam Echosounder*), magnetometr i profilomierz osadów (ang. *Subbottom Profiler*), a zbierane nimi dane służą do mapowania dna morskiego i podłoża, co ułatwia np. identyfikację odpowiednich fundamentów dla struktur offshore. Badania geotechniczne skupiają się na analizie właściwości mechanicznych i fizycznych podłoża morskiego. Obejmują m.in. wiercenia geotechniczne, pobieranie próbek gruntu i testy wytrzymałościowe, które pozwalają ocenić stabilność gruntu oraz jego nośność. Wyniki tych badań są kluczowe dla projektowania i bezpiecznego zakotwiczenia konstrukcji offshore, takich jak turbiny wiatrowe, platformy wiertnicze czy rurociągi. Wykorzystywane urządzenia to m.in. wiertnice geotechniczne, sondy stożkowe (CPT, ang. *Cone Penetration Test*) i testery wytrzymałości na ścinanie. Z kolei badania środowiskowe obejmują ocenę bioróżnorodności, monitorowanie siedlisk morskich oraz analizę wpływu działalności człowieka na ekosystemy. Standardowe metody obejmują pobieranie próbek zoobentosu, planktonu i osadów dennych czy pomiary parametrów fizykochemicznych wody. Celem tych

badan jest zapewnienie zgodności z przepisami ochrony środowiska, identyfikacja obszarów wrażliwych ekologicznie oraz minimalizacja wpływu planowanych działań na morskie ekosystemy. Urządzenia wykorzystywane w takich badaniach to np. czerpaki van Veena, dragownice, sondy oceanograficzne. Wszystkie te rodzaje badań są kluczowymi elementami zintegrowanych kampanii badawczych, dostarczając kompleksowych danych niezbędnych do efektywnego projektowania, budowy i zarządzania infrastrukturą morską.

Wraz z rozwojem morskich źródeł energii odnawialnej, szczególnie w regionach takich jak Morze Bałtyckie, rośnie zapotrzebowanie na precyzyjne i terminowe badania morskie. Jak wskazano w Polityce Energetycznej Polski do 2040 roku (PEP2040¹), dostępnej na stronie Serwisu Rzeczypospolitej Polskiej (www.gov.pl), przewiduje się, że zainstalowana moc w morskiej energetyce wiatrowej osiągnie 5,9 GW do 2030 roku, z dalszym wzrostem do 11 GW do 2040 roku. Zgodnie z tym dokumentem morskie farmy wiatrowe (MFW) mają dostarczyć 13% całkowitej produkcji energii elektrycznej w 2030 roku, a do 2040 roku ten udział ma wzrosnąć do 19%. Obecnie w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej (WSE) realizowanych jest dziewięć projektów MFW, z których wszystkie posiadają pozwolenia lokalizacyjne. Oprócz MFW w polskiej WSE realizowane są także inwestycje obejmujące układanie kabli, budowę infrastruktury portowej, wydobywanie węglowodorów oraz budowę infrastruktury przybrzeżnej. Wszystkie te przedsięwzięcia wymagają działań człowieka na morzu, wspieranych przez różne jednostki pływające. W większości przypadków kluczowe znaczenie mają: odpowiednia przestrzeń na pokładzie, wyposażenie w system dynamicznego pozycjonowania (DP, ang. *Dynamic Positioning*) oraz warunki zakwaterowania, co sprawia, że liczba takich statków zdolnych do wspierania projektów offshore jest ograniczona. Oprócz dostępności floty, na koszty i terminowość badań morskich wpływają też takie czynniki, jak złożoność (Poulsen i Lema 2017; Kubacka i in. 2021; Douard i in. 2012) oraz różnorodność badań środowiska morskiego (Lednicka i in. 2022; Pydyn i in. 2021; Janowski i in. 2021), zmienność obszarów badań, ich odległość od portu (Leimeister i Kolios 2018; Walker 2013) oraz wrażliwość statków i sprzętu pomiarowego na trudne warunki morskie (Kubacka i in. 2022).

Analizując publikacje dotyczące realizacji projektów morskich (Gilbert i in., 2021; Astariz i in. 2015; Rowell 2022; Kubacka i in. 2022; Kubacka i in. 2021), można wyciągnąć następujący wniosek: warunki pogodowe stanowią kluczowy czynnik wpływający na sukces lub porażkę jakiejkolwiek działalności na morzu. Ze względu na to, że prognozy pogody są

¹ Monitor Polski, Warszawa, dnia 10 marca 2021, Poz. 264

dokładne jedynie na kilka dni do przodu, niemożliwe jest sporządzenie realistycznego harmonogramu prac dla długoterminowych projektów morskich. Niekorzystne warunki pogodowe wpływają na kołysanie statku oraz urządzeń pomiarowych, co prowadzi do różnych błędów w pomiarach. Fale morskie mogą nie tylko utrudniać prowadzenie prac, ale również negatywnie wpływać na jakość zbieranych danych. W przypadku silnych wiatrów warunki sztormowe nie tylko uniemożliwiają przeprowadzanie pomiarów, ale także stają się niebezpieczne dla załogi statku. Nie bez znaczenia jest również wzrost poziomu szumów akustycznych w wodzie, wpływających na jakość pomiarów geofizycznych. W związku z powyższym ważne jest odpowiednie zarządzanie ryzykiem pogodowym.

Ryzyko definiowane jest jako zdarzenie lub warunek, którego wystąpienie jest niepewne i które może zarówno pozytywnie, jak i negatywnie wpłynąć na realizację celów projektu (PMBOK® Guide). Zgodnie z definicją Campbella i Diebolda (2005) ryzyko pogodowe to „nieprzewidywalny element wahań pogody”, który przejawia się w formie „niespodzianek pogodowych”. Ryzyko to wynika z dynamicznej zmienności warunków atmosferycznych, które mogą się znacznie różnić w danym miejscu w kolejnych okresach. Zmienność tę określa się jako odchylenie mierzonych parametrów pogodowych od ich długoterminowych średnich wartości (Czekaj 2016). Choć zjawiska atmosferyczne są trudne do prognozowania ze względu na swoją naturę, nie oznacza to, że przewidywanie ich jest zupełnie niemożliwe. W rzeczywistości dokładność prognoz zależy od zastosowanych metod oraz jakości danych historycznych, co umożliwia przewidywanie pewnych trendów i skrajnych warunków z określonym poziomem pewności. Jak każde ryzyko, także ryzyko pogodowe wymaga właściwego zarządzania. Proces zarządzania ryzykiem koncentruje się na identyfikacji i eliminacji zagrożeń, które mogą negatywnie wpłynąć na realizację inwestycji. Proces ten zazwyczaj obejmuje kilka etapów (Shafiee, 2015): identyfikacja, ocena, analiza, kontrola i monitorowanie oraz mitygacja. Niemniej jednak uproszczona metoda zarządzania ryzykiem (Williams i in., 2017) wskazuje na trzy główne etapy:

- 1) Identyfikacja: określenie kategorii zagrożeń, głównych konsekwencji, kwestii związanych z konsekwencjami oraz możliwych przyczyn.
- 2) Analiza: ocenienie konsekwencji i prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka oraz przypisanie mu odpowiedniego poziomu.
- 3) Mitygacja: wybór typu i środków zapobiegawczych/łagodzących, ocena skutków i prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka oraz ustalenie zaktualizowanego poziomu ryzyka po wdrożeniu środków ochronnych.

Metoda ta powinna być wdrożona w odniesieniu do ryzyka pogodowego występującego podczas prowadzenia badań morskich.

Cel badań

Warunki środowiskowe są kluczowym i zarazem najbardziej nieprzewidywalnym czynnikiem decydującym o powodzeniu wszelkich projektów offshore. Warunków pogodowych nie można przewidzieć wystarczająco dokładnie, dlatego stworzenie realnego harmonogramu prac dla projektów związanych z prowadzeniem badań na morzu to ogromne wyzwanie. Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu warunków hydrometeorologicznych na realizację badań w projektach offshore w południowej części Bałtyku, a także stworzenie metody zarządzania ryzykiem pogodowym. Badania obejmowały trzy główne etapy: 1) identyfikację kluczowych ryzyk pogodowych, 2) analizę ich wpływu na prowadzenie badań w obszarach morskich oraz 3) opracowanie planu działań mitygujących ryzyka, polegającego na opracowaniu metody szacowania czasu potrzebnego na wykonanie kampanii pomiarowej, uwzględniając lokalizację, termin realizacji projektu oraz wielkość (dzielność) jednostek pomiarowych.

Zarys pracy

Niniejsza dysertacja stanowi spójną całość dotyczącą zarządzania ryzykiem pogodowym w badaniach offshore prowadzonych w rejonie południowego Bałtyku. Analiza koncentruje się na wpływie warunków środowiska morskiego na ryzyko operacyjne oraz na metodach minimalizacji opóźnień i zagrożeń związanych z niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi. Innym analizowanym problemem jest identyfikacja ryzyk związanych z prowadzeniem projektów morskich, przy wykorzystaniu dokumentacji projektowej oraz danych zebranych w ramach przeprowadzonych ankiet. Kluczowe aspekty badawcze obejmują również analizę danych z modeli numerycznych, uwzględniających warunki atmosferyczne i oceanograficzne charakterystyczne dla tego obszaru. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu warunków środowiskowych na harmonogramy prac offshore oraz na opracowanie rekomendacji w zakresie minimalizacji ryzyk operacyjnych. Wyniki przeprowadzonych badań zostały przedstawione w pięciu publikacjach naukowych:

1. Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the Polish exclusive economic zone (Kubacka i in. 2021);
2. Many faces of survey equipment failures during marine research at sea – risk analysis (Kubacka i in. 2022);
3. Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys (Kubacka i in. 2024a);
4. Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego (Kubacka i in. 2024b);
5. Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone (Kubacka i in. 2025).

Problem badawczy

Problem badawczy w pracy dotyczy analizy wpływu warunków środowiskowych na ryzyko związane z prowadzeniem badań w projektach offshore w południowej części Morza Bałtyckiego. Projekty offshore są narażone na nieprzewidywalne zmiany warunków pogodowych, które mogą wpływać zarówno na harmonogram prac, jak i bezpieczeństwo badaczy, załogi statku, sprzęt oraz skuteczność i jakość pomiarów.

W związku z tym głównym problemem jest opracowanie skutecznej metodologii oceny ryzyka pogodowego, uwzględniającej czynniki hydrometeorologiczne, które mogą mieć wpływ na powodzenie kampanii pomiarowo-badawczych. Przedstawione badania mają na celu nie tylko lepsze zrozumienie zmienności warunków środowiskowych w regionie południowego Bałtyku, ale również opracowanie strategii zarządzania ryzykiem pogodowym, co obejmuje analizę okien pogodowych oraz prognozowanie dostępności operacyjnej. Ostatecznie praca ta ma za zadanie stworzyć ramy teoretyczne i praktyczne, które pomogą w minimalizowaniu ryzyka i optymalizacji działań człowieka na morzu.

Hipotezy badawcze

Sformułowano następujące hipotezy badawcze:

- 1) Warunki hydrologiczno-meteorologiczne akwenów morskich mają istotne znaczenie przy planowaniu pracy na morzu i realizacji kampanii pomiarowo-badawczych.
- 2) Analiza statystyczna danych hydrologiczno-meteorologicznych pozwala lepiej zarządzać ryzykiem pogodowym przy planowaniu i realizacji prac na morzu, w tym prowadzeniu kampanii pomiarowo-badawczych.
- 3) Sezonowe zmiany w warunkach pogodowych w rejonie południowego Bałtyku mają znaczący wpływ na dostępność czasu operacyjnego, umożliwiającą realizację prac pomiarowo-badawczych, z większą dostępnością w okresie letnim w porównaniu do zimowego.
- 4) Identyfikacja i analiza ryzyka związanego z pogodą jest możliwa na podstawie: a) analizy danych hydrometeorologicznych, b) analizy dokumentacji projektowej, c) badania ankietowego przeprowadzonego wśród osób zaangażowanych w realizację badań środowiska morskiego.

Realizowane zadania

1) Przegląd literatury (publikacje nr 1, 2, 3, 4, 5)

Przegląd literatury obejmował analizę badań z zakresu identyfikacji i oceny ryzyka pogodowego w projektach offshore, w tym rozpoznanie metod wykorzystywanych do oceny zmienności i wpływu warunków pogodowych na realizację projektów morskich. Badania skupiały się w szczególności na wykorzystaniu historycznych danych pogodowych oraz metod prognostycznych w kontekście warunków panujących na południowym Bałtyku i w innych regionach Europy. Skupiono się również na metodach zarządzania ryzykiem (w tym mitygacji i metodach statystycznych) stanowiących podstawę do opracowania rekomendacji dla optymalizacji harmonogramów projektów offshore.

2) Identyfikacja ryzyka związanego z pogodą (publikacje nr 1 i 2):

a) analiza dokumentacji projektowej (publikacje nr 1 i 2)

Przegląd Raportów dziennych (DPR, ang. *Daily Progress Report*) i Kart Obserwacji (ang. *Observation Cards*) oraz raportów końcowych umożliwiających identyfikację ryzyk związanych z niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi.

b) metoda delficka (publikacja nr 1)

Gromadzenie opinii ekspertów w celu wyłonienia najważniejszych czynników pogodowych wpływających na realizację projektów.

c) ankieta (publikacja nr 2)

Przeprowadzenie wywiadów z osobami zaangażowanymi w morskie badania środowiskowe w celu poznania ich doświadczeń i spostrzeżeń dotyczących warunków pracy oraz zagrożeń wynikających z nieprzewidywalności pogody, w tym wpływu niekorzystnych warunków atmosferycznych na statki i sprzęt pomiarowy.

3) Analiza zidentyfikowanych ryzyk (publikacje nr 1 i 2)

Opracowanie oceny ryzyk pogodowych poprzez analizę częstotliwości występowania, skali i wpływu niekorzystnych warunków pogodowych na projekt offshore.

4) Opracowanie planu działań mitygujących dla zidentyfikowanych ryzyk (publikacje nr 1, 2, 3, 4, 5):

- a) analiza statystyczna danych hydrologiczno-meteorologicznych z modeli pogodowych w celu oceny prawdopodobieństwa wystąpienia niekorzystnych warunków atmosferycznych (np. sztormy) i przewidywania „okien pogodowych” umożliwiających bezpieczną pracę (publikacje nr 1, 3, 4, 5)
- b) analiza szeregów czasowych dotyczących danych hydrologiczno-meteorologicznych z modelu ERA5 umożliwiającą identyfikację trendów pogodowych oraz potencjalnych okien pogodowych (ang. *weather windows*) (publikacja nr 5).

5) Opracowanie wniosków (publikacje nr 1, 2, 3, 4, 5)

Na podstawie analizy zgromadzonych danych i wyników badań opracowanie wniosków dotyczących zarządzania ryzykiem pogodowym w kontekście projektów offshore w południowym Bałtyku, a także rekomendacji w zakresie planowania oraz organizacji harmonogramów prac badawczych z uwzględnieniem zmiennych warunków środowiskowych.

Wykorzystane metody badawcze

1) Analiza dokumentacji projektów offshore realizowanych w Instytucie Morskim oraz metoda delficka

Aby zidentyfikować ryzyka związane z pogodą, wykonano analizę dokumentacji projektów realizowanych w Instytucie Morskim:

- badania środowiskowe przeprowadzone w celu uzyskania pozwolenia na budowę elektrowni jądrowej w dwóch lokalizacjach: Lubiatowo-Kopalino i Żarnowiec w Polsce;
- badania przedinwestycyjne dla MFW: Baltic Power, Baltica-2, Baltica-3;
- badania przedinwestycyjne dla gazociągu Baltic Pipe.

W badaniu skupiono się na dwóch kategoriach dokumentów przesyłanych ze statków badawczych:

- Raporty dzienne (DPR) – Codzienne sprawozdania wypełniane przez kierownika grupy pomiarowej i przesyłane kierownikowi projektu w celu bieżącej kontroli realizacji i postępu prac obejmujące m.in. aktualną pozycję statku, krótkie opisy prowadzonych działań oraz plan prac na kolejne 48 godzin. Szczególną uwagę zwracano na liczbę i czas przestojów statku spowodowanych złymi warunkami pogodowymi, a także związanymi z tym awariami sprzętu badawczego.
- Karty obserwacji (*Observation Card*) – Karty te są ważnym elementem ciągłej analizy i monitorowania bieżących działań realizowanych w ramach projektów. Dokument został stworzony jako część polityki Zintegrowanego Systemu Zarządzania i zgodności z normami ISO 9001, 14001, 45001 (Lloyd's Register), aby umożliwić obserwację i ocenę zachowań i działań zespołu badawczego na statku. Karty te są dostępne dla wszystkich zaangażowanych w realizację projektu, w tym załogi statku i zespołu badawczego. Dzięki nim można zgłaszać wszystkie nieprawidłowości, wraz z informacjami takimi jak: miejsce wystąpienia, powiązanie zdarzenia z pracownikami lub kontrahentami, pełen opis zdarzenia oraz jego przyczyny, a także proponowane rozwiązanie.

Analiza dokumentów pozwoliła określić częstotliwość występowania danego zdarzenia oraz określić jego konsekwencje dla projektu, w tym opóźnienia w harmonogramie (czas trwania zdarzenia).

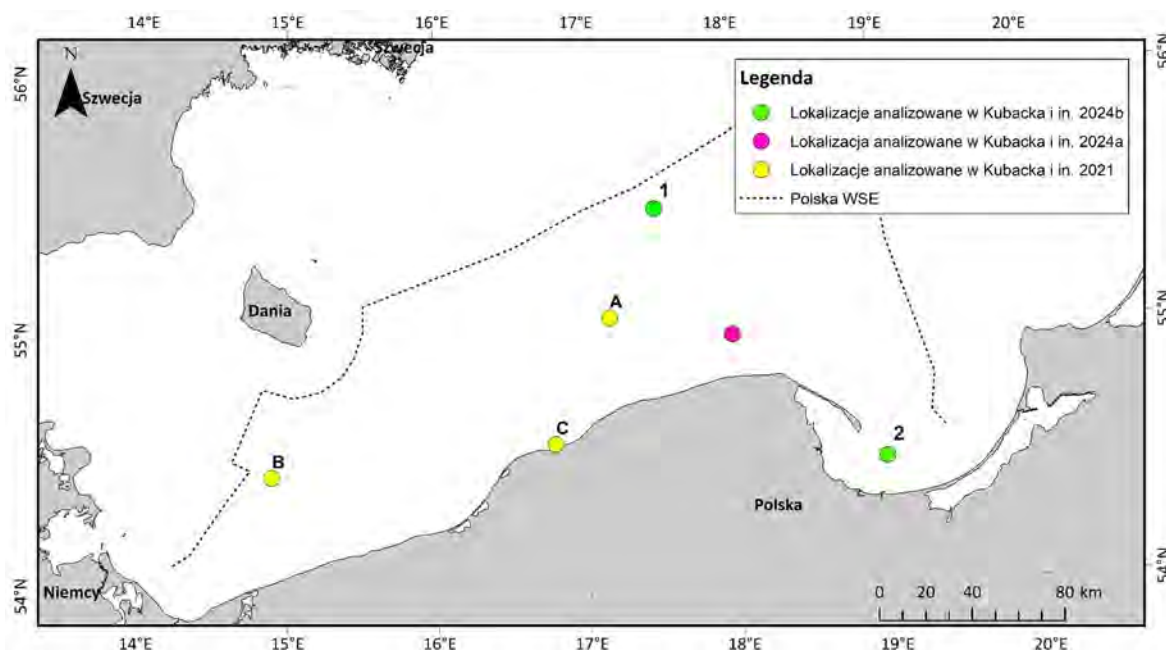
Kolejną metodą zastosowaną do identyfikacji i oceny ryzyka była metoda delficka: przeprowadzono rozmowy z 18 osobami bezpośrednio zaangażowanymi w realizację projektów offshore. Wśród rozmówców byli zarówno pracownicy biurowi (kierownicy projektów – 4; członkowie zespołu projektowego – 6), jak i osoby pracujące na morzu (pomiarowcy – 8). Pytania dotyczyły wszystkich zagadnień pogodowych mogących wpływać na realizację projektów offshore. Porównano odpowiedzi z wynikami przeglądu dokumentacji, stworzono listę ryzyk, a następnie poproszono uczestników o ocenę prawdopodobieństwa i skutków tych zdarzeń oraz propozycje działań ograniczających ryzyko.

2) Ankieta przeprowadzona wśród osób biorących udział w realizacji badań środowiska morskigo

Do zebrania informacji o najczęstszych przyczynach przerw w prowadzeniu pomiarów morskich stworzono szczegółowy kwestionariusz online, dostępny w wersji dwujęzycznej (angielskiej oraz polskiej). Kwestionariusz był anonimowy i nie wymagał zgody IRB (Institutional Review Board) ani komisji etycznej, ponieważ uczestnicy pozostali anonimowi, a dane kontaktowe nie były zbierane. Kwestionariusz składał się z pytań otwartych i zamkniętych, w tym rankingów i pytań wielokrotnego wyboru. Część pytań dotyczyła oceny najczęstszych przyczyn awarii sprzętu pomiarowego i oceny, jaki wpływ ma na nie czynnik ludzki, siły natury (w tym pogoda) i czynnik techniczny. Prośba o wypełnienie kwestionariusza została skierowana do pomiarowców, badaczy morskich, członków załóg oraz innych osób zaangażowanych w badania morskie. Dystrybuowano go międzynarodowo drogą mailową w marcu i kwietniu 2021 roku wśród zainteresowanych stron: badaczy, naukowców, analityków i członków załóg badawczych, takich jak załoga statku badawczego IMOR, pracowników Instytutu Morskiego oraz innych instytucji badawczych i firm prywatnych, np. MEWO S.A., Międzynarodowe Stowarzyszenie Operatorów Statków Badawczych (IRSO), Polski Rejestr Statków (PRS) oraz European Research Vessel Operators Association (ERVO), obejmujące członków z Belgii, Danii, Finlandii, Niemiec, Francji, Włoch i Hiszpanii. Niektóre strony poproszono o rozpowszechnienie linku do kwestionariusza, aby uzyskać jak największą liczbę wyników. W sumie skontaktowano się z 200 osobami, z czego 76 odpowiedziało na ankietę, co stanowi reprezentatywną próbę. Pierwszą odpowiedź otrzymano 31 marca 2021 roku, a ostatnią 21 kwietnia 2021 roku.

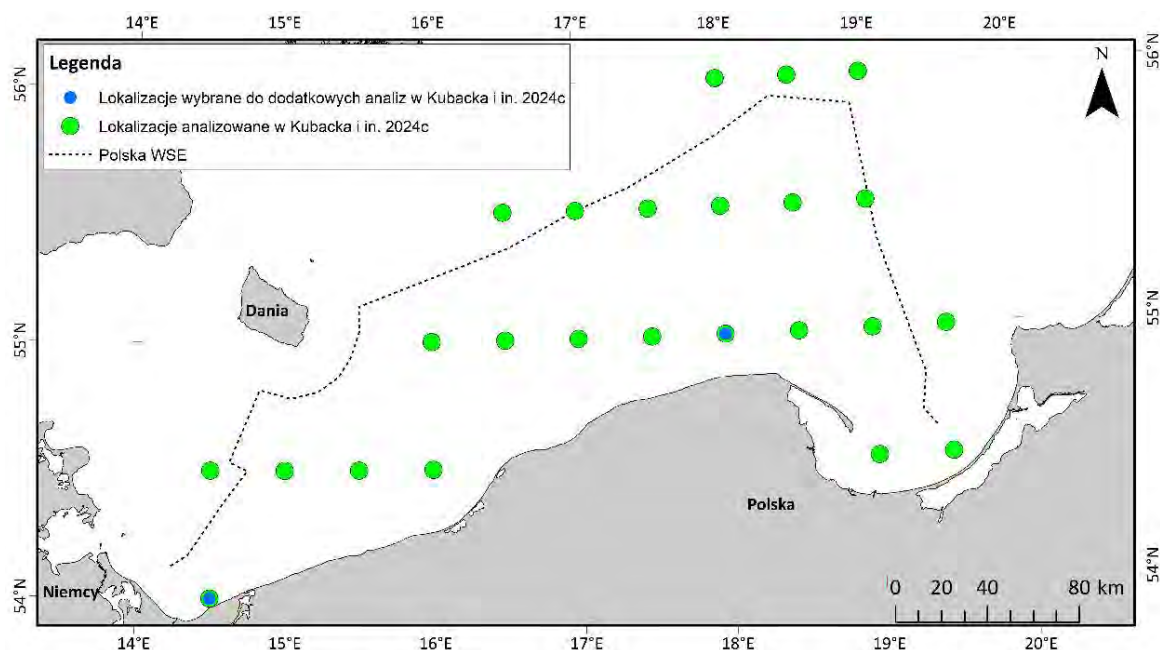
3) Analiza danych hydrologicznych i meteorologicznych

Aby oszacować dostępność obszaru pod kątem czasu operacyjnego, tj. okresu, w którym można bezpiecznie prowadzić badania, przeprowadzono analizę statystyczną danych hydrologicznych i meteorologicznych. Początkowe szacunki oparto na statystykach dotyczących warunków wiatrowych oraz wysokości fali znacznej (H_s) z okresu siedmiu lat (2013–2020), uzyskanych za pomocą modelu falowego WAM 4 (Komen i in. 1994; Paplińska-Swerpel i Paszke 2006) dla trzech różnych lokalizacji w południowej części Morza Bałtyckiego (A: $\varphi = 55^\circ 0'N$, $\lambda = 17^\circ 0'E$, B: $\varphi = 54^\circ 30'N$, $\lambda = 14^\circ 30'E$, C: $\varphi = 54^\circ 0'N$, $\lambda = 17^\circ 0'E$; Rys. 1) (Kubacka i in. 2021). Następnie analizy poszerzono o dane z modelu ERA5 (Hersbach i in. 2023), obejmujące 82-letni okres (1940–2022), co pozwoliło na ocenę dostępności kolejnej wybranej lokalizacji offshore ($\varphi = 55^\circ 0'N$, $\lambda = 18^\circ 0'E$) w kontekście możliwości prowadzenia badań (np. geofizycznych), z uwzględnieniem rozkładu tej dostępności w podziale na 12 miesięcy w roku oraz biorąc pod uwagę zdolność operacyjną różnych statków – analizy wykonano dla różnych progów wysokości fali znacznej ($H_s \leq 0,5$ m, $H_s \leq 1,0$ m, $H_s \leq 1,5$ m) (Kubacka i in. 2024a). W obliczeniach uwzględniono wysokość fali znacznej (H_s), definiowaną jako wysokość fal wytworzonych przez wiatr i rozkołys. Przeprowadzono także szczegółową analizę falowania w tym rejonie. W celu zbadania zmienności przestrzennej analizowane parametry uwzględniono również w dwóch dodatkowych lokalizacjach południowego Bałtyku: jednej w Zatoce Gdańskiej ($\varphi = 54^\circ 30'N$, $\lambda = 19^\circ E$) oraz drugiej na otwartych wodach Bałtyku ($\varphi = 55^\circ 30'N$, $\lambda = 17^\circ 30'E$) (Kubacka i in. 2024b). Zaproponowana metoda wykazała, że wysokości fal pozostają poniżej określonego poziomu przez określony procent wybranego okresu (rok, sezon, miesiąc), jednak nie dostarczała informacji o liczbie okien pogodowych wchodzących w skład tego procentu. W związku z tym metoda ta nie dawała pełnego obrazu dostępności miejsca badań, chociaż wyznaczone wartości mogą stanowić integralną część różnych scenariuszy oceny ryzyka pogodowego (Kubacka i in. 2024b).



Rys. 1. Mapa analizowanych lokalizacji w publikacjach Kubacka i in. 2021, Kubacka i in. 2024a, Kubacka i in. 2024b

Uzyskane statystyki nie uwzględniają trwałości ani ciągłości wysokości fal względem siebie, co pomija istotny aspekt czasu potrzebnego na planowane operacje morskie. Ciągłość fal względem siebie odnosi się do analizy sekwencji kolejnych fal w czasie, z uwzględnieniem ich wysokości oraz regularności. Obejmuje to również ocenę występowania dłuższych serii wysokich fal lub przerw między nimi. W związku z tym, oprócz progów środowiskowych, w kolejnych analizach uwzględniono parametr długości tzw. okna pogodowego (Kubacka i in. 2025). Na pierwszym etapie, bazując na danych z modelu ERA5 obejmujących 82 lata, przeprowadzono szczegółową analizę okien pogodowych w dwóch lokalizacjach (A: $\varphi = 55^{\circ}0'N$, $\lambda = 18^{\circ}0'E$; B: $\varphi = 54^{\circ}0'N$, $\lambda = 14^{\circ}30'E$; Rys. 2), porównując takie parametry jak: 1) średnia liczba okien pogodowych w każdym miesiącu, 2) całkowita długość okien pogodowych oraz 3) maksymalna długość okien pogodowych. Analizowano okna pogodowe trwające co najmniej 12 godzin, 24 godziny i 48 godzin w podziale na 12 miesięcy.



Rys. 2. Mapa analizowanych lokalizacji w publikacji Kubacka i in. 2025

Dla najbardziej optymalnej metody, tj. biorąc pod uwagę czas uzyskany z sumowania okien pogodowych trwających co najmniej 48 godzin, obliczono czas operacyjny w 22 dodatkowych lokalizacjach. Stacje te znajdują się w obrębie lub w pobliżu polskiej WSE i są rozmieszczone w regularnych odstępach co 0,5 stopnia szerokości i długości geograficznej (Rys. 2). Dodatkowo analizy uwzględniały cztery progi wysokości fali ($H_s \leq 0,5$ m, $H_s \leq 1,0$ m, $H_s \leq 1,5$ m oraz $H_s \leq 2,0$ m), które determinują możliwość prowadzenia badań zarówno z małych, jak i dużych jednostek pomiarowych. Wyniki zostały wyinterpolowane metodą krigingu (Surfer, Golden Software) i przedstawione w postaci map operacyjnej dostępności czasowej w polskiej WSE, wyrażonej w godzinach. Aby podkreślić sezonową zmienność okien pogodowych, a tym samym zmienność dostępnego czasu operacyjnego na badanym obszarze, ich rozkład przedstawiono w podziale na 12 miesięcy.

Uzyskane wyniki

Ocena wpływu warunków hydrologicznych i meteorologicznych na realizację badań w projektach offshore w południowej części Bałtyku

Długoterminowe symulacje numeryczne właściwości fal umożliwiły oszacowanie podstawowych cech klimatu falowego południowego Bałtyku na przestrzeni 82 lat, tj. od 01.01.1940 roku do 31.12.2022 roku. Analiza wykazała wyraźną sezonowość reżimów falowych zarówno w ujęciu miesięcznym, jak i rocznym, co skutkuje sezonową zmiennością dostępności wybranej lokalizacji do prowadzenia działalności operacyjnej. Badania pokazały, że najniższe wartości wysokości fal (H_s) występowały późną wiosną i latem, tj. od maja do sierpnia. Warunki falowe na analizowanym obszarze wykazują duże różnice między sezonami, przy czym średnie wysokości fal w najspokojniejszych i najbardziej wzburzonych miesiącach różnią się aż 2,2-krotnie (od 0,75 m w maju do 1,65 m w styczniu).

Wyniki analizy okien pogodowych potwierdziły znaczącą sezonową zmienność warunków falowych, przy czym korzystniejsze okna pogodowe występowały wiosną i latem, szczególnie wzdłuż zachodniego i południowo-wschodniego wybrzeża Polski. Płytke wody przybrzeżne oferują lepszą dostępność niż głębsze obszary offshore, co zgadza się z wynikami innych badań. W miesiącach zimowych czas operacyjny jest ograniczony, a styczeń cechował się minimalną dostępnością przy niskich progach wysokości fali. Porównanie z innymi regionami europejskimi (Martins et al. 2014, Gintautas and Sørensen 2017, Moore et al. 2024, O'Connor et al. 2013) wskazało, że warunki morskie w polskiej WSE są ogólnie korzystniejsze, szczególnie dla wyższych progów wysokości fali ($H_s \leq 1,5$ m i $H_s \leq 2,0$ m). To sugeruje, że przy optymalnych warunkach operacje morskie mogłyby być prowadzone przez większą część roku, zwłaszcza od maja do września.

Analizy statystyczne wysokości fali znacznej z okresu 1940–2022 pokazały, że zmiany klimatyczne mają niewielki wpływ na prowadzenie pomiarów morskich w kontekście południowego Bałtyku. Wykazano, że wysokość fali znacznej zmienia się sezonowo, z medianą wynoszącą od 0,75 m w maju do 1,65 m w styczniu. W ciągu 82 lat zaobserwowano jedynie minimalny wzrost wysokości fali znacznej o około 0,5 cm. Zmiany te były zauważalne głównie w sezonie zimowym (wzrost o ~ 21 cm) i jesiennym (~ 8 cm), podczas gdy w sezonie ciepłym odnotowano niewielki spadek (~ 6 cm wiosną i ~ 3 cm latem). W przeliczeniu na dekadę oznacza to zmiany rzędu $-0,7$ cm wiosną, $-0,4$ cm latem, $+1$ cm jesienią i $+2,6$ cm zimą. Roczne

wahania wskazują, że wpływ tych zmian na operacje pomiarowe jest ograniczony i nie wydaje się znaczący z perspektywy długoterminowej.

Zarządzanie ryzykiem pogodowym

Wykorzystując opisane metody badawcze, zidentyfikowano i przeanalizowano pięć ryzyk związanych z pogodą, które mogą wpływać na projekty badań przedinwestycyjnych na obszarach morskich, a także opracowano kluczowe elementy planu zarządzania ryzykiem pogodowym dla tego rodzaju prac (Kubacka i in. 2021, Kubacka i in. 2022). W poniższej tabeli (Tab. 1) przedstawiono klasyfikację ryzyk, ich przyczyny, skutki oraz prawdopodobieństwo wystąpienia. Ryzyko według przyczyn sklasyfikowano jako spowodowane przez czynniki zewnętrzne, czyli takie, na które nie mamy wpływu (np. siły natury), i czynniki wewnętrzne związane ze sposobem planowania projektu oraz czynnikiem ludzkim. Do każdego ryzyka przypisano także jego skutki dla realizacji projektu oraz prawdopodobieństwo wystąpienia.

Tabela 1. Zestawienie ryzyk związanych z nieprzewidywalnymi warunkami atmosferycznymi w projektach inwestycji morskich

Ryzyko						
symbol	opis	źródło	natura	do czego może prowadzić	skutek	prawdopodobieństwo wystąpienia
R1	termin badań w okresie sztormowym	wewnętrzne / zewnętrzne	organizacyjna/siły natury	niedostępność terenu do prowadzenia badań; konieczność powtórzenia części badań	wydłużenie harmonogramu	bardzo prawdopodobne
R2	złe warunki atmosferyczne w okresie niesztormowym	zewnętrzne	siły natury	niedostępność terenu do prowadzenia badań; konieczność powtórzenia części badań	wydłużenie harmonogramu	prawdopodobne
R3	niepodejmowanie decyzji o rozpoczęciu badań pomimo sprzyjających warunków atmosferycznych	wewnętrzne	ludzka	postój pomimo sprzyjających warunków pogodowych	wydłużenie harmonogramu	mało prawdopodobne
R4	awarie sprzętu pomiarowego	wewnętrzne / zewnętrzne	organizacyjna / techniczna	konieczność powtórzenia części badań; postój pomimo sprzyjających warunków pogodowych	wydłużenie harmonogramu	mało prawdopodobne
R5	konflikt z innymi użytkownikami akwenu	zewnętrzne	organizacyjna	postój pomimo sprzyjających warunków pogodowych	wydłużenie harmonogramu	mało prawdopodobne

źródło: Kubacka i in. 2021

Fundamentalnym problemem, a zarazem najbardziej prawdopodobnym ryzykiem, okazał się termin badań przypadający na okres sztormowy (R1, Tab. 1). Okres sztormowy można zdefiniować jako czas, w którym na danym akwenie wzrasta częstotliwość występowania sztormów charakteryzujących się znaczną wysokością fali (wg skali Beauforta fala znaczna o wysokości przekraczającej 2,5 m). To ryzyko często wynika ze złożoności projektu. Duże inwestycje, które mogą zostać zaplanowane na okres, kiedy teoretycznie powinny panować korzystne warunki atmosferyczne do prowadzenia prac badawczych na morzu, mogą się znacznie wydłużyć w czasie i harmonogram po aktualizacji obejmie miesiące sztormowe. Zdarzają się również takie projekty, przy których prace pomiarowe są wykonywane przez 12 miesięcy w roku. Jako najbardziej optymalną metodą zminimalizowania opóźnień w harmonogramie wywołanych okresami sztormowymi wskazano kalkulację rezerw czasowych, wyrażonych w godzinach operacyjnych przeznaczonych na poszczególne lokalizacje na morzu, w zależności od terminu prowadzenia badań i rodzaju jednostki, z pokładu której zaplanowano realizację tych działań (Kubacka i in. 2025).

Zjawiska pogodowe mają charakter sezonowy i zmieniają się w czasie. Przykładem tego jest występowanie pór roku. Nie oznacza to jednak, że zjawiska pogodowe są przewidywalne w określonych porach roku; wskazuje jedynie na to, że istnieją pewne cechy specyficzne dla danego okresu. Surowe warunki pogodowe poza okresem sztormowym (R2, Tab. 1) mogą wystąpić w dowolnym miesiącu, w którym prowadzone są badania, również w tych bardziej korzystnych miesiącach od maja do sierpnia. Wystąpienia takiego zdarzenia zostało ocenione jako prawdopodobne, co może wpłynąć na harmonogram projektu, powodując opóźnienia nawet o dwa miesiące. Jednorazowy wpływ środowiskowy związany z ryzykiem R2 jest znacznie mniejszy niż w przypadku ryzyka R1, ale całkowity wpływ na środowisko, mierzony na dłuższym odcinku czasu, jest znaczący. Proponowaną strategią odpowiedzi na to ryzyko jest strategia unikania. Ponieważ nie mamy wpływu na warunki pogodowe, możemy zaplanować działania tak, aby uwzględnić dodatkowe rezerwy czasowe na wypadek wystąpienia burz lub nagłych zmian pogodowych (Kubacka i in. 2021).

Nieprzystąpienie do badań pomimo korzystnych warunków pogodowych (R3, Tab. 1) zostało ocenione jako mało prawdopodobne, mimo że takie zdarzenie miało miejsce w przeszłości. Konsekwencje dla harmonogramu określono jako niskie (opóźnienie 2–4 tyg.). Źródłem tego ryzyka jest czynnik wewnętrzny, wynikający z błędu ludzkiego. Proponowaną strategią odpowiedzi na ryzyko jest ograniczenie ryzyka przez umożliwienie wspólnego podejmo-

wania decyzji o zawieszeniu działań z powodu warunków pogodowych przez kierownika kampanii i kapitana statku (Kubacka i in. 2021). Mimo że dokładność prognoz pogody wzrosła na przestrzeni lat, nadal nie są one w pełni precyzyjne (Naresh i in. 2022). W związku z tym konieczne jest regularne analizowanie prognoz pogodowych z kilku źródeł.

Awarie sprzętu pomiarowego (R4, Tab. 1) zostały ocenione jako zdarzenie mało prawdopodobne, które jednak może prowadzić do przestojów statku pomimo korzystnych warunków pogodowych, co w konsekwencji może wydłużyć czas trwania projektu nawet o dwa miesiące. Źródłem ryzyka są czynniki zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne, związane z kwestiami organizacyjnymi, technicznymi oraz siłami natury. Przejawem ryzyka zewnętrznego, związanego z pogodą, może być przede wszystkim uszkodzenie sprzętu pomiarowego. W publikacji Kubacka i in. 2022 zidentyfikowano i przeanalizowano 12 ryzyk związanych z awariami sprzętu pomiarowego, z czego źródłem 7 (w tym 4 ryzyk o najwyższej randze) były m.in. siły natury. Według respondentów w przeprowadzonej ankiecie najczęstszą przyczyną awarii sprzętu pomiarowego spowodowanych siłami natury jest występowanie falowania. Większość uszkodzeń sprzętu ma miejsce podczas jego wciągania na pokład statku, przy kołysaniu jednostki trudno jest kontrolować ciężki sprzęt zawieszony na kablolinie. Urządzenia ulegają mechanicznym uszkodzeniom w wyniku uderzeń o strukturę statku. W najgorszych przypadkach duże fale powodują naprężenie kabla, który często pęka, co skutkuje zatonięciem sprzętu (*„Straciliśmy cały 6-kilometrowy kabel hydrofonowy. Była bardzo wietrzna noc, morze było wzburzone...”*). Utrata urządzeń może także wynikać z niedostatecznego zabezpieczenia sprzętu na pokładzie, który może wypaść za burtę w wyniku kołysania (*„Podmuch wiatru przewrócił wibrosondę na łańcuchy zabezpieczające na rufie; łańcuch o grubości 2 cm pękł”*). Respondenci wskazali również problemy ze sprzętem spowodowane niskimi temperaturami, takie jak zamarzanie urządzeń czy wody w batometrze. Wspomniano także o wpływie zjawisk takich jak refrakcja czy burze magnetyczne na jakość danych pomiarowych. Zbieranie danych hydroakustycznych podczas niesprzyjających warunków pogodowych również znacząco wpływa na ich jakość.

Tego typu zdarzenia mają niską częstotliwość, ale potencjalnie poważne konsekwencje. Dodatkowo do wewnętrznych źródeł ryzyka należą kwestie organizacyjne, takie jak brak odpowiednich procedur, brak zgodności z procedurami lub instrukcjami dotyczącymi obsługi danego urządzenia. Ryzyko to można ograniczyć poprzez regularną konserwację sprzętu, opracowanie i przestrzeganie odpowiednich procedur oraz skuteczne przeszkolenie personelu badawczego (Kubacka i in. 2021, Kubacka i in. 2022).

Możliwy konflikt z innymi użytkownikami obszaru morskiego (R5, Tab. 1) został oceniony jako mało prawdopodobny, jednak jego potencjalny wpływ na harmonogram może skutkować opóźnieniami rzędu 2–4 tygodni. Źródła ryzyka są związane głównie z czynnikami zewnętrznymi, wynikającymi z organizacji przestrzeni morskiej oraz konieczności koordynacji różnych działań. Przykładowo, prowadzenie badań na obszarach morskich może być utrudnione przez zamykanie poligonów wojskowych, co wymaga dostosowania harmonogramu np. do ćwiczeń militarnych. Inne istotne ryzyko powodują sieci rozstawiane przez rybaków na planowanych obszarach pomiarowych. Sieci mogą nie tylko utrudniać operacje badawcze, ale także stanowić zagrożenie dla sprzętu, szczególnie dla urządzeń podwodnych. Dodatkowo prowadzenie badań przez inne statki badawcze lub statki realizujące prace hydrotechniczne może powodować konieczność reorganizacji planowanych tras pomiarowych lub czasowego wstrzymania prac. Szczególnie problematyczne jest to w okresach dobrej pogody, kiedy wielu użytkowników akwenu – zarówno badacze, rybacy, podmioty komercyjne, jak i przedstawiciele sektora turystyki, sportu oraz rekreacji – próbuje maksymalnie wykorzystać sprzyjające warunki, co prowadzi do wzmożonej aktywności i zwiększonego ryzyka konfliktu interesów.

Sugerowaną strategią odpowiedzi na te wyzwania jest unikanie ryzyka poprzez ustalenie priorytetów dla poszczególnych jednostek i działań na obszarze badań. Kluczowe jest także bieżące monitorowanie aktywności na obszarze badawczym, wczesne planowanie i koordynacja działań z odpowiednimi instytucjami (np. administracją morską, wojskiem czy lokalnymi grupami rybackimi) oraz elastyczność w modyfikowaniu harmonogramu w przypadku zaistnienia nieprzewidzianych przeszkód (Kubacka i in. 2021).

Podsumowanie i wnioski

Badania wykazują, że choć dokładne prognozowanie warunków pogodowych na długi okres jest niemożliwe, to wykorzystanie zaawansowanych analiz statystycznych parametrów hydrodynamicznych stanowi skuteczne narzędzie do optymalizacji harmonogramów badań morskich. W szczególności analiza sezonowych wahań takich zmiennych jak wysokość fali znacznej (H_s) i długość okien pogodowych pozwala na oszacowanie dostępności obszarów morskich oraz określenie optymalnych okresów do prowadzenia operacji offshore. Praca wskazuje, że strategiczne planowanie, bazujące na wieloletnich danych dotyczących warunków fali i pogodowych, umożliwia minimalizowanie ryzyka opóźnień oraz poprawę efektywności działań w projektach morskich.

W kontekście projektów inwestycyjnych na morzu, takich jak np. budowa farm wiatrowych, zidentyfikowano różnorodne ryzyka związane z warunkami pogodowymi, które mogą wpływać na harmonogramy prac. Ryzyka te obejmują:

- **Termin badań przypadający na okres sztormowy** – największe prawdopodobieństwo i konsekwencje w postaci wydłużenia harmonogramu.
- **Nieprzewidziane złe warunki atmosferyczne w okresie niesztormowym** – możliwe w dowolnym miesiącu, z potencjalnym wpływem na opóźnienia projektu.
- **Niepodejmowanie decyzji o rozpoczęciu badań pomimo sprzyjających warunków atmosferycznych** – choć mało prawdopodobne, może prowadzić do znaczących strat czasowych.
- **Awaryje sprzętu pomiarowego** – mało prawdopodobne, mogą prowadzić do strat czasowych.
- **Konflikt z innymi użytkownikami akwenu** – szczególnie problematyczny w okresach dobrej pogody, kiedy aktywność na morzu wzrasta.

Kluczowe zmienne, takie jak wysokość fali znacznej, długość okien pogodowych i sezonowość ich zmian, determinują dostępność terenu oraz warunki pracy dla ekip badawczych i technicznych. Badania przeprowadzone w polskiej WSE Bałtyku podkreślają, że nieodpowiednie zarządzanie ryzykiem pogodowym może prowadzić do znacznych kosztów związanych z koniecznością przerwania prac, powtórzenia prac, przestojów czy utraty sprzętu.

Rezultaty badań wskazują, że odpowiednia analiza i uwzględnienie ryzyka pogodowego na etapie planowania i realizacji kampanii badawczych mogą znacznie zredukować negatywne skutki niesprzyjających warunków atmosferycznych. Wywiady i ankiety przeprowadzone wśród uczestników kampanii badawczych i osób zaangażowanych w realizację projektów offshore podkreślają, że wdrożenie działań mitygujących, takich jak rezerwy czasowe, systematyczne monitorowanie prognoz pogodowych z wielu źródeł czy stosowanie procedur zarządzania awariami sprzętu, przyczynia się do poprawy efektywności i bezpieczeństwa pracy na morzu.

Niniejsza praca dostarcza istotnych wniosków dotyczących zarządzania ryzykiem pogodowym w projektach morskich, zwłaszcza w rejonie południowego Bałtyku. Wnioski te mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności i niezawodności badań w trudnych warunkach środowiskowych, zmniejszenia kosztów, urealnienia rentowności projektów oraz minimalizacji opóźnień w harmonogramach. W pracy podkreślono również, że integracja wiedzy o zmienności sezonowej oraz specyficznych wyzwaniach pogodowych z etapem planowania projektów offshore może stać się podstawą do lepszej organizacji działań i ich realizacji w dynamicznym środowisku morskim.

Wykaz literatury

1. Astariz, S., Abanades, J., Pérez-Collazo, C., & Iglesias, G., 2015, Improving wind farm accessibility for operation & maintenance through a co-located wave farm: Influence of layout and wave climate. *Energy Convers. Manag.*, 95, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.040>.
2. Campbell, S. D., & Diebold F. X., 2005, Weather forecasting for weather derivatives. *J. Am. Stat. Assoc.*, 100, 6–16. <https://doi.org/10.1198/016214504000001051>.
3. Czekaj, Z., 2016, Derywaty pogodowe jako instrument zarządzania ryzykiem pogodowym (Weather derivatives as an instrument of weather risk management). *RPEiS*, 78, 217–228. <https://doi.org/10.14746/rpeis.2016.78.1.17>.
4. Douard, F., Domecq, C., & Lair, W., 2012, A probabilistic approach to introduce risk measurement indicators to an offshore wind project evaluation – Improvement to an existing tool ECUME. *Energy Procedia*, 24, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.107>.
5. Gilbert, C., Browell, J., & McMillan, D., 2021, Probabilistic access forecasting for improved offshore operations. *Int. J. Forecast.* 37, 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.03.007>.
6. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J-N., 2023. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) (dostęp: 05.05.2023). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
7. Janowski, Ł., Wróblewski, R., Dworniczak, J., Kolakowski, M., Rogowska, K., Wójcik, M., & Gajewski, J., 2021, Offshore benthic habitat mapping based on object-based image analysis and geomorphometric approach. A case study from the Slupsk Bank, Southern Baltic Sea. *Sci. Total Environ.*, 801, 149712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149712>.
8. Komen, G. J., Cavalieri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P.A.E.N., 1994, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628955>.
9. Kubacka, M., Matczak, M., Kałas, M., Gajewski, L., & Burchacz M., 2021, Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the Polish exclusive economic zone. *WCAS*, 13, 899–911. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0168.1>.
10. Kubacka, M., Gajewski, L., Burchacz, M., Matczak, M., Janowski, P., & Piotrowicz, J., 2022, Many faces of survey equipment failures during marine research at sea – risk analysis. *PLoS ONE*, 17, e0272960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960>.

11. Kubacka, M., Krężel, A., Gajewski, J., & Barbucha, D., 2024a, Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys. *Sci. Rep.*, 14, 24596. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75054-4>.
12. Kubacka, M., Krężel, A., Nowak, J., Janowski, P., 2024b, Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego, [w:] *Zarządzanie ryzykiem w przemyśle offshore*, Agnieszka Błokus-Dziula, (red.), Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, s. 103–128.
13. Kubacka, M., Barbucha, D., Krężel, A., & Gajewski, J., 2025, Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone. *Sci. Rep.*, 15, 7094.
14. Lednicka, B., Kubacka, M., Freda, W., Haule, K., Dembska, G., Galer-Tatarowicz, K., & Pazikowska-Sapota, G., 2022, Water Turbidity and Suspended Particulate Matter Concentration at Dredged Material Dumping Sites in the Southern Baltic. *Sensors*, 22(20), 8049. <https://doi.org/10.3390/s22208049>.
15. Leimeister, M., & Kolios, A., 2018, A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 91, 1065–1076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>.
16. Naresh, R. K., Kumar, S., & Narwal, E., 2022, Weather forecasting. *Artificial Intelligence in Indian Agriculture*, R. K. Naresh i in. (red.), Jaya Publishing, s. 1–16.
17. Paplińska-Swempel, B., & Paszke, Ł., 2006, Application of Neural Networks to the Prediction of Significant Wave Height at Selected Locations on the Baltic Sea. *Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech.*, 53(3), 183–201.
18. Poulsen, T., & Lema, R., 2017, Is the supply chain ready for the green transformation? The case of offshore wind logistics. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 73, 758–771. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.181>.
19. Project Management Institute, 2013, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK ® Guide) – Fifth Edition. Project Management Institute, Newton Square.
20. Pydyn, A., Popek, M., Kubacka, M., & Janowski, Ł., 2021, Exploration and reconstruction of a medieval harbour using hydroacoustics, 3-D shallow seismic and underwater photogrammetry: A case study from Puck, southern Baltic Sea. *Archaeol. Prospect.*, 28(4), 527–542. <https://doi.org/10.1002/arp.1823>.
21. Rowell, D., Jenkins, B., Carroll, J., & McMillan, D., 2022, How Does the Accessibility of Floating Wind Farm Sites Compare to Existing Fixed Bottom Sites? *Energies*, 15, 8946. <https://doi.org/10.3390/en15238946>.
22. Shafiee, M., 2015, A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. *Expert Syst. Appl.*, 42, 2143–2152. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.019>.

23. Walker, R. T., van Nieuwkoop-McCall, J., Johanning, L., & Parkinson, R. J., 2013, Calculating weather windows: Application to transit, installation and the implications on deployment success. *Ocean Eng.*, 68, 88–101.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.015>.
24. Williams, H., Masters, I., Pletsas, D., Fuentes Grunewald, C., Callaway, R., Dalton, G., & Blanch, M., 2017, A risk assessment methodology for combining marine renewables with other blue economy activities via multi-use of spaces and platforms. *Proceedings 12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2017)*, Cork, Ireland.

CZEŚĆ II

Publikacja nr 1

Artykuł naukowy pt.:

Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone

Weather, Climate, and Society, 2021, 13, 899–911, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0168.1>

autorzy: **Maria Kubacka**, Maciej Matczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz

Artykuł dotyczy zarządzania ryzykiem pogodowym w kampaniach badawczych dla projektów inwestycyjnych offshore w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej. W pracy przedstawiono pięć głównych ryzyk związanych z pogodą, które zidentyfikowano metodami analizy dokumentacji projektów offshore oraz metodą delficką. Następnie przeprowadzono analizę tych ryzyk oraz zaproponowano strategie ich łagodzenia, m.in. poprzez planowanie odpowiednich rezerw czasowych na podstawie statystycznych danych pogodowych.

Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone

MARIA KUBACKA,^a MACIEJ MATCZAK,^a MACIEJ KAŁAS,^a LUCJAN GAJEWSKI,^b AND MARCIN BURCHACZ^a

^a Maritime Institute of the Gdynia Maritime University, Gdynia, Poland

^b MEWO S.A., Straszyn, Poland

(Manuscript received 17 December 2020, in final form 19 July 2021)

ABSTRACT: Weather is a crucial factor (and the most unpredictable of all factors) determining the success or failure of any offshore activity, such as investments in seafloor grid connectors (gas, energy, or communication), development of oil and gas drilling facilities, and erection of offshore wind farms. Weather conditions cannot be foreseen accurately over a time horizon longer than a few days, and so arranging a realistic work schedule for such an enterprise poses a great challenge. This paper identifies and analyzes the greatest risks associated with weather conditions at sea. The importance and impact of weather on the project implementation are assessed and mitigating measures are proposed. As part of the work, a review of scientific literature was conducted, and the core conclusions were reached using information-gathering techniques and a documentation review of the offshore projects implemented in cooperation with the Maritime Institute. The authors based their analysis on experience from survey campaigns conducted in the Baltic Sea in the areas of the investments planned for implementation. The analysis of risks associated with weather conditions is based on the statistical weather data obtained using the Wave Ocean Model cycle 4 (WAM4). The research reveals that it is impossible to create an accurate survey schedule for long-term offshore projects; however, using statistics for each individual hydrodynamic parameter can, to some extent, facilitate the creation of survey schedules for maritime projects.

SIGNIFICANCE STATEMENT: Offshore wind energy is one of the fastest-growing industries in the world energy sector, yet there is no wind farm in the Polish Exclusive Economic Zone on the Baltic Sea. To date, however, many preinvestment studies and survey campaigns have been carried out for several such investments. Some of them were conducted by the team of the Maritime Institute of Poland. The biggest challenge for us was to plan the survey campaigns because of the weather conditions that cannot be foreseen accurately over a time horizon longer than a few days. The experience gained in the process was an inspiration to write this article in which we identify and analyze the weather-related risks. The obtained results, although representative for the Baltic Sea region area, are also of a more universal character and can be used by offshore managers all over the world.

KEYWORDS: Hydrometeorology; Europe; Numerical weather prediction/forecasting; Seasonal forecasting; Risk assessment

1. Introduction

a. Marine surveys and investigations in offshore projects

Improvement of environmental performance in the energy sector is a commonly implemented strategy, both on global and European scales. Renewable energy investments are, therefore, an important step toward the reduction of carbon emissions (“20-20-20 target”) and keeping the global warming temperature below 2°C [target from the 21st session of the Conference of Parties in Paris (COP 21)] (Mytilinou and Kolios 2019). Also, it serves the implementation of the European Commission climate

and energy policy framework where renewable energy should contribute to the final energy consumption from 30% to 51% in 2050 (Chaouachi et al. 2017). Thus, onshore and offshore wind energy have become an interesting option for decision-makers. Offshore wind farms (OWF) are an example among other offshore investments such as grid connectors in seafloor (gas, energy, or communication) and development of oil and gas drilling facilities. Analyzing an OWF life cycle can generally be split into four (Poulsen and Lema 2017) or five (Dedecca et al. 2016; Myhr et al. 2014) key phases with an initial predevelopment and consent (P&C) stage. The key elements of this phase are project management, legal authorization, engineering, and contingencies as well as comprehensive seafloor surveys (Shafiee et al. 2015).

The P&C of an OWF normally takes from 1 to 5 (Tseng et al. 2017) years (total life span of an OWF is estimated at approximately 25 years) and consumes around 14.0% of capital expenditures (CAPEX) (Shafiee et al. 2015). The survey part consisting of environmental and meteorological investigations creates ~16% of the costs of the P&C phase (Myhr et al. 2014) or 1.3% of CAPEX (Shafiee et al. 2015) of the entire investment. Since the complex and lengthy approval procedures (e.g., mandatory environmental impact assessment; Tseng et al. 2017) are

 Denotes content that is immediately available upon publication as open access.

Kubacka's ORCID: 0000-0002-5146-7722.

Matczak's ORCID: 0000-0002-2985-9914.

Kałas's ORCID: 0000-0001-9341-2829.

Burchacz's ORCID: 0000-0002-8522-4470.

Corresponding author: Maria Kubacka, mkubacka@im.umg.edu.pl

DOI: 10.1175/WCAS-D-20-0168.1

© 2021 American Meteorological Society. For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the AMS Copyright Policy (www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses).

especially relevant for offshore wind parks (Williams et al. 2017), a comprehensive scope of marine surveys is required (Gatzert and Kosub 2016). These are conducted to ensure that the offshore wind farms can be built in the right locations with the least impact on animal life or nature in general and are based on the correct seabed conditions (Poulsen and Lema 2017). Marine surveys are also necessary in the next phases of the OWF development, especially in relation to the environmental impact assessment (the before-after-control-impact framework) (Lapeña et al. 2010; OSPAR Commission 2008).

Along with the complexity of research, the limited accessibility of the survey area is also a challenge. It is estimated that the average accessibility of the offshore wind farms ranges from 60% to 70% (95%–99% in the case of onshore projects) (Shafiee 2015). Limited accessibility is due to ever-changing sea conditions, high weather sensitivity of the equipment and vessels (Gintautas et al. 2016), and location at a distance from the coast (Leimeister and Kolios 2018) as well as great project complexity (Douard et al. 2012). Effective weather risk management plan, where procedures used to manage weather-related risks during project implementation is well developed in the P&C phase, and the projects' whole life cycle is fundamental. Weather risk management plan includes weather-related risks identification and measurement, planning weather-related risk response methods, and implementation of reserve plans as well as allocation of reserves.

b. Weather risk management in the offshore surveys

According to Campbell and Diebold (2005), weather risk “is about the unpredictable component of weather fluctuations” revealed by “weather surprises.” The weather risk results from the variability of atmospheric conditions that can occur for the same place in successive periods of time. This variability is understood as the deviation of the measured weather factors from their long-term average (Czekaj 2016). However, atmospheric phenomena are difficult to predict, but it does not mean that prediction is impossible. If it were possible to accurately forecast the weather over a time horizon longer than a few days, then there would be no weather risk and therefore no problem. However, despite significant developments in synoptic meteorology, it is basically possible to make a weather forecast with a satisfactory accuracy for several days ahead, which in most cases is too short of a period to be useful for sea research activities. When managers do not address risks that have negative effects on project effectiveness, it may result in various problems such as cost overruns, schedule delays, and poor quality of study.

As estimated, one-third of businesses worldwide are directly affected by weather conditions (Al-Zarrad et al. 2017). The risk exposures become more significant in businesses located in weather-sensitive areas, like at sea, or that are strictly linked to weather conditions, such as agriculture (<https://wrmsglobal.com/>) or the energy sector (Cogen 2020). Obviously, the weather is not the only issue in the complex array of risks (Gatzert and Kosub 2016), however, the weather risks are identified as crucial for the offshore sector. This risk appears at all stages of any offshore activity, for example, the OWF life cycle, but its character differs in its life cycle parts. Thus, for example, the weather conditions create a constant challenge for the transport between a farm and the shore. For that reason, a majority of the weather risk surveys

focus on the operation and maintenance phase (Jamshidi et al. 2019; Li et al. 2016; Dalgic et al. 2015; Nielsen and Sørensen 2011).

Considering the P&C stage, the activities of the research team and proper utilization of survey equipment are important activities that are influenced by weather conditions. Transport to the survey areas and work carried out there can only be performed in acceptable safe states of the sea (wave height and period), and at the right wind speeds (Leimeister and Kolios 2018). Additionally, features such as good visibility or sunset and sunrise time can limit or extend the ability to conduct research activities (Dalgic et al. 2015). Bad weather conditions could prolong the process of research implementation, extending its costs and delaying the consenting procedures. It is crucial for survey companies.

Like any other risk, weather risk must be properly managed. Risk management is a process that focuses on identifying and eliminating hazards that could affect performance of investment. This process normally includes several stages such as (Shafiee 2015): identification, assessment, evaluation, control and monitoring, and mitigation. However, a simplified method points to three stages of risk management (Williams et al. 2017):

- 1) identification (hazard category, principal consequences, issues related to consequences, and possible causes),
- 2) analysis (consequences and likelihood of a risk occurrence; allocation of the risk magnitude), and
- 3) mitigation (mitigation type and measures, consequences and the likelihood of a risk occurrence, and updated risk magnitude for the residual risk).

The above-presented method should be implemented for the weather risks that occur when marine surveys are conducted. The implementation of the relevant methods (Yu 2018; Jamshidi et al. 2019), approaches (Dalgic et al. 2015), and techniques of weather risk management (Mraoua and Bari 2007; Wiczorek-Kosmala 2020) should support the planning and execution of a survey campaign. As a result, it enables the timely conclusion of research work and optimizes its costs.

c. The aim and scope of geophysical surveys conducted offshore

Preinvestment geophysical surveys at sea aim to investigate the relief and structure of the seabed including its bathymetry, geomorphology, and surface reflection profiles as well as soil substratum and the possible locations of uncovered bedrock. They include bathymetric (depth), seismic (deep structure of the seabed), magnetometer (magnetic anomalies in the soil substratum), and sonar (seabed surface character) surveys. The measurements are conducted along parallel measurement profiles so that the entire seabed of the area analyzed is covered. The surveys also aim to determine the presence and compile an inventory of objects that may affect the integrity and safety of the investment, such as pipelines, cables, wrecks, unexploded ordnance and misfires (“UXO”), and existing and abandoned (inactive) energy and communication cables as well as fishing nets (Szefer et al. 2017; Stryjecki et al. 2019).

d. Survey area

The Baltic Sea is regarded as a prospective area for the development of offshore wind farms. So far, 2,219 GW of wind

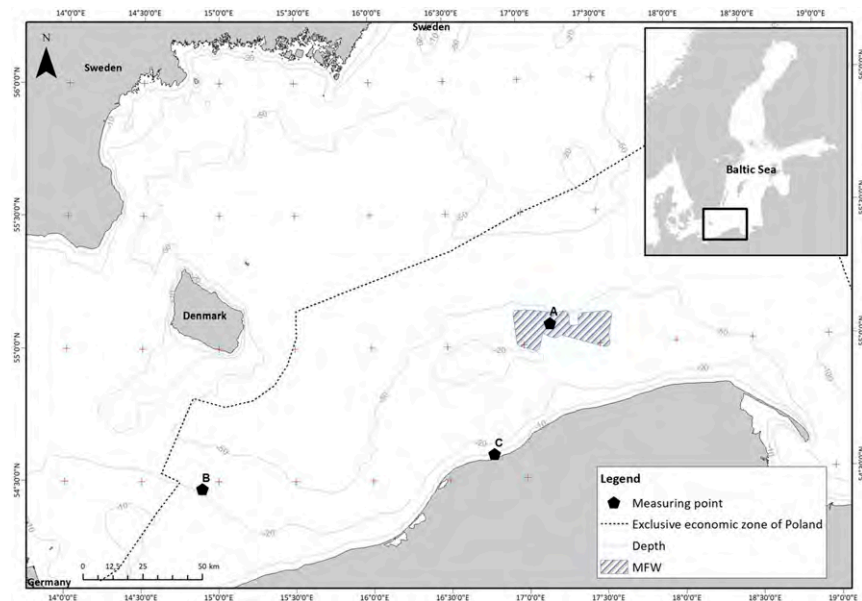


FIG. 1. Locations of the points at sea associated with the surveys performed for various hydroengineering investments.

capacity (10% of European capacity) has been installed in the region (WindEurope 2020). Offshore windmills are installed in Denmark, Germany, Sweden, and Finland. Poland is the last European Union country remaining at the P&C stage. According to the Energy Policy of Poland until 2040 (the Ministry of Climate and Environment 2020), the expected capacity of OWE should reach a level of 8–11 GW in 2040. Considering the present stage of the implementation of the OWF investments in Poland (in most cases the site selection and environmental impact assessment procedures), the first farms will begin operation around 2025. For this reason, the relevant geophysical investigations and environmental surveys are still being conducted in the Polish Exclusive Economic Zone (EEZ).

In this study, we present three research points located in the Polish EEZ of the Baltic Sea and selected for surveys and analyses. The points are placed in different geographical areas, at different distances from the coastline and are characterized by different bathymetric and geomorphological conditions. Since the selected locations can be considered representative for the Polish EEZ, the analysis of the specific meteorological and other dynamic conditions of the sea displays a full scope of works that may be implemented in the Polish marine areas in connection with offshore investments.

Two of the points are placed on the high seas, in the western (point A) and eastern (point B) parts of the Polish EEZ. Point

A is in the area of the planned Baltica OWF, 45 km from the shoreline, at a depth of 40 m. Point B is located 35 km from the shore at a depth of ~25 m, on the route of the Baltic Pipe gas pipeline linking Poland and Denmark, which is currently under construction. The third point (C) is located 1.5 km from the shoreline in the nearshore zone, at a depth of 12 m. This sea area is designated for the landfall of the Baltica OWF cables. At each location preinvestment surveys were carried out: point A in 2016–17, point B from 2017 to 2019 and point C from 2016 to 2017. Detail locations and characteristics of the points are presented in Fig. 1 and Table 1.

e. Problems that this paper aims to solve

Weather conditions have significant influence on economic activities, especially in sensitive sectors such as the maritime industry. Thus, weather risk management becomes crucial for the offshore business during the whole investment process, including the preinvestment research activities.

This study aims to develop crucial elements of the weather risk management plan for offshore preinvestment geophysical surveys and for this purpose it focuses on the following research objectives: 1) identification of the weather-related risks in implementation of preinvestment geophysical surveys at sea, 2) assessment and quantification of identified weather-related risks and their qualification, 3) creating response plan for the

TABLE 1. Characteristics of the selected points at sea: coordinates (x, y) in the world geodetic system (WGS) 1984, average depths *d* in meters, distance from the shore in kilometers, and project name.

Measuring points	x	y	d	Distance from the shore	Project
A	171 754	55 0797	40	45	Baltica OWF
B	148 944	54 4723	25	35	Baltic-Pipe
C	167 917	54 5917	12	1,5	Landfall of the Baltica OWF

identified weather-related risks, and 4) usage of statistical data obtain from models for identification the meteorological conditions at selected locations at sea as an example of risk response strategy. The results presented in this paper make an essential contribution to the offshore project management process. The presented findings may be used and applied by offshore managers all over the world.

The study is composed of the following parts: 1) We discuss offshore marine projects in the Polish EEZ, conditions suitable for conducting preinvestment research, and the importance of weather conditions in the implementation of such projects. 2) From the information-gathering techniques and the documentation review, we identified the weather-related risks that appeared in the projects. 3) All of the identified weather-related risks were analyzed (assessed, quantified, and qualified). 4) The risk-response strategy was developed by, among other methods, using data from models for the Baltic Sea. 5) The final part of the paper consists of the discussion and conclusions.

2. Materials and methods

a. Conditions for the efficient performance of the surveys planned

Conducting marine surveys usually requires the use of a research vessel. The type of vessel depends primarily on the survey details, that is, the distance from the place of refuge and the water depth, which is regulated by the applicable laws. Severe weather conditions may endanger the life and health of the vessel's crew, resulting in irreversible measurement errors or failures and damages to the measuring equipment. Thus, in stormy conditions, the ship does not leave the port, or if it is at the survey area, it stops operations and returns to the nearest port of refuge.

In the offshore area, the surveys are carried out aboard larger vessels, which can sail for as long as several weeks without stopovers, with the ship's working day lasting 24 h, and the crew numbers being large enough to work in shifts. On the other hand, conducting surveys in the shallow water zone is much more difficult due to the specific bathymetric and hydrodynamic conditions (sea state) that prevail near the shore. The duration of surveys is additionally limited by the short operational time of such a vessel, which must return to a port after 12 h.

Considering the maritime safety and work safety legislation applied and the standards specifying the acceptable weather parameters for the performance of hydrographic, geophysical, and seismoacoustic surveys, the following maximal values have been accepted for the purposes of this article: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for wind speed and 1.5 m for wave height.

b. The weather-related risks identification and their qualification

A key stage in the risk management process, that is, the risk identification, is an organized and detailed activity aimed at detecting specific types of risk occurring in a given project (Pritchard 2001). According to the Project Management Institute, the risk identification tools and techniques include documentation reviews, information-gathering techniques,

checklist and assumption analyses, and diagram techniques (Project Management Institute 2000).

For the purposes of this article, the risk related to weather conditions has been identified. The necessary information was collected based on the information-gathering techniques and the documentation review of the offshore investment projects in the Polish EEZ implemented in cooperation with the Maritime Institute. Documentation included projects carried out at designated points (Fig. 1; Table 1) and additionally the environmental surveys conducted to obtain a permit for the construction of a nuclear power plant in two locations: Lubiatowo-Kopalino and Żarnowiec, Poland. These surveys covered a sea area limited by a line parallel to the shore located 8.5 km from the shore (Polska Grupa Energetyczna 2015). The analysis also takes into consideration the preinvestment surveys in the areas of expected construction aggregate exploitation, which are located at a distance from 2 to 8 m from the shoreline (Hac et al. 2011a,b), as well as the survey campaigns for the investment projects Baltica-2, Baltica-3 (Szeffler et al. 2017), and Baltic Power OWFs (<https://www.balticpower.pl>).

A documentation review consists of careful analysis of the relevant documents, with a clear goal to identify the risks that may arise during the project implementation (Pritchard 2001). In this case, the most important documents analyzed were the daily progress reports (DPR). The DPRs filled in by the party chief and sent to the project manager every day for the ongoing control of work implementation and progress. The reports cover 24 h and include, among others, the current position of the vessel, short descriptions of work performed on board, observed weather conditions, conducted operational works at sea, and a summary of work planned for the following 48 h. The information that was of particular interest included the number and duration of research vessels layovers caused by adverse weather conditions. We also looked into cases when the work was not carried out even though the weather conditions were favorable.

The information-gathering techniques allow for making unambiguous and transparent observations that describe the project risks. For the purposes of the study the Delphi technique was mostly used; therefore, questionnaires were filled out during conversations with the 18 people directly engaged in the implementation of offshore projects. The interviewees were both office workers (the project managers—4; members of the project team—6) and people conducting work at sea (surveyors—8). The questions concerned all weather-related issues that can affect the implementation of the offshore projects. We compared the responses with the results of the documentation review and compiled a list of risks. The next step was to present all the identified risks and ask the interviewees for an assessment of the probability of listed events and their consequences. The last stage concerned questions about actions that can be taken to reduce or eliminate listed risks.

As a result of the documentation analysis and interviews, five main weather-related issues were identified. A fundamental problem that occurred to be beyond control is vessel layover or the suspension of research surveys caused mostly by natural conditions—the weather. The necessity to perform surveys in cyclical storm periods may have a considerable impact on their economics, that is, the ratio between the spell of

TABLE 2. Compilation of risks for offshore investment projects related to the unpredictable weather conditions. Source: internal data.

Symbol	Description	Source	Nature	May lead to	Effect	Occurrence probability
R1	Surveys timed for the storm period	Internal/external	Organization/forces of nature	Inaccessibility of the area for surveys; need to repeat a part of surveys	Time-frame extension	Highly probable
R2	Severe weather conditions outside the storm period	External	Forces of nature	Inaccessibility of the area for surveys; need to repeat a part of surveys	Time-frame extension	Probable
R3	Failure to start surveys despite favorable weather conditions	Internal	Human error	Vessel layover despite favorable weather conditions	Time-frame extension	Unlikely
R4	Measurement gear breakdown	Internal/external	Organization/technical	Need to repeat part of the surveys; layover despite favorable weather conditions	Time-frame extension	Unlikely
R5	Possible conflict with other users of the sea area	External	Organization	Vessel layover despite favorable weather conditions/change of organization	Time-frame extension	Unlikely

good weather and time with conditions preventing the performance of geophysical surveys. The most important issue, however, is to identify the meteorological conditions in the area where the long-term geophysical surveys are planned.

Adverse weather conditions also occur outside the cyclical storm periods; thus, introducing an element of risk into the process of survey work planning. The DPR forms also indicate that directly after the storm conditions subside, so-called swell waves may occur, which prevent further conduct of surveys despite favorable wind conditions.

Another important issue is the human factor, that is, refraining from deciding to begin the measurements at sea despite favorable weather conditions. The decision-makers on board a vessel are the captain and the party chief. The captain is responsible for the crew safety and technical condition of the water vessel at all times. Based on the weather forecast, the captain decides whether the vessel may leave the port and conduct surveys. The party chief is responsible for the implementation and quality of surveys. The party chief decides whether the prevailing weather conditions allow the performance of the measurement works and the collection of good-quality data.

Since geophysical surveys require relatively good weather conditions to be conducted properly and effectively, a conflict associated with sharing the surveyed sea area with other users is another risk. A period of poor weather also means downtime for other users of the sea area engaged, for example, in fisheries, the implementation and operation of offshore construction, or other surveys. As soon as adverse weather conditions end, the other users may start to generate the risks for the survey performance forcing the survey cancellation or its reorganization.

The last of the risks identified is a technical factor, which covers situations such as equipment failure, including vessel breakdown resulting from weather conditions. The most common causes of failures include random events, poor maintenance of equipment or its usage without following instructions, lack of personal responsibility for the technical state of equipment in

the survey team, and their lack of experience in setting the weather limits for handling, and, primarily, safe loading of the measuring equipment on board.

All of the risks identified have been classified in terms of their causes, results, and occurrence probability (Table 2). With regard to their cause, the risks were categorized into two groups: the risks caused by external factors, that is, ones outside human control (such as forces of nature) and the risks caused by internal factors associated with the way the project was planned and the human factor. For each risk, its consequences for the project implementation and the occurrence probability have also been ascribed. The risks identified are indicated with symbols R1, R2, R3, R4, and R5.

c. Risk assessment and quantification

Each type of risk can be assessed in terms of its probability and severity. The measurement of risk makes it possible to determine the overall level of risk in a project as well as its value expressed in terms of cost or duration. This value often determines the level of reserves or their part (Pritchard 2001). To assess the risk associated with weather conditions, a probability and consequence class assessment matrix has been developed for the delays in completion of survey works at sea in relation to the work schedule. Probability of risk occurrence and impact on the work schedule have been determined for each type of risk. The probability of the risk occurrence was determined in percentage. Very unlikely events (less than 1% chance) are not expected to occur but cannot be excluded. Unlikely events (1%–10% chance) mean such an event occurred in the past and cannot be completely ignored. Probable events (10%–35% chance) occurred in the past (but are not common) and even though the conditions for the implementation of the present project are different, they are quite a real possibility. Very probable events (35%–60% chance) occurred several times in the last few years, whereas almost certain events (more than 60% chance) occurred frequently in previous projects.

time	very low	low	moderate	high	very high
	< 2 weeks	2–4 weeks	1–2 months	2–4 months	> 4 months
almost certain (>60%)					
very probable (35–60%)					R1
probable (10–35 %)			R2		
unlikely (1–10%)		R3, R5	R4		
very unlikely (<1%)					

low	moderate	high
-----	----------	------

FIG. 2. Risk classification matrix, as developed from research data by the Maritime Institute of the Gdynia Maritime University.

The source data for the process of creating systems of assessment are the assessments of the probabilities and severities of individual types of risk by people involved in the implementation of offshore projects. The impact scale of each risk was determined in terms of its consequences on the project schedule and time delays. Consequences of very low impact were defined as delays of less than 2 weeks. Low impact was determined as 2–4-week delays, moderate impact as 1–2-month delays, high impact as 2–4-month delays, and very high impact as more than 4 months. In Fig. 2 the red cells indicate that the risk is unacceptable, and the yellow cells present a risk that can hardly be accepted. Such a risk calls for counteractive measures. A risk classified in the highest group (red cells) is of top priority, and the information on it must be passed to the upper-level management officers, for example, the project council, the contract manager on the ordering party's side, or even the investor. If the risk is marked as a green cell, it means it is acceptable.

d. Risk response planning

The development of risk response methods is a key stage in the risk management process. The process specifies the actions through which the problems with particular types of risk identified during the identification, classification and quantification processes are to be solved (Pritchard 2001) in response to the negative risks of projects, the “Project Management Body of Knowledge” describes four strategies: avoid, transfer, mitigate, and accept. According to Pritchard (2001), avoidance is modifying the project in order to eliminate a given risk or the factors that determine the risk by, for example, increasing the amount of time intended for the project implementation. Transfer strategy is transferring the adverse effects and responsibility for the consequences of risk onto an individual or

an organization, for example, insurance, adequate provisions in the contract, bank guarantees, or warranty. Risk transfer does not remove it from the project but forces others to deal with it, and it should therefore be used with caution (Wyrożębski 2012). Risk mitigation is the most common of all risk response strategies. This process involves taking specific actions to reduce the probability and/or severity of a risk. The manager must develop a risk mitigation plan and then oversee the activities carried out according to that plan. Risk mitigation may involve the reduction of the probability of a risk occurring or the minimization of its severity if the risk does occur (Pritchard 2001). Acceptance means introducing no changes in the project plan in relation to a specific risk. Based on the gathered information we have compiled examples of response strategies for identified weather-related risks, which will be presented in section 3c.

e. Determination of weather conditions at sea based on data from the models

We analyzed wind conditions and significant wave heights for the three selected points in the Polish EEZ in the southern Baltic (Table 1; Fig. 1). The analysis was based on the relevant data from a period of 7 years (March 2013–February 2020) obtained from the operational weather forecasting models for the Baltic Sea: the mesoscale model of the atmosphere unified model (UM) calculated operationally at the Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modeling, University of Warsaw (ICM UW) (Herman-Lżycki et al. 2002), and the wind-generated Wave Ocean Model (WAM) calculated at the Maritime Institute, Gdańsk (Komen et al. 1994). The analysis used model data calculated based on 4-km (wind) and 1 n mi (wave motion; 1 n mi = 1.852 km) grid cells for the points closest to the locations surveyed, with a time step of 1 h, from the prognostic calculations. Since the weather forecast calculations are operationally conducted four times per day (every 6 h up to 60 h ahead), for our purposes, data from the six earliest hours have been taken. Such a choice of model data guarantees that it mirrors the conditions prevailing at sea as closely as possible (Kałas et al. 2002).

In the calculations conducted for determination of the time available for the conducting of works in the sea area, it was accepted that the two parameters (wind conditions and significant wave heights) are of key importance and a situation in which both of them occur at once was considered. However, other factors hampering the conduct of works, for example, meteorological (icing, restricted visibility, etc.) and hydrological (ice conditions, strong currents, etc.) conditions or day lengths were ignored as, in the climate conditions of the southern Baltic, their significance in conducting preinvestment geophysical surveys is limited.

3. Results

a. Weather conditions at the selected points at sea

Taking into account the above assumptions, the results of the calculations of the time (in percent of the period analyzed) available during the entire year and individual months for the performance of offshore surveys described above are presented in Table 3 and Fig. 3.

TABLE 3. Time available (as a percentage of the entire period analyzed) for works at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea, by month (1–12). The wave data are derived from computation with WAM at the Maritime Institute. The wind data are derived from operational computations of weather forecasts from the mesoscale atmospheric UM at ICM UW.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Year
A	56.37	64.48	77.80	84.09	91.63	88.89	87.36	86.03	76.42	64.94	64.21	46.60	74.07
B	50.83	60.08	71.47	77.10	85.77	83.95	81.43	82.07	72.45	62.33	59.01	40.76	68.93
C	63.25	70.41	79.22	82.00	88.06	88.79	84.51	87.32	79.82	72.37	71.73	56.45	76.99

b. The wind and wave conditions in the sea areas of the southern Baltic

The analysis of the time available for conducting work at sea in selected locations of the Polish EEZ presented in [section 3a](#) demonstrates significant variability throughout the year. The most favorable conditions for conducting surveys are in the spring and summer months (from May to August). The proportion of time available for conducting work in this period exceeds 80%, reaching the maximum for the open sea area in May (86%–92%) and for the coastal waters in June (88%). In the autumn, this share decreases systematically, reaching the minimum in December of 41%–47% for the open sea area and 56% for the coastal waters. In the following winter and spring months, a gradual increase occurs there ([Table 3](#); [Fig. 3](#)). The greatest variability of the time available (up to 45%), as well as the lowest values occur at a considerable distance from the seashore (~40 m), while in its vicinity, the fluctuations between different seasons are smaller (up to 32%).

The presented possibilities of performing work at sea during the year are closely related to the climatic conditions of the southern Baltic areas. This becomes apparent when we take into account the average monthly wind speeds over the sea areas analyzed ([Table 4](#); [Fig. 4](#)) and the average monthly wave heights ([Table 5](#); [Fig. 5](#)). The highest average monthly wind speeds as well as the highest average wave heights occur in December. However, in relation to the annual averages, the highest average wind speeds occur in the eastern part of the EEZ (location A— 7.75 m s^{-1}), whereas the highest average wave heights occur in the western part (location B— 1.11 m). For the sea areas located at a relatively short distance from the coast (~10 m), these values are slightly lower— 7.01 m s^{-1} for the wind speed and 0.99 m for the wave height. In the period analyzed, the highest wind speed of 27.23 m s^{-1} was recorded on 5 December 2013 (location A), and the highest wave height of 6.92 m was on 6 December 2013 (location B).

c. Response plan for the weather-related risk

This section describes in detail identified weather-related risks and the proposals of response strategies ([Table 6](#)). Surveys timed for the storm period (R1) often happen as a result of the complexity of the project. Major investments, which may be planned for a period when the weather conditions at sea should, based on previous observations, be favorable for the implementation of offshore surveys, may get considerably extended in time, which means that an updated schedule will cover the stormy months. There are also projects in which surveys are scheduled for 12 months. The key condition for meeting the deadlines is the proper planning of the

work schedule and making allowances for possible departures from the original action plan with enough time margin for individual tasks. As an avoidance strategy, a risk weight has been calculated for each month of vessel's operation at sea in a specific location ([Table 7](#)). The risk weight is based on statistical data from a wave motion model ([section 3b](#)). The time reserve expressed in a few work days allotted for an individual task depending on the month and the location at which the works are conducted has been proposed. Another proposed mitigation strategy for the risk is its transfer by including in the contract additional provisions to transfer the risk of schedule extension due to the weather conditions unsuitable for survey implementation to the principal.

Severe weather conditions outside the storm period (R2) (e.g., thunderstorm) may occur in any month of survey conduct, thus possibly interrupting the measurements conducted at that time and, consequently, delaying the task completion. A proposed avoidance strategy suggests allocating a time reserve for individual tasks in the schedule to prevent possible deviations from the action plan. Another suggested form of a risk response is its transfer by including in the contract additional provisions to transfer the risk of schedule extension due to the weather conditions unsuitable for survey implementation to the principal. This, however, requires that terms such as “force majeure” and “boundary weather conditions” are clarified in the contract, and that the duration of adverse weather conditions included in the base of the contract value is clearly specified.

Failure to start surveys despite favorable weather conditions (R3) may occur on board the ship when a conflict arises between the captain and the party chief whether to start the measurement works. It may also happen that both decide the

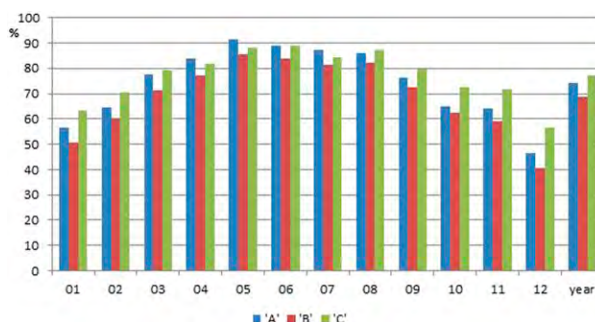


FIG. 3. The share of time available (as a percentage of the entire period analyzed) in individual months at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea.

TABLE 4. Average wind speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea, by month (1–12). The wind data are derived from operational computations of weather forecasts from the mesoscale atmospheric UM computed at the ICM UW.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Year
A	9.62	8.69	7.54	6.91	6.08	6.04	6.45	6.65	7.64	8.64	8.66	10.12	7.75
B	9.31	8.39	7.37	6.85	6.12	6.1	6.36	6.54	7.42	8.13	8.68	9.48	7.56
C	8.59	7.71	6.73	6.51	5.68	5.66	6.17	5.97	6.83	7.54	7.62	9.16	7.01

ship should not leave the port despite good weather. Decisions on suspending operations due to weather conditions should be made by the party chief and the captain after joint consultations and weather analysis (forecast and the comparison of the forecast with the current state as well as the recent forecast accuracy). A proposed strategy is mitigation of the risk. The analysis should be aimed at ensuring safe working conditions for people and acceptable conditions for data acquisition. It is proposed to consider the correlation between the available (at least two) weather forecasts, and the correlation of the forecast with the current conditions. In case of discrepancies between the forecasts, increased caution should be exercised, and when the forecasts do not envisage the current conditions, the time reserve should be additionally increased while making decisions. It is also proposed to ban the crew from disembarking the ship during its stay in a port. An introduction of such a ban is supposed to ensure a quick mobilization and readiness of the ship to begin survey activities.

Measuring equipment breakdown (R4), including ships, may be random events or consequences of improper maintenance as well as noncompliance with procedures or instructions on the use of a given device. Consequently, instead of conducting measurements in a spell of favorable weather, the ship remains in port until the necessary repairs are made. The mitigation strategy for the risk of a breakdown is proposed by regular maintenance, ongoing repairs and services of the ship, and the measuring equipment. Another example is to provide training and allow the crew to constantly develop their skills, also during their stay in port. The best practice mitigating the risk of unplanned lapses in the implementation of a project is to delegate the responsibility for individual elements of the measurement sets to individual risk owners and a daily control of their commitment to mitigating the risk impacts. Usually, this control is conducted via toolbox talks organized in daily cycles for each shift.

The last identified weather-related risk is possible conflict with other users of the sea area (R5). The proposed strategy is to avoid the conflicts within the survey area where several research vessels conduct surveys simultaneously, it is necessary to set the priority for each vessel and each activity. The captains of research vessels in advance must have knowledge about the planned presence of other vessels in the survey area.

4. Discussion

a. Reference to the main research objectives

The aim of the research was to develop the weather risk management plan for preinvestment geophysical surveys at

sea. For this purpose, identification of the weather-related risks was made. All identified risks were assessed, quantified, and qualified, and for each risk a response plan was created.

b. Summary of the main findings of the article

Five weather-related risks were identified: surveys timed for the storm period (R1), severe weather conditions outside the storm period (R2), failure to start surveys despite favorable weather conditions (R3), breakdown of measuring gear (R4), and possible conflicts with other users of the sea area (R5). To our best knowledge, this work is the first one that undertook the identification of weather-related risks in the implementation of preinvestment surveys in offshore projects. However, weather is a source of risks in many types of other economic activities, for example, agriculture (Gobin 2017), construction (Al-Zarrad et al. 2017), tourism (Franzoni and Pelizzari 2016), transport (Meyer et al. 2012), or energy (Wieczorek-Kosmala 2020). Unfavorable weather conditions often have significant impact on demand or, in extreme cases, may prevent the normal functioning of a particular entity or group of entities in a given location. Yet the strength of the weather risk impact is not the same in every case (Mentel and Nakonieczny 2019). According to Barrieu and Scalett (2010) the impact of weather is also very predictable: the same causes will always lead to the same effects. Consequently, development risk response strategy is crucial.

Risk R1 was found to occur in projects in which the implementation time lasts several months or its original duration is extended. Risk sources have been identified as both external and internal. Internal sources were listed as inadequate planning of work schedule when the survey was arranged in a period of unfavorable weather at sea; external sources were listed when the implementation of the project was delayed due to reasons beyond peoples' control. The occurrence of such an event was determined with high probability and a very high

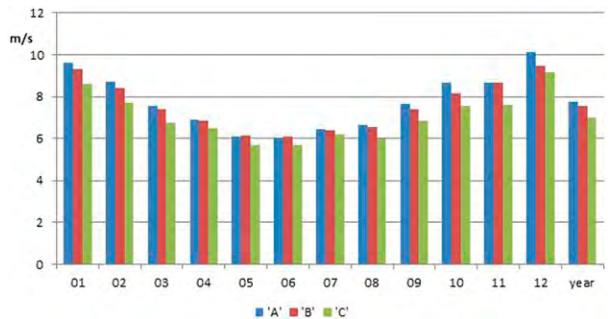


FIG. 4. Mean wind speeds ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) by month at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea.

TABLE 5. Mean wave heights (m) at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea, by month (1–12). The wave data are derived from computation with WAM at the Maritime Institute.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Year
A	0.9	0.76	0.72	0.69	0.56	0.57	0.66	0.53	0.7	0.79	0.73	1.02	0.72
B	1.49	1.27	1.11	0.98	0.78	0.79	0.88	0.82	1.06	1.29	1.23	1.65	1.11
C	1.26	1.09	1.01	0.91	0.77	0.72	0.79	0.75	0.95	1.12	1.09	1.34	0.99

impact on the work schedule with consequences on the implementation time of the project that could be extended for even more than 4 months. According to Naresh et al. (2021) a 7-day weather forecast is about 80% reliable. Shorter time scales are more so with a 5-day weather forecast about 90% correct. Forecasts longer than seven days, especially 10-day forecasts or longer tends to be only about 50% accurate. As the atmosphere is constantly changing, estimates over long periods have proved to be very difficult to model and predict. The strategy for the risk avoidance is to create a special time reserve (a risk weight) expressed in a work days, which depends on the month of the year and the location at which the works are conducted. The proposed risk weights are based on statistical data from a wave motion model. In our research, three different locations were selected to show the variation in sea conditions at the same time. According to Barrieu and Scailett (2010), weather risk has some specificities as compared with other sources of economic risk: in particular, it is a local geographical risk, which cannot be controlled. Analyzing the above, it becomes clear that addressing the R1 risk was based on a regional analysis of relevant parameters. According to Gajewski et al. (2016) and Kałas and Szefer (2016) information from several different points is enough to assess the hydrodynamic conditions for larger, adjacent areas in the Baltic Sea, thus our results should ensure representativeness for the potential survey areas, which can be located at presented measuring points (Fig. 1).

The statistics obtained from the wave motion model indicate that the weather conditions in the period from March to September are much more favorable for conducting surveys at sea than in October–February. Scheduling work for the summer period does not, however, guarantee the continuity of work. Although the average wave height at both survey points are within 1–1.3 m throughout the year, the maximum wave height reaches a minimum of 3 m. Storms can occur during the whole year and the time a vessel waits in the port for favorable weather conditions can be just as long in the summer as in the winter months. Relative to the model statistics, the actual standby time due to unfavorable weather in the months selected is longer. The completed survey campaigns provided data on the weather standbys in individual months of the ships engaged in the surveys. The collection of continuous data covering several years of conducting such surveys in the Polish EEZ was, however, impossible. Since all the projects considered are commercial projects and the data collected are subject to a confidentiality clause, we cannot disclose their details. We can, nevertheless, compare the measurements made in selected months. In May, the standby caused by the unfavorable weather conditions during the geophysical

surveys conducted at that time constituted 40% in 2011, and 42% in 2020. The statistical data from the model indicate that unfavorable weather conditions in May for all three possible locations reach at most 15%. In June 2020, the weather-related standby was 33%, and the statistical data indicate again about 15%. In October 2016, one of the ships stayed in port 93% of the time due to bad weather conditions, while the statistics show that it is possible to conduct surveys almost 65% of the time. In November 2017, the waiting time for acceptable weather was 58%.

Weather phenomena are seasonal and change over time. An example is the occurrence of seasons. This does not mean, however, that weather phenomena are predictable within given seasons, but only that there are certain features specific to a given period. Severe weather conditions outside the storm period (R2) may occur in any month of survey conduct. Probability of such an event was determined as probable with consequences to the schedule with a delay even of up to two months. The one-time environmental impact of R2 is much smaller than that of the R1 risk, but the overall environmental impact, measured over a longer period, is noteworthy. A first proposed risk response strategy was avoidance. As we have no influence on the weather conditions, we can plan to schedule activities in such a way that we allow for additional time reserves in the event of storms or sudden weather changes.

The second proposed risk response strategy for R1 and R2 is transfer by including in the contract additional provisions to transfer the risk of schedule extension due to the weather conditions unsuitable for survey implementation to the principal.

Failure to start surveys despite favorable weather conditions (R3) was determined as unlikely even though such an event occurred in the past. Consequences to the schedule are determined

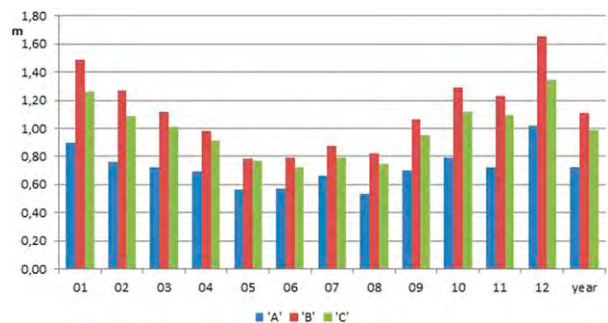


FIG. 5. Mean wave heights (m) by month at the selected points in the Polish EEZ in the Baltic Sea.

TABLE 6. The summary of strategies for identified weather-related risks, with examples.

Risk	Strategy	Example
R1	Avoidance	Using statistical data from a wave motion model for time reserve expressed in a few workdays allotted for an individual task depending on the month and the location at which the works are conducted
	Transfer	Including in the contract additional provisions to transfer the risk of schedule extension due to the weather conditions unsuitable for survey implementation to the principal Clarifying in the contract terms such as “force majeure” and “boundary weather conditions”
R2	Avoidance	Considering possible deviations from the action plan and allocating a time reserve for individual tasks in the schedule
	Transfer	Including in the contract additional provisions to transfer the risk of schedule extension due to the weather conditions unsuitable for survey implementation to the principal2 Clarifying in the contract terms such as “force majeure” and “boundary weather conditions”
R3	Mitigation	Making decisions on suspending operations due to weather conditions by the party chief and the captain after joint consultations Regular weather analysis (comparison of the forecast with the current state as well as the recent forecast accuracy) Banning the crew from disembarking from the ship during its stay in a port to ensure a quick mobilization and readiness of the ship to begin a survey cruise
R4	Mitigation	Regular maintenance, ongoing repairs, and services of the ship and the measuring equipment Providing training and allowing the crew to constantly develop their skills, also during their stay in port Delegating the responsibility for individual elements of the measurement sets to individual risk owners and a daily control of their commitment
R5	Avoidance	Setting the priority for each vessel and each activity Informing the captains of research vessels in advance about the planned presence of other vessels in the survey area

as low (2–4 weeks). Source of the risk is specified as internal and caused by human error. The proposed response strategy is mitigation by allowing joint decisions on suspending operations due to weather conditions by the party chief and the captain. Although the accuracy of weather forecasting has increased over time, it is not yet 100% accurate (Naresh et al. 2021). Taking into account the above regular weather analysis from several sources is necessary.

Measurement gear breakdown (R4) was determined as an unlikely event that can lead, among other results, to vessel layover despite favorable weather conditions and, in consequence, the project time extension frames up to 2 months. Source of the risk was determined as both external and internal caused by organization or technical issues. The manifestation of external weather risk could be the damage of infrastructure or survey equipment, which is often a result of “weather surprises,” according to Wiczorek-Kosmala (2020) these kinds of events also have low frequency but potentially high consequences. Internal sources have organizational nature such as lack of proper procedures, noncompliance with procedures or instructions on the use of a given device. This type of weather risk exposure could be hedged with mitigation by regular maintenance of the equipment or providing training to the surveyors (Table 6).

Possible conflict with other users of the sea area (R5) was determined as unlikely with consequence to the schedules determined as low (2–4 weeks). The source was specified as external caused by organizational issues. The suggested risk response strategy is avoidance by setting the priority for each vessel and each activity.

Analyzing the above, it becomes clear that the risks identified as unlikely (R3, R4, R5) occurring individually have little consequences for the project implementation. The effects can be serious, when the accumulation of risks occurs or when we sum up their occurrence. Moreover, in the case of R3, while its

frequency may be low, the damage caused in this case may be very severe.

c. Limitations of our research

This particular study has some limitations that are due to the sample size: there was only one company (Maritime Institute) operating in Poland that was the subject of this study. Because of the great experience of the Maritime Institute and a large number of completed offshore projects, we found that the derived results led to some interesting findings.

d. Recommendations for future research

Obtained results open the prospects for further research endeavors, as it raises several questions: How do companies operating in the offshore market deal with unpredictability of the weather conditions and therefore how do they manage weather risks while implementing investment projects and are the observations presented in this paper consistent with the situation in other companies operating in the market? Can there be identified any additional weather-related risks not mentioned in this paper that may depend on the scale of offshore investment projects or their specificities? What is the economic cost of weather-related delays on the offshore investment projects? Could a Baltic-wide recommendation, made by a decision-making body, mitigate economic consequences

TABLE 7. The R1 risk weight values determined for individual months (1–12) of the works conducted in survey locations A, B, and C, in days. Source: internal data.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	14	10	7	5	3	3	4	4	7	11	11	17
B	15	11	9	7	4	5	6	6	8	12	12	18
C	11	8	6	5	4	3	5	4	6	9	8	14

of weather risks? Last, how is this problem handled in other sea basins? To answer these questions, however, a wider examination needs to be conducted, with the application of methods that go beyond the information contained in reports prepared in one company and conducted only in the Polish EEZ. Further analysis of a larger number of documentation from projects carried out by other entities and interviews with a wider group of experts should provide enough material for more knowledge and experience on effective weather risk management.

5. Conclusions

In recent years, weather risk has become a very important category for many companies, despite the fact that the weather has always had an impact on the functioning of enterprises. The weather has a direct or indirect impact on the functioning of enterprises in the world, and the sectors most sensitive to changes in weather conditions are, in addition to the maritime industry, also energy, agriculture, tourism, and construction.

Weather is a key factor in the success of work carried out at sea. If it were possible to accurately forecast the weather for the entire period of any given project, the scope of the impact of the weather risk would be significantly reduced. Despite the development of forecast meteorology, today it is only possible to reliably forecast the weather in a period no longer than a few days, the longer the time horizon of the forecast, the lower the accuracy of the forecast. From the viewpoint of weather risk management in enterprises, this period is definitely too short (Czekaj 2016).

More and more often, project investors transfer the risks related to survey organization, including the weather conditions, onto the contractor. This paper reveals that finding the right weather-related risk analysis tool and creating a weather risk management plan will allow a reliable safe calculation of the project schedule and costs.

Effective weather risk management plan is fundamental. It should include weather-related risks identification and measurement, planning weather-related risk response methods, implementation of reserve plans, and allocation of reserves for any offshore project. Risk identification reduces the number of unforeseen events and the severity of their consequences. The paper proposes a risk analysis covering its qualification, assessment, and quantification. For this purpose, a risk matrix is created, which allows us to assess each identified risk probability and severity with the impact scale determined in terms of its consequences on the project schedule and time delays. Risks are classified as acceptable, risk that can hardly be accepted and as unacceptable risk. This allows awareness of the risks and enables the planning of appropriate measures to mitigate project delays.

The list of identified weather-related risks in the paper is far from being exhausted but they seem of universal and not uniquely Polish specific character. Moreover, the authors propose some concrete strategies for identified weather-related risks with examples. The main idea proposed to avoid the risk of surveys timed for the storm period is using statistical data from a wave motion model for time reserves expressed in the work days allotted for an individual task depending on the

month and the location at which the works are conducted. Recognition of the meteorological conditions in the planned survey area is crucial for risk assessment and work schedule planning. Additional time reserves in the event of storms or sudden weather changes, however, should be taken into account throughout the year when planning activities at sea. Weather is also an indirect cause of complications and delays in conducting research. The ones we recognized are failure to start surveys despite favorable weather conditions, measurement gear breakdown or possible conflict with other users of the sea area. The present case can be treated as a starting point for more profound examinations of weather risk management plan in offshore projects.

In summary, this study is a step toward a quantitative method for generating satisfactory and optimal risk response plans to address project process weather-related risk factors. Our hope is that this research can provide an effective weather risk response tool to support offshore project stakeholders in improving their project's performance and ensuring its success.

Acknowledgments. The authors declare no conflict of interest.

Data availability statement. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon justified request.

REFERENCES

- Al-Zarrad, M. A., G. Moynihan, and S. Vereen, 2017: Weather derivatives as a risk management tool for construction projects. *Sixth CSCE-CRC Int. Construction Specialty Conf. 2017*, Vancouver, BC, Canada, Canadian Society for Civil Engineering, 1506–1514.
- Barrieu, P., and O. Scaillett, 2010: A primer on weather derivatives. *Uncertainty and Environmental Decision Making*, J. Filar and A. Haurie, Eds., International Series in Operations Research and Management Science, Vol. 138, Springer, 155–175, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1129-2_5.
- Campbell, S. D., and F. X. Diebold, 2005: Weather forecasting for weather derivatives. *J. Amer. Stat. Assoc.*, **100**, 6–16, <https://doi.org/10.1198/016214504000001051>.
- Chaouachi, A., C. F. Covrig, and M. Ardelean, 2017: Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*, **103**, 179–192, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.018>.
- Cogen, J., 2020: What is weather risk? Retailenergy, <http://www.retailenergy.com/articles/weather.htm>.
- Czekaj, Z., 2016: Derywaty pogodowe jako instrument zarządzania ryzykiem pogodowym (Weather derivatives as an instrument of weather risk management). *Ruch Prawniczy Ekon. Socjol.*, **78**, 217–228, <https://doi.org/10.14746/rpeis.2016.78.1.17>.
- Dalgic, Y., I. Lazakis, I. Dinwoodie, D. McMillan, and M. Revie, 2015: Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities. *Ocean Eng.*, **101**, 211–226, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.040>.
- Dedecca, J. G., R. A. Hakvoort, and J. Roland Ortt, 2016: Market strategies for offshore wind in Europe: A development and diffusion perspective. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **66**, 286–296, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.007>.

- Douard, F., C. Domecq, and W. Lair, 2012: A probabilistic approach to introduce risk measurement indicators to an offshore wind project evaluation—Improvement to an existing tool ECUME. *Energy Procedia*, **24**, 255–262, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.107>.
- Franzoni, S., and C. Pelizzari, 2016: Weather risk management in tourism industry. *Symphonya Emerging Issues in Management*, Milan, Italy, ISTEI 45–55, <https://doi.org/10.4468/2016.1.05franzoni.pelizzari>.
- Gajewski, L., J. Gajewski, K. Kałas, A. Staśkiewicz, and K. Szeffler, 2016: Optimum location of autonomous measurement stations on the southern Baltic. *Bull. Marit. Inst.*, **31**, 46–57.
- Gatzert, N., and T. Kosub, 2016: Risks and risk management of renewable energy projects: The case of onshore and offshore wind parks. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **60**, 982–998, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.103>.
- Gintautas, T., J. D. Sørensen, and S. R. Vatne, 2016: Towards a risk-based decision support for offshore wind turbine installation and operation & maintenance. *Energy Procedia*, **94**, 207–217, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.225>.
- Gobin, A., 2017: Weather related risks in Belgian arable agriculture. *Agric. Syst.*, **159**, 225–236, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.009>.
- Hac, B., and Coauthors, 2011a: Badania przedinwestycyjne w rejonach przewidywanej eksploatacji kruszyw: Raport z wykonania prac morskich Pola IIA, IIB, IIC (Pre-investment research in the areas of expected aggregate exploitation: Fields IIA, IIB, IIC sea works report). Maritime Institute Internal Publ. 6615, 33 pp.
- , and Coauthors, 2011b: Badania przedinwestycyjne w rejonach przewidywanej eksploatacji kruszyw: Raport z wykonania prac morskich Pola I (Pre-investment research in the areas of expected aggregate exploitation: Field I sea works report). Maritime Institute Internal Publ. 6614, 23 pp.
- Herman-Iżycki, L., B. Jakubiak, K. Nowiński, and B. Niezgódka, 2002: UMPL—The numerical weather prediction system for operational applications. *Research Works Based on the ICM's UMPL Numerical Weather Prediction System Results*, Wydawnictwa ICM, 14–27.
- Jamshidi, A., F. Jamshidi, D. Ait-Kadi, and A. Ramudhin, 2019: Applied risk analysis approaches for maintenance of offshore wind turbines: a literature review. *IFAC-PapersOnLine*, **52**, 1075–1078, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.338>.
- Kałas, M., and K. Szeffler, 2016: Applications of correlation functions to determine optimal locations of autonomous measuring buoys in the southern Baltic Sea. *Bull. Marit. Inst.*, **31**, 44–45.
- , A. Staśkiewicz, J. Gajewski, and K. Szeffler, 2002: Wind characteristics in the Gulf of Gdańsk area from HIRLAM and UMPL models in comparison with the measurements from MIG-1 buoy. *J. Environ. Chem. Phys.*, **24**, 206–212.
- Komen, G. J., L. Cavalieri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. N. Janssen, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, 554 pp.
- Lapeña, P., K. M. Blanca, S. J. M. H. Hulscher, and A. Stein, 2010: Environmental impact assessment of offshore wind farms: A simulation-based approach. *J. Appl. Ecol.*, **47**, 1110–1118, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01850.x>.
- Leimeister, M., and A. Kolios, 2018: A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **91**, 1065–1076, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>.
- Li, X., and Coauthors, 2016: A decision support system for strategic maintenance planning in offshore wind farms. *Renewable Energy*, **99**, 784–799, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.037>.
- Mentel, G., and J. Nakonieczny, 2019: Weather risk and energy consumption in Poland. *Energy Transformation towards Sustainability*, Elsevier, 113–132.
- Meyer, M. D., E. Rowan, M. J. Savonis, and A. Choate, 2012: Integrating extreme weather risk into transportation asset management. American Association of State Highway and Transportation Officials Doc., 19 pp.
- Ministry of Climate and Environment, 2020: Energy Policy of Poland until 2040. Government of Poland Rep., 102 pp., <https://www.gov.pl/attachment/62a054de-0a3d-444d-a969-90a89502df94>.
- Mraoua, M., and D. Bari, 2007: Temperature stochastic modeling and weather derivatives pricing: Empirical study with Moroccan data. *Afrika Stat.*, **2**, 22–43, <https://doi.org/10.4314/afst.v2i1.46865>.
- Myhr, A., C. Bjerkseter, A. Ågotnes, and T. A. Nygaard, 2014: Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a lifecycle perspective. *Renewable Energy*, **66**, 714–728, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.017>.
- Mytilinou, V., and A. J. Kolios, 2019: Techno-economic optimisation of offshore wind farms based on life cycle cost analysis on the UK. *Renewable Energy*, **132**, 439–454, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.146>.
- Nareesh, R. K., S. Kumar, and E. Narwal, 2021: Weather forecasting. *Artificial Intelligence in Indian Agriculture*, R. K. Nareesh et al., Eds., Jaya Publishing, 1–16.
- Nielsen, J. J., and J. D. Sørensen, 2011: On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **96**, 218–229, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.007>.
- OSPAR Commission, 2008: Assessment of the environmental impact of offshore wind-farms. Biodiversity Series Doc., 35 pp., <https://www.ospar.org/documents?v=7114>.
- Poulsen, T., and R. Lema, 2017: Is the supply chain ready for the green transformation? The case of offshore wind logistics. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **73**, 758–771, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.181>.
- Pritchard, C., 2001: *Risk Management, Concepts and Guidance*. 2nd ed. ESI International, 340 pp.
- Polska Grupa Energetyczna, 2015: The first Polish nuclear power plant. Project Information Sheet PGE EJ 1 sp. z o.o., 220 pp., https://2015-2019.kormany.hu/download/7/b1/a0000/Environmental%20Scoping%20Report%20PGE_SCN_DES_0001_EN.pdf.
- Project Management Institute, 2000: *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. Project Management Institute, 592 pp.
- Shafiee, M., 2015: A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. *Expert Syst. Appl.*, **42**, 2143–2152, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.019>.
- , F. Brennan, and I. A. Espinosa, 2015: Towards whole life-cycle costing of large-scale offshore wind farms. *European Wind Energy Association Annual Conf. and Exhibition 2015*, Paris, France, European Wind Energy Association, 140–144.
- Stryjecki, M., and Coauthors, 2019: Baltic pipe offshore pipeline—Polish part. Environmental Impact Assessment Rep., 167 pp.
- Szeffler, K., and Coauthors, 2017: Report on the environmental impact of the Baltica Offshore Wind Farm (in Polish). Consortium of Maritime Institute in Gdańsk and MEWO

- Rep., 500 pp., http://www.portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/morskafarmawiatrowa-Baltica/Raport_OOS_PL_vA.pdf.
- Tseng, Y. C., Y. M. Lee, and S. J. Liao, 2017: An integrated assessment framework of offshore wind power projects applying equator principles and social life cycle assessment. *Sustainability*, **9**, 1822, <https://doi.org/10.3390/su9101822>.
- Wieczorek-Kosmala, M., 2020: Weather risk management in energy sector: The Polish case. *Energies*, **13**, 945, <https://doi.org/10.3390/en13040945>.
- Williams, H., I. Masters, D. Pletsas, C. Fuentes Grunewald, R. Callaway, G. Dalton, and M. Blanch, 2017: A risk assessment methodology for combining marine renewables with other blue economy activities via multi-use of spaces and platforms. *Proc. 12th European Wave and Tidal Energy Conf.*, Cork, Ireland, EWTEC, 817-1–817-9.
- WindEurope, 2020: Offshore wind in Europe—Key trends and statistics 2019. WindEurope Rep., 40 pp., <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>.
- Wyrozębski, P., 2012: Zarządzanie ryzykiem w projekcie (Project risk management). *Nowoczesne Zarządzanie Projektami (Modern Project Management)*, M. Trocki, Ed., Polish Economic Society, 296–306.
- Yu, J., 2018: 5 basic methods for risk management. Investopedia, <https://www.investopedia.com/articles/investing-strategy/082816/methods-handling-risk-quick-guide.asp>.

Publikacja nr 2

Artykuł naukowy pt.:

Many faces of survey equipment failures during marine research at sea – risk analysis

PLoS ONE, 2022, 17(8): e0272960, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960>

autorzy: **Maria Kubacka**, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz

Publikacja analizuje różnorodne ryzyka związane z prowadzeniem badań morskich, ze szczególnym uwzględnieniem awarii sprzętu pomiarowego. W artykule podkreślono wpływ niekorzystnych warunków pogodowych, takich jak wysokie fale czy silne wiatry, na funkcjonowanie i niezawodność urządzeń do badań geofizycznych, geotechnicznych i środowiskowych. Przedstawiono również ramy analizy ryzyka, które pozwalają ograniczyć te wyzwania i zwiększyć efektywność operacyjną podczas kampanii pomiarowych.

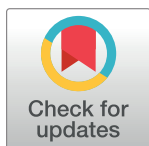
RESEARCH ARTICLE

Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis

Maria Kubacka^{1*}, Lucjan Gajewski², Marcin Burchacz¹, Maciej Matczak¹, Paweł Janowski¹, Jakub Piotrowicz¹

1 Gdynia Maritime University, Maritime Institute, Gdańsk, Pomorskie, Poland, **2** MEWO S.A., Straszyn, Pomorskie, Poland

* maria.kubacka@im.umg.edu.pl



Abstract

Research of the marine environment is still a huge challenge for humanity. Each survey campaign is a complex project, where research vessels and relevant survey equipment is used. One of the problems that limit the success of working at sea are failures of survey equipment. The aim of this paper was to identify the most common survey equipment failures during marine research, find their causes and analyze identified risks. The authors employ risk assessment methodology in maritime research at sea and present its practical utility and contribution in social and organizational development. For this purpose we based the analysis on the review of relevant project documentation (Daily Progress Reports, Observation Cards) and the questionnaire addressed to specialists who carry out their survey work on board research vessels and also people involved in the implementation of off-shore projects. The research reveals that 76.3% respondents participated in a project which had to be stopped due to a failure of the survey equipment that required return to the port which highlights that the problem which was analyzed is of particular importance. The questionnaire form was designed to obtain as much information as possible on the types of failures with examples and also their causes according to three groups: human factors, technical factors and forces of nature. Twelve risks were identified and analyzed. The authors also stress the relationship between the quality of research project management and its implementation in the context of the failure rate of measuring equipment.

OPEN ACCESS

Citation: Kubacka M, Gajewski L, Burchacz M, Matczak M, Janowski P, Piotrowicz J (2022) Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis. PLoS ONE 17(8): e0272960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960>

Editor: Abroon Qazi, American University of Sharjah, UNITED ARAB EMIRATES

Received: October 15, 2021

Accepted: July 31, 2022

Published: August 26, 2022

Copyright: © 2022 Kubacka et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: The data underlying the results presented in the study are attached as [Supporting Information](#) files (Questionnaire resp. xls).

Funding: The authors received no specific funding for this work.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Introduction

Context of the study

According to the National Oceanic and Atmospheric Administration [1] nearly 71% of the Earth's surface is covered with water and oceans which hold about 96.5% of all Earth's water. More than 80% of our oceans are unmapped, unobserved and unexplored. The investigation of the marine environment still remains one of humanity's greatest challenges. Maritime industries constitute an important branch of the world economy, which includes: petroleum industry [2, 3], maritime industry [4, 5] and seafood industry [6, 7]. They all require human action at sea supported by research vessels and relevant survey equipment.

Currently the fleet of research vessels (R/V) being crucial assets during the environmental investigation of the marine environment consists of over 880 units worldwide. Despite the fact that vessels are an extremely important element of the survey process, their usefulness is defined by a selection of relevant survey instruments installed onboard. Due to the complexity and diversity of marine environment investigations (e.g. habitat monitoring, geophysical and geotechnical investigations, search for wrecks and artefacts, exploration of mineral resources, assistance in the implementation of investments at sea) as well as variability of operation areas and duration of survey campaigns, proper selection of equipment available onboard is crucial. Achieving an appropriate level of equipment performance efficiency requires its proper selection, both in terms of quantity (redundancy) and quality. In both cases, it is related to the cost of research, therefore the identification of basic failures and their consequences is one of the key elements in the preparation and implementation of offshore projects.

What's more, equipment performance efficiency depends on the ever-changing sea conditions and weather conditions that influence sensitivity of the equipment and vessels [8] as well as location at a distance from the coast [9]. The success of offshore projects depends on many factors [10, 11], also on the efficient conduct of planned survey campaigns.

The failures themselves may therefore be the result of quality deficiencies in the equipment, but also result from extreme research conditions, and finally from human errors that may occur under such conditions. Therefore, the appropriate assessment of the risk associated with the operated equipment requires identification of basic problems occurring during the research and then estimating their impact on the effective implementation of the project. As a result, it is possible to manage equipment risks and minimise their impact on the costs and timeliness of offshore research.

Risk of equipment failures in the offshore projects

The concept of risk was introduced to management in 1964 by DB Hertz [12] and gradually accepted in the other areas of the field, including project management [13]. After the identification process, having a complete list of risks, the next step is to proceed to the qualitative risk assessment (QRA). It describes the risks in non-numerical terms and categorises them depending on their importance for the given project and the impact on the level of achievement of the objectives. When prioritizing risks we apply, among others, the probability and impact matrix [14–16]. According to Dziadosz and Rejment [17] or Mahamid [18], it is the most useful method of project risk analysis, identification and initial risk assessment.

A Guide to the Project Management Body of Knowledge [19] defines risk as an uncertain event or condition, that if it occurs, has a positive or negative effect on a project's objective. Projects in Controlled Environments (PRINCE2) methodology gives the definition of risk consistent with that contained in the Management of Risk (M_o_R) methodology: a risk is an uncertain event or set of uncertain events that, if they occurred, would affect the objectives of the project. BS ISO 31000 defines risk as an effect of uncertainty on objectives that is often expressed in terms of a combination of the consequences of an event and the associated likelihood (probability) of occurrence [20].

According to Olubiyo [21] equipment failure can be any event in which equipment cannot accomplish its intended purpose or task. As an equipment failure risk while working at sea in this paper the authors understand an event or set of events when the survey device does not fulfil its role and the data is not collected or is collected with errors.

When managers do not address risks that have a negative impact on project effectiveness, it may result in various problems such as cost overruns, schedule delays and poor quality of collected data. Thus, relevant assessment and management of risk becomes a significant element

of the project development and implementation. The more complicated and sensitive the project is, the more attention should be paid to risk management methods and tools. The investigation of the marine environment is regarded as a particularly demanding area of economic activity, so relevant standards have been developed.

An international standard for the safe management and operation of ships and for pollution prevention is specified by the International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention (ISM Code) [22]. A safety management system (SMS) that fulfils the objectives of the code should be established and implemented by shipowner or charter. One of the main requirements of the code is a risk assessment. According to IMO [22] all identified risks to vessels, personnel and environment should be assessed and appropriate safeguards should be established by the company. In order to ensure the highest level of safety for the implementation of marine research, risk assessments of functions on board and the tasks performed are conducted. Before starting any research activity, each staff member is obliged to read the document describing the associated risks. It must also be noted that the process of risk assessment and management should not only be correctly formulated as well as implemented but should also be regularly evaluated so that the objectives of the code are achieved. However, despite following the recommended procedures, accidents and failures do happen.

When analyzing the above it becomes clear that addressing risks should be based on analysis of information gathered from relevant people directly involved in implementation of surveys at sea. The authors goal was to obtain the greatest amount of information about the causes of failures and what factors affect the failures. Understanding the root cause of an event is key to preventing reoccurrence and addressing any existing issues with operating procedures, equipment design, maintenance practices and other.

Completely separate from ISM Code is the assessment of risks associated with the management of the survey process, including the management of risks associated with the use of specialised survey equipment during offshore survey work. Due to the very specific and niche nature of this type of activity, there is no uniform standard. Therefore, it would be useful to create dedicated systems for assessing and managing risk in the marine survey process.

State of knowledge

The issue of equipment failures and related risk assessment is widely discussed in literature [23–26], however no specific researchers devoted to identification of the marine research equipment failure and associated risk have been identified. Narrow specialisation of such activities with a dedicated subsea equipment structure, the scientific basis of research, commonly disregarding their economic efficiency, as well as marginal importance of the research phase (being the pre-investment part of project implementation) in the maritime investments (from the investor perspective), are only the basic factors of this situation.

In literature the marine equipment failure is mostly related to the offshore oil & gas industry, where economic or environmental consequences are elaborated and predicted by selected methods or models [27, 28]. Furthermore, the technical aspects of failures of offshore processing equipment and quantitative approach to risk (QRA) are the main considerations [29]. Researchers are also traditionally focused on the technical aspects of failure and risk [30]. In some research, however, additional factors are investigated. The concepts of human reliability analysis (HRA) approaches incorporate human performance and the resulting human errors in QRA for a more holistic overview of the associated risks with offshore facilities [31]. Thus, the STAMP-HFACS methodology can express interactions between people, technical equipment, and the environment [32]. The complex quantitative risk modelling methodologies can

also commonly reflect and analyse specific factors with respect to human, operational and organisational risk influencing factors [30].

Investigating the causes and effects of failures in offshore measurement equipment, as well as the risks associated with these events is, therefore, an area that requires attention. This is especially important for organisations and enterprises carrying out sea floor research, both for science and industry.

Research objectives

This study focused on the following research objectives: (a) identification of the most common survey equipment failures while working at sea, (b) finding causes of survey equipment failures, (c) identified risks assessment, (d) creating response plan for the identified survey-equipment failures risks.

A scarce peer-reviewed research was found in a literature review regarding the more specific risks associated with survey equipment failures while working at sea. This paper therefore attempts to fill this research gap by presenting an identified risk and its analysis that can be used in the risk identification process when planning implementation of the offshore projects. The authors decided to use unique data set of specific project documentation and results from the questionnaire conducted among surveyors working on the research vessels and other people directly involved in the implementation of offshore projects. Such data hasn't been previously used, which we confirmed after literature review.

This study comprises of the following parts:

- We discuss the general problems and risks associated with survey equipment failures during marine research at sea;
- We review documentation which allows identifying the most common survey equipment failures which took place during project implementation and divide them according to the cause of the problem: human factors, technical factors and forces of nature (independent of human influence);
- To get more detailed information, there was prepared a questionnaire for people working on research vessels and involved in the implementation of projects at sea;
- All the identified weather-related risks were assessed, quantified and qualified;
- The final part of the paper discusses identified risks and their causes as well as limitations of the research and recommendation for future investigations.

Materials and methods

Risk identification

According to Pritchard [14] risk identification is an organized and detailed activity aimed at detecting specific types of risk occurring in a given project, which is also a key stage in the whole risk management process. In this paper risk related to failures of survey equipment was identified. The necessary information was collected based on the information-gathering techniques (questionnaire) and the documentation review of the offshore investment projects implemented in cooperation with the Maritime Institute—Gdynia Maritime University and MEWO S.A. Both companies are located in Gdańsk, Poland.

Documentation review. For the purpose of this paper risk related to failures of survey equipment was identified. One of the techniques used was a documentation review which consisted of careful analysis of the relevant survey vessel's documents, with a clear goal to identify

the risks that may arise during the project implementation [14]. We analysed two types of documents: daily progress reports (DPR) and observation cards. The DPRs are filled in by the party chief and sent to the project manager every day for the ongoing control of work implementation and progress. The reports cover 24 hours and include, among others, the current position of the vessel, short descriptions of work performed on board, conducted operational works at sea, and a summary of work planned for the following 48 hours. In the DPR form a party chief comments and informs about events such as accidents, incidents or near misses. Information which were of particular interest included the number and duration of research vessels downtime caused by survey equipment breakdown as well as information about the type of failure.

The second type of documents that were analysed were observation cards which are an important element of continuous analysis and observation of current activities that take place in projects. This document was created as part of Integrated Management System and ISO 9001, 140001, 45001 (Lloyds Register) policy to allow observation and assessment of behaviour and activities of the vessel survey team. Observation cards are available to everyone involved in the implementation of the project, including the ship's crew and survey team. Using these documents all irregularities can be reported with details such as: location of occurrence, information if the event was related to their own personnel or contractors, give full event description and its causes as well as propose a solution.

In order to obtain information for the purposes of this article, 36 observation cards from the selected projects implemented by the Maritime Institute in 2019–2021 and the DPR from the seabed research projects carried out by the Maritime Institute and the consortium of Maritime Institute and MEWO S.A. were reviewed [33–38]. The research areas are indicated on the map below (Fig 1). The analysis of failures from the observation cards allowed to determine the frequency of occurrence of a given failure and its consequences for the project and delays for the schedule (duration of the failure).

Three factors contributing to equipment failure. On the basis of the above-mentioned documents, it was possible to identify the most frequently reported failure causes, which we divided into three groups:

1. human factor,
2. technical factor and
3. forces of nature.

According to Bařar et al. [39] human factors cover all of the actions revealing the relation between people and machines. Another definition says that human factors refer to environmental, organisational and job factors, as well as human and individual characteristics which influence behaviour at work in a way which can affect health and safety [40]. In the literature, we also find terms such as human error [41] and human element which, according to IMO, is recognized as a key element of the safety of life on board ships and a contributing factor to most of the casualties in the shipping sector. We took all of these into account as a human factor. Technical factors cover all technical issues which make survey conducting impossible. The forces of nature while working at sea are mainly related to the weather and waves which limit and make work at sea difficult. The factors also include all elements of the environment that affect the survey equipment and quality of measurements.

Questionnaire. Documentation review was the basis for creating a questionnaire that was to provide as detailed information as possible on the most common causes of survey equipment failures and specific examples of survey set breakdowns. In addition, the same set of events related to equipment failures was analyzed in terms of dependence of their occurrence

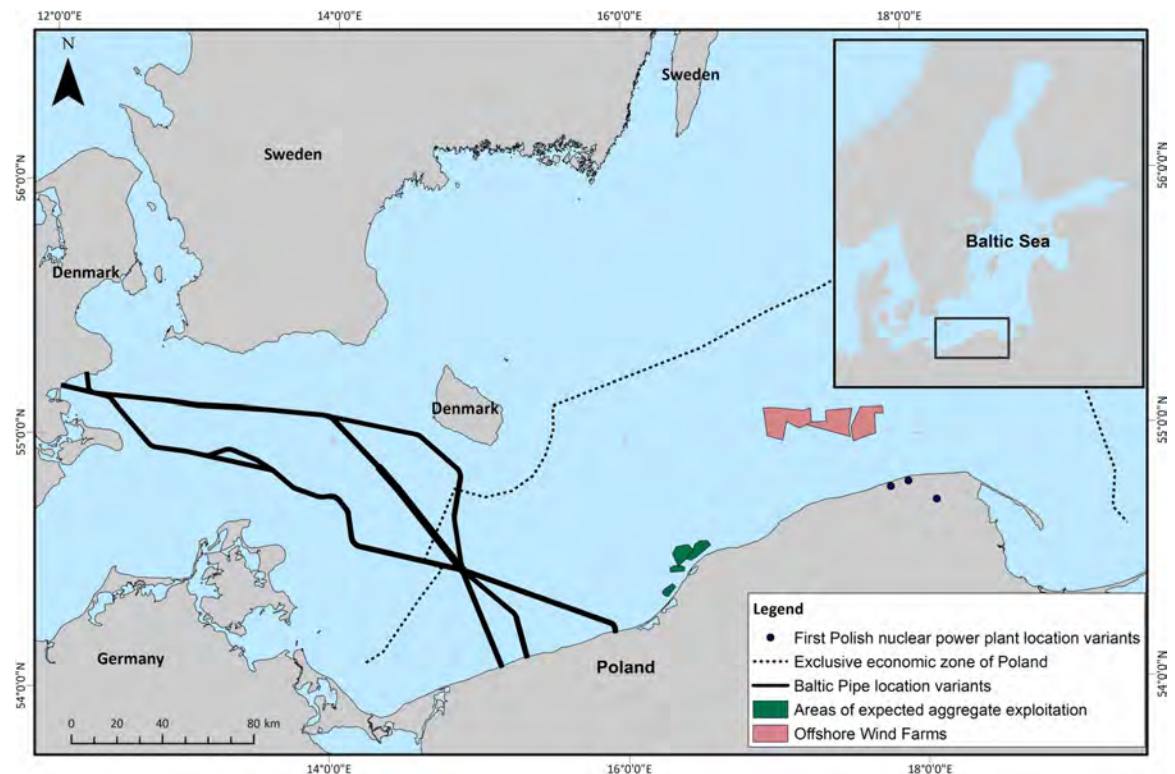


Fig 1. Map with marked areas for offshore investments where Maritime Institute and MEWO conducted pre-investment research used in the documentation review for this paper.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g001>

on the possibility of their prevention through proper project management. For the paper's purposes, the completely voluntary online survey on failures of measuring equipment was created and distributed among stakeholders as the bilingual Google-form (English version plus Polish translation). The survey was not approved by any IRB/ethics committee as it was anonymous and based on the answers given, participants (including their contact details/emails) could not be identified. The respondents have not been approached live, therefore no physical contact, risk of discomfort, inconvenience or psychological distress could have occurred.

The online survey consisted of a combination of both open and closed questions including rankings and choices of multiple answers.

The structure of questionnaire included:

- The initial information about questionnaire respondents' qualifications (surveyor, crew member, other—to define) and years of experience (four interval scales to choose from: less than one year, 1–5 years, 5–10 years and 10+ years)
- Question on participation in the project which had to be stopped due to a failure of the research vessel (Yes and No—i.e. positive and negative answer)
- Question on participation in project works which had to be stopped due to a failure of the survey equipment and vessel was required to return to the port (Yes and No—i.e. positive and negative answer)
- Both positive and negative answers lead to the next section on the main issues related to the failures of measuring equipment.

In the first two open questionnaire respondents had to describe: 1. the most common survey equipment failures encountered while working at sea; 2. the most memorable witnessed equipment failure onboard a vessel and cause of this failure.

The next part of the survey was dedicated to ranking the most common cause of measuring equipment (human error, forces of nature, technical factor) with scale from 1—the least common to 5—the most common).

The last section of the survey consisted of a few obligatory questions which used several survey methods: open questions, rankings of importance and questions of choices.

In terms of the most common human factor contributing to equipment failures, respondents could mark multiple answers (lack of caution, lack of qualifications or good training, rush, no compliance with the procedures, fatigue, poor work organisation) and add their own answer in the “other” section. The same method was used for the most common technical factor contributing to equipment failures (choice between two answers and “other” text to fill-in).

The survey ended with two open questions: list/description of witnessed failures of survey equipment caused by the forces of nature and question on sea basins where respondents operated.

The request to fill in the online survey was addressed primarily to surveyors, crew members, and other persons involved in performing research at sea. It was distributed internationally via email in March and April 2021 between involved stakeholders: surveyors, scientists, analytics and crew members e.g. IMOR research vessel crew and analytics, surveyors from Maritime Institute and the other research bodies, private companies such as MEWO S.A, International Research Ship Operators (IRSO), Polish Register of Shipping (PRS), and European Research Vessels Operators (ERVO) consisting of members from countries such as Belgium, Denmark, Finland, Germany, France, Italy and Spain. Some parties were asked to forward the link to the questionnaire in order to receive the largest number of results possible. In total, 200 individuals were approached of which 76 answered the survey which makes it a proper representative sample. The first answer was given on 31 March 2021 while the last one was received on 21 April 2021.

Risk assessment

In order to assess the risk associated with measuring equipment failures, a probability and consequence class assessment risk matrix was developed for the delays in completion of survey works at sea in relation to the work schedule. Probability of risk occurrence and impact on the work schedule were determined in a five-scale dimension for each type of identified risk on the basis of the analysed documents, answers provided in the survey and our subjective assessments [42]. The probability of the risk occurrence was determined in percentage. Highly unlikely events (less than 1% chance) are not expected to occur, but cannot be excluded. Unlikely events (11–30% chance) mean such an event occurred in the past and cannot be completely ignored. Probable events (31–60% chance) occurred in the past (but are not common) and even though the conditions for the implementation of the present project are different, they are quite a real possibility. Highly likely events (61–90% chance) occurred several times in the last few years, while almost certain events (more than 81% chance) occurred frequently in previous projects. The hazard severity was determined in terms of its consequences on the project schedule and time delays. Consequences of very low impact were defined as delays of less than 1 day. Low impact was determined as 1–2 days delay, moderate impact as 3–7 days delays, high impact as less than 2 weeks delay and very high impact as more than 2 weeks. Risk (R) is calculated as a combination of potential hazard Severity (S) and Probability (P) of occurrence of this hazard according to the following formula $R = P \times S$ (Fig 2).

Risk = P x S			Risk severity (S) / time				
			very low	low	moderate	high	very high
			< 1 day	1–2 days	3–7 days	8–14 days	> 15 days
			1	2	3	4	5
Probability of occurrence (P)	almost certain (>81%)	5	5	10	15	20	25
	highly likely (41–80%)	4	4	8	12	16	20
	probable (11–40%)	3	3	6	9	12	15
	unlikely (1–10%)	2	2	4	6	8	10
	Highly unlikely (<1%)	1	1	2	3	4	5

Fig 2. Risk classification matrix (source: Internal data).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g002>

The evaluation of the degree of impact and probability of occurrence of identified risks was based on information obtained from documentation review, questionnaires and our experience in offshore projects. The basis for determining the risk severity were DPR documents, according to which it was possible to estimate the duration of each failure and the time needed to repair inoperative equipment or find other solutions to continue the survey. Risk probability was assessed after the study of listed documents and questionnaire responses (the question about the most common survey equipment failures encountered while working at sea). Assessment of the risk probability was made based on the frequency of information on a given failure in the documents and in the interviewees' responses. For example, in the DPRs, information about cable malfunction appeared very often, therefore risk probability was defined as highly likely. Based on the same set of documents, we found that the repair of such a failure never lasted longer than 2 days, therefore the risk severity was defined as low. Due to confidential clauses in the contracts we are not allowed to publish detailed data from the analysed observation cards and DPRs.

Green zone (1–4) is a low risk which is acceptable. Yellow zone (5–9) is a significant risk that can hardly be accepted. Risk at this level is tolerated only if further risk reduction is not possible. The red cells (10–25) indicate a high risk that is unacceptable. Such a risk calls for counteractive measures. A risk classified in the highest group (red cells) is of top priority and the information on it must be passed to the upper-level management officers, e.g. the project council, the contract manager on the ordering party's side, or even the investor. Work should

not be started until the risk is minimised. If it is not possible to reduce the risk, work can not continue. Before initiating a project at sea and before mobilizing the equipment, the contracting party should provide the contractor with project documentation containing risk assessment analysis so that the contractor is aware of the risk involved from the very beginning and is able to introduce appropriate preventative measures.

Results

The questionnaire was completed by 76 people, most of whom were employed as surveyors (52.6%). The second largest group of respondents were technicians (15.8%). Crew members and scientists formed groups of seven people (9.2%). The questionnaire was also filled in by: analysts and sample takers (5.3%), survey managers (2.6%), r/v managers (2.6%) and one post-processor (1.3%). Respondents were well experienced in offshore works as 64.5% of them had been working at sea for longer than 10 years, a group of 15.8% have worked at sea for 5 to 10 years, while 19.7% for the period of 1 to 5 years. None of the respondents had worked at sea for less than a year. The Baltic Sea was indicated by the respondents as the main location for research. However, only 15 people indicated the Baltic as the only location of their research.

Causes of survey equipment failures

Among all the respondents 76.3% participated in a project which had to be stopped due to a failure of the survey equipment which required return to the port.

The most common cause of survey equipment failures was assessed as a human factor (Fig 3), 9 respondents pointed it as the most common and 28 as frequent. The technical factor was assessed as the second most important cause of equipment failures, 7 respondents indicated it as the most common, 22 as frequent. The most often given answer (30) was moderately common. Rare (24) and the least common (12) cause of survey equipment failures according to respondents are forces of nature.

Human factor contributing to equipment failure. The respondents indicated that the most common cause of failures due to human error was lack of caution, which was pointed out by 49 interviewees. The second most common cause was lack of qualifications or good training (40 indications), the third was rush (32 indications). Poor work organisation was pointed out by 27 respondents, no compliance with the procedures and fatigue was selected by 26 respondents. Other causes of failures related to the human factor were given by eight respondents (Fig 4).

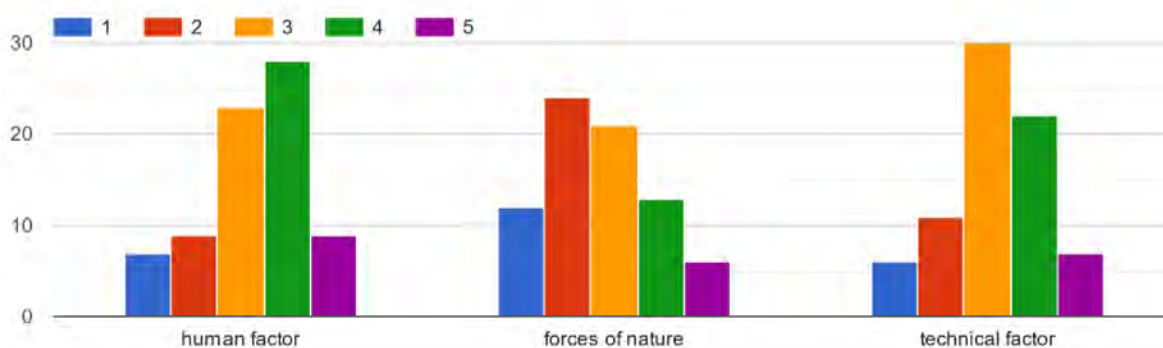


Fig 3. The most common causes of measuring equipment failures assessed from 1—the least common to 5—the most common.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g003>

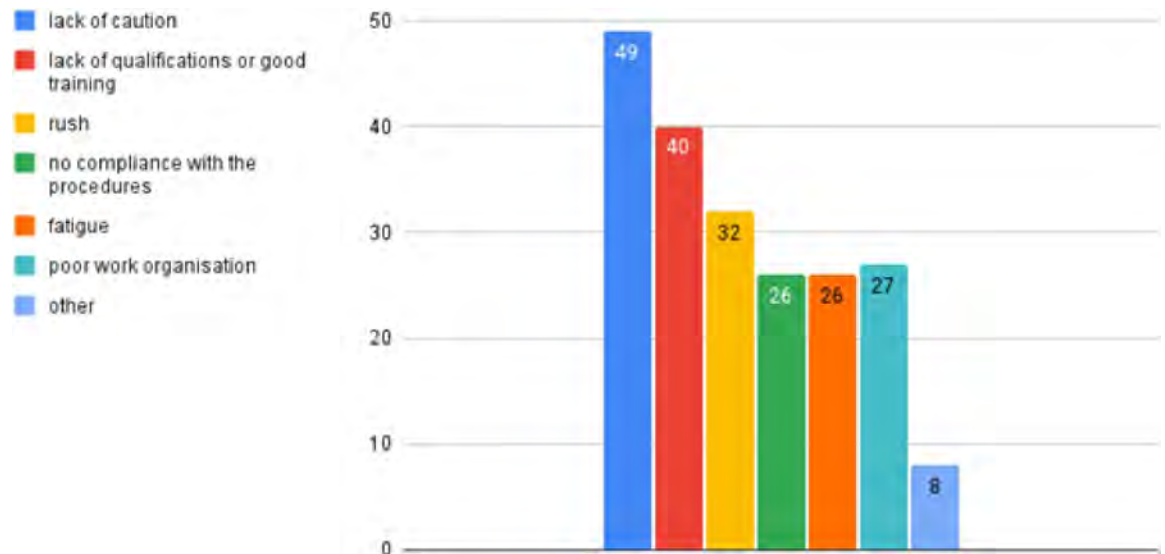


Fig 4. The most common causes of measuring equipment failures due to human factor according to interviewees.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g004>

Examples of other causes of failures due to human factor named by the respondents are listed below:

- working under stress;
- lack of communication between the survey team and the vessel crew;
- risky vessel manoeuvres;
- lack of experienced personnel on board;
- circumstances beyond control;
- a false belief that using different survey method than the one recommended by the experienced supervisor will bring better results;
- poor supervision;
- poor design of new survey instruments;
- poor understanding of the marine environment in which the equipment is deployed.
- cumulation of many factors;

Technical conditions contributing to equipment failures. Poor technical conditions of tools or instruments were indicated by 63.2% of respondents as the most common technical factor contributing to equipment failures. Inadequate tools or instruments were pointed out by 14.5% of interviewees. Other causes of failures related to the technical factor were mentioned by 22.4% of respondents (Fig 5).

Examples of other causes of failures related to technical conditions named by the respondents are listed below:

- intense usage;
- space dedicated to equipment not meeting the requirements of ABP;
- lack of regular inspections and instrument testing before taking the measurements;

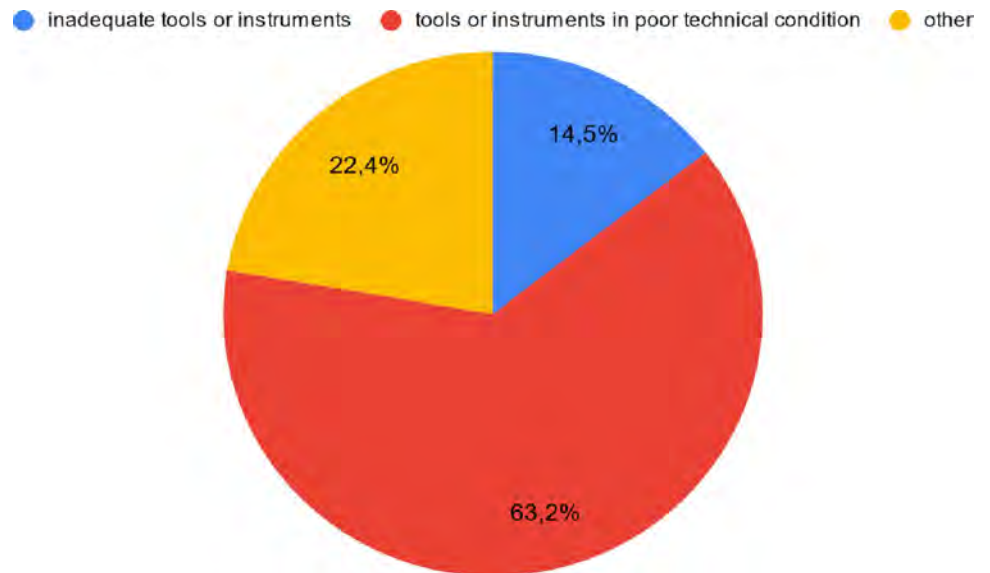


Fig 5. The most common causes of measuring equipment failures due to technical conditions according to interviewees.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g005>

- wear of materials;
- inappropriate vessel for research;
- equipment failure in the course of normal usage despite proper installation and repair e.g., disconnection / tear of cable connecting the measuring; equipment, dislocation of equipment part, etc.;
- deterioration of individual elements from usual usage;
- circumstances beyond control;
- wear and tear;
- pushing limits of equipment capabilities;
- material stress, extension of equipment life period over factory;
- recommendations;
- poor maintenance, inadequate maintenance;
- lack of redundancy;
- inexperience with newly designed equipment or systems ("Bleeding Edge");
- poor IT infrastructure;
- contamination in the work environment interfering with the survey results;
- poorly selected or installed equipment.

Forces of nature contributing to equipment failures. Sudden change of weather conditions was indicated by 42.1% of respondents as the most common forces of nature

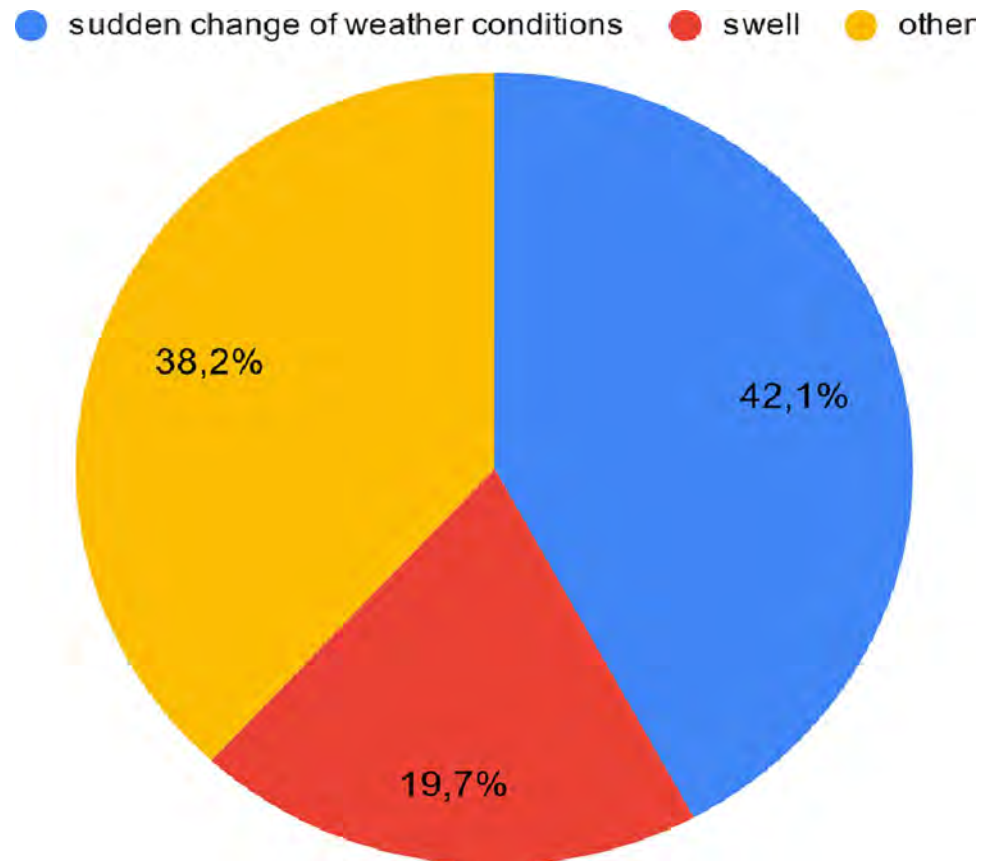


Fig 6. The most common causes of survey equipment failures due to forces of nature according to interviewees.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g006>

contributing to equipment failures. Swell was pointed out by 19.7% of interviewees. Other causes of failures related to the forces of nature were given by 38.2% of respondents (Fig 6).

Examples of other causes of failures related to forces of nature named by the respondents are listed below:

- waving, wind, currents, changing salinity, ice, adverse conditions due to frost, water pressure and temperature;
- refraction;
- misreading of weather forecast;
- taking survey in adverse weather conditions for prolonged periods of time;
- difficult working conditions: water, temperature, vibrations, load;
- failure to properly set up the equipment;
- survey crew not backing themselves to make the correct decision at a time to recover prior to things getting too dangerous for personnel and equipment to be recovered safely in increasing weather;
- poor vessel handling.

The most common equipment failures—identified risks and its assessment. After analyzing the documentation and survey responses, the survey equipment failure risks were identified. Later it was assessed by specifying their probability and severity (Table 1). According to the respondents the most frequently mentioned equipment failure is caused by damage to the cable line on which the device is towed. This may be the result of hitting an object lying on the seabed or floating debris and can lead to damage to the probe sensors or even loss of the towed equipment. Interviewees listed many other cable issues, such as mechanical damages (tearing, breakage), twisting the cable in the crane block or in the ship's propeller. Cable malfunctions cause communication issues with devices. Among the listed reasons there are also leaks, electrical breakdowns at the connectors, damages due to material stress, incorrect maintenance, cuts in the cable insulation causing water ingress and damage to slip rings by salt water and water pressure. Mechanical damage is a frequent group of observed failures. Such may occur among others when equipment hits the seabed or an object lying on it, hits the ship construction or bends on a hard surface when sampling. The respondents also mentioned as common the problems with electricity, electronics and equipment software. It was mentioned that the equipment was damaged when transporting the device or stopping at the port. The respondents also listed a multitude of failures that they remembered the most.

The failures don't happen often but have a serious impact on projects due to the enormous waste of time and costs. Among them are collisions when the measurement equipment was destroyed by a support vessel that flowed on the equipment or when the hydrophones broke off due to the impact of a drifting object. Interviewees described incidents when the equipment was trapped into the fishing nets or elements of a shipwreck lying on the seabed. There was a case when it was necessary to call special divers who pulled out equipment trapped at a depth of 60 m. Respondents mentioned problems with devices that are left on the seabed for the purpose of continuous recording of parameters, such as a current profiler. *It happened that the device was flooded. The water got in at the very beginning because the gasket was not properly placed. A similar measurement attempt ended up even worse. The fishing boats dredged our equipment two miles away. Most of the equipment was damaged. We have only now recovered some parts.*

Respondents also described failures of measuring equipment caused by the forces of nature. The failures listed are most often caused by waves. Most of the damage to the equipment happens when it is brought onto the deck of the vessel. When the vessel is rocked, it is difficult to control heavy equipment hanging on a cable. The devices suffer mechanical damage from impacts on the ship's structure. In worst-case scenarios big waves stress the cable, which often breaks off and results in equipment sunk (*Once we lost the entire 6 km hydrophone cable. It was a very windy night, the sea was rough and maybe the cable was not properly tied*). The device loss may also occur due to poor securing of equipment on board the vessel, which may fall overboard by swinging (*A blow of wind pushed the vibrocore onto the safety chains on the stern, 2 cm-thick chain broke*). The respondents also indicated problems with the equipment due to low temperatures, such as freezing of equipment, freezing of water in a bathometer. Also the impact of phenomena on the quality of measurement data like refraction and magnetic storms was mentioned. Hydroacoustic data acquisition during unfavourable weather conditions also affects their quality.

Discussion

Reference to the main research objectives

The aim of the research was to identify the most common measuring equipment failures while working at sea, find its causes according to results of conducted surveys, assess and quantify risks. We also proposed a response plan for each identified risk.

Table 1. Classification of identified risks according to Fig 1 (source: Internal data).

No	Risk	Examples	$R = P \times S$	Source of the risk	Actions to reduce risk
1	damage to devices installed on the seabed	Equipment dredged by fishing boat Breaking off the hydro-meteo buoy from the anchor	$15 = 3 \times 5$	human factor forces of nature	Navigation warnings for fishers and local communities Trainings for surveyors
2	loss of towed equipment	Hitting the device against an object at the bottom Hitting the device against the drifting target	$15 = 3 \times 5$	human factor forces of nature	Quality control of the towing cable Including routine equipment check-up to the procedures
3	mechanical damage to the equipment	Hitting the device against an object at the bottom Hitting the device against ship's side while hauling up/in Hitting the device against the drifting target Bending of the probe due to the hard seabed	$12 = 3 \times 4$	human factor technical factor forces of nature	Trainings for surveyors, Trainings for vessel's crew Communication between the controller and the operator. Procedures for confirming external conditions / factors for deploying probes into the water. In shallow waters, potentially hazardous locations site surveys should be conducted.
4	collision	Hitting the device against the drifting target Other ship flow on the equipment	$10 = 2 \times 5$	human factor forces of nature	Preparation of survey plan, implementation of safety navigation procedures, using additional vessels at demanding research locations, additional training of operators and vessel crew.
5	hooked or trapped device	Equipment trapped in fishing nets Equipment hooked to a target at the seabed	$8 = 2 \times 4$	human factor	Training of operators, Training of ship crews, mutual communication during equipment set-up. Procedures in the event of equipment being trapped underwater. Navigation warnings for fishers Observation by the helmsman in the event of any fishing nets encounter. Radio communication with fishermen about—measurement activities. Messages in fishing ports
6	blackout during survey / electricity generator malfunction	Vesselwide blackout	$8 = 2 \times 4$	human factor technical factor	Trainings for crew on procedures to restore power in case of blackout
7	cable malfunction	Tearing, Breakage, Cuts in the cable insulation	$8 = 4 \times 2$	human factor technical factor	Storing adequate supply of spare parts on the vessel
8	freezing	Device not adapted to work in low temperatures Water freezes during overflow from the bathometer	$6 = 2 \times 3$	forces of nature technical factor	Staff training, procedures related to labor standards, Training related to health and safety
9	damage to the equipment when transporting the device or stopping at the port	Overturning of poorly secured equipment when heaving	$4 = 2 \times 2$	human factor forces of nature	Developing procedures and standards for transporting equipment from the time of mobilization to the measurement location. Appropriate preparation of transported equipment. Training for equipment operators Paying attention to the sensitivity of individual elements.
10	damage to the equipment against the ship's propeller	Entanglement / pull-in of the line to which the device is attached to the ship's propeller	$4 = 3 \times 3$	human factor forces of nature	Development of procedures for starting survey, immersion of equipment. Crew and surveyors trainings Raising awareness of the need for communication, meetings reminding about the conditions, activities and work stages.
11	problems with the software	software crash	$3 = 3 \times 1$	human factor technical factor	Crew and surveyors trainings, Systematic checks of the equipment during mobilization, before reaching the measurement location

(Continued)

Table 1. (Continued)

No	Risk	Examples	R = P × S	Source of the risk	Actions to reduce risk
12	issues with an oceanographic winch		3 = 3 × 1	technical factor	Adequate equipment servicing procedures, Procedure for checking “dry” equipment during mobilization. Crew and surveyors trainings.

R—Risk, P—Probability, S—Severity.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.t001>

Summary of the main findings of the article

Twelve basic equipment failure risks were identified in our paper based on the review of relevant project documentation (DPRs, Observation Cards) and information-gathering techniques (questionnaire). After analyzing the documentation, the risks were divided into three main sources: human factor, technical factor and forces of nature. The questionnaire was designed to obtain as much information as possible about the types of failures with examples and their causes according to these three groups. We Authors assessed the risk in terms of the likelihood of its occurrence and its consequences on the project schedule creating a risk matrix. Each risk was calculated as a combination of potential hazard severity and probability of occurrence of this hazard and assigned to the appropriate zone: green (acceptable risk), yellow (significant risk) or red (unacceptable risk).

The group of the unacceptable risk includes: damage to devices installed at the seabed, loss of towed equipment, mechanical damage to the equipment and collision. Among the sources for the listed risks are all three: human factor, technical factor and forces of nature. Two failures of the biggest calculated risk have probability at the level up to 40% with a very high impact on the work schedule which could be even more than 2 weeks delay although, based on the responses of our interviewees, delays can be counted in months. Many studies [35, 43] require devices like Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) or Acoustic Wave and Current Profiler (AWAC) to be installed at the seabed in order to continuously record parameters such as currents or hydrophysical parameters. Problems that may arise during the survey include data recording errors, damage or even complete loss of the device.

Interviewees mentioned that one of the causes of the total hardware loss was dredged equipment installed at the seabed by the fishing boats. However, placement of any research buoy such as a profiling buoy or weather buoy in the Polish exclusive economic zone should be reported to the Hydrographic Office of the Polish Navy that publishes each week ‘*Notices to Mariners*’. The publication lists new potential obstacles or obstructions to safe navigation which are then included in the electronic and paper maps which are available to sea users. Yet, not every map service or publication is updated regularly or the updates are not checked by the users. Therefore, as mentioned before, loss of research equipment may happen.

Loss of towed equipment was also one of the most frequently mentioned failures. Such an event is another risk associated with a large loss of time for the project and increased costs. The search for a device in some cases can take several days and it is not always successful. The most common cause of loss of towed equipment is a collision with an obstacle at the bottom in the survey area (Fig 7).

When choosing the survey method, impact of environmental conditions on imaging accuracy by using hydro-acoustic systems [44] should be taken into account especially in waters of a high non-uniformity of spatial distribution of hydrological parameters. Complex environmental conditions in shallow sea, especially changeable seasonal temperature distribution which directly affects spatial distribution of sound propagating in water column [45], are of a

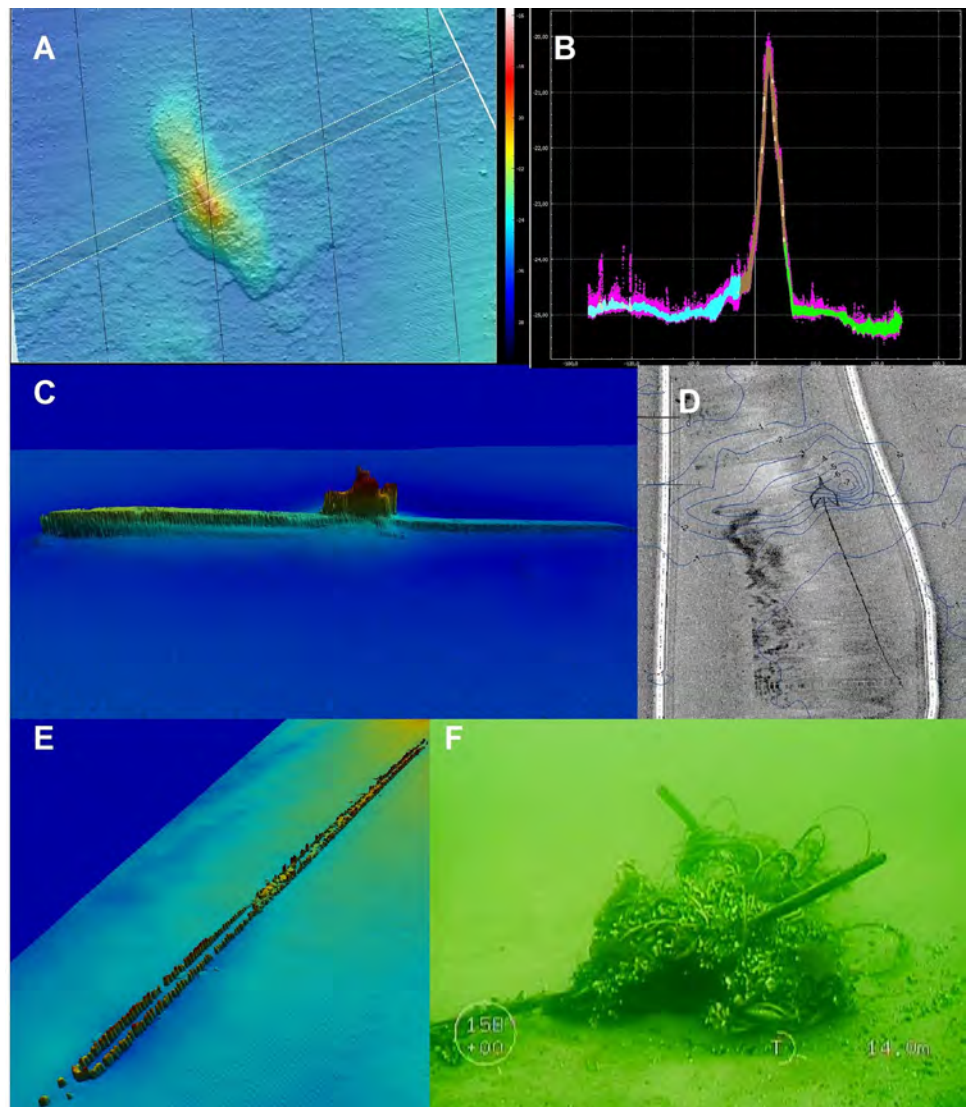


Fig 7. Examples of objects on the seabed which may interfere with the survey: A) geological form on the seabed, image from the multibeam echosounder (MBES), B) single MBES profile in the location of the geological form A—height 5 m above the seabed, C) wreck of the Ślązak vessel, MBES image, D) fishing nets at the seabed of the reservoir, side-scan sonar SSS image with magnetic field anomaly lines, E) Palisade remains, MBES image, F) abandoned fishing nets, ROV TV picture.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g007>

great importance for accuracy in seabed imaging. To avoid the impact of refraction on data quality the device is towed close to the seabed, which may result in hitting the seabed or an obstacle. Here the operator's caution and experience are of great importance. Another type of survey where the device is towed over the bottom is a magnetometer survey. The maximum size of an iron object which can be detected is determined by the distance from the object to the magnetometer [46]. The two main survey parameters which affect this distance are the altitude of the magnetometer above the seabed (and target) and the distance between survey run lines [47, 48]. In order to detect smaller targets it is desirable to tow the magnetometer towfish as close to the seabed as possible. As a consequence, there is a danger of hitting the seabed or the target with the towfish and appropriate distance between the seabed and the device must

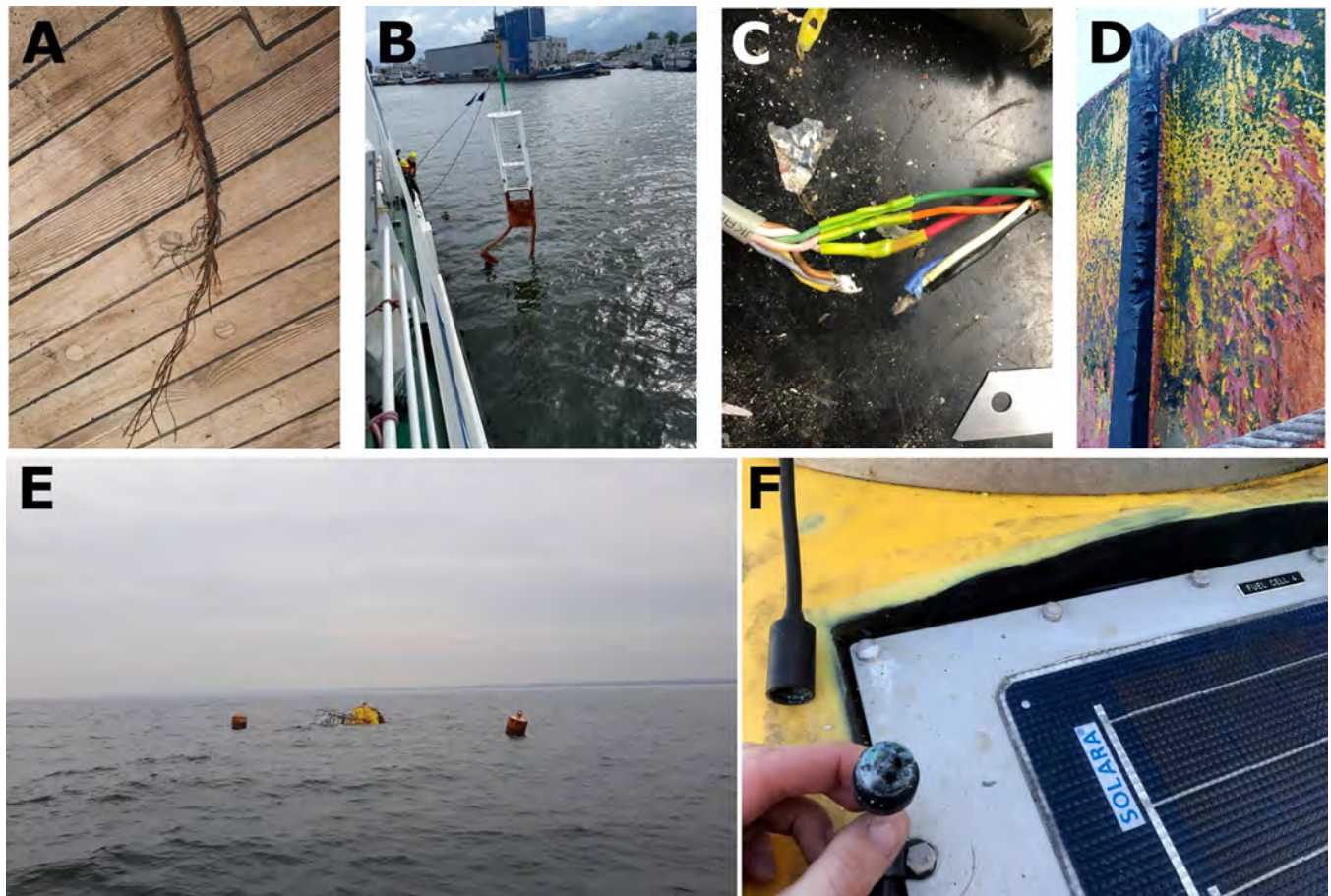


Fig 8. Examples of mechanical damage. A) Steel rope of the ship's crane broken when lifting a device from the seabed, B) Hitting the MBES frame on the underwater installation, which resulted in a deformation of the frame and loss of the device, C) Broken cable, D) Damage to the measuring buoy plating due to a collision with another floating object, E) Tipping over of the measurement buoy after breaking the anchor due to severe weather conditions, collision / trampling by other floating object / lack of appropriate services, F) Damaged cable.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g008>

be maintained which will depend on the nature of the seabed itself, the prevailing sea conditions and the courage of the operator [47]. Hitting the seabed or target with the towfish may cause a breakage of the cable and equipment loss, but also may affect mechanical damage. Based on our analyzes, other causes of such damage are also hitting the device against ship's side while hauling up/in, hitting the device against the drifting target or bending of the probe due to the hard seabed (Fig 8).

The last example may occur when sampling or coring is carried out on the bottom covered with various types of sediments (Fig 9) as it can not be operated in rocky substrates [49]. In this case, the best way to avoid a failure is to pre-identify the bottom surface and then plan the sampling. Risks of mechanical damage to the equipment according to the risk matrix was estimated at 12 with highly likely probability more than 40% and high consequences for the project.

Collisions like hitting the device against the drifting target or other ship flow on the equipment were assessed as unlikely but with very high consequences to the project schedule. The probability of an event occurring may be low, but if it does, the consequences can be catastrophic and result in complete loss/damage of equipment.

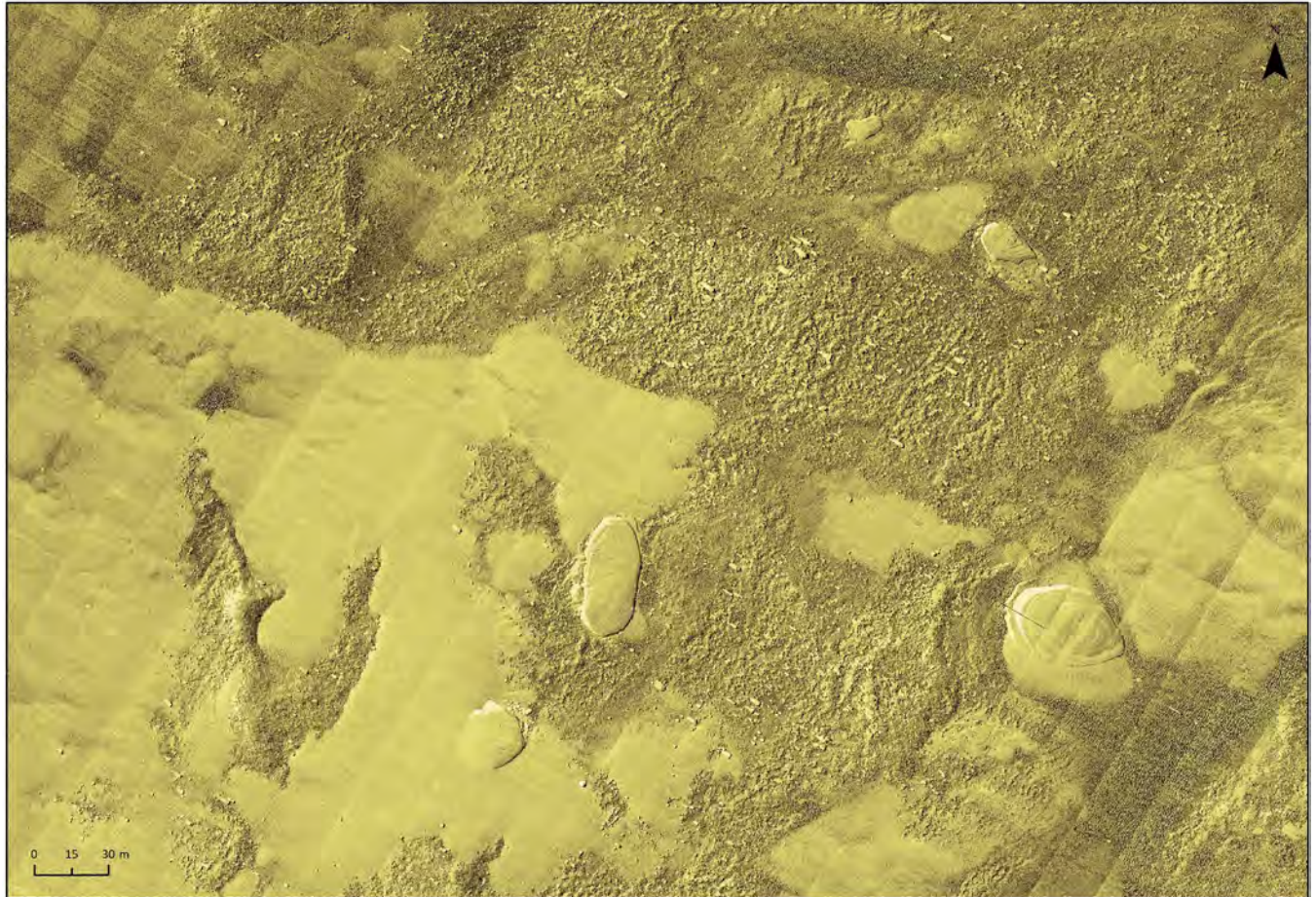


Fig 9. Side-scan sonar image of seabed consisting of various sediment types.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960.g009>

The group of the significant risk includes: hooked or trapped device, blackout during survey, cable malfunction, freezing. All of these risks have been assessed as very unlikely except for cable malfunction which has a highly likely probability of occurrence and its risk severity was assessed as low as repair usually doesn't take long but only if there are spare parts onboard and people with appropriate knowledge and skills. In the survey, we found descriptions of the accidents when the device was trapped into the fishing nets or elements of a shipwreck. The events were mentioned as those that were most memorable for the respondents, so we conclude that they caused a lot of trouble for project participants. Such accidents happen when the area under investigation is not well recognized or there are surprises such as recently deployed fishing nets without navigation warnings. The key factor here is the caution of the equipment operator. Problem of freezing depends primarily on the research region as well as the season. In some campaigns the risk will not be taken into account at all, while in some projects this phenomenon can significantly delay work.

The group of the acceptable risk includes: problems with the software, damage to the equipment when transporting the device or stopping at the port, damage to the equipment against the ship's propeller, issues with an oceanographic winch. These occurrences are assessed as probable or unlikely with moderate, low or very low consequences to the project. However, these problems cannot be ignored. The human factor appears as the source of risk in almost all

cases. The basis for success is therefore good work organization and a backup plan to each potential risk. Moreover analyzing the above, it becomes clear that the risks identified as unlikely occurring individually have little consequences for the project implementation. The effects can be serious, when the accumulation of risks occurs or when we sum up their occurrence.

The results of our survey conducted among people involved in work on research vessels indicate that the most common cause of failure of measuring equipment is human factor. It is generally stated that 80% of all accidents at sea are a result of human error [50, 51] however, Wróbel [52] gave this statement a broad analysis and claims it unsubstantiated. Moreover the literature mainly refers to accidents at sea, but not every failure of a measuring device can be classified as an accident and the cases examined in the literature do not only concern equipment installed on board. To our best knowledge, this work is the first one that undertook the identification of measuring equipment failures risks in offshore surveys. According to our respondents the most common cause of survey equipment failures was assessed as a human factor, the second important cause was a technical factor, with the main cause of the failure indicated as poor technical conditions of tools or instruments. According to DNV [53] failure analysts most commonly use four general descriptions of failure damage mechanisms: fracture, corrosion, wear, and distortion (or undesired deformation). Finding physical root cause is vital action to avoid a problem reoccurring. Such analysis also requires an interdisciplinary approach, according to Edwards [54] three levels: physical roots, human roots and latent roots (procedural, organizational in nature, environmental or other beyond the realm of control). Among the risks associated with the forces of nature, in the case of offshore works, weather is the greatest [11]. According to our survey, sudden change of weather conditions was indicated by 42.1% of our respondents as the most common force of nature contributing to equipment failures. Good weather risk management can be a tool to avoid a range of potential failures. Although when analyzing the collected research material, an important conclusion is clearly visible: the relationship between the occurrence of equipment failures and the possibility of avoiding them by improving the quality of project management. Many of the event descriptions explicitly or implicitly indicated that failures could have been avoided by more appropriate planning of the survey process (choice of equipment, choice of personnel, choice of research method). Such relationships can be found in each of the three groups of factors causing equipment failures.

Limitations of our research

Due to the nature of the offshore marine research vessel industry, it is extremely difficult to gain access to suitably qualified and experienced surveyors and project managers willing and able to participate in this type of research. The small size of this particular population sample does not allow generalizations and as such, the results of this survey should not be seen as representative of the trends dominating in the entire industry.

As safety-related matters are a very important factor in this industry, and are often considered sensitive, the offshore marine companies are reluctant to allow researchers access to the safety-related data which they possess, due to confidential clauses in their contracts.

Recommendations for future research

Presented results of the analysis on equipment failures do not exhaust the subject matter at hand. On the contrary, several questions arise that may prompt additional scientific research undertakings. The sources of equipment failures were divided into human and technical aspects as well as those resulting from the unpredictability of nature. Therefore, it would be

worth exploring how the staff of survey vessels for a particular research operation is recruited, what are the qualifications and conditions they need to meet, how the research is organised and managed, how the human risk is accounted into planning and implementation of a project during its lifetime. And on top of that, how cost efficiency or cost cutting determines selection of staff, equipment, organisational structure and procedures when arranging a research endeavour at sea and if it significantly influences risk of equipment failures. How unpredictability of the weather conditions is factored in the research schedule, are weather risks avoidance procedures in place? What is the financial cost of weather-related delays on the marine research that is a part of an offshore investment project? Could there be proposed any new legislation facilitating introduction of risk management procedures minimising risk of equipment failure and therefore, reducing delays in the realisation of much needed investments in offshore energy?

To answer these questions, however, a wider examination needs to be conducted, with the application of methods that go beyond the information contained in the reports. Further analysis on a much larger scale based on wider scope of information from documents and experts should provide enough material for more knowledge and experience on effective management of risks arising from equipment failure.

Conclusions

Investigation of the marine environment is a complex process that requires involvement of appropriate resources of equipment and people. The main purpose of this paper was the identification of factors that may adversely affect work on board research vessels. Among the three main elements which we identified during the documentation review were human factor, technical factor and forces of nature. A survey addressed to people involved in the implementation of offshore projects indicated that the most common cause of survey equipment failures was human factor. The analysis of the remaining factors also showed that in some way they are all related to human factor.

The fact that 76.3% respondents participated in a project which had to be stopped due to a failure of the survey equipment which required return to the port shows that the problem which we analyze is of particular importance for efficient work at sea. Crucial element that restricts implementation of offshore projects is unfavourable weather conditions which are beyond human control. Thus, the time in which we can conduct research is limited and the accessibility of the research areas should be used as best as possible. Therefore, proper risk management is necessary.

The list of twelve identified survey equipment failure risks in the paper is far from being exhaustive but it seems universal. Increasing awareness among management and employees will reduce the number of unforeseen events and the severity of their consequences. As a result, it also allows effective protection of the resources, as well as reducing risk costs and work schedule extension. The authors also provide examples of actions to reduce identified risks. Such a backup plan is a mandatory part of a good risk management plan.

Our analyses have revealed a long list of potential failures that may occur during the research work onboard the ship, which has not been presented before. Collecting information on failures that have occurred so far in implemented projects helps to determine approaches that can be taken to investigate why the failure has occurred and how to prevent it in the future. The article also highlights the relationship between the quality of research project management and its implementation in the context of the failure rate of measuring equipment. We came to the conclusion that the most important element at every stage of the project implementation are people and decisions made.

Supporting information

S1 Data.

(XLS)

S1 File. Questionnaire: Failures of measuring equipment.

(PDF)

Author Contributions

Conceptualization: Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak.

Data curation: Maria Kubacka.

Formal analysis: Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz.

Funding acquisition: Maria Kubacka, Maciej Matczak.

Investigation: Maria Kubacka, Jakub Piotrowicz.

Methodology: Maria Kubacka, Maciej Matczak.

Resources: Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Paweł Janowski.

Software: Maria Kubacka.

Supervision: Maria Kubacka.

Visualization: Maria Kubacka, Paweł Janowski.

Writing – original draft: Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz.

Writing – review & editing: Maria Kubacka, Marcin Burchacz.

References

1. NOAA, Ocean, [Cited 2021 June 1], Available from: <http://www.noaa.gov/ocean.html>.
2. Chandler JAP. Developing offshore petroleum to meet socio-economic objectives: Lessons from Australia, Norway and the United Kingdom, *Energy Policy* 2020; 144: 111618. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111618>.
3. Yin C. International law regulation of offshore oil and gas exploitation, *Environmental Impact Assessment Review* 2021; 88: 106551. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106551>.
4. Wang X, Yuen KF, Wong YD, Li KX. How can the maritime industry meet Sustainable Development Goals? An analysis of sustainability reports from the social entrepreneurship perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2020; 78: 102173. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.002>.
5. Mauricio Hernandez CO, Shadman M, Amiri MM, Silva C, Estefen SF, La Rovere E. Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021; 144: 110994.
6. Venugopal V, Sasidharan A. Seafood industry effluents: Environmental hazards, treatment and resource recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2021; 9 (2): 104758. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104758>.
7. Johansen U, Bull-Berg H, Vik LH, Stokka AM, Richardsen R, Winther U. The Norwegian seafood industry—Importance for the national economy. *Marine Policy* 2019; 110: 103561. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103561>.
8. Gintautas T, Sørensen JD, Vatne SR. Towards a Risk-based Decision Support for Offshore Wind Turbine Installation and Operation & Maintenance. *Energy Procedia* 2016; 94: 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.225>.
9. Leimeister M, Kolios A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>

10. Mukhtar A, Kassem MA. Risk management in oil and gas construction projects. Review Article. 2021.
11. Kubacka M, Matczak M, Kałas M, Gajewski L, Burchacz M. Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone. *Weather, Climate, and Society* 2021; 13(4): 899–911. Retrieved Sep 22, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/13/4/WCAS-D-20-0168.1.xml>
12. Hertz DB. Risk Analysis in Capital Investment. *Harvard Business Review*. Jan-Feb 1964.
13. Wyróżewski P. Zarządzanie ryzykiem w projekcie (Project risk management). In: Trocki M, editor. *Nowoczesne Zarządzanie Projektami (Modern Project Management)*. Polish Economic Society, Warszawa 2012. pp. 296–306.
14. Pritchard C. *Management Risk, Concepts and Guidance*, 2nd ed., ESI International; 2001.
15. Hess M, Kos S, Njegovan M. Assessment and control of operational risks on board ships in accordance with the ISM code. *Pomorstvo* 2011; 25: 405–416.
16. Wyróżewski P. *Metodyka PMBoK Guide (Project risk management)*. In: Trocki M, editor. *Metodyki i standardy zarządzania projektami (Modern Project Management)*. Polish Economic Society, Warszawa 2017. pp 99–143.
17. Dziadosz A, Rejment M. Risk Analysis in Construction Project—Chosen Methods. *Procedia Engineering* 2015; 122: 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.034>
18. Mahamid I. Risk matrix for factors affecting time delay in road construction projects: owners perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2011; 18 (6): 609–617.
19. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)—Fifth Edition*. Project Management Institute, Newton Square; 2013.
20. British Standards Institution, *Risk management—Risk assessment techniques*, BS EN 31010:2010; 2010.
21. Olubiyo E. Equipment failure; whose fault. February 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15953.48489>
22. International Safety Management (ISM) Code. IMO, London, 2010.
23. Evstifeev AA, Zaeva MA. Method of Applying Fuzzy Situational Network to Assess the Risk of the Industrial Equipment Failure. *Procedia Computer Science* 2021; 190: 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.030>.
24. Wu H, Huang A, Sutherland JW. Avoiding Environmental Consequences of Equipment Failure via an LSTM-Based Model for Predictive Maintenance. *Procedia Manufacturing* 2020; 43: 666–673. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.131>.
25. Li W, He M, Sun Y, Cao Q. A novel layered fuzzy Petri nets modelling and reasoning method for process equipment failure risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2019; 62: 103953. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103953>
26. Blancke O., Tahan A, Komljenovic D, Amyot N, Lévesque M, Hudon C. A holistic multi-failure mode prognosis approach for complex equipment. *Reliability Engineering and System Safety* 2018; 180: 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.006>.
27. Luquetti dos Santos IJA, França JEM, Santos LFM, Haddad AN. Allocation of performance shaping factors in the risk assessment of an offshore installation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020; 64, March 2020: 104085. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104085>.
28. Gran BA, Bye R, Nyheim OM, Okstad EH, Seljelid J, Sklet S, et al. Evaluation of the Risk OMT model for maintenance work on major offshore process equipment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2012; 25 (3): 582–593. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.01.001>
29. Scheu MN, Tremps L, Smolka U, Kolios A, Brennan F. A systematic Failure Mode Effects and Criticality Analysis for offshore wind turbine systems towards integrated condition based maintenance strategies. *Ocean Engineering* 2019; 176: 118–133.
30. Zhen X, Vinnem JE, Peng C, Huang Y. Quantitative risk modelling of maintenance work on major offshore process equipment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2018; 56: 430–443. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.004>
31. Ade N, Peres SC. A review of human reliability assessment methods for proposed application in quantitative risk analysis of offshore industries. *International Journal of Industrial Ergonomics* 2022; 87: 103238. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103238>
32. Lowera M, Magotta J, Skorupski J. A System-Theoretic Accident Model and Process with Human Factors Analysis and Classification System taxonomy. *Safety Science* 2018; 110: 393–400.
33. Hac B et al. *Badania przedinwestycyjne w rejonach przewidywanej eksploatacji kruszyw: Raport z wykonania prac morskich Pola IIA, IIB, IIC (Pre-investment research in the areas of expected aggregate exploitation: Fields IIA, IIB, IIC sea works report)*. Maritime Institute Internal Publ. 6615, Gdańsk 2011a.

34. Hac B et al. Badania przedinwestycyjne w rejonach przewidywanej eksploatacji kruszyw: Raport z wykonania prac morskich Pola I (Pre-investment research in the areas of expected aggregate exploitation: Field I sea works report). Maritime Institute Internal Publ. 6614, Gdańsk 2011b.
35. Szeffler K et al. Report on the environmental impact of the Baltica Offshore Wind Farm (in Polish). Consortium of Maritime Institute in Gdansk and MEWO Rep. 2017; 500 pp. Available from: http://www.portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/morskafarmawiatrowa-Baltica/Raport_OOS_PL_vA.pdf.
36. Power Baltic, www.balticpower.pl, 2021.
37. Polska Grupa Energetyczna. The first Polish nuclear power plant. Project Information Sheet PGE EJ 1 sp.z o.o, September 2015. 220 pp. Available from: https://2015-2019.kormany.hu/download/7/b1/a0000/Environmental%20Scoping%20Report%20PGE_SCN_DES_0001_EN.pdf.
38. Stryjecki M et al. Baltic pipe offshore pipeline—Polish part. Environmental Impact Assessment Rep. 2019; 167 pp.
39. Başar E, Erol S. The analysis of ship accident occurred in Turkish search and rescue area by using decision tree. Maritime Policy & Management 2014; 42. <https://doi.org/10.1080/03088839.2013.870357>
40. HSE. Reducing error and influencing behaviour. 1999.
41. Gordon RPE. The contribution of human factors to accidents in the offshore oil industry. Reliability Engineering & System Safety 1998; 61 (1–2): 95–108. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)80003-3](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)80003-3).
42. Li J, Chunbing B, Wu D. How to Design Rating Schemes of Risk Matrices: A Sequential Updating Approach. Risk Analysis 2018; 38: 99–117. <https://doi.org/10.1111/risa.12810> PMID: 28403567
43. Serebryany A. Observation of anomalous phenomena in the sea using ADCP (in Russian). Conference: XVII Школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенная с XXXIII сессией РАОА: Москва, ИО РАН; 2020.
44. Blondel P. The Handbook of Sidescan Sonar. Springer Praxis Books. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49886-5_7
45. Grelowska G, Kozaczka E, Witos-Okrasińska D, Szymczak W. The Imaging of Gdansk Bay Seabed by Using Side Sonar. Polish Maritime Research 2018; S1 (97) Vol. 25: 111–118. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0031>
46. Hall ET. The use of the proton magnetometer in underwater archaeology. Archaeometry 1966, 9: 32–43. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1966.tb00904.x>.
47. Camidge K, Holt P, Johns Ch, Randall L, Schmidt A. Developing Magnetometer Techniques to Identify Submerged Archaeological Sites. Historic Environment Service, Environment and Heritage, Cornwall County Council 2010. Report No: 2010R012.
48. Kubacka M. Runlines distribution in hydromagnetic surveys—case studies. BMI 2017; 32 (1): 186–192.
49. Missiaen T, Sakellariou D, Flemming N. Survey Strategies and Techniques in Underwater Geoarchaeological Research: An Overview with Emphasis on Prehistoric Sites. In: Bailey GN, Harff J, Sakellariou D, editors. Under the Sea: Archaeology and Palaeolandscapes of the Continental Shelf. Coastal Research Library. Springer, Cham 2017. pp. 21–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53160-1_2
50. Coraddu A, Oneto L, Navas de Maya B, Kurt R. Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach. Ocean Engineering 2020; 211: 107588. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107588>.
51. Chae C, Kim M, Kim H. A study on identification of development status of mass technologies and directions of improvement. Appl Sci 2020; 10: 4564. <https://doi.org/10.3390/app10134564>.
52. Wróbel K. Searching for the origins of the myth: 80% human error impact on maritime safety. Reliability Engineering & System Safety 2021; 216. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107942>
53. What causes materials failure in oil & gas and maritime equipment? DNV, 2021. Available from: <https://www.dnv.com/oilgas/laboratories-test-sites/article/what-causes-materials-failure-in-oil-gas-and-maritime-equipment.html>.
54. Edwards K. ASM handbook, volume 11: failure analysis and prevention. Materials & Design—MATER DESIGN 2004; 25: 735–736. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.005>

Publikacja nr 3

Artykuł naukowy pt.:

Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys

Scientific Reports, 2024, 14: 24596, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75054-4>

autorzy: **Maria Kubacka**, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, Dariusz Barbucha

Artykuł analizuje czynniki wpływające na możliwość prowadzenia badań morskich w wybranym rejonie południowego Bałtyku. Praca koncentruje się na interakcji pomiędzy warunkami pogodowymi, ryzykiem operacyjnym oraz ograniczeniami logistycznymi, które wpływają na dostępność obszarów badawczych na morzu. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi sezonowej zmienności oraz specyficznym wyzwaniom lokalizacyjnym na planowanie i realizację kampanii badawczych.

Analiza ta jest ściśle związana z optymalizacją operacji offshore i porusza kwestie ryzyk związanych z badaniami na Bałtyku. Wyniki podkreślają kluczowe aspekty związane z poprawą efektywności i bezpieczeństwa badań morskich, zwłaszcza w kontekście warunków klimatycznych i ich wpływu na dostępność obszarów badawczych.



OPEN Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys

Maria Kubacka^{1✉}, Adam Krężel¹, Juliusz Gajewski¹ & Dariusz Barbucha²

The article presents the accessibility conditions for carrying out research work for an exemplary site in the southern Baltic Sea region. The basic parameter of the state of the marine environment was the

the period between 1940 and 2022. A statistical analysis of the variability of this height on a monthly basis, taking into account its conversion into the time of potential availability in conditions enabling

can be used for operating purposes. This number, depending on the research vessel capabilities, may even be an order of magnitude higher in the summer months than in winter. Additionally, it was found

The Polish part of the Baltic Sea has ideal conditions for the development of offshore wind energy, both due to the depth of the sea and the prevailing weather conditions. According to the spatial development plan for Poland's internal sea waters, territorial sea and exclusive economic zone (EEZ) (Journal of Laws of 2021, item 935), about 3600 km² is allocated for Offshore Wind Farms (OWFs). Apart from offshore windmills, marine investments in the Polish EEZ include cables, port approaching infrastructure, hydrocarbon mining and coastal infrastructure construction. They all require human activity at sea supported by various types of vessels. The involvement of ships begins at the project preparation stage, for example during comprehensive seafloor surveys. The objectives of the data acquisition and analysis in geophysical investigations for offshore pre-investment projects are to provide detailed information on the seabed and near-surface geology and to identify and classify objects on the seabed that could affect the safety and integrity of the planned investment. As a standard, they include bathymetric, seismic, magnetometer and sonar surveys. It should also be noted that geophysical surveys are conducted only as a part of larger environmental survey campaigns. In this paper, we focused on multibeam echosounder (MBES) surveys for bathymetric mapping and side scan sonar (SSS) surveys for preparing characteristics of the seabed surface. The sonar image is the basis for the identification of types and forms of seabed relief in the survey area¹. It is also used for detecting boulder areas and anthropogenic objects located on the seabed surface, which have the potential to pose obstacles or threats to the planned investment. MBES systems sample the seabed with the primary purpose of obtaining bathymetric information, and in addition, allow recording of the backscatter acoustic signal, which provides sound image products. This information helps in determining the physical properties of the seafloor^{2,3} and is widely used in bottom classification processes⁴. As for the majority of work, sufficient deck space, DP capabilities, or accommodation possibilities are crucial, the number of research vessels suitable for supporting offshore projects is limited. Apart from the relevant fleet availability, factors such as the complexity^{5–7} and diversity of marine environment investigations^{8–10}, variability of survey areas and the location at a certain distance from the port^{11,12}, sensitivity of the equipment and vessels to the harsh marine environment¹³ have a significant impact on the costs and timeliness of marine research.

When studying professional publications concerning project implementation at sea^{6,13–16}, one can draw the following conclusion: weather is a crucial factor determining success or failure of any offshore activity. Due to the fact that the weather forecast can be accurate only for a few days ahead, it is impossible to arrange a realistic work schedule for long-term offshore projects. In 2021, Kubacka et al. identified and analysed five weather-related risks for offshore investment projects and attempted to develop the crucial elements of the weather risk management plan. A fundamental problem that proved to be beyond control was vessel layover or the

¹Department of Operational Oceanography, Maritime Institute, Gdynia Maritime University, 80-548 Gdańsk, Poland. ²Department of Information Systems, Faculty of Management and Quality Science, Gdynia Maritime University, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Poland. ✉email: mkubacka@im.umg.edu.pl

suspension of research caused by the weather. An avoidance strategy for the schedule delays caused by storm periods was calculating time reserves expressed in working days allotted for an individual location at sea. The estimations were based on statistical data on wind conditions and significant wave height (Hs) for a period of seven years (2013–2020) obtained using the WAM 4 wave model^{17,18}. Building on the presented method, we decided to extend the analyses with the dataset from the ERA5¹⁹ model covering a period of 82 years (between 1940 and 2022) to verify the accessibility of a given offshore location in terms of the amount of time needed for surveys (such as geophysical investigations) to be carried out. Our calculations took into account the significant height of combined wind waves and swell defined as the average height of the highest third of surface ocean/sea waves generated by wind and swell. According to Hersbach et al.¹⁹, this parameter “represents the vertical distance between the wave crest and the wave trough. The ocean/sea surface wave field consists of a combination of waves with different heights, lengths and directions (known as the two-dimensional wave spectrum). The wave spectrum can be decomposed into wind-sea waves, which are directly affected by local winds, and swell, the waves that were generated by the wind at a different location and time. This parameter takes account of both. More strictly, this parameter is four times the square root of the integral over all directions and all frequencies of the two-dimensional wave spectrum.”

The significant wave height is a basic parameter in wave characterization and the ability to predict it correctly is essential for different marine activities, e.g. measuring the intensity of storms and forecasting potential damage to coastal communities, marine vessels, and other infrastructure. Engineers use Hs to calculate the load on structures in the open ocean, such as oil platforms, or in coastal applications^{20,21}, prediction of mass transport, planning, logistics and safety of navigation²² or fishery activities. Significant wave height is the most important and critical parameter in feasibility studies and the design of wave energy converters²³, and its prediction is also crucial for marine renewable energy development²⁴. For this purpose many methods, i.e. experimental modelling, field measurements, or numerical modelling, have been applied by researchers for years with satisfactory results^{23,25–28}. When analysing the above, it becomes clear that using the significant wave height information for calculating the accessibility of a given offshore location in terms of the amount of time in which a survey can be carried out is reasonable. In the existing literature, accessibility has been evaluated in the context of the levels of access to marine renewable devices such as offshore wind turbines or wave energy converters for operation and maintenance activities. For this purpose, a wide range of metocean conditions and operational limits with a focus on Hs have been analysed^{16,29–32}.

According to the website of the Republic of Poland (www.gov.pl³³), the first OWFs in the Polish EEZ will start producing energy in 2026, whereas, as reported by H-Blix (H-Blix³⁴; www.h-blix.com.pl), it is expected that by 2030 almost 2300 foundations and 2150 turbines will have been installed in the Baltic Sea. Therefore, not only pre-investment research will be performed in the Polish EEZ, but also the construction and operation phases will begin. The project execution will require the involvement of large construction ships and a variety of smaller support vessels, e.g. for deployment of bubble curtain systems, guard and monitoring or crew transfer. The operational capabilities of these assets, above all, will depend on sea conditions³⁵. It also must be taken into account that the number of vessels suitable for supporting offshore wind projects is limited³⁴. Thus, correct information on the accessibility of a given offshore location in terms of the amount of time needed for a specific activity to be performed is essential for developers and vessel operators to get prepared for challenges such as establishing a realistic work schedule and the project budget¹⁶. This study aims to support the above-mentioned investment decisions and, therefore, it focuses on the following research objectives:

- (a) analysing the long-term model data for identification of the meteorological conditions at a selected location in the southern Baltic Sea;
- (b) using statistical analysis to quantify the levels of access to the chosen site;
- (c) quantifying the seasonality of the wave regimes by showing the number of hours each month, as well as annually, during which the wave height is below a certain level.

The results presented in this study make an important contribution to the environmental assessment of the southern Baltic Sea wave climatology over a period of 82 years based on long-term numerical simulations of the wave properties. The procedures presented for the analysed site may be applied in other areas of the Baltic Sea and all over the world. Scarce peer-reviewed research has been found in a literature review regarding the quantification of the levels of access to selected areas in the implementation of pre-investment surveys in the Polish EEZ. This paper, therefore, attempts to fill this research gap by presenting the results of our analysis that can be used when planning the implementation of offshore projects.

Materials and methods

Weather conditions at sea-model data and the study area

In recent times, there has been an emergence of global reanalysis data pertaining to meteorological and wave parameters³⁶. This dataset offers high temporal and spatial resolution and spans extensive time frames. Re-analyzed meteorological data holds potential in modeling various atmosphere–ocean interaction processes. Through the utilization of this data in conjunction with contemporary wave models, it is possible to conduct comprehensive examinations of wave patterns throughout oceans and seas, particularly in areas lacking direct measurement capabilities. Existing literature proves that mathematical modeling emerges as the most efficient method for studying the temporal and spatial variations of the wave field in the Baltic Sea²⁵. Moreover, models that are calibrated and validated using wave buoy data offer insights into the temporal and spatial changes in wave characteristics, including average and extreme wave climate features. A detailed literature review on this topic for the Baltic Sea was conducted by Sokolov and Chubarenko³⁶.

The existing literature demonstrates strong seasonal and spatial variability of sea states over the Baltic Sea, where the lower waves in the summer and higher waves in the winter are obvious^{26–28,36,37}. The average monthly significant wave heights and their extremes in the fall–winter period may even be twice as high as in the spring–summer months³⁸. Based on the reconstructed long-term wave conditions data, the largest average significant wave heights occur south of Gotland, east of Oland and in the Arkona Basin (> 0.9 m)³⁹, with the lowest heights recorded in the Gulf of Bothnia, the Gulf of Riga and the Gulf of Finland^{26,40}. High waves are a rare phenomenon due to the enclosed nature and small size of the basin⁴¹, however, hazardous waves may exceed even 12 m⁴².

The research site examined in this paper is located in the southern Baltic Sea region and presented in Fig. 1. The analysed data set comes from the ERA 5 reanalysis by the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). This model uses historical real-world weather data (i.e. satellite and weather buoy data) combined with numerical simulations to generate accurate weather datasets. For the purposes of this paper, data were collected for a single point (Fig. 1) located at a distance of 19.5 km from the Polish coastline. The ports closest to the location are in Władysławowo (approx. 3–4 h away, 19 Nm = 35 km) and Gdynia (approx. 7–8 h away, 48 Nm = 89 km). The data are provided in hourly resolution, covering the period between 1940 and 2022, and include information about the following parameters: date, time, and the significant height of combined wind waves and swell.

Working with data almost always brings to mind a question about their quality, as an important aspect of data analysis⁴³. By focusing on different dimensions of the data quality, in the case of the data set analyzed, one can mention that the number of observations collected in the analyzed data set within the considered period between 1940 and 2022 is 728,328. However, 728,280 observations refer to completed data, and in 48 observations, the values of the significant height of combined wind waves and swell are missing. In case of missing values the data cover two periods: from 24 April 1985, 10:00 AM, to 25 April 1985, 09:00 AM (24 observations), and from 15 March 1987, 10:00 AM, to 16 March 1987, 09:00 AM (also 24 observations). This shows that the completeness of the data is 99.993%. Hence, only the completed observations (728,280) have been taken into account and presented in Tables 1, 2, and 3.

By focusing on some other dimensions of data quality, the analyzed data are consistent (consistency dimension). They are stored in a single file. What is important the data set does not contain duplicated or repeated data (uniqueness dimension) and meets the accuracy requirements (accuracy dimension) as specified by ECMWF. No outliers or abnormal differences between two consecutive observations of have been detected in the significant height of combined wind waves and swell.

In the designated area, no in-situ measurements were conducted. However, in close proximity lies the planned BC-Wind OWF site, where hydrological and meteorological monitoring occurred at two locations: MH_01 (approximately 10 km away) and MH_02 (approximately 5 km away). These stations were equipped with a profiling current meter AWAC installed about 0.5 m above the seabed to measure wind-generated waves on the open sea surface. According to the inventory report of abiotic and biotic resources of the BC-wind research area (BCW_REP_ROOS_PL_A_ZAL_01 2021)⁴⁴ shared on the website by the Regional Directorate

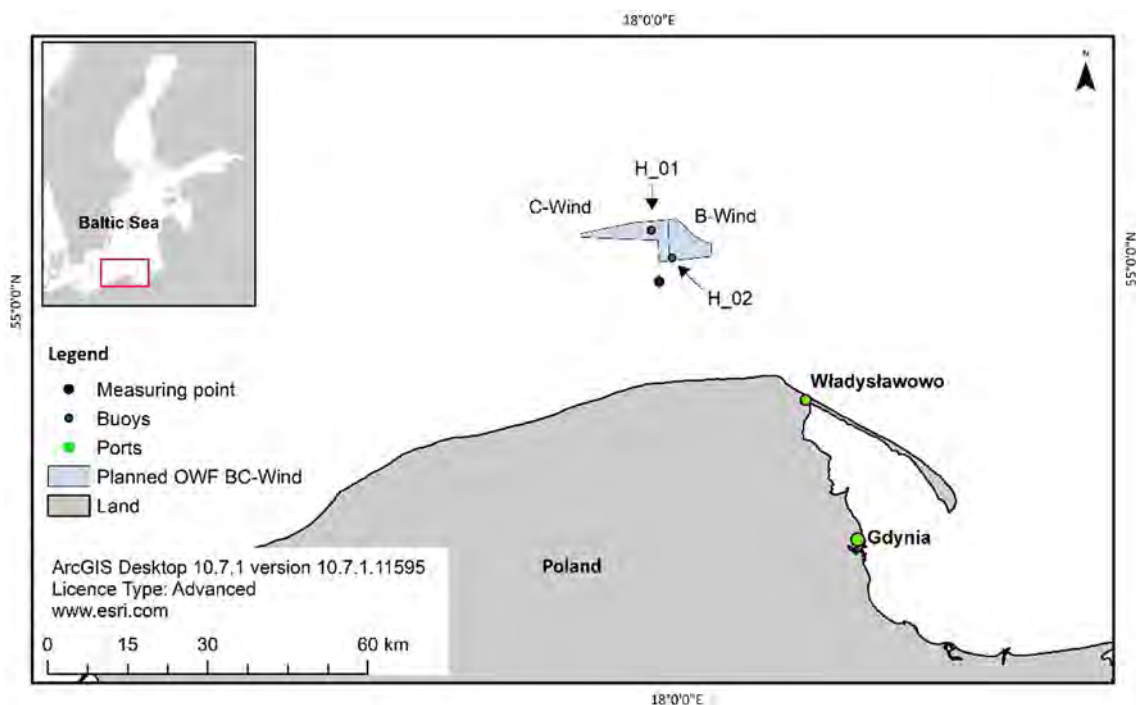


Fig. 1. Location of the measuring point in the Baltic Sea, with the coordinates (x,y) in the world geodetic system (WGS) 1984: 18° 0' 0" E, 55° 0' 00" N, and the locations of the measurement stations H_01 and H_02 within the BC-Wind OWF area. Map created in ArcGIS version 10.7.1.11595, www.esri.com.

Month	N	Mean	Min	Max	Std.dev
January	62,496	1.65	0.18	8.38	1.00
February	56,280	1.45	0.07	7.53	0.91
March	61,728	1.24	0.05	6.48	0.81
April	59,736	0.93	0.03	5.65	0.67
May	61,752	0.75	0.05	4.89	0.53
June	59,760	0.76	0.05	4.87	0.53
July	61,752	0.83	0.04	5.34	0.58
August	61,752	0.93	0.05	5.55	0.66
September	59,760	1.18	0.10	6.13	0.80
October	61,752	1.36	0.11	9.15	0.88
November	59,760	1.53	0.14	8.29	0.94
December	61,752	1.62	0.14	9.18	0.93

Table 1. Significant wave height (Hs), at the 18° 0′ 0″ E, 55° 0′ 00″ N location in 1940–2022.

Hs interval [m]	Number of occurrences	Cumulative occurrences	Percentage	Cumulative percentage	% Exceedance*
0.0 ≤ x < 0.5	152,829	152,829	20.98354	20.9835	100.0000
0.5 ≤ x < 1.0	226,493	379,322	31.09766	52.0812	79.0165
1.0 ≤ x < 1.5	149,434	528,756	20.51740	72.5986	47.9188
1.5 ≤ x < 2.0	88,167	616,923	12.10540	84.7040	27.4014
2.0 ≤ x < 2.5	51,126	668,049	7.01964	91.7236	15.2960
2.5 ≤ x < 3.0	29,380	697,429	4.03390	95.7575	8.2764
3.0 ≤ x < 3.5	15,466	712,895	2.12349	97.8810	4.2425
3.5 ≤ x < 4.0	7975	720,870	1.09497	98.9760	2.1190
4.0 ≤ x < 4.5	4020	724,890	0.55195	99.5280	1.0240
4.5 ≤ x < 5.0	1940	726,830	0.26636	99.7943	0.4720
5.0 ≤ x < 5.5	817	727,647	0.11217	99.9065	0.2057
5.5 ≤ x < 6.0	340	727,987	0.04668	99.9532	0.0935
6.0 ≤ x < 6.5	153	728,140	0.02101	99.9742	0.0468
6.5 ≤ x < 7.0	73	728,213	0.01002	99.9842	0.0258
7.0 ≤ x < 7.5	39	728,252	0.00535	99.9896	0.0158
7.5 ≤ x < 8.0	11	728,263	0.00151	99.9911	0.0104
8.0 ≤ x < 8.5	7	728,270	0.00096	99.9920	0.0089
8.5 ≤ x < 9.0	4	728,274	0.00055	99.9926	0.0080
9.0 ≤ x < 9.5	6	728,280	0.00082	99.9934	0.0074
9.5 ≤ x < 10.0	0	728,280	0.00000	99.9934	0.0066

Table 2. Distribution of the significant wave height with 0.5 m intervals in 1940–2022. *Percentage of the year when wave heights exceed the lower interval of the Hs interval (column 1).

for Environmental Protection, wave measurements lasted approximately 17 min and were repeated hourly in UTC time intervals. Due to the unavailability of commercial data, detailed analyses and comparisons of actual Hs measurements with model data for individual months are not feasible. Nonetheless, the report provides statistical wave characterizations for both stations from 21/10/2019 0:00, to 31/12/2022 0:00.

Data processing
Weather conditions for the marine research

In the offshore area, surveys are carried out from aboard vessels that have the autonomy to sail for up to several weeks, with the ship's working day lasting 24 h, and the crew large enough to work in shifts. The character and local condition of the seabed is the main factor impacting the towing geometry of data acquisition in the case of SSS. If the measuring instrument is towed too close to the seabed in conditions of variable bathymetry or diversified seabed relief, the device may hit the bottom or be dragged on the seabed itself. The disturbances to the surveys are also associated with weather. The prevailing weather conditions limit the use of the towed equipment set. The most common conditions encountered during surveys are waves of sufficient height to prevent the acquisition of data of acceptable quality. In practice, regardless of the direction from which the wave is coming in relation to the survey runline, a wave height of more than 1 m will result in cessation of data acquisition due to increased noise on the recorded data. Thus, the possibility and correct performance of marine research are

Month	Hs ≤ 0.5 m		Hs ≤ 1.0 m		Hs ≤ 1.5 m	
	p50	p90	p50	p90	p50	p90
January	78	16	201	111	333	234
February	105	34	212	116	336	225
March	160	81	295	192	413	320
April	247	161	393	294	490	409
May	292	211	452	372	550	489
June	290	192	449	364	547	467
July	276	162	441	318	544	452
August	233	163	405	313	512	439
September	172	95	311	224	427	359
October	148	61	288	185	402	308
November	104	35	235	119	350	232
December	75	25	204	115	333	232

Table 3. Comparison of mean operating hour percentiles for $H_s \leq 0.5$, $H_s \leq 1.0$ and $H_s \leq 1.5$

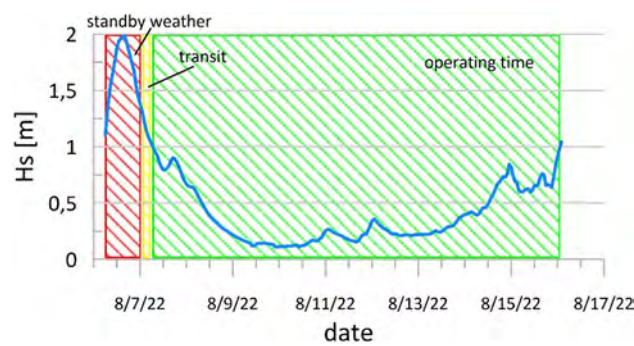


Fig. 2. Exemplary H_s time series with types of actions that should be taken (weather standby, transit, operating time) depending on the H_s .

limited by weather conditions, primarily wind and wave height^{6,30,32}. Severe weather conditions may also pose a threat to the lives of people working on the ship, cause equipment failure and damage¹³, and diminish the quality of data collected so that the survey does not meet the requirements in this regard. Therefore, unfavourable weather conditions may cause cessation of work, vessel's return to the nearest port of refuge and weather standby.

For the purposes of the paper, the following factors were taken into account when analysing the data: significant wave heights which limit the possibility of conducting surveys, time of transit to the survey area, the ship's autonomy and her working day length. The model data covering the years 1940–2022 at the selected point at sea (Fig. 1) were divided into periods of adverse weather conditions when the vessel must remain in port (weather standby) and into periods of time when surveys could be carried out (potential operating time). The deterioration of weather conditions forces the work to be stopped and the ship to return to the port. Our analysis also takes into account the period of time which is needed for the vessel to reach the port and return to the survey area (transit). The figure (Fig. 2) below shows an example of H_s time series covering the period between the 6th and 16th of August 2022 and the breakdown of time into types of actions which should be taken according to significant wave height.

The green area denotes the weather window lasting approximately 204 h (8.5 days), which is when surveys can be carried out. For the selected location, the required transit time was assumed to be 4 h (yellow field, Fig. 2). The red area means downtime when H_s exceeds the limit for work. Bearing in mind the above assumptions, the number of hours with potential operating time, weather standby and the time required for transit to and from the survey area were calculated for a period of 82 years divided into individual months. It was assumed that the significant wave height for the survey was $H_s \leq 1$ m and that work would be carried out 24 h a day, 7 days a week. Similar analyses for $H_s \leq 0.5$ m and $H_s \leq 1.5$ m were conducted to compare the accessibility of the survey area for different ship types and different scopes of work. The results are presented further in the article.

Statistical analysis

Simpler statistical analysis methods were used in this paper. Separate calculations were carried out for a period of 82 years, as well as for each season or month. To present the wave conditions at the selected location, the significant wave height seasonal variability was estimated. The seasonality of the wave regimes was quantified by calculating wave height frequencies and the annual mean exceedances³¹. The results are presented in the form of tables (Tables 1, 2, 3) and scatter plots (Figs. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

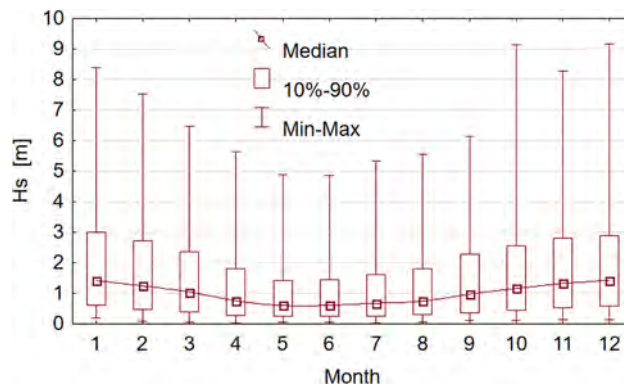


Fig. 3. Characteristics of the significant wave height variability at the location selected for analysis based on the data for 1940–2022 on the basis of the ERA 5 model.

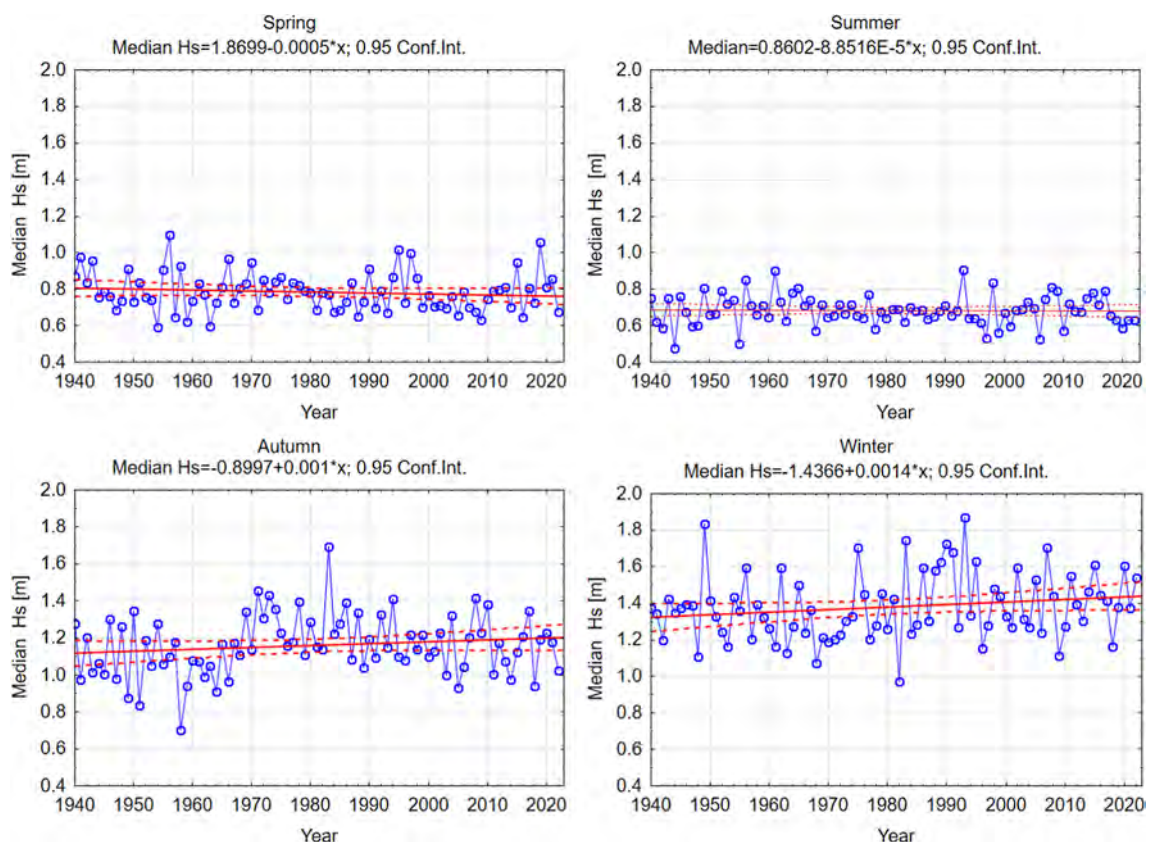


Fig. 4. Seasonal variability of the significant wave height in 1940–2022, red dashed line is 95% confidence interval.

Results

A statistical analysis of the significant wave height determined with a frequency of 1 h in the period between 01/01/1940 0:00 and 31/12/2022 24:00 (Fig. 3) shows that its size depended on the season, and the median value ranged from 0.75 m in May to 1.65 m in January. 90% of the time in the summer months, this height did not reach 2 m, and in winter and autumn only in January it was about 3 m. Since quite rapid climate changes are being currently observed⁴⁵, and bearing in mind quite a long observation period, it was verified whether there has been any significant trend as regards the variability of this sea surface parameter. The presented drawings show that, in general, over the last 82 years, the significant wave height increased minimally, i.e. by about 0.5 cm. Taking into account individual seasons (Fig. 4), this increase was recorded only in the cold season (~21 cm in winter and ~8 cm in autumn), and in the warm season, there was even a decrease (~6 cm in spring and ~3 cm

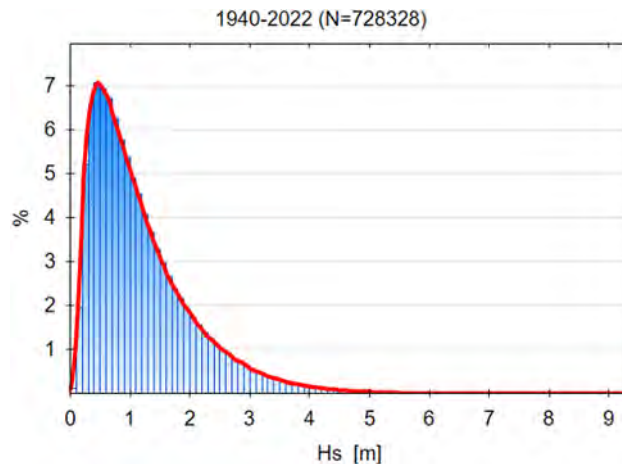


Fig. 5. Wave height as a percentage of the total wave regime at the selected location.

in summer). This means the following changes over a period of 10 years: -0.7 cm (spring), -0.4 cm (summer), +1 cm (autumn) and +2.6 cm (winter). Taking into consideration the yearly fluctuations in the seasonal median significant wave height, within the framework of the article's objectives, the detected 21 cm alteration throughout the cold season, corresponding to about 2.6 mm annually, does not seem notably substantial.

Wave height frequency

The wave height frequency is the percentage of the total wave regime consisting of waves at each individual wave height. The frequency of significant wave height occurrence at the selected location over the 82 years is shown in the figure below (Fig. 5). An interval of 10 cm was used to process the data; it means that, for example, significant waves with a height between 0.5 and 0.6 m in 1940–2022 accounted for 7% (Fig. 5). The results indicate that waves with a height of $H_s \in [2 \text{ m}, 2.1 \text{ m})$ accounted for less than 2%, and $H_s \in [3 \text{ m}, 3.1 \text{ m})$ for less than 0.5% of the cases.

The analysis of the data set for 82 years (Table 1) shows that the highest mean H_s values were observed in January (1.65 m) and December (1.62 m). Mean H_s values above 1.5 m also occurred in November. Mean H_s below 1 m was recorded between April and August, with the lowest value in May (0.75 m). The maximum $H_s = 9.18 \text{ m}$ was observed in December.

The significant wave height as a percentage of the total wave regime in individual months is presented below (Fig. 6). The results show that the highest percentage (12%) of waves was for H_s from 0.4 to 0.545 m in May and June. Waves with a height of $H_s \in [0.4 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$ were the least frequent in December and January (less than 4%). During this period waves with a height of $H_s \in [1 \text{ m}, 1.1 \text{ m})$ occurred most often (approx. 5%).

Mean annual exceedance

The plot below (Fig. 7) presents the percentage of the year when the significant wave height is above a certain level. The analysis shows that 30% of the wave height incidence was above 1.5 m, while 80% waves were above 0.5 m (Table 2).

The percentage of cases, when the significant wave height was above a certain level in individual months, are presented below (Fig. 8). The analysis of the charts shows that the most favourable period for conducting research, i.e. when the smallest number of occurrences of large values of significant waves is recorded, is in May and June (just over 20% of cases when $H_s > 1.5 \text{ m}$). The least favourable period is in December, January and February when this condition is satisfied more than 60% of the time.

The share of time based on wave conditions

The analysis of the amount of time available for work at sea at the selected location in the southern Baltic Sea exposes significant variability throughout the year. The figure below (Fig. 9) presents a breakdown of time into operating time, weather standby and transit in individual months between 1940 and 2022. The most favourable conditions for conducting surveys were observed between May and August when average operating time exceeded 400 h per month (Fig. 9), reaching the maximum in August (708 h). This was followed by a systematic drop in the amount of the potential operating time in autumn and winter, with the lowest average values recorded in January (206 h) and December (212 h). According to our analysis, no operating hours were recorded in December and a minimum of 1 operating hour was observed in January. However, it should be underlined that this happened in one particular year. The results of statistical research cover the total of 82 years, with the values differing in individual years, for example in February 1982, the number of operating hours exceeded 500, while in July 1974, the number of operating hours was lower than 200.

The boxplots below (Fig. 10) present the mean number of work hours at a given location for $H_s \leq 0.5 \text{ m}$, $H_s \leq 1 \text{ m}$ and $H_s \leq 1.5 \text{ m}$. According to the analysis, the highest mean number of working hours was recorded between May and August, when the mean number of operating hours was above 500 for $H_s \leq 1.5 \text{ m}$ and 400 for $H_s \leq 1 \text{ m}$. For the wave limitation of $H_s \leq 0.5 \text{ m}$, the highest average number of operating hours was in May and

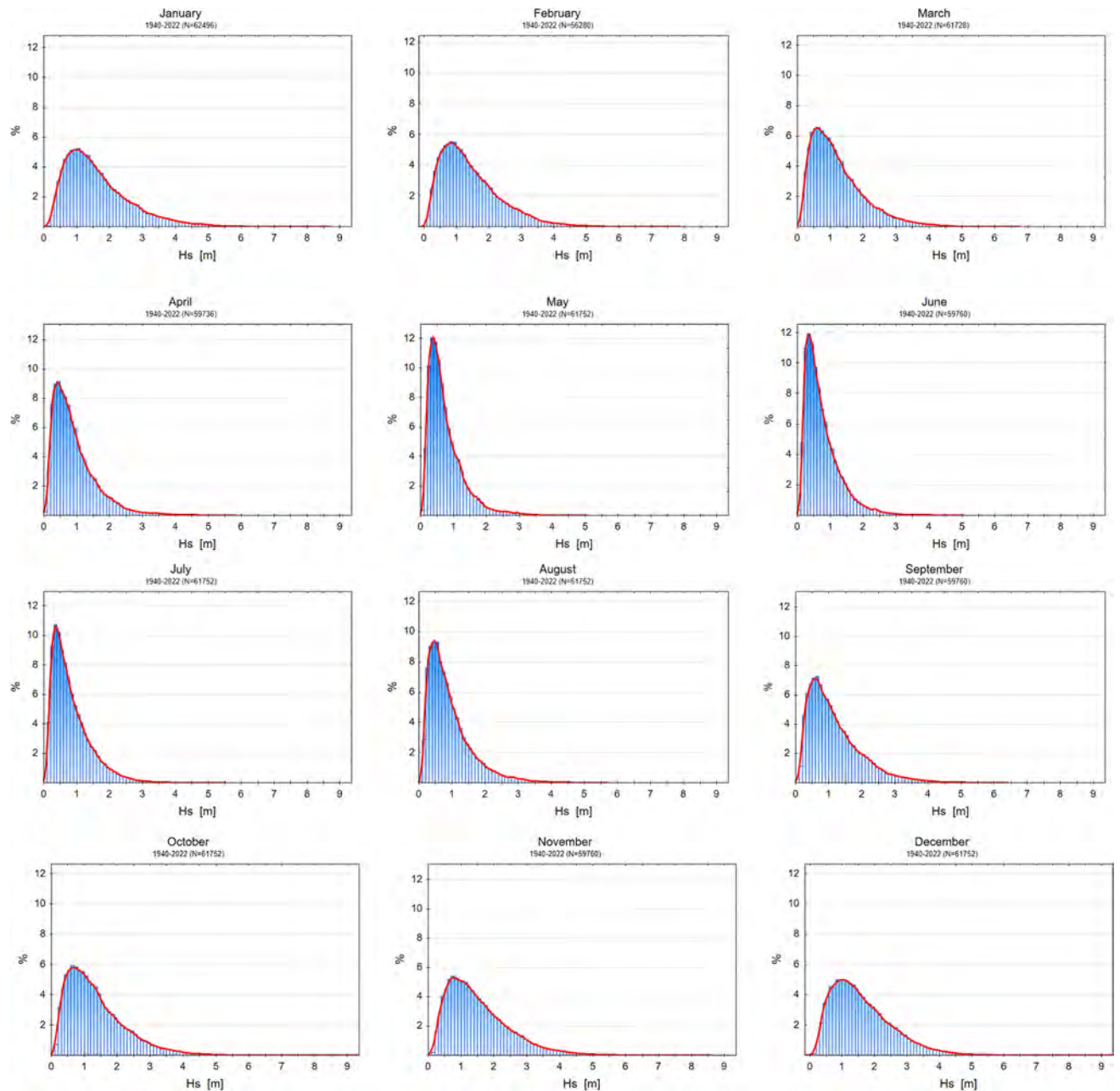


Fig. 6. Significant wave height as a percentage of the total wave regime in individual months at the selected location.

June (almost 300). The lowest number of working hours was observed in the winter season, i.e. in December and January, when the operating time may be less than 100 h.

The highest percentile values for the mean operating hours were observed in May (Table 3), when the 50th percentile reached the level of 550 h and the 90th percentile reached the level of 489 h for $H_s \leq 1.5$ m. Similarly, in the case of more restricted H_s values ($H_s \leq 0.5$, $H_s \leq 1.0$), the percentiles were also the highest in May. Most of the operating time (90th percentile) was observed in late spring and summer (between May and September).

Discussion

The article presents environmental conditions important for conducting research resulting from the wave-related variability of the sea surface condition. The significant wave height was adopted as a parameter commonly used to describe this variability. A location in the Baltic Sea was selected for analysis in the area that is planned for the so-called offshore investments, which also requires knowledge about the site's availability and conditions for conducting research using, among others, research vessels. Long-term numerical simulations of the wave properties enabled us to estimate the basic characteristics of the wave climatology of the southern Baltic Sea over

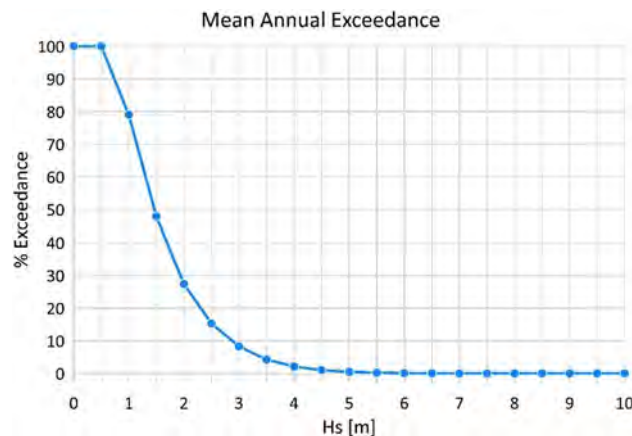


Fig. 7. Mean annual exceedance showing the percentage of the year when the wave heights were above a certain level at the selected station as averaged for 1940–2022.

an 82-year period. The analysis showed high seasonality of wave regimes on a monthly and annual basis, and, consequently, seasonal variability in the availability of the selected location.

The study reveals that the lowest H_s occurred in late spring and summer, i.e. between May and August. Similar results were obtained in Kubacka et al.⁶, where model data for a point located 50 km west of the location discussed herein were analysed. The mean H_s values for these four months were also the lowest and they were respectively: 0.56 m, 0.57 m, 0.66 m and 0.53 m, and, moreover, for May, June and July the difference was about 0.2 m. Based on the data for 82 years, it was revealed that the highest mean H_s levels have been recorded in January (1.65 m) and December (1.62 m), and mean $H_s > 1$ m was also observed in February, March, and in the last quarter of the year, whereas⁶ indicated the occurrence of mean $H_s > 1$ m only in December. The obtained values are higher than the monthly mean H_s in the northern Baltic Proper (with the maximum value of 1.4 m in December) and lower than in the Gulf of Finland (with the maximum value of 0.5 m in October). Wave intensity presented and analysed in this paper largely follows the seasonal pattern of the Baltic Sea and is the highest in November–January and the lowest in late spring and summer^{26–28,37,39}. This variability is also adequately mirrored by wave condition models^{27,28}.

When comparing BC-Wind OWF's data with ERA5, we find that the mean H_s during this period is 0.13 m lower at station H_01 (1.19 m) and 0.26 m lower at station H_02 (1.06 m) compared to the location analyzed in this paper. Over an 82-year span, the average H_s values are equivalent at location H_01 and 0.13 m higher at location H_02. Wave data derived from WAM computation, as presented in Kubacka et al.⁶, are, on average, 0.5 m lower compared to all three locations from Fig. 1. The report indicates that wave activity on the open sea surface varied seasonally, from calm in summer to intense in winter. The maximum recorded wave heights were 9.56 m at H_01 (November) and 8.68 m at H_02, while ERA5 provides a maximum value of 6.48 m for the same timeframe.

Based on long-term reconstructions of the wave field data, we have calculated the accessibility (potential operating time) when surveys can be carried out at a selected location at sea. The highest mean number of work hours was observed between May and August, when the mean number of operating hours was above 500 for $H_s \leq 1.5$ m, which was ~72% of the entire month. According to the time availability for a nearby location calculated by Kubacka et al.⁶, more than 70% of operating time falls in the period between March and September with the same H_s limit. The least favourable working conditions were observed in winter (January and December), and operating time of less than 400 h per month (below 60%) was recorded between November and February. Kubacka et al.⁶ show operating time below 60% only in January and December. Wave activity may be much less favourable for work in other offshore regions. For example, the average number of hours in a month when $H_s \leq 1.5$ m on the western coast of Ireland exceeds 200 only in July and August³¹, whereas in late autumn and winter (between November and January) H_s exceeds 1.5 m. Similarly, in the Scottish waters, H_s is above 1.5 m between December and February¹⁶, which gives about 250 more operating hours in summer in the southern Baltic Sea and the possibility of conducting surveys in winter. Therefore, the wave conditions prevailing at the selected location are relatively favourable for work throughout the year. The worst-case scenario is for $H_s \leq 1$ m and $H_s \leq 0.5$ m. The annual mean values of $H_s \leq 1$ m are recorded between April and August and they are never below 0.5 m. When analysing individual months, there is almost two times more operating time in late spring and summer in comparison with $H_s \leq 0.5$ m. For this limit, there are less than 100 operating hours during the winter season and approx. 200 operating hours at $H_s \leq 1$ m.

This selected location may not adequately represent the entire Baltic Sea, including the southern Baltic Sea region. Existing literature clearly illustrates the spatial variability of sea conditions throughout the Baltic Sea, highlighting the most intense wave climate in the eastern part of the Baltic proper, less severe in the Sea of Bothnia and notably milder in the bays. Even a simple statistical analysis of the results from two measurement buoys, located approximately 7 km apart, reveals differences in the outcomes, although they are not significant. However, the presented method can be applied to assess wave conditions in other locations, especially that it has

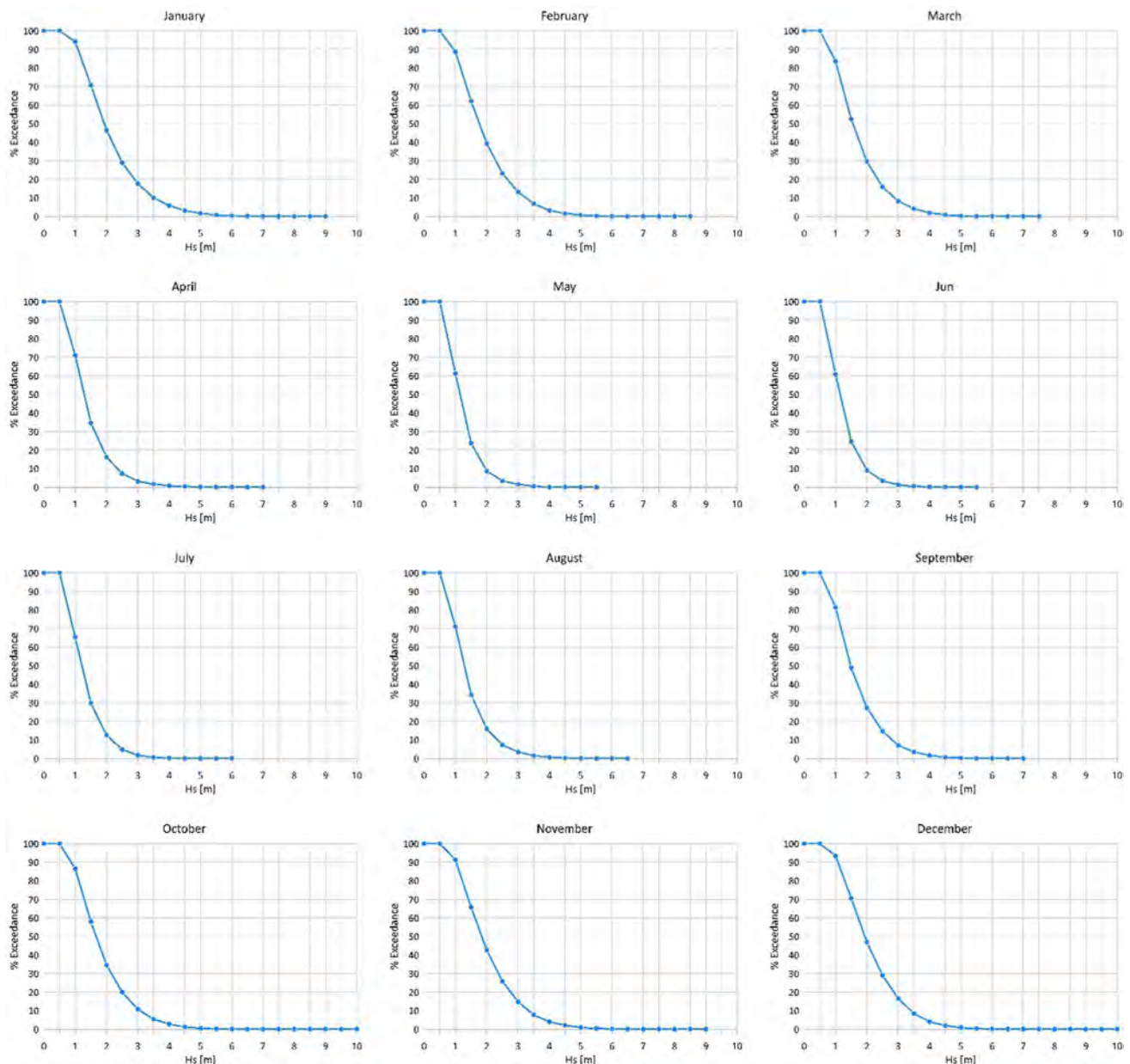


Fig. 8. Monthly distributions of the significant wave heights showing their percentages above a certain level at the selected station as averaged for 1940–2022.

been demonstrated that wave models with medium resolution adequately replicate the main properties of the Baltic Sea wave climate in terms of wave heights²⁵.

This particular study has some limitations that are due to the fact that the statistics presented in this paper take no account of the persistence or consecutive nature of the wave heights in relation to one another, thus neglecting a consideration of time needed for planned marine operations. Next to the environmental threshold, such parameters as the length of the weather window should be taken into account^{12,16,31}. Environmental surveys take time and it is essential to determine whether a particular weather window is long enough to start operations, otherwise, unnecessary additional costs may be incurred. Here, the time needed for transit should also be considered because a weather window which is too short may result in cessation of work after a few hours. The presented results reflect the wave conditions prevailing at the selected location and provide the identification of the times in a year when lower wave heights are expected. On the other hand, the presented exceedance graphs show that the wave heights are below a certain level of 5% during the selected period (year, season, month), but this does not demonstrate how many weather windows make up this particular percentage. This method does not give a complete picture of the accessibility of the survey site but the exceedance values determined can be an integral part of different weather risk^{6,46} assessment scenarios. Involving the long-term reconstructions of the wave fields or decades-long continuous measurement time series is the most reliable way to obtain satisfying return results. Kubacka et al.⁶ proposed to avoid the risk of surveys timed for the storm period using met-ocean

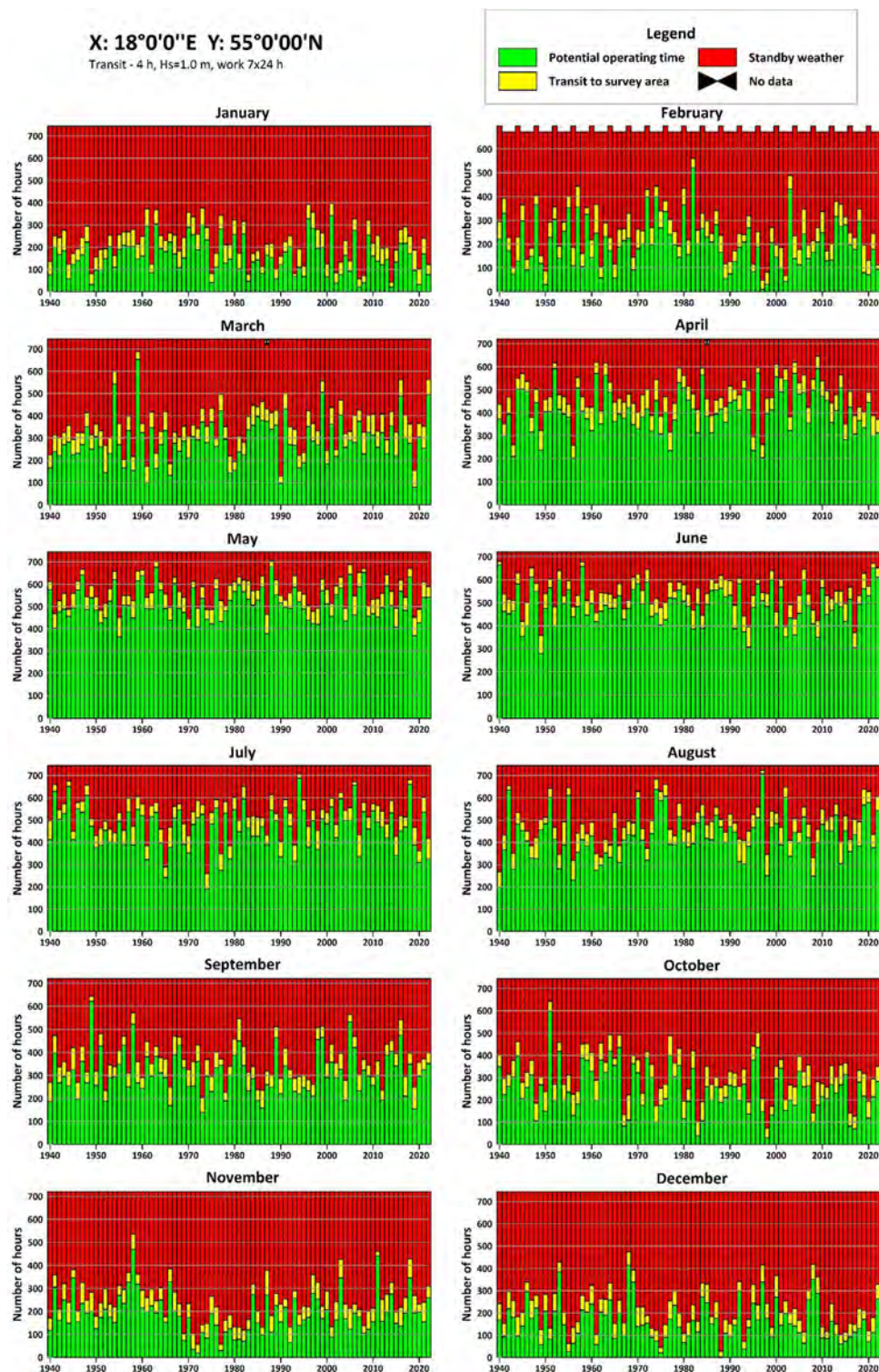


Fig. 9. The share of time into operating time, weather standby and transit with $H_s \leq 1$ m in individual months between 1940 and 2022 at the selected Baltic Sea location.

parameters and statistical data for time reserves assigned for an individual task depending on the month and the offshore location. Such recognition of the weather conditions in the planned survey area is crucial for risk assessment and work schedule planning, where it seems obvious that commencing surveys in the spring season will be more beneficial than in autumn. Moreover, the obtained results open up prospects for further research endeavours to compare the actual time needed to carry out surveys at the selected location with the theoretical amount of time calculated on the basis of statistical analyses.

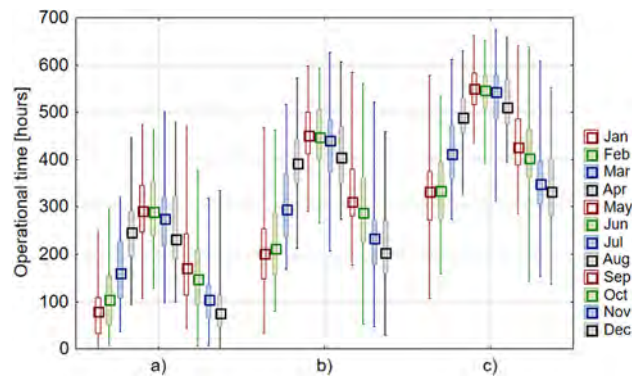


Fig. 10. The breakdown of operating time into individual months at the selected Baltic Sea location for (a) $H_s \leq 0.5$, (b) $H_s \leq 1.0$ and (c) $H_s \leq 1.5$.

In this study, the significant height of combined wind waves and swell was the only parameter analysed in the context of the selected location's accessibility for research, but there are more environmental factors affecting offshore operations which require consideration. The presented assessment may be extended with a wider range of met-ocean parameters, for example the peak wave period, mean wind speed³², visibility^{35,47} or icing^{13,48}. A problem that calls for further research is also applying these parameters over a greater range of southern Baltic Sea locations.

Conclusions

This paper's results are based on 82 years of numerical simulations of the significant height of combined wind waves and swell. The analysis of long-term data (82 years) shows that the meteorological conditions prevailing during this period did not undergo any changes that would affect the significant wave height. The presented findings enabled us to estimate the basic characteristics of the southern Baltic Sea wave climatology for over eight decades, which was the basis for determining the accessibility of the offshore location in research terms. The wave conditions in the selected area vary strongly between seasons, with the difference in the mean wave heights between the roughest and the calmest months being 2.2 times. When comparing the results with the existing literature, the weather conditions at the analysed location are favourable for conducting surveys at sea all year round, also in the winter season. The calculated statistics concerning the height level below which the waves at the site must remain, is an informative measure, but it does not give a complete picture of the survey site's accessibility. A problem that calls for further research is a weather window analysis.

Data availability

The datasets used and analysed during the current study available from the corresponding author on reasonable request.

Received: 24 June 2024; Accepted: 1 October 2024

Published online: 19 October 2024

References

- Blondel, P. *The Handbook of Sidescan Sonar* (Springer, Berlin, 2009). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49886-5>.
- Lamarche, G. & Lurton, X. Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Mar. Geophys. Res.* **39**, 5–22. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9315-6> (2018).
- Ferreira, I. O., Andrade, L. C., Teixeira, V. G. & Santos, F. C. M. State of art of bathymetric surveys. *Bull. Geodetic Sci.* **28**, e2022002. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702022000100002> (2022).
- Trzcinska, K. et al. Measurement of seafloor acoustic backscatter angular dependence at 150 kHz using a multibeam echosounder. *Remote Sensing* **13**, 4771. <https://doi.org/10.3390/rs13234771> (2021).
- Poulsen, T. & Lema, R. Is the supply chain ready for the green transformation? The case of offshore wind logistics. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **73**, 758–771. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.181> (2017).
- Kubacka, M., Matczak, M., Kalas, M., Gajewski, L. & Burchacz, M. Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the polish exclusive economic zone. *Wea. Clim. Soc.* **13**, 899–911. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0168.1> (2021).
- Douard, F., Domecq, C. & Lair, W. A probabilistic approach to introduce risk measurement indicators to an offshore wind project evaluation—Improvement to an existing tool ecume. *Energy Proc.* **24**, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.107> (2012).
- Lednicka, B. et al. Water turbidity and suspended particulate matter concentration at dredged material dumping sites in the southern baltic. *Sensors* **22**, 8049. <https://doi.org/10.3390/s22208049> (2022).
- Pydyn, A., Popek, M., Kubacka, M. & Janowski, L. Exploration and reconstruction of a medieval harbour using hydroacoustics, 3-D shallow seismic and underwater photogrammetry: A case study from Puck, southern Baltic Sea. *Archaeol. Prospect.* **28**, 527–542. <https://doi.org/10.1002/arp.1823> (2021).
- Janowski, L. et al. Offshore benthic habitat mapping based on object-based image analysis and geomorphometric approach. A case study from the Slupsk Bank, Southern Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* **801**, 149712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149712> (2021).

11. Leimeister, M. & Kolios, A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **91**, 1065–1076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004> (2018).
12. Walker, R. T., van Nieuwkoop-McCall, J., Johanning, L. & Parkinson, R. J. Calculating weather windows: Application to transit, installation and the implications on deployment success. *Ocean Eng.* **68**, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.015> (2013).
13. Kubacka, M. et al. Many faces of survey equipment failures during marine research at sea-risk analysis. *PLoS ONE* **17**, e0272960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272960> (2022).
14. Gilbert, C., Browell, J. & McMillan, D. Probabilistic access forecasting for improved offshore operations. *Int. J. Forecast.* **37**, 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.03.007> (2021).
15. Astariz, S., Abanades, J., Pérez-Collazo, C. & Iglesias, G. Improving wind farm accessibility for operation & maintenance through a co-located wave farm: Influence of layout and wave climate. *Energy Convers. Manag.* **95**, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.040> (2015).
16. Rowell, D., Jenkins, B., Carroll, J. & McMillan, D. How does the accessibility of floating wind farm sites compare to existing fixed bottom sites?. *Energies* **15**, 8946. <https://doi.org/10.3390/en15238946> (2022).
17. Komen, G. J. et al. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves* (Cambridge University Press, Cambridge, 1994). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628955>.
18. Paplińska-Swepel, B. & Paszke, Ł. Application of neural networks to the prediction of significant wave height at selected locations on the Baltic sea. *Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech.* **53**, 183–201 (2006).
19. Hersbach, H. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store* <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> (2023).
20. Pang, J. & Dong, S. A novel multivariable hybrid model to improve short and long-term significant wave height prediction. *Appl. Energy* **351**, 121813. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121813> (2023).
21. Szmytkiewicz, P., Szmytkiewicz, M., Ostrowski, R. & Marcinkowski, T. Determination of the optimal groin length on a sandy multibar shore of a Nontidal Sea: Case study of the Hel Peninsula, Poland, South Baltic Sea. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.* **148**, 5022003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000714](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000714) (2022).
22. Anastopoulos, P. A. & Spyrou, K. J. Extrapolation of ship capsizing probability over significant wave height: Foundation on wave groups theory. *Ocean Eng.* **281**, 114766. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114766> (2023).
23. Mahdavi-Meymand, A. & Sulisz, W. Application of nested artificial neural network for the prediction of significant wave height. *Renew. Energy* **209**, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.118> (2023).
24. Cuadra, L., Salcedo-Sanz, S., Nieto-Borge, J. C., Alexandre, E. & Rodríguez, G. Computational intelligence in wave energy: Comprehensive review and case study. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **58**, 1223–1246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.253> (2016).
25. Giudici, A. et al. A comparison of Baltic Sea wave properties simulated using two modelled wind data sets. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* **290**, 108401. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108401> (2023).
26. Björkvist, J.-V. et al. Comparing a 41-year model hindcast with decades of wave measurements from the Baltic Sea. *Ocean Eng.* **152**, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.048> (2018).
27. Soomere, T. & Räämet, A. Long-term spatial variations in the Baltic Sea wave fields. *Ocean Sci.* **7**, 141–150. <https://doi.org/10.5194/os-7-141-2011> (2011).
28. Jönsson, A., Broman, B. & Rahm, L. Variations in the Baltic Sea wave fields. *Ocean Eng.* **30**, 107–126. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00103-2) (2003).
29. Feuchtwang, J. & Infield, D. Offshore wind turbine maintenance access: A closed-form probabilistic method for calculating delays caused by sea-state. *Wind Energy* **16**, 1049–1066. <https://doi.org/10.1002/we.1539> (2013).
30. Silva, N. & Estanqueiro, A. Impact of weather conditions on the windows of opportunity for operation of offshore wind farms in Portugal. *Wind Eng.* **37**, 257–268. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.37.3.257> (2013).
31. O'Connor, M., Lewis, T. & Dalton, G. Weather window analysis of Irish west coast wave data with relevance to operations & maintenance of marine renewables. *Renew. Energy* **52**, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.021> (2013).
32. O'Connor, M., Bourke, D., Curtin, T., Lewis, T. & Dalton, G. Weather windows analysis incorporating wave height, wave period, wind speed and tidal current with relevance to deployment and maintenance of marine renewables. In *4th International Conference on Ocean Energy*, 17 October, Dublin (2012).
33. The Offshore Wind Development Programme. <https://www.gov.pl/web/morska-energetyka-wiatrowa/program-rozwoju-morskich-farm-wiatrowych>. Retrieved 12.10.2023.
34. H-BLIX, Offshore wind vessel availability until 2030: Baltic Sea and Polish perspective–June 2022. <http://h-blix.com.pl>. Retrieved 10.10.2023.
35. Konuk, E.-B. et al. On the definition of a comprehensive technology-informed accessibility metric for offshore renewable energy site selection. *J. Mar. Sci. Eng.* **11**, 1702. <https://doi.org/10.3390/jmse11091702> (2023).
36. Sokolov, A. & Chubarenko, B. Baltic sea wave climate in 1979–2018: Numerical modelling results. *Ocean Eng.* **297**, 117088. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117088> (2024).
37. Sapiega, P., Zalewska, T. & Struzik, P. Application of SWAN model for wave forecasting in the southern Baltic Sea supplemented with measurement and satellite data. *Environ. Model. Softw.* **163**, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105624> (2023).
38. Tuomi, L., Kahma, K. K. & Pettersson, H. Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.* **16**, 451–472 (2011).
39. Soomere, T. & Räämet, A. Spatial patterns of the wave climate in the Baltic Proper and the Gulf of Finland. *Oceanologia* **53**(Supplement 1), 335–371. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TL335> (2011).
40. Räämet, A., Soomere, T. & Zaitseva-Pärnaste, I. Variations in extreme wave heights and wave directions in the north-eastern Baltic Sea. *Proc. Estonian Acad. Sci.* **59**, 182–192. <https://doi.org/10.3176/proc.2010.2.18> (2010).
41. Jakimavičius, D., Kriaučiūnienė, J. & Šarausienė, D. Assessment of wave climate and energy resources in the Baltic Sea nearshore (Lithuanian territorial water). *Oceanologia* **60**, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.10.004> (2018).
42. Sulisz, W., Paprota, M. & Reda, A. Extreme waves in the southern Baltic Sea. *Ciencias Marinas* **42**, 123–137. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i2.2599> (2016).
43. Sidi, F., Shariat Panahy, P. H., Affendey, L. S., Jabar, M. A., Ibrahim, H. & Mustapha, A. Data quality: A survey of data quality dimensions, In: *Proceedings of the IEEE 2012 International Conference on Information Retrieval & Knowledge Management, Kuala Lumpur, Malaysia* 300–304. <https://doi.org/10.1109/InfRKM.2012.6204995> (2012).
44. Regional Directorate for Environmental Protection, Inventory report of abiotic and biotic resources of the BC-wind OWF research area. http://portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/MFW_BC-WIND/DO%20UDZIA%C5%81U%20SPO%C5%81ECZNEGO/ZAL_1/BCW_REP_ROOS_PL_A_ZAL_01.pdf (2021). Retrieved 06.04.2024.
45. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647> (2023).
46. Campbell, S. D. & Diebold, F. X. Weather forecasting for weather derivatives. *J. Am. Stat. Assoc.* **100**, 6–16. <https://doi.org/10.1198/016214504000001051> (2005).

47. Sullivan, R., Cothren, J., Winters, S. L., Cooper, C., Williamson, M. & Ball, D. An assessment of offshore wind turbine visibility in the United Kingdom. 2012 Oceans, 14–19 October 2012, Hampton Roads, VA, USA, 1–9, <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405138> (2012).
48. Battisti, L., Fedrizzi, R., Brighenti, A. & Laakso, T. Sea ice and icing risk for offshore wind turbines. Owemes 2006, 20–22 April, Citavecchia, Italy (2006).

Acknowledgements

We sincerely thank Karolina Rogóż-Badzińska for her precise translation of this manuscript, and Teresa Moroz-Kunicka and Mateusz Kunicki for their valuable edits, all of which greatly improved the clarity and quality of the final text. This study was funded by the Gdynia Maritime University, the research projects: IM/2024/PZ/03 (1005).

Author contributions

M.K., A.K. and D.B. wrote the main manuscript text, M.K., A.K., J.G. and D.B. analyzed the data, M.K., A.K., J.G. prepared figures. All authors reviewed the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to M.K.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

© The Author(s) 2024

Publikacja nr 4

Rozdział w monografii pt.:

Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego

w książce: „Zarządzanie ryzykiem w przemyśle offshore”, 2024, A. Blokus-Dziula (red.), Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, s. 103–128

autorzy: **Maria Kubacka**, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski

Rozdział analizuje ryzyka związane z prowadzeniem badań geofizycznych w projektach inwestycyjnych na morzu, ze szczególnym uwzględnieniem warunków pogodowych w polskiej WSE. Omówiono również sezonowe zmiany parametrów falowania, które determinują dostępność obszarów badawczych na przykładzie dwóch lokalizacji: jednej w Zatoce Gdańskiej oraz drugiej na otwartych wodach Bałtyku.

ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PRZEMYŚLE OFFSHORE

**Praca zbiorowa
pod redakcją Agnieszki Blokus-Dziula**

Gdynia 2024

REDAKTOR NAUKOWY: dr hab. AGNIESZKA BLOKUS-DZIULA

RECENZENCI NAUKOWI:

dr hab. inż. BOŻENA BABIARZ, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
dr hab. AGNIESZKA BLOKUS-DZIULA, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr hab. MAGDALENA BOGALECKA, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr inż. kpt. ż.w. JAROSŁAW CYDEJKO, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr AGATA CZOPEK, Philip Morris International
dr hab. SAMBOR GUZE, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr TOMASZ HARACKIEWICZ, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr ŁUKASZ JANOWSKI, Uniwersytet Morski w Gdyni
dr inż. SEBASTIAN KOWALCZYK, Energa Wytwarzanie S.A.
dr inż. kpt. ż.w. PRZEMYSŁAW WILCZYŃSKI, Uniwersytet Morski w Gdyni

RECENZENCI BRANŻOWI:

JAKUB BUDZYŃSKI, Polskie Towarzystwo Morskiej Energetyki Wiatrowej
WOJCIECH CHOJNACKI, NKT S.A.
ROBERT GRZEGOROWSKI, ekspert branżowy
MAGDALENA JABŁONOWSKA, LOTOS Petrobaltic S.A.
PAWEŁ KLIM, Seatech Engineering Ltd.
PIOTR KUBAŁA, PGE Baltica Sp. z o.o.
ANNA MARCINIEC, Nevion Sp. z o.o.
PAWEŁ MILANOWSKI, Seaway7
JAROSŁAW MRÓZ, Subsea7 S.A.
PAWEŁ ZIEMIŃSKI, PGE Energia Odnawialna S.A.

Publikacja współfinansowana przez PGE Baltica – patrona studiów
podyplomowych *Zarządzanie ryzykiem w morskim przemyśle wydobywczym
i energetyce wiatrowej.*

REDAKCJA I KOREKTA: Ewa GIEDZIUN

PROJEKT OKŁADKI: Krzysztof BECKER

WYDAWNICTWO UNIwersYTETU MORSKIEGO W GDYNI

WYDAWCA:



UNIwersYTET MORSKI W GDYNI

ul. Morska 81-87
81-225 Gdynia
www.umg.edu.pl

ISBN 978-83-67428-35-4

e-ISBN 978-83-67428-36-1

Wszelkie prawa autorskie i wydawnicze zastrzeżone

Materiały wykorzystane w projekcie okładki udostępniło Biuro Promocji i Komunikacji UMG.

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	5
<i>Sławomir Baldyga, Agnieszka Blokus-Dziula</i>	
Rozdział 1	
MIĘDZY TEORIĄ A PRAKTYKĄ – ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W BRANŻY MORSKIEJ ENERGETYKI WIATROWEJ W OBLCZU RYNKOWYCH TURBULENCJI	15
<i>Łukasz Sikorski</i>	
Rozdział 2	
ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PROJEKTACH	30
<i>Maciej Krupa</i>	
Rozdział 3	
ROLA KOMPETENCJI MIĘKKICH W ZARZĄDZANIU PROJEKTAMI ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM KOMUNIKACJI	41
<i>Joanna Rybicka-Gornowicz</i>	
Rozdział 4	
TECHNICZNA ANALIZA I OCENA RYZYKA	60
<i>Dawid Dobrzański</i>	
Rozdział 5	
GEOLOGICZNE WARUNKI PODŁOŻA INWESTYCJI MORSKICH FARM WIATROWYCH NA MORZU BAŁTYCKIM – RYZYKA I OGRANICZENIA	93
<i>Piotr Kubala</i>	
Rozdział 6	
BADANIA GEOFIZYCZNE W PROJEKTACH INWESTYCJI MORSKICH – ASPEKT RYZYKA POGODOWEGO	103
<i>Maria Kubacka, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski</i>	
Rozdział 7	
ASPEKTY ŚRODOWISKOWE W ZAKRESIE TWORZENIA KONCEPCJI, BUDOWY ORAZ DZIAŁALNOŚCI OPERACYJNEJ MORSKICH FARM WIATROWYCH	129
<i>Aneta Gawin</i>	

Rozdział 8

LOTNICZE OPERACJE MORSKIE (PLANOWANIE / ORGANIZACJA / RYZYKA) – WPROWADZENIE	153
---	------------

Konrad Wróbel

Rozdział 9

WPROWADZENIE DO OPERACJI JEDNOSTEK DYNAMICZNIE POZYCJONOWANYCH W SEKTORZE OFFSHORE	188
---	------------

Paweł Kołakowski

Rozdział 10

OPERACJE JEDNOSTEK DP W ASPEKcie ZARZĄDZANIA RYZYKIEM	208
--	------------

Jarosław Cydejko

Rozdział 11

RYZYKA PRZY INSTALACJI MORSKICH KABLI ELEKTRYCZNYCH ORAZ NADZÓR NAD ICH INSTALACJĄ	229
---	------------

Przemysław Adam Łodygowski

Rozdział 12

WSTĘP DO BADANIA PRZYPADKU. POZYSKANIE NOWEJ JEDNOSTKI DO INSTALACJI KABLI PODWODNYCH CABLE LAYING VESSEL	251
--	------------

Andrzej Kludka

Rozdział 13

PRACA W PRZESTRZENIACH ZAMKNIĘTYCH NA STATKACH	268
---	------------

Rafał Żendarski

Maria KUBACKA, Adam KRĘŻEL, Jarosław NOWAK
Paweł JANOWSKI

Rozdział 6

BADANIA GEOFIZYCZNE W PROJEKTACH INWESTYCJI MORSKICH – ASPEKT RYZYKA POGODOWEGO

WSTĘP

Polska część Morza Bałtyckiego posiada idealne warunki do rozwoju morskiej energetyki wiatrowej, zarówno ze względu na głębokość morza, jak i warunki pogodowe. Zgodnie z planem zagospodarowania przestrzennego polskich obszarów morskich, morza terytorialnego i wyłącznej strefy ekonomicznej (WSE) (DzU z 2021 r., poz. 935) pod Morskie Farmy Wiatrowe (MFW)¹ przeznaczono około 3600 km². Oprócz morskich wiatraków przykładami inwestycji *offshore* w polskiej WSE są także kable, infrastruktura portowa, wydobywanie węglowodorów czy budowa infrastruktury przybrzeżnej. Wszystkie te projekty wymagają działań człowieka na morzu wspieranych przez różnego rodzaju statki, których zaangażowanie rozpoczyna się już na etapie przygotowania projektu, np. podczas kompleksowych badań dna morskiego – kampanii geofizycznych.

Pomimo że morska energetyka wiatrowa stanowi jedną z najszybciej rozwijających się branż światowej energetyki, to w polskiej WSE nie postawiono jeszcze żadnej MFW. Do tej pory dla wielu takich planowanych inwestycji Instytut Morski w Gdańsku zrealizował związane z tym projekty kompleksowych badań środowiska morskiego. Jednym z największych wyzwań w takich projektach jest zaplanowanie czasu potrzebnego na przeprowadzenie kampanii pomiarowych ze względu na nieprzewidywalność warunków atmosferycznych. Pogoda to najbardziej

¹ W rozdziale często występują nazwy w postaci akronimów, które są powszechnie używane w wielu dziedzinach nauki i innej działalności.

nieprzewidywalny i jednocześnie kluczowy element decydujący o sukcesie realizacji projektów *offshore*. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie najważniejszych ryzyk, związanych z warunkami pogodowymi, które zostały zidentyfikowane w projektach *offshore*, zrealizowanych w Instytucie Morskim w Gdańsku.

1. INFRASTRUKTURA DLA BADAŃ GEOFIZYCZNYCH W PROJEKTACH *OFFSHORE*

1.1. Zakres i aparatura do badań morskich

Głównym celem badań geofizycznych jest dostarczenie szczegółowych informacji, dotyczących dna morskiego, w tym batymetrii, kształtu i cech charakterystycznych powierzchni dna morskiego, rodzaju podłoża, a także identyfikacji odsłoniętego podłoża skalnego (jeżeli występuje), w szacowaniu biomasy zwierząt i roślin oraz określaniu ich rozkładu przestrzennego.

Badanie ma również na celu wykazanie obecności na dnie morskim obiektów, które mogłyby mieć wpływ na integralność i bezpieczeństwo inwestycji, takich jak np. istniejące rurociągi, kable, wraki, niewybuchy i niewypały (UXO, ang. *Unexploded Ordnance*) itp. Szczególnie istotna jest identyfikacja istniejących lub porzuconych (nieczynnych) kabli energetycznych czy komunikacyjnych. Badania geofizyczne standardowo obejmują badania batymetryczne, sejsmiczne, magnetometryczne i sonarowe. Należy także zaznaczyć, że są one elementem badań środowiskowych, które dla przedsięwzięcia obejmującego MFW, a w praktyce też morską i lądową infrastrukturę przyłączeniową, wymagają przeprowadzenia wielu kampanii pomiarowych w bardzo zróżnicowanym zakresie. Badania te, oprócz pomiarów geofizycznych, obejmują m.in. badania hydrologiczne, meteorologiczne, pomiary fizykochemiczne wody czy badania elementów biotycznych, np. fitobentosu czy zoobentosu.

Metody akustyczne są obecnie jednymi z najdokładniejszych metod badań dna morza. Wynika to z bardzo dobrych warunków propagacji fal dźwiękowych w środowisku morskim i dlatego są one szeroko wykorzystywane do rozpoznawania dna morskiego pod względem batymetrii, morfologii, lokalizacji znajdujących się na nim obiektów, a także budowy strukturalnej.

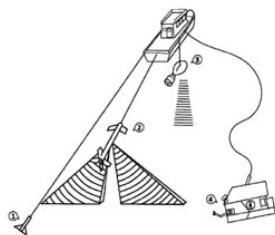
Badania akustyczne polegają na generowaniu impulsu akustycznego oraz odbieraniu jego echa. Poprzez analizę cech charakterystycznych dla odbitej fali

akustycznej możliwe jest określenie osadów tworzących dno, identyfikacja miejsca wypływu gazu lub lokalizacja znajdujących się na nim obiektów.

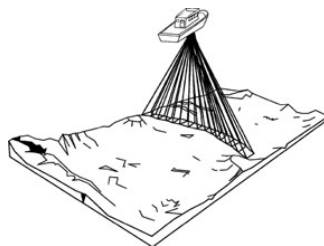
Urządzeniami najczęściej wykorzystywanymi do pomiarów są echosondy jednowiązkowe, echosondy wielowiązkowe, sonary boczne i profilomierze osadów. Innymi urządzeniami wykorzystywanymi w kampaniach geofizycznych, których działanie nie opiera się na propagacji fal dźwiękowych w wodzie, są magnetometr oraz pojazd podwodny ROV TV (szczegóły w punktach 1.1.4 i 1.1.5).

W części głębokowodnej badania są prowadzone z pokładu dużych jednostek pływających w pełni wyposażonych w niezbędne urządzenia pomiarowe (rys. 1). Przy stabilnych warunkach pogodowych możliwe jest prowadzenie badań wszystkimi urządzeniami pomiarowymi jednocześnie. Takie rozwiązanie znacznie ogranicza czas prowadzenia badań.

a)



b)



Rys. 1. Szkic: a) jednostki badawczej do pomiarów hydrograficznych: 1 – magnetometr, 2 – sonar boczny, 3 – profilomierz osadów, 4 – zdalnie sterowany pojazd podwodny, b) działania echosondy wielowiązkowej

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę urządzeń stosowanych do pomiarów hydrograficznych. Zaletą wszystkich opisanych urządzeń jest ich bezinwazyjność.

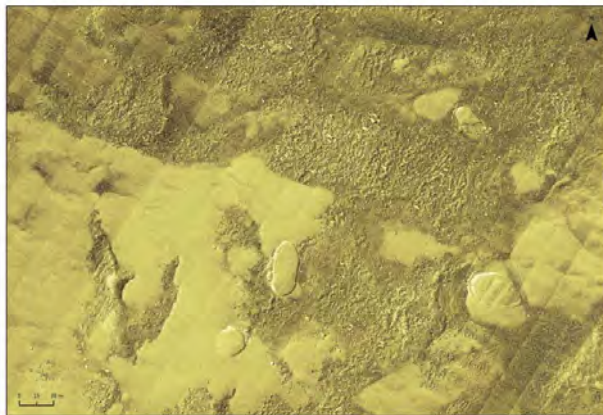
1.1.1. Sonar boczny (SSS)

Badania sonarem bocznym SSS (ang. *Side Scan Sonar*) są wykonywane w celu rozpoznania geologicznej charakterystyki powierzchni dna morskiego oraz wykrycia wszystkich obiektów na nim zalegających. Sonar boczny jest narzędziem, dostarczającym akustyczne zobrazowanie dna morskiego. Urządzenie holowane jest

nad dnem, na kablolinie przymocowanej do jednostki pływającej. Taka konfiguracja pozwala na pracę głównie w dobrych, stabilnych warunkach hydrometeorologicznych. Podczas rejestracji danych sonarowych redukowane są zakłócenia sygnału echa, wywołane hałasami, generowanymi przez napęd jednostki holującej. Sonar boczny skanuje dno dwoma bocznymi przetwornikami hydroakustycznymi, skierowanymi do dna pod pewnym kątem. Transmisja impulsu sondującego odbywa się w dwóch wiązkach, prostopadłych do osi przetwornika i jednocześnie nachylonych względem dna.

Odbijany sygnał rejestrowany jest przez antenę odbiorczą, którą tworzy przetwornik akustyczny, będący poprzednio nadajnikiem. Na podstawie odebranego echa sygnału skanującego generowany jest obraz powierzchni dna morskiego, oddający jego morfologię, położenie i kształt obiektów oraz rodzaj osadów powierzchniowych (np. piaski, żwiry, kamieniska, muły).

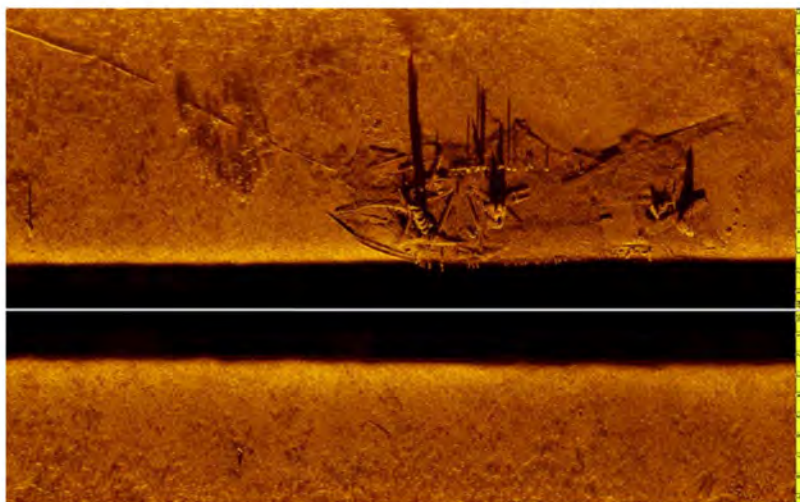
Mapy sonarowe w połączeniu z danymi pochodzącymi z innych urządzeń (np. echosondy wielowiązkowej) stanowią podstawę do interpretacji wyników pomiarów oraz identyfikacji obiektów, które mogą stanowić przeszkodę lub zagrożenie dla planowanej inwestycji np. kamieni, UXO bądź wraków (rys. 3). Sonar boczny stosowany jest również do tworzenia jakościowych map dna morskiego z możliwością rozróżnienia typu osadów (rys. 2) czy szczegółów dotyczących form morfologicznych występujących na dnie, np. ripplemarków (rys. 3b).



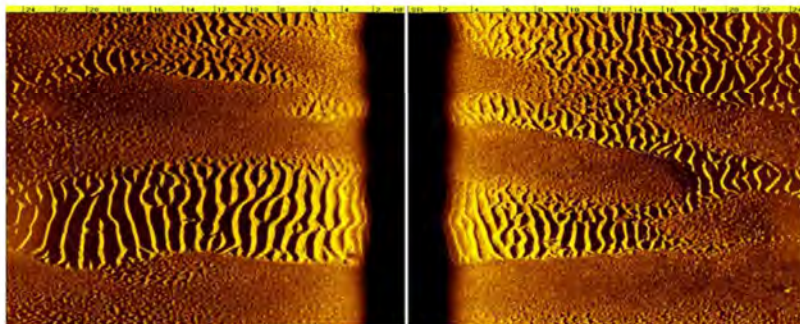
Rys. 2. Sonogramy przedstawiające zróżnicowane typy osadów na dnie morskim w rejonie kłapowiska Darłowo, wykonane w sierpniu 2019 z pokładu r/v „Imor”

Źródło: Instytut Morski w Gdańsku, Dane SSS z Edge Tech 4200 600 kHz zebrali J. Koszałka, W. Meler, M. Kubacka, opracował Ł. Gajewski.

a)



b)

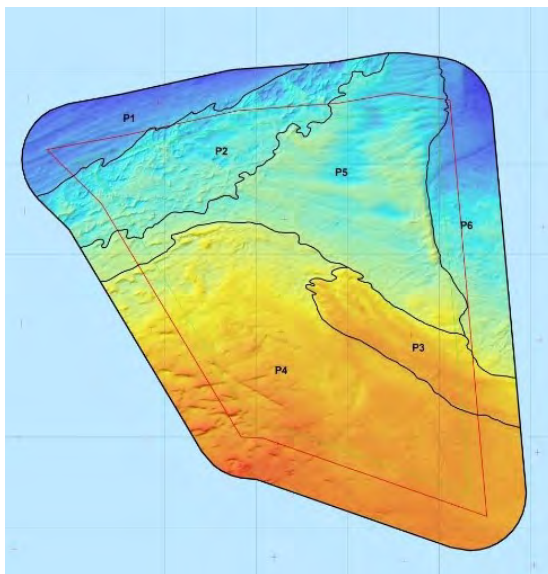


Rys. 3. Sonogramy przedstawiające: a) wrak szkuty „Catharina” z Zatoki Rewskiej niedaleko Osłonina, wykonane 24 lutego 2015 z pokładu „Imos 1”, b) dno Zatoki Gdańskiej, wykonane 3 grudnia 2014 z pokładu „Pucka”

Źródło: Instytut Morski w Gdańsku, a) dane SSS z Edge Tech 4125 1600 kHz – J. Koszałka, R. Spacjer, b) dane SSS z Edge Tech 4200 600 kHz – J. Leśniewicz i J. Koszałka.

1.1.2. Sonda wielowiązkowa (MBES)

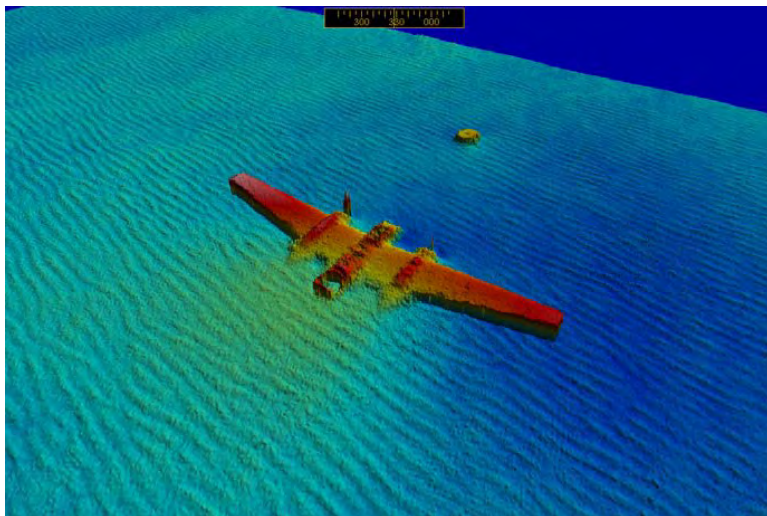
Badania echosondą wielowiązkową MBES (ang. *Multibeam Echosounder*) wykonywane są w celu opracowania szczegółowej mapy batymetrycznej powierzchni dna (rys. 4 i 5b). Echosondy są urządzeniami, które w trakcie pomiarów wykorzystują pomiar czasu transmisji impulsu akustycznego od przetwornika hydroakustycznego do dna i z powrotem. Głównym zastosowaniem przyrządu jest badanie morfologii dna na podstawie analizy sygnałów echa, ale też badanie różnego rodzaju obiektów (np. biologicznych, militarnych), unoszących się w toni wodnej lub położonych na dnie (rys. 5a). W echosondzie wielowiązkowej wysyłany jest jeden szeroki impuls, natomiast system odbiorczy składa się z wachlarza wiązek o bardzo wąskiej charakterystyce. Obraz dna, uzyskiwany z echosondy wielowiązkowej, służy do określania precyzyjnej batymetrii badanego akwenu [7, 13], ale też rejestrowana jest siła rozpraszania wstecznego. Na podstawie kątowych zależności tego parametru można dokonać akustycznej klasyfikacji typów powierzchni dna [22].



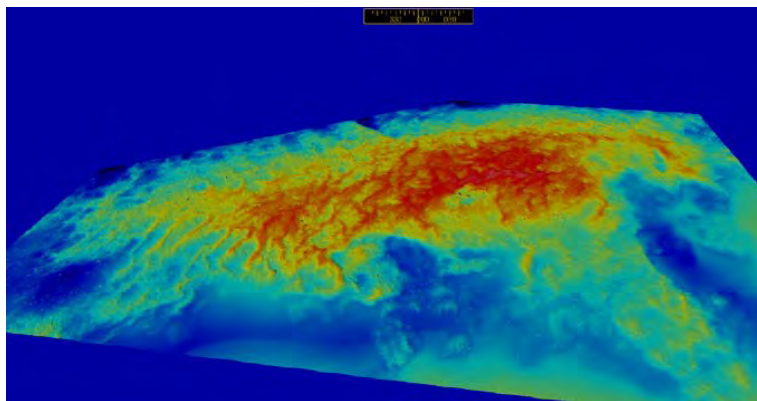
Rys. 4. Wynik pomiaru echosondą wielowiązkową; mapa typów powierzchni dna na obszarze MFV BS II z widoczną batymetrią obszaru

Źródło: RDOŚ.

a)



b)



Rys. 5. Zdjęcia: a) wrak samolotu „Heink526” przed wydobyciem w okolicy Rozewia, wykonane 19 września 2014 z pokładu statku „Imoros 2”, b) mielizna Rewska, wykonane 28 grudnia 2013 z pokładu statku „Imoros 2”

Źródło: Instytut Morski w Gdańsku, dane MBES z Reson Seabat 7125 – J. Koszałka, D. Soska,
b) dane MBES z Reson Seabat 7125 – A. Jaczyński, J. Koszałka, D. Soska.

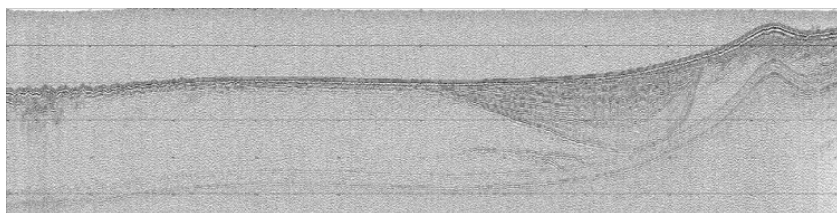
Zasadę działania echosondy wielowiązkowej oraz sposób przeprowadzania pomiaru pokazano na rysunku 1b.

1.1.3. Profilomierz osadów (SBP)

Badania profilomierzami osadów (ang. *SubBottom Profiler*) są wykonywane w celu uzyskania profili refleksyjnych dna morskiego, służących do analizy geologicznej budowy dna, wykrycia dużych obiektów, kabli, rurociągów i innych obiektów w nim zakopanych.

SBP jest urządzeniem, które budową i zasadą działania przypomina echosondę wielowiązkową, ale nadaje pojedynczy impuls akustyczny i pracuje na niższych częstotliwościach. Przyrząd rejestruje echa odbijające się od granic rozdziałów osadów o różnej impedancji akustycznej. Właściwości odbijające powierzchni są opisywane przy użyciu współczynnika odbicia bądź stosunku energii odbitej do energii padającej. Różnice współczynnika odbicia dla dna zbudowanego z różnych materiałów można zaobserwować na echogramie (rys. 6).

W zwartych osadach piaszczystych i glinach uzyskuje się obraz warstwy dna na głębokość od 6 do 10 metrów przy dużej rozdzielczości pionowej wynoszącej nawet 0,1 metra. W osadach miękkich akustycznie penetracja pionowa tym urządzeniem sięga 100 metrów.



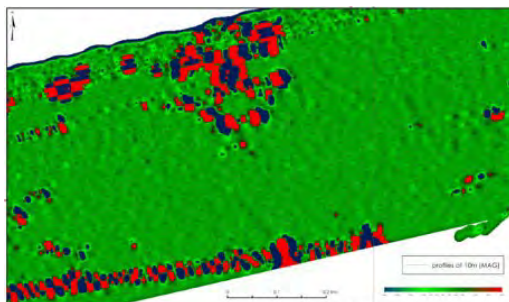
Rys. 6. Zapis sejsmoakustyczny, Zatoka Gdańska, wykonane w listopadzie 2023 z pokładu statku „Imoros 2”

Źródło: Instytut Morski, dane SBP z SES-2000 standard firmy Innomar – M. Kubacka, D. Soska, M. Niemkiewicz.

1.1.4. Magnetometr (MAG)

Badania magnetometryczne wykonuje się w celu wykrycia wszelkich obiektów o właściwościach magnetycznych: wraków, kabli, lin stalowych, niewybuchów, takich jak miny i torpedy.

Magnetometry wykorzystywane do badań morskich zazwyczaj mierzą całkowitą (skalarną) wielkość pola indukcji magnetycznej. Przyrządem, służącym do pomiarów magnetycznych ziemskiego pola magnetycznego, jest magnetometr kwantowy. Zasada działania urządzenia opiera się na wykorzystaniu zjawisk fizycznych o charakterze kwantowym, zachodzących w słabym polu magnetycznym. Magnetometr holowany jest na kablolinie. W celu eliminacji zakłóceń pola magnetycznego, indukowanych przez jednostkę pomiarową, czujnik lub zestaw czujników, powinien być holowany w odległości zapewniającej jak najmniejszy wpływ pola magnetycznego statku na wynik pomiaru. Magnetometry, wykorzystywane do badań morskich, mierzą wielkość skalarną (moduł) pola indukcji magnetycznej. Z zebranych danych pomiarowych opracowuje się mapę anomalii magnetycznych ΔT (rys. 7). Mapy powstają w efekcie interpolacji danych po obróbce. Widoczne na mapie lokalne anomalie magnetyczne wskazują na zalegające na dnie bądź znajdujące się pod cienką warstwą osadów obiekty ferromagnetyczne.



Rys. 7. Mapa anomalii pola magnetycznego, Zatoka Gdańska, pomiary wykonane w 2014 z pokładu r/v „Imor”

Źródło: Instytut Morski w Gdańsku.

1.1.5. Inspekcja podwodna ROV (ROV TV)

Podwodna inspekcja wideo wykrytych obiektów jest prowadzona za pomocą kamer, zamontowanych na zdalnie sterowanym pojeździe podwodnym ROV (ang. *Remotely Operated Vehicle*). Na pojeździe ROV zamontowana jest kamera TV, kontrolowana manipulatorem, oraz zestaw świateł halogenowych. Elektroniczny kompas umożliwia stabilny ruch pojazdu wzdłuż wcześniej zaprojektowanych tras. Pojazd cechuje duża stabilność ruchu i łatwość manewrowania. Czujnik

głębokości umożliwia stabilizację pojazdu na zadanej głębokości. Warunkiem profesjonalnego wykorzystania pojazdu (ROV) jest wyposażenie go w system nawigacji podwodnej, ponieważ tylko wtedy możliwe jest prowadzenie pojazdu według wcześniej zaprojektowanych tras. Dzięki pakietom programów nawigacyjnych, które integrują systemy pozycyjne statku i pojazdu ROV, operator na ploterze z przygotowaną mapą batymetryczną widzi aktualne położenie pojazdu, a na monitorze obserwuje obraz obiektu (rys. 8).



Rys. 8. Obraz z kamery podwodnej: dno piaszczyste, ripplemarki; widoczny obiekt porośnięty omułkami *Mytilus edulis* i roślinami morskimi, Morze Bałtyckie, wykonane w 2016 z pokładu r/v „Imor”

Źródło: Instytut Morski w Gdańsku.

1.2. Pływające jednostki badawcze

Do prowadzenia pomiarów morskich wykorzystywane są pływające jednostki badawcze. Wybór statku zależy przede wszystkim od lokalizacji prowadzonych badań, tj. odległości od miejsca schronienia i od głębokości akwenu, jest również regulowany odpowiednimi przepisami. Każda jednostka pływająca posiada dokument rejestracyjny oraz własną kartę bezpieczeństwa. Świadectwo klasy jednostki nadawane jest przez odpowiedni organ administracji państwowej lub instytucję posiadającą do tego uprawnienia. Dokumenty te potwierdzają spełnienie wymagań technicznych, zapewniających bezpieczeństwo żeglugi oraz dobry stan techniczny jednostki. Kartę bezpieczeństwa wydaje odpowiedni Urząd Morski. Określa ona m.in. dopuszczalny, ograniczony rejon żeglugi, warunki pogodowe oraz

minimalny skład załogi nawigacyjnej. Potwierdza też spełnienie wszystkich wymagań państwa bandery.

Jednym z podstawowych parametrów technicznych przy wyborze jednostki do prowadzenia badań w wybranej lokalizacji jest jej zanurzenie. W części płytkowodnej pomiary wykonuje się z niewielkich jednostek o małym zanurzeniu, ponieważ zagrożenie ich wejścia na mieliznę jest wówczas niewielkie. Małe jednostki pomiarowe pracują w systemie pracy dziennej, w co również należy wliczyć czas potrzebny na przebycie drogi pomiędzy punktem pomiaru a miejscem schronienia. Z małych jednostek pomiarowych nie wykonuje się wszystkich pomiarów w trakcie jednego rejsu. Ograniczenie to wynika m.in. z małej liczby załogi. W części morskiej prace badawcze wykonuje się z pokładu większych jednostek, które posiadają nawet kilkutygodniową autonomię pływania, a załoga jest na tyle liczna, że pracuje w systemie zmianowym. Na takiej jednostce badawczej, przy sprzyjających warunkach pogodowych, pomiary można prowadzić 24 godziny na dobę, a przy pełnym wyposażeniu statku przeprowadzić komplet zleconych pomiarów. Prędkość jednostki pomiarowej w trakcie wykonywania pomiaru zależy przede wszystkim od wymaganej jakości pozyskiwanych danych. Najczęściej stosowana średnia prędkość, przy której prowadzi się badania, wynosi 3,5–4 węzłów.

Poniżej (rys. 9) przedstawiono przykłady jednostek pływających, stosowanych do pomiarów w części morskiej i przybrzeżnej oraz zestawienie najważniejszych parametrów, warunkujących pracę danej jednostki w wybranej lokalizacji (tab. 1).

a)



b)



Rys. 9. Statki pomiarowe wykorzystywane do badań geofizycznych przez Instytut Morski: a) „Imoros 2”, b) r/v „Imor”

Tabela 1

Zestawienie podstawowych parametrów, opisujących możliwość wykonywania prac pomiarowych przez jednostki pływające

Parametry		Jednostka pływająca	
		r/v „Imor”	„Imoros 2”
Obszar badań	rejon prowadzenia pomiarów	do 200 Mm od portu schronienia	20 Mm od brzegu
	część morską	tak	tak
	część płytkowodna	tak	tak
Parametry techniczne	zanurzenie średnie	2,21 m	0,70 m
	długość	32,5 m	10,97
	szerokość	10,5 m	3,43
	prędkość ekonomiczna	8.0 węzłów	8.0 węzłów
Czas pracy	autonomia pływania	21 dni	-
	okres doby	24 h	24 h
	liczba załogi	5	2
	maksymalna liczba osób na statku	16	6
Limity pogodowe	siła wiatru	do 8°B	do 6°B
	stan morza	do 5°	-
Urządzenia badawcze	MBES	tak	tak
	SSS	tak	tak
	MAG	tak	tak
	SPB	tak	tak
	ROV	tak	tak

Ponieważ w przypadku większości prac kluczowa jest wystarczająca przestrzeń na pokładzie, wyposażenie statku w system DP (dynamicznego pozycjonowania) czy możliwości zakwaterowania, to liczba statków badawczych nadających się do realizacji projektów *offshore* jest ograniczona. Poza odpowiednią dostępnością floty czynniki takie, jak: złożoność [6, 14, 16] oraz różnorodność badań środowiska morskiego [9, 14, 21, 25] zmienność obszarów badawczych i lokalizacja w pewnej odległości od portu [15, 23] wrażliwość sprzętu i statków na trudne środowisko morskie [11] mają istotny wpływ na koszty i terminowość badań morskich.

Międzynarodowy standard bezpiecznego zarządzania i eksploatacji statków oraz zapobiegania zanieczyszczeniom określa Międzynarodowy Kodeks Zarządzania Bezpieczną Eksploatacją Statków i Zapobieganiem Zanieczyszczeniom (*International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention*; Kodeks ISM) (IMO 2010). Armator lub podmiot czarterujący jednostkę powinien ustanowić i wdrożyć system zarządzania bezpieczeństwem, który spełnia wymogi określone w kodeksie. Jednym z głównych wymogów kodeksu jest ocena ryzyka. Według IMO (2010) spółka powinna ocenić wszystkie zidentyfikowane ryzyka dla statków, personelu i środowiska, a następnie wdrożyć odpowiednie środki bezpieczeństwa.

W celu zapewnienia najwyższego poziomu bezpieczeństwa realizacji badań morskich prowadzone są oceny ryzyka działań na statku i realizowanych zadań. Przed rozpoczęciem jakichkolwiek prac badawczych każdy pracownik powinien zapoznać się z dokumentem, opisującym związane z nimi ryzyka. Należy również zauważyć, że proces oceny i zarządzania ryzykiem powinien być nie tylko poprawnie sformułowany i wdrożony, ale także regularnie oceniany, tak by wymogi kodeksu pozostawały spełnione. Jednak nawet przy zachowaniu zalecanych procedur zdarzają się wypadki i awarie, zarówno sprzętu pomiarowego, jak i statków.

Kwestią całkowicie odrębną od Kodeksu ISM jest ocena ryzyka związanego z zarządzaniem procesem badawczym, w tym zarządzaniem ryzykiem, związanym z użyciem specjalistycznego sprzętu badawczego podczas prac badawczych na morzu. Ze względu na bardzo specyficzny i niszowy charakter tego typu działalności nie wypracowano jednolitego standardu, dlatego też celowe jest stworzenie dedykowanych systemów oceny i zarządzania ryzykiem w procesie badań morskich.

2. ZNACZENIE POGODY W REALIZACJI PROJEKTÓW OFFSHORE

Pogoda jest kluczowym czynnikiem decydującym o sukcesie lub niepowodzeniu jakiejkolwiek działalności na morzu [11, 12, 17]. Ponieważ warunków pogodowych nie można przewidzieć dokładnie, to stworzenie realnego harmonogramu prac dla długoterminowych projektów badań przedinwestycyjnych na morzu stanowi poważne wyzwanie. Niesprzyjające warunki atmosferyczne mają wpływ na kołysanie statku i urządzeń pomiarowych, z czego wynikają m.in. różne błędy pomiarowe. Fale morskie mogą uniemożliwić wykonywanie prac albo źle wpłynąć na jakość zbieranych danych. Występujące przy silnych wiatrach warunki sztormowe często nie tylko uniemożliwiają pomiar, ale są przede wszystkim

niebezpieczne dla załogi jednostki badawczej, która go wykonuje. Idealne warunki do pracy stanowią: prosta linia trasy pomiaru oraz stała prędkość i zanurzenie urządzenia pomiarowego. Zniekształcenia i błędy pomiarowe mogą wynikać ze zmiennej prędkości ruchu urządzenia wykonującego pomiar, odchyień od trasy pomiaru, zmiany wysokości położenia urządzenia w trakcie przeprowadzania pomiaru, kołysania urządzenia wzdłuż linii pomiarowej czy zboczenia z trasy sondowania. Są one spowodowane najczęściej przez falowanie. Niektóre zniekształcenia są niemożliwe do skorygowania ze względu na utratę danych w tych obszarach. Decyzja zatem o podjęciu skutecznych pomiarów, w zależności od pogody, w dużej mierze zależy od rodzaju/wielkości statku badawczego oraz parametrów przewidywanego falowania. W przypadku obszaru Morza Bałtyckiego i wspomnianych przykładów jednostek badawczych, wielkością falowania, która w istotny sposób ogranicza możliwość ich skutecznego wykonania, jest parametr określany jako wysokość fali znacznej² (H_s) przekraczający 1,5 m. Ograniczenie to nie dotyczy badań ROV, na które falowanie nie ma wpływu.

Dobre warunki atmosferyczne są czynnikiem koniecznym do prawidłowego wykonania pomiarów na morzu. Informacje o warunkach pogodowych, panujących w obszarze planowanych badań, można pozyskać np. na podstawie archiwalnych danych pomiarowych i/lub modelowych, które umożliwiają sprawdzenie statystycznych warunków pogodowych w danej lokalizacji dla wybranego okresu w ciągu roku. Informacje te są ważne w podejmowaniu decyzji o terminie rozpoczęcia prac na morzu dla badań długoterminowych. Decyzje o bieżących działaniach operacyjnych podejmuje się na podstawie informacji o aktualnym stanie morza oraz dokładnej prognozy krótkoterminowej, udostępnianej przez liczne portale pogodowe.

2.1. Ryzyko pogodowe w projektach *offshore*

Przewodnik po zarządzaniu zasobami wiedzy w projektach (PMBOK® *Guide*) definiuje ryzyko jako niepewne zdarzenie lub warunek, który będzie mieć pozytywny lub negatywny wpływ na cel projektu, jeśli się wydarzy. Jeżeli menedżerowie projektów nie zajmą się ryzykami, które mają negatywny wpływ na efektywność projektu, może to skutkować różnego rodzaju problemami, np. przekroczeniem kosztów, opóźnieniami w harmonogramie czy niską jakością

² Średnia wysokość 1/3 największych fal występujących w grupie fal w danym miejscu na morzu, obserwowanych w czasie (najczęściej) 20 minut.

zebranych danych pomiarowych. Odpowiednie zarządzanie i ocena ryzykiem staje się więc istotnym elementem opracowania i realizacji projektu. Im bardziej skomplikowany i wrażliwy jest dany projekt, tym większą uwagę należy zwrócić na metody i narzędzia zarządzania ryzykiem. Badania środowiska morskiego uznawane są za szczególnie trudny obszar działalności gospodarczej, dlatego wymagają opracowania odpowiednich standardów.

Według Campbella i Diebolda [3] ryzyko pogodowe „to nieprzewidywalny element wahań pogody” ujawniany przez „niespodzianki pogodowe”. Ryzyko pogodowe wynika ze zmienności warunków atmosferycznych, które mogą wystąpić w tym samym miejscu w kolejnych okresach czasowych. Zmienność ta rozumiana jest jako odchylenie mierzonych czynników pogodowych od ich średniej wieloletniej [5]. Zjawiska atmosferyczne są jednak trudne do przewidzenia, co nie znaczy, że przewidywanie ich jest zupełnie niemożliwe. Gdyby można było dokładnie prognozować pogodę w horyzoncie czasowym dłuższym niż kilka dni, nie byłoby ryzyka pogodowego, a zatem problemu. Jednak pomimo znacznego rozwoju meteorologii synoptycznej w zasadzie możliwe jest sporządzenie prognozy pogody z zadowalającą dokładnością na kilka dni do przodu, co w większości przypadków jest okresem zbyt krótkim, aby można go było wykorzystać w dokładnym planowaniu morskich kampanii pomiarowych.

Do zgromadzenia niezbędnych informacji o ryzyku pogodowym posłużono się m.in. techniką delficką i metodą burzy mózgów, jednak najlepszym źródłem informacji okazał się przegląd dokumentacji ze zrealizowanych projektów inwestycji morskich. Analizie poddano dwa rodzaje dokumentów, przesyłanych ze statków badawczych: tzw. DPR (*Daily Progress Report*) oraz karty obserwacji.

DPR są wypełniane przez kierownika grupy pomiarowej i codziennie przesyłane kierownikowi projektu w celu bieżącej kontroli realizacji i postępu prac. Raporty obejmują okres 24 godzin i zawierają m.in. aktualną pozycję statku, krótkie opisy prac wykonywanych na pokładzie, przeprowadzonych na morzu działań operacyjnych, obserwowane warunki pogodowe czy podsumowanie prac zaplanowanych na kolejne 48 godzin. W formularzu DPR kierownik grupy pomiarowej komentuje i informuje również o zdarzeniach, takich jak wypadki, incydenty lub zdarzenia potencjalnie niebezpieczne.

Do analiz ryzyka szczególnie przydatne są informacje, dotyczące liczby i czasu trwania przestojów statków badawczych, spowodowanych pogodą, awariami sprzętu pomiarowego oraz informacje o rodzajach i przyczynach tych awarii.

Drugim rodzajem przeanalizowanych dokumentów były karty obserwacji (rys. 10), które stanowią ważny element ciągłej analizy i obserwacji bieżących działań w projektach. Dokument ten powstał w ramach Zintegrowanego Systemu Zarządzania (ZSZ) i polityki ISO 9001, 140001, 45001 (*Lloyds Register*) w Instytucie Morskim w Gdańsku, aby umożliwić obserwację oraz ocenę zachowań i działań zespołu badawczego statku. Karty obserwacji są dostępne dla wszystkich osób zaangażowanych w realizację projektu, w tym dla załogi statku i zespołu badawczego. Za pomocą tych dokumentów można zgłosić wszelkie nieprawidłowości ze szczegółami takimi, jak: miejsce wystąpienia, informacja, czy zdarzenie miało związek z własnym personelem lub kontrahentami, podać pełny opis zdarzenia i jego przyczyny, a także zaproponować rozwiązanie.

OBSERVATION CARD			
EVENT / ZDARZENIE ☐ Near Miss / Zdarzenie potencjalnie niebezpieczne ☐ Accident / Wypadek ☐ Suggestion for improvement / Sugestia zmian ☐ Environmental incident / Incydent Środowiskowy ☐ Positive observation / Obserwacja pozytywna ☐ Non-Conformance / Niezgodność		Date / Data: Time / Godzina: Project name and number Nazwa i numer projektu:	
EVENT CATEGORY / KATEGORIA ZDARZENIA ☐ Unsafe behaviour / Niebezpieczne zachowanie ☐ Unsafe position / Niebezpieczna pozycja ☐ Careless / Nieuwaga ☐ Rush / Pośpiech ☐ PPE not used / Środki ochrony osobistej nieużywane ☐ PPE insufficient / Środki ochrony osobistej niewystarczające ☐ PPE in poor condition / Środki ochrony osobistej w złym stanie ☐ Lack of procedures / Brak procedur ☐ Inadequate procedures / Nieodpowiednie procedury ☐ Procedures not followed / Procedury nieprzestrzegane ☐ Lack or poor communication / Brak lub słaba komunikacja ☐ Inadequate or no training / Brak lub nieodpowiednie szkolenie ☐ Tools wrong for the job / Narzędzia nieodpowiednie do pracy ☐ Tools in poor condition / Narzędzia w złym stanie ☐ Environmental / Środowiskowe ☐ Work conditions (Heat/Cold) / Warunki pracy (gorąco/zimno) ☐ Slips, trips and falls / Poślizgnięcia, potknięcia i upadki ☐ Hit by object / Uderzenie przedmiotem ☐ Other / Inne		LOCATION OF EVENT / LOKALIZACJA ZDARZENIA EVENT RELATED TO / ZDARZENIE ZWIĄZANE Z ☐ Own personnel / własny personel ☐ Contractors / wykonawcy ☐ Subcontractors / podwykonawcy	
		EVENT DESCRIPTION / OPIS ZDARZENIA 	
		SUGGESTED SOLUTION/SUGEROWANE ROZWIĄZANIE 	
		OPTIONAL / OPCJONALNIE	
		Name of observer: Nazwisko osoby zgłaszającej: Rank of observer: Funkcja osoby zgłaszającej:	

Rys. 10. Karta Obserwacji obowiązująca w ramach ZSZ Instytutu Morskiego

Źródło: Instytut Morski.

Na podstawie przeprowadzonych analiz zidentyfikowano cztery podstawowe ryzyka pogodowe w morskich kampaniach geofizycznych:

- 1) R1 – Termin badań w okresie sztormowym – termin badań, przypadający na okres sztormowy, często wynika ze złożoności projektu. Duże inwestycje, które mogą zostać zaplanowane na okres, kiedy teoretycznie powinny panować korzystne warunki atmosferyczne do prowadzenia prac badawczych na morzu, mogą się znacznie wydłużyć w czasie i harmonogram po aktualizacji obejmie miesiące sztormowe. Zdarzają się również takie projekty, przy których prace pomiarowe są wykonywane przez 12 miesięcy w roku.
- 2) R2 – Złe warunki atmosferyczne w okresie niesztormowym – niekorzystne warunki atmosferyczne (np. sztorm) mogą wystąpić w każdym miesiącu prowadzonych badań i mogą skutkować przerwaniem prac pomiarowych, a w konsekwencji opóźnieniem realizacji zadania.
- 3) R3 – Niepodejmowanie decyzji o rozpoczęciu badań pomimo sprzyjających warunków atmosferycznych – na statku może zrodzić się konflikt pomiędzy kapitanem a kierownikiem zespołu pomiarowego, dotyczący podjęcia decyzji o rozpoczęciu prac pomiarowych. Może również dojść do sytuacji, w której obie osoby podejmą decyzję o tym, że statek nie opuszcza portu pomimo dobrej pogody.
- 4) R4 – Awarie sprzętu pomiarowego, w tym statków – mogą być wywołane czynnikiem losowym, niewłaściwą konserwacją, nieprzestrzeganiem procedur czy instrukcji obsługi poszczególnych urządzeń. W konsekwencji statek zamiast prowadzić pomiary w czasie sprzyjających warunków atmosferycznych będzie stał w porcie ze względu na konieczne naprawy.

W poniższej tabeli (tab. 2) przedstawiono klasyfikację ryzyk, ich przyczyny, skutki oraz prawdopodobieństwo wystąpienia. Ryzyko według przyczyn sklasyfikowano jako spowodowane przez przyczyny zewnętrzne, czyli takie, na które człowiek nie ma wpływu (np. siły natury) i przyczyny wewnętrzne, związane ze sposobem planowania projektu oraz czynnikiem ludzkim. Dla każdego ryzyka przypisano także jego skutki dla realizacji projektu oraz prawdopodobieństwo wystąpienia.

Tabela 2

Zestawienie ryzyk związanych z nieprzewidywalnymi warunkami atmosferycznymi w projektach inwestycji morskich

Ryzyko						
Symbol	Opis	Źródło	Natura	Może prowadzić do:	Skutek	Prawdopodobieństwo wystąpienia
R1	Termin badań w okresie sztormowym	wewnętrzne / zewnętrzne	organizacyjna/siły natury	Niedostępność terenu do prowadzenia badań; konieczność powtórzenia części badań	wydłużenie harmonogramu	bardzo prawdopodobne
R2	Złe warunki atmosferyczne w okresie niesztormowym	zewnętrzne	siły natury	Niedostępność terenu do prowadzenia badań; konieczność powtórzenia części badań	wydłużenie harmonogramu	prawdopodobne
R3	Niepodjęcie decyzji o rozpoczęciu badań pomimo sprzyjających warunków atmosferycznych	wewnętrzne	ludzka	Postój pomimo sprzyjających warunków pogodowych	wydłużenie harmonogramu	mało prawdopodobne
R4	Awaria sprzętu pomiarowego	wewnętrzne / zewnętrzne	organizacyjna/techniczna	Konieczność powtórzenia części badań; postój pomimo sprzyjających warunków pogodowych	wydłużenie harmonogramu	mało prawdopodobne

Źródło: M. Kubacka, M. Matczak, M. Kalas, L. Gajewski, M. Burchacz, *Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the Polish Exclusive Economic Zone*, *Wea. Climate Soc.*, 2021, vol. 13.

2.2. Działania mitygujące

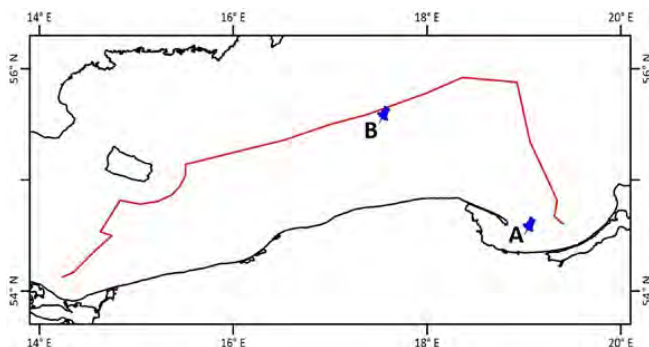
Kluczowym warunkiem dotrzymania terminów jest właściwe zaplanowanie harmonogramu prac z uwzględnieniem możliwych odstępstw od planu działań oraz przypisanie odpowiedniej rezerwy czasowej dla poszczególnych zadań. W tym celu można posłużyć się danymi statystycznymi dla każdego miesiąca pracy statku na morzu w wybranej lokalizacji.

Pomiary falowania na wodach Bałtyku są wykonywane nieregularnie i w wielu miejscach, tak że na ich podstawie nie jest możliwe wykonanie długoterminowych analiz, określających prawdopodobieństwo występowania fal o różnych parametrach (wysokości, okresie i kącie podchodzenia). Do odtworzenia parametrów falowania na morzu wykorzystywane są modele falowania. Danymi wejściowymi do modeli falowania są pola wiatrów. W starszych pracach opierano się

na wynikach obliczeń falowania wykonywanych modelami parametrycznymi dla wiatrów stacjonarnych i jednorodnych. Podstawowym uproszczeniem tych modeli było założenie, że wiatry pomierzone na stacjach brzegowych (lądowych) są reprezentatywne dla całego Bałtyku i mogą być przyjmowane jako czynnik sprawczy generacji fal wiatrowych na tym akwenie.

Literatura przedmiotu wskazuje na dużą zmienność sezonową i przestrzenną stanów morza nad Bałtykiem, gdzie wyraźnie widoczne są niższe fale latem i wyższe zimą [1, 10, 18, 20]. Średnie miesięczne wysokości fali znacznej i ich ekstrema w okresie jesienno-zimowym mogą być nawet dwukrotnie wyższe niż w miesiącach wiosenno-letnich.

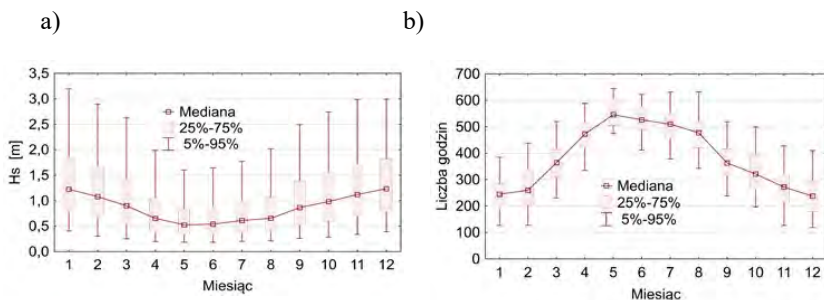
Do analiz przedstawionych w dalszej części pracy wykorzystano zbiór danych z modelu ERA 5 [8], opracowanych przez Europejskie Centrum Prognoz Średnio-terminowych (ECMWF). Model ten wykorzystuje historyczne dane pogodowe ze świata rzeczywistego (tj. dane satelitarne i boje pogodowe) w połączeniu z symulacjami numerycznymi do wygenerowania dokładnych zestawów danych pogodowych. Na potrzeby pracy wykorzystano dane dla dwóch lokalizacji południowego Bałtyku (rys. 11). Dane mają rozdzielczość godzinną, obejmują okres od 1940 do 2022 roku i zawierają informacje o następujących parametrach: data, godzina oraz wysokość fali znacznej, uwzględniająca lokalne fale wiatrowe oraz wygenerowane w innym miejscu i czasie – tzw. rozkołys (ang. *swell*).



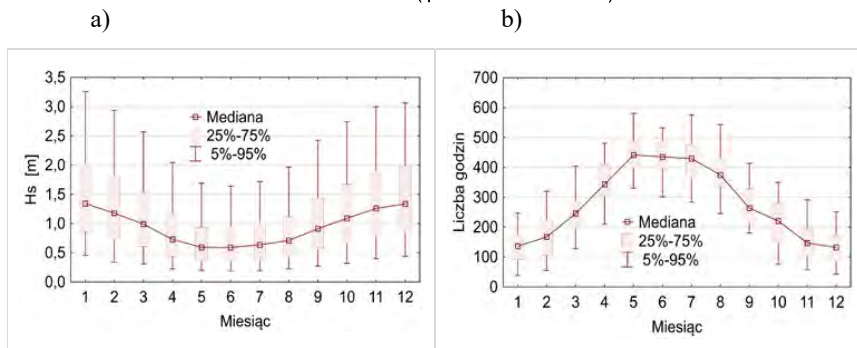
Rys. 11. Mapa lokalizacji punktów prognostycznych: A – Zatoka Gdańska ($\varphi = 54^{\circ}30'N$ i $\lambda = 19^{\circ}E$), B – Morze Bałtyckie ($\varphi = 55^{\circ}30'N$ i $\lambda = 17^{\circ}30'E$)

Na podstawie opracowanych danych, obejmujących okres 82 lat, powstały wykresy porównujące średnią wysokość fali znacznej w wybranych punktach prognostycznych (rys. 12a i 13a) i odpowiadającą jej liczbę godzin w miesiącu

(rys. 12b i 13b), kiedy ta wysokość nie przekracza 1,5 m i teoretycznie prace pomiarowe mogą być wykonywane. Aby obliczyć dostępność danej lokalizacji pod kątem tego możliwego czasu pracy, dane modelowe, obejmujące lata 1940–2022, podzielono na okresy niesprzyjających warunków pogodowych, kiedy statek musi pozostać w porcie, oraz na okresy, w których można prowadzić badania. W analizach uwzględniono również czas, jaki statek potrzebuje na dotarcie do portu i powrót na poligon pomiarowy (tzw. tranzyt).



Rys. 12. Wykresy: a) wysokość fali znacznej (H_s), b) odpowiadająca jej liczba godzin w miesiącu, kiedy ta wysokość nie przekracza 1,5 m, z czasem dotarcia do portu 2 godziny. Zatoka Gdańska ($\varphi=54^{\circ}30'N$ i $\lambda=19^{\circ}E$)



Rys. 13. Wykresy: a) wysokość fali znacznej (H_s), b) odpowiadająca jej liczba godzin w miesiącu, kiedy ta wysokość nie przekracza 1,5 m, z czasem dotarcia do portu 8 godzin. Morze Bałtyckie ($\varphi=55^{\circ}30'N$ i $\lambda=17^{\circ}30'E$)

W lokalizacji B obserwuje się wyższe średnie wartości falowania w skali roku. Punkt ten ma inną ekspozycję niż punkt A, w związku z czym rozciągłości działania falowania są dla niego większe niż rozciągłości występujące dla punktu A.

W rezultacie przed analizą parametrów można przyjąć a priori, że parametry falowania (dotyczy to zwłaszcza wysokości fal oraz okresów) będą większe, tym samym falowanie w lokalizacji B będzie charakteryzować się większą dynamiką. Na podstawie dostępnych danych modelowych można zauważyć, że najmniejsze falowanie w wybranych lokalizacjach występuje w okresie od kwietnia do września.

W tych miesiącach panują zatem najbardziej korzystne warunki hydrodynamiczne do prowadzenia pomiarów morskich. Z danych modelowych dla rejonu Zatoki Gdańskiej wynika również, że w okresie od kwietnia do sierpnia będzie można pracować przez co najmniej 400 godzin w miesiącu, natomiast w lokalizacji B takie warunki przypadają tylko w miesiącach od maja do lipca. W obu lokalizacjach najbardziej korzystne warunki do pracy panują w maju, a najgorsze – w grudniu i styczniu.

Ze statystyk, uzyskanych z modelu falowania, wynika, że warunki pogodowe w okresie od kwietnia do września są znacznie bardziej korzystne do prowadzenia prac badawczych na morzu niż w miesiącach październik – marzec. Zaplanowanie prac na sezon letni nie gwarantuje jednak ciągłości pracy. Pomimo że mediany wysokości fali w obu punktach prognostycznych w ciągu całego roku utrzymują się poniżej 1,5 m, to maksymalne wysokości fal znacznych mogą osiągać na otwartym morzu od prawie 4 m w czerwcu do ponad 7 m w miesiącach zimowych. W 95% przypadków ogranicza się to odpowiednio do tylko nieco ponad 1,5 m w czerwcu i ponad 3 m w zimie. Sztormy mogą występować przez cały rok, a czas oczekiwania statku w porcie na korzystne warunki pogodowe może być tak samo długi w miesiącach letnich, jak i zimowych.

Przedstawione analizy statystyczne można wykorzystać do opracowania odpowiedniej wagi dla każdego zidentyfikowanego ryzyka pogodowego w postaci rezerwy czasowej w formie liczby dni dla poszczególnych zadań, w zależności od miesiąca i lokalizacji, w którym prowadzone są prace pomiarowe [12].

Badanie pokazane w tej pracy ma również pewne ograniczenia, ponieważ przedstawione statystyki nie uwzględniają trwałości wysokości fal w stosunku do siebie, a zatem zaniedbują uwzględnienie czasu potrzebnego na planowane operacje morskie. Oprócz ograniczenia $H_s \leq 1,5$ m należy wziąć pod uwagę taki parametr, jak długość okna pogodowego [17, 23]. Badania środowiskowe wymagają czasu i istotne jest ustalenie, czy dane okno pogodowe jest wystarczająco długie, aby statek opuścił port, dopłynął do rejonu badań i wykonał pracę, w przeciwnym razie mogą zostać poniesione niepotrzebne dodatkowe koszty.

PODSUMOWANIE

W ostatnich latach ryzyko pogodowe stało się bardzo ważną kategorią, mimo że pogoda od zawsze miała wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstw. Pogoda jest kluczowym czynnikiem decydującym o powodzeniu prac wykonywanych na morzu. Gdyby istniała możliwość dokładnego prognozowania pogody na cały okres realizacji danego projektu, to zakres oddziaływania ryzyka pogodowego zostałby znacząco ograniczony. Pomimo rozwoju meteorologii prognostycznej, dziś wiarygodne prognozowanie pogody możliwe jest w okresie nie dłuższym niż kilka dni, a im dłuższy horyzont czasowy prognozy, tym mniejsza jej dokładność. Z punktu widzenia zarządzania ryzykiem pogodowym w przedsiębiorstwach okres ten jest zdecydowanie za krótki.

W pracy pokazano, że posilkowanie się wieloletnimi statystykami poszczególnych parametrów (np. wysokość fali znacznej), jak również klimatyczny podział na pory roku lub podział na miesiące, może być odpowiednim narzędziem do analizy ryzyka pogodowego, a także tworzenia harmonogramu i obliczania kosztów projektu. Sama identyfikacja ryzyk, związanych z pogodą, zmniejsza liczbę nieprzewidzianych zdarzeń i dotkliwość ich konsekwencji. Lista przedstawionych ryzyk pogodowych, opisanych w tym rozdziale, z pewnością nie jest wyczerpująca, ale ryzyka te wydają się mieć charakter uniwersalny.

Ponadto konkretną strategią, dotyczącą zidentyfikowanych zagrożeń pogodowych, jest wykorzystanie danych statystycznych z modelu ruchu fal dla rezerw czasu, przeznaczonych na poszczególne zadanie w zależności od miesiąca i miejsca prowadzenia prac.

Warunki meteorologiczne w obszarze planowanych badań mają kluczowe znaczenie dla oceny ryzyka i planowania harmonogramu prac. Analizy statystyczne wskazują, że warunki pogodowe w okresie letnim są znacznie bardziej korzystne do prowadzenia prac badawczych na morzu niż w miesiącach zimowych. Planując działania na morzu, należy jednak pamiętać, że sztormy i nagłe zmiany pogody zdarzają się w ciągu całego roku.

Niniejszy przypadek można potraktować jako punkt wyjścia do głębszej analizy planu zarządzania ryzykiem pogodowym w projektach *offshore*, a przedstawione analizy mogą być skutecznym narzędziem reagowania na ryzyko pogodowe, które pomoże zainteresowanym stronom projektów *offshore* w poprawie wyników projektu i zapewnieniu jego powodzenia.

BIBLIOGRAFIA

1. Björkqvist J.V., Lukas I., Alari V., Ph. van Vledder G., Hulst S., Pettersson H., Behrens A., Männik A., *Comparing a 41-year model hindcast with decades of wave measurements from the Baltic Sea*, Ocean Engineering, 2018, vol. 152, s. 57–71.
2. Blondel P., *The handbook of sidescan sonar*, Springer Praxis Books (PRAXIS), 2009.
3. Campbell S.D., Diebold F.X., *Weather forecasting for weather derivatives*, J. Amer. Stat. Assoc., 2005, vol. 100, s. 6–16.
4. Ciaran G., Browell J., McMillan D., *Probabilistic access forecasting for improved offshore operations*, International Journal of Forecasting, 2021, vol. 37, no. 1, s. 134–150.
5. Czekaj Z., *Derywaty pogodowe jako instrument zarządzania ryzykiem pogodowym (Weather derivatives as an instrument of weather risk management)*, Ruch Prawniczy, Ekonomiczny i Socjologiczny, 2016, vol. 78, s. 217–228.
6. Douard F., Domecq C., Lair W., *A probabilistic approach to introduce risk measurement indicators to an offshore wind project evaluation – Improvement to an existing tool ECUME*, Energy Procedia, 2012, vol. 24, s. 255–262.
7. Ferreira I., de Andrade L., Teixeira V., Santos, F., *State of art of bathymetric surveys*, Boletim de Ciências Geodésicas 2022.
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N., *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023.
9. Janowski Ł., Wróblewski R., Dworniczak J., Kolakowski M., Rogowska K., Wójcik M., Gajewski J., *Offshore benthic habitat mapping based on object-based image analysis and geomorphometric approach. A case study from the Slupsk Bank, Southern Baltic Sea*, Science of the Total Environment, 2021.
10. Jönsson A., Broman B., Rahm L., *Variations in the Baltic Sea wave fields*, Ocean Engineering, 2002, vol. 30, s. 107–126.
11. Kubacka M., Gajewski L., Burchacz M., Matczak M., Janowski P., Piotrowicz J., *Many faces of survey equipment failures during marine research at sea – Risk analysis*, PLoS ONE, 2022, vol. 17(8).
12. Kubacka M., Matczak M., Kałas M., Gajewski L., Burchacz M., *Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the Polish Exclusive Economic Zone*, Wea. Climate Soc., 2021, vol. 13, s. 899–911.
13. Lamarche G., Lurton X., *Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars*, Marine Geophysical Research, *Seafloor backscatter data from swath mapping echosounders: From technological development to novel applications*, 2018, s. 1–18.

14. Lednicka B., Kubacka M., Freda W., Haule K., Dembska G., Galer-Tatarowicz K., Pazikowska-Sapota G., *Water turbidity and suspended particulate matter concentration at dredged material dumping sites in the Southern Baltic*, Sensors, 2022, vol. 22(20).
15. Leimeister M., Kolios A., *A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry*, Renewable Sustainable Energy, 2018, Rev. 91, s. 1065–1076.
16. Poulsen T., Lema R., *Is the supply chain ready for the green transformation? The case of offshore wind logistics*, Renewable Sustainable Energy, 2017, Rev. 73, s. 758–771.
17. Rowell D., Jenkins B., Carroll J., McMillan D., *How does the accessibility of floating wind farm sites compare to existing fixed bottom sites?* Energies, 2022, vol. 15.
18. Sapięga P., Zalewska T., Struzik P., *Application of SWAN model for wave forecasting in the southern Baltic Sea supplemented with measurement and satellite data*, Environmental Modelling & Software, 2023, vol. 163.
19. Sharay A., Abanades J., Pérez-Collazo C., Iglesias G., *Improving wind farm accessibility for operation & maintenance through a co-located wave farm: Influence of layout and wave climate*, Energy Conversion and Management, 2015, vol. 95, s. 229–241.
20. Soomere T., Räämet A., *Long-term spatial variations in the Baltic Sea wave fields*, Ocean Science (OS), 2011.
21. Szeffler K. i in., *Report on the environmental impact of the Baltica Offshore Wind Farm (in Polish)*, Consortium of Maritime Institute in Gdansk and MEWO Rep., Gdańsk 2017.
22. Trzcńska K., Tęgowski J., Poćwiardowski P., Janowski Ł., Zdroik J., Kruss A., Rucińska M., Lubniewski Z., Schneider von Deimling J., *Measurement of seafloor acoustic backscatter angular dependence at 150 kHz using a multibeam echosounder*, Remote Sensing, 2021.
23. Walker R.T., van Nieuwkoop-McCall J., Johanning L., Parkinson R.J., 2013, *Calculating weather windows: Application to transit, installation and the implications on deployment success*, Ocean Engineering, 2013, vol. 68, s. 88–101.

Źródła internetowe

24. *Badania dna morskiego na obszarze morskiej farmy wiatrowej „Bałtyk Środkowy II”*, Instytut Morski w Gdańsku, Gdańsk 2015, http://portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/morskafarmawiatrowa-BaltykSrodkowyII/RAPORT/Tom%20III_Wyniki%20badan/Sekcja%203_Dno%20morskie/BSII_Dno%20morskie%20wyniki_raport.pdf.
25. Pydyn A., Popek M., Kubacka M., Janowski Ł., *Exploration and reconstruction of a medieval harbour using hydroacoustics, 3-D shallow seismic and underwater photogrammetry: A case study from Puck, southern Baltic Sea*, Archaeological Prospection, 2021, vol. 28(4), http://www.portalgis.gdansk.rdos.gov.pl/morskafarmawiatrowa-Baltica/Raport_OOS_PL_vA.pdf.



Maria Kubacka zatrudniona na stanowisku starszego specjalisty w Zakładzie Oceanografii Operacyjnej Instytutu Morskiego, Uniwersytet Morski w Gdyni. Absolwentka Wydziału Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego, kierunku *Oceanografia* w specjalności *Fizyka morza*. Z Instytutem Morskim związana od 2010 roku, zaangażowana w realizację projektów *offshore* i badań środowiska morskiego. Ukończyła studia podyplomowe w zakresie geofizyki stosowanej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2013–2014) oraz zarządzania projektami w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie (2018–2019).



Prof. dr hab. Adam Krężel zatrudniony na stanowisku profesora w Zakładzie Oceanografii Operacyjnej Instytutu Morskiego, Uniwersytet Morski w Gdyni. Do 2022 roku związany z Uniwersytetem Gdańskim, gdzie w latach 2002–2008 pełnił funkcję dyrektora Instytutu Oceanografii, a w latach 2008–2012 dziekana Wydziału Oceanografii i Geografii. W 2014 roku uzyskał tytuł profesora w dyscyplinie nauk o ziemi i środowisku w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych. Jeden z twórców systemu SatBałtyk, który dostarcza w czasie rzeczywistym informacji o kilkudziesięciu parametrach stanu środowiska

Morza Bałtyckiego. Tematyka badań naukowych: 1) wykorzystanie metod tele-detekcji satelitarnej w badaniach środowiska morskiego; 2) badania charakterystyki jakościowej i ilościowej niektórych właściwości wód powierzchniowych Bałtyku ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska upwellingu przybrzeżnego; 3) wpływ energii promieniowania słonecznego do powierzchni morza i optyczne właściwości atmosfery w rejonie Bałtyku.



Dr Jarosław Nowak, absolwent Wydziału Biologii, Geografii i Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego. W 2016 r. obronił rozprawę doktorską pt. „Akustyczne odwzorowanie cech morfologicznych dna morza bezpływowego na przykładach polskich obszarów morskich”. Posiada uprawnienia hydrografa klasy A. Przez 25 lat pracownik Zakładu Oceanografii Operacyjnej Instytutu Morskiego w Gdańsku, gdzie pełnił funkcję kierownika działu mechatroniki i specjalisty ds. pomiarów geofizycznych. Obecnie *Survey Expert* w MEWO S.A. Zaangażowany w realizację badań przedinwestycyjnych w największych projektach *offshore* w polskiej EEZ.



Paweł Janowski zatrudniony na stanowisku starszego specjalisty w Zakładzie Oceanografii Operacyjnej Instytutu Morskiego, Uniwersytet Morski w Gdyni. Absolwent socjologii Uniwersytetu Gdańskiego. Członek zespołu QHSE, pełni rolę DPA (*Designated Person Ashore*), odpowiedzialny za utrzymanie floty i załogi statków w pełnej gotowości oraz działania organizacyjne w realizacji projektów *offshore*.

Publikacja nr 5

Artykuł naukowy pt.:

Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone

Scientific Reports, 2025, 15: 7094, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91525-8>

autorzy: **Maria Kubacka**, Dariusz Barbucha, Adam Krężel, Juliusz Gajewski

Artykuł skupia się na ocenie dostępności obszarów morskich w polskiej WSE południowego Bałtyku pod kątem prowadzenia badań i pomiarów na morzu. Przeanalizowano sezonowe i przestrzenne zróżnicowanie tzw. „okien pogodowych”, czyli okresów sprzyjających bezpiecznej realizacji działań offshore. Badanie wykorzystuje długoterminowe dane meteorologiczne i oceanograficzne, aby określić kluczowe czynniki pogodowe, takie jak wysokość fali znacznej i czas trwania korzystnych warunków. Wyniki wskazują, że dostępność obszarów badawczych jest silnie zróżnicowana sezonowo, z najwyższą dostępnością w miesiącach letnich i ograniczoną możliwością operacyjną w okresie jesienno-zimowym. Praca dostarcza praktycznych wskazówek dotyczących planowania morskich kampanii badawczych w regionie południowego Bałtyku, podkreślając potrzebę uwzględnienia zmienności sezonowej i przestrzennej w strategiach operacyjnych.



OPEN Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone

Maria Kubacka^{1✉}, Dariusz Barbucha², Adam Krężel¹ & Juliusz Gajewski¹

This study focuses on analysing weather windows in the Polish Exclusive Economic Zone of the southern Baltic

The research examines monthly

height (Hs) thresholds of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m. in accessibility depending on the location, time of the year, and wave height thresholds, with the highest accessibility observed for $H_s \leq 2.0$ m in coastal areas throughout the year. In contrast, winter months present the lowest accessibility, especially for $H_s \leq 0.5$ The study underscores the importance of such analyses for optimising the scheduling of marine operations, risk management, and cost reduction, particularly for pre-investment marine survey projects.

execution of research and commercial activities at sea.

Keywords Significant wave height, Weather window, Accessibility, Weather risk management, Offshore wind farm, Surveys

Marine surveys and investigations are crucial for offshore project planning, development, and operational phases. These activities provide essential data to ensure the safety, feasibility, and environmental sustainability of offshore wind farms, oil and gas platforms, and subsea installations. Marine surveys encompass various activities, including geophysical, geotechnical, environmental, and hydrographic investigations, collectively informing project design, site selection, and risk management strategies. Geophysical surveys, for example, use sonar and seismic methods to map the seabed and subsurface conditions^{1,2}, aiding in the identification of suitable foundations for offshore structures. Geotechnical investigations provide insights into soil mechanics and stability³, which are critical for secure anchoring of platforms or wind turbines^{4,5}. Meanwhile, environmental surveys monitor biodiversity and assess the impact of human activities on marine ecosystems, ensuring that regulatory standards are met and marine habitats are protected⁶.

With the increasing development of offshore renewable energy, especially in regions like the Baltic Sea, the demand for precise and timely marine investigations is growing. As outlined in the Energy Policy of Poland until 2040 (EPP2040) available at www.gov.pl⁷, projections indicate that the installed capacity in offshore wind energy (OWE) is set to achieve 5.9 GW by 2030, with further growth to reach up to 11 GW by 2040. According to the document, offshore wind farms (OWFs) are anticipated to account for 13% of the total electricity generated in 2030, escalating to 19% by 2040. At present, there are nine ongoing OWF projects within the Polish Exclusive Economic Zone (EEZ), all of which have secured location permits. Effective planning and execution of surveys minimise geohazards⁸ and reduce operational costs by preventing delays during the construction and maintenance phases. As offshore projects involve significant risks, primarily due to operations in challenging environments with unpredictable weather^{9,10}, well-coordinated marine surveys are crucial for optimising project timelines and ensuring safe working conditions^{11–13}.

Like other maritime activities, survey campaigns require deployment of various types of vessels, whose operational capabilities depend primarily on sea states^{14–16}. Nonetheless, this study focuses solely on significant wave height, as it is a primary factor directly influencing vessel operability. This approach was chosen for

¹Department of Operational Oceanography, Maritime Institute, Gdynia Maritime University, 80-548 Gdańsk, Poland. ²Faculty of Management and Quality Science, Department of Information Systems, Gdynia Maritime University, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Poland. ✉email: mkubacka@im.umg.edu.pl

simplicity and due to the central role H_s plays in determining accessibility during marine operations. Significant wave height is commonly used in operations and maintenance contracts to establish thresholds for when contractors can carry out work, making it a widely accepted parameter for assessing maritime feasibility. While acknowledging that other variables, such as wind speed, visibility, and icing, can also significantly influence the feasibility of operations, their inclusion was beyond the scope of this study. Existing research has shown a strong correlation between wave heights and wind speeds for most marine sites, indicating that when wave heights are high enough to limit access, wind speeds are likely to exceed safe operational thresholds for activities such as crane hoisting^{14,17}. This further justifies the selection of H_s as the primary focus for this analysis. Nevertheless, incorporating additional variables in future studies is important to provide a more comprehensive assessment of accessibility for maritime operations.

The Baltic Sea has relatively calm wave conditions compared to the North Sea or open ocean environments, which simplifies the construction and maintenance of offshore wind infrastructure and contributes to the overall stability and durability of the structures. This, however, does not imply that working conditions here will be perfect throughout the year. Wave motion depends on various factors, such as the season, wind speed and direction, or general atmospheric conditions. In maritime activities, such as marine research and also the construction and operation of wind farms, it is essential to consider significant wave height (H_s) values^{16,18,19}. This parameter, along with weather conditions and vessel capabilities, determines accessibility—the time during which vessels can safely access and operate in specific sea areas^{17,20,21}. Accessibility is not only crucial for operational planning but also has a significant impact on the financial viability of wave energy technologies²⁰. A good tool to provide information about the level of accessibility to a site based on vessel operating constraints can be weather window analysis^{17,19}. A comprehensive understanding of the frequency and duration of weather windows is essential for effectively planning and scheduling offshore activities, which enables more efficient use of resources, minimises downtime, and helps reduce overall project costs while maximising revenue potential¹⁶.

Recent research on weather window analyses has been conducted across diverse regions, for example, the Portuguese waters²², the North Sea, and the Irish waters including the Atlantic Ocean^{16,19,23}, or the Black Sea²⁴. These studies emphasize significant wave height (H_s) as a critical parameter^{16,19}. However, maritime operations such as crew transfers or using cranes while hauling up/in survey equipment also depend on wind conditions, and including wind speed in assessments alongside H_s provides more comprehensive accessibility evaluations^{22,25}.

This article focuses on assessing the accessibility of the southern Baltic Sea, specifically within Poland's EEZ, for conducting marine research. For this purpose, a weather window analysis was applied, considering different window lengths and H_s values. The goal was to identify the most practical and reasonable parameters that would support various marine activities, including pre-investment studies at sea. Based on these insights, accessibility maps were developed that illustrate the theoretical operating time in hours, providing a clearer understanding of when and where maritime research can be conducted efficiently. These findings can play a crucial role in weather risk management planning¹¹, contributing significantly to strategies for mitigating weather-related risks in offshore projects. Taking the above into account, this study focuses on the following research objectives:

- assessment of spatial and seasonal variability of weather windows by analysing their distribution across 12 months within the Polish EEZ of the Baltic Sea. These analyses consider four wave height thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m) and evaluate weather windows of different lengths: windows of at least 12 h, windows of at least 24 h, and those lasting at least 48 h.
- comparison of offshore operating time across these wave height thresholds, determining which months and locations provide the most favourable conditions for maritime operations in offshore areas.
- quantification of the total operating time available for varying wave height thresholds, offering a comprehensive picture of the operational potential across the region.

Materials and methods

The study area

The research focuses on a southern Baltic Sea area (Fig. 1). This region, part of the semi-enclosed sea, is influenced by freshwater inputs from major rivers, including the Vistula and the Odra. The Vistula River contributes an average discharge of approximately 1080 m³/s, while the Odra River provides around 540 m³/s²⁶. However, due to the relatively small scale of riverine inflow in relation to the overall dynamics of the Baltic Sea, the influence on the processes analyzed in this study is considered minimal. The tidal dynamics in the southern Baltic Sea are also weak, with tidal amplitudes typically below 5 cm. This is a result of the semi-enclosed nature of the Baltic Sea and its limited connection to the North Sea via the Danish Straits. Consequently, tidal effects are overshadowed by other factors such as waves and atmospheric conditions, which are the primary drivers of the processes investigated in this study²⁷. The depth of the Baltic Sea within the Polish Exclusive Economic Zone varies significantly, with an average depth of approximately 60–80 m, while the deepest areas can exceed 100 m.

Analysis presented in this paper encompassing 24 selected calculation points (Measuring stations 1–24 marked in Fig. 1). These stations are positioned within or close to the Polish EEZ and are spaced at regular intervals of 0.5 degrees of geographical position. Moreover, two locations, A (Measuring station 13) and B (Measuring station 1), were chosen for detailed comparison of weather and wave conditions to represent contrasting marine environments in the Baltic Sea. Location A (18°0'0"E, 55°0'0"N), situated further offshore in the Baltic Sea, experiences larger wave heights due to longer wind wave run-up and less coastal influence, making it representative of open-sea conditions. Additionally, this Location is near planned offshore wind farms investments, offering the potential for future access to operational data to validate the results obtained in this study. To emphasize the stark difference in climatic conditions, Location B (14°30'0"E, 54°0'0"N) was selected, as it is closer to the coast and more sheltered, with smaller waves that reflect typical nearshore

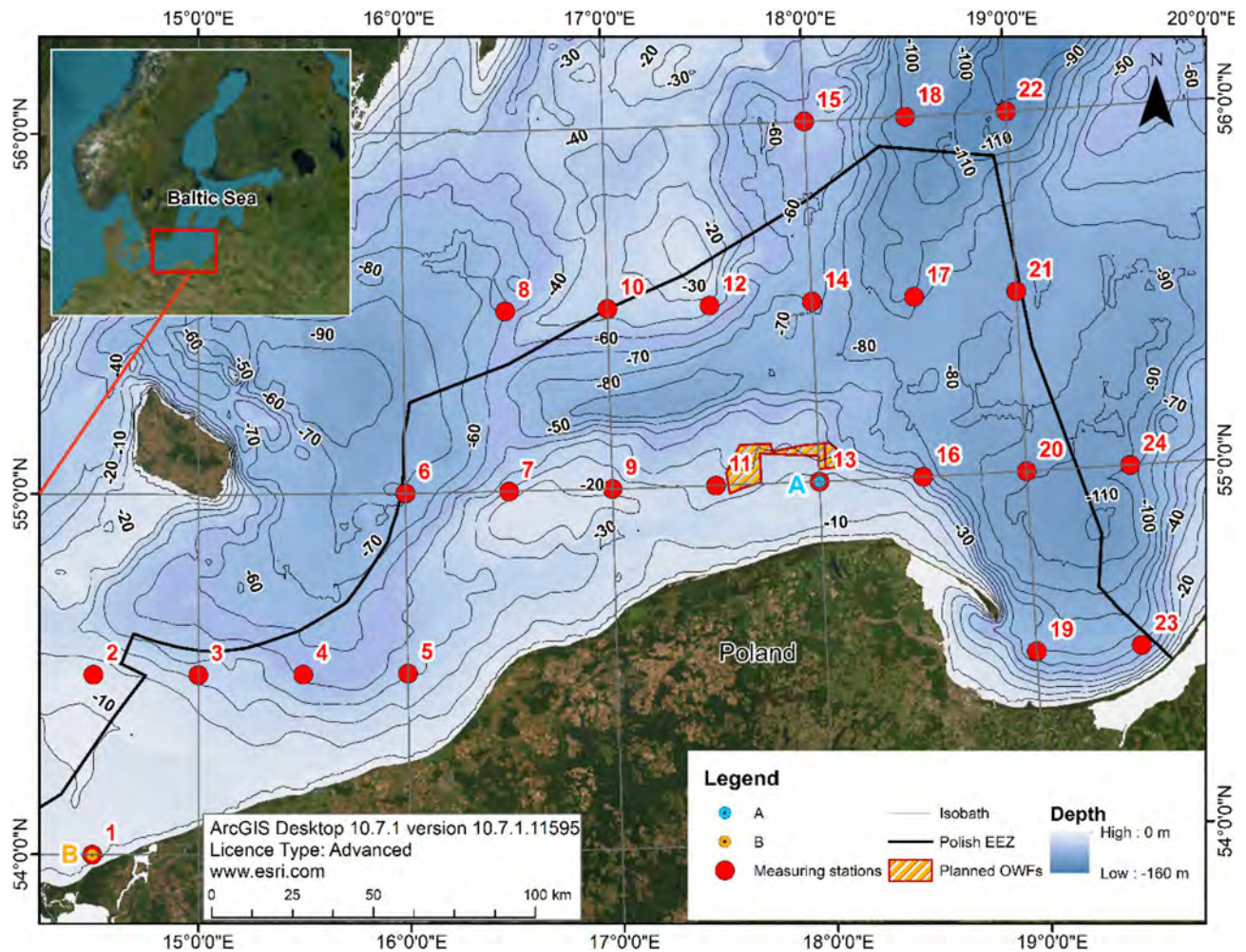


Fig. 1. Locations of the measuring points in the Baltic Sea. Map created in ArcGIS version 10.7.1.11595, www.esri.com.

conditions influenced by the proximity of land. These locations provide a general understanding of the varying wave and weather conditions in different parts of the Baltic Sea.

Location A ($18^{\circ} 0' 0''$ E, $55^{\circ} 0' 0''$ N), situated further offshore in the Baltic Sea, experiences larger wave heights due to longer wind wave run-up and less coastal influence, making it representative of open-sea conditions. In contrast, Location B ($14^{\circ} 30' 0''$ E, $54^{\circ} 0' 0''$ N), being closer to the coast, is more sheltered with smaller waves, reflecting typical nearshore conditions influenced by the proximity of land. These locations provide a general understanding of the varying wave and weather conditions in different parts of the Baltic Sea.

Data processing

Wave height limits

In the existing literature, H_s thresholds are most commonly set between 1 m and 3 m, reflecting the operational capabilities of various types of vessels and the nature of planned activities, such as maintenance operations or crew transfers^{16,17,28}. In the context of this study, a key threshold is 1 m. This limit is particularly relevant because geophysical survey operations are commonly hindered by waves high enough to compromise data quality. As noted in the literature, waves exceeding 1 m, regardless of their direction relative to the survey runline, result in increased noise in recorded data and typically necessitate the cessation of data acquisition¹³. Higher thresholds, such as 1.5 m and 2.0 m, were also analyzed to account for planned offshore wind farm operations in the southern Baltic Sea. The 2 m threshold was chosen as the upper limit, reflecting the typical conditions in this region. Additionally, a lower threshold of 0.5 m was examined to address the operational needs of small vessels operating primarily in the nearshore zone. Moreover, this threshold is particularly relevant for marine environmental research activities, which often require exceptionally calm sea conditions to ensure the safety and accuracy of operations. For example, the servicing of buoys used for oceanographic or meteorological data collection involve delicate procedures, such as the retrieval and redeployment of instrumentation or the calibration of sensors, where stability is critical to prevent damage to equipment.

In conclusion the thresholds for H_s in this paper were chosen based on a combination of factors, including the operational requirements for vessels in the study area, the typical conditions observed in the southern Baltic

Sea, and the range of wave heights that are relevant to maritime operations. To sum up, analyses were conducted for four wave height limits: H_s 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m.

Weather window analysis

For the paper, the datasets from 24 measuring points were analysed to determine the quantity of weather windows. In the context of this study, datasets from the ERA 5 climate reanalysis²⁹ were utilised for analysis and interpretation. The datasets have an hourly resolution, covering the period from 1940 to 2022, and include information on parameters such as date, time, and the significant wave height of combined wind waves and swell. Analyses were performed at wave height limits of H_s 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m for window lengths of (1) at least 12 h, (2) at least 24 h, (3) at least 48 h. The method for determining the number of weather windows is shown in the figure below (Fig. 2).

Figure 2 provides an exemplification of H_s time series covering the period from the 6th August 2022 to the 27th September 2022 and the share of time for types of actions that should be taken at the H_s working limit of 1.5 m. The shaded green sections signify periods of potential operating time, amounting to approximately 528 h, 216 h, 108 h, 60 h and 13 h in this particular scenario. These lengths are categorised as four windows falling within the range of 48 h or more, and one window within a range of at least 24 h. A transit time of four hours was considered for the selected location, represented by the yellow fields in Fig. 2. The red areas indicate downtime when the H_s exceeds the permissible limit for work.

Using the aforementioned assumptions, the total number of weather windows from the 24 locations (Fig. 1) was calculated over 82 years, with monthly breakdowns. Similar calculations were performed for time windows across the remaining wave height thresholds of 0.5 m, 1.0 m, and 2.0 m.

A more detailed analysis was conducted for Locations A and B, where the monthly average number of weather windows was determined for four wave height thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m). For each threshold, the mean and maximum lengths of weather windows were also calculated for each month.

Operating time based on total mean length of windows

To calculate the average operating time for each month, the duration of weather windows lasting at least 48 h was computed and summed. Statistics for the 82 years were gathered for 24 locations and all four H_s thresholds. Next, the results were interpolated using the kriging method in the Surfer software (manufactured by Golden Software, LLC, PO Box 281, Golden, CO 80402-0281) to generate maps illustrating the mean operating time within the Polish EEZ. Kriging is a geostatistical interpolation method widely used for spatial data analysis, offering a statistically optimized prediction of values at unsampled locations based on observed data points³⁰. The general workflow applied in this study involved several key steps: first, the input data, including calculated operating times for selected points within the Polish EEZ, were prepared and imported into the Surfer software. Then, a variogram analysis was conducted to understand the spatial structure of the data and define the optimal parameters for the kriging model. These parameters were fine-tuned to ensure the best fit to the observed data. Subsequently, the kriging method was employed to interpolate the values across the study area, creating a continuous surface representing the mean operating time. The output maps were then customized to enhance their readability, with adjustments to color scales, legends, and labels to ensure clear communication of the results. As a result, 52 maps of operating time availability were created for the Polish EEZ. Four maps were produced for each wave height threshold, illustrating the average annual operating time availability. In addition, four more sets, each containing 12 maps corresponding to individual months of the year, were generated for each threshold. This provides a detailed monthly breakdown of operating time availability across the Polish EEZ for each wave height threshold. Results are presented in the following section of the article.

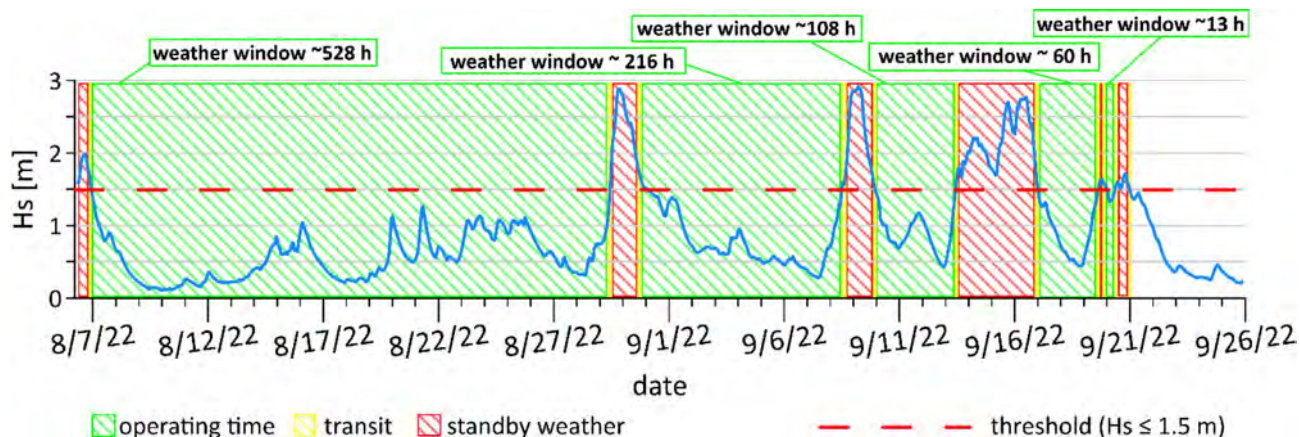


Fig. 2. Exemplary time series of H_s (blue plot) with types of actions that should be taken at the H_s limit of 1.5 m (standby weather, transit, operating time) and the duration of the weather windows marked.

Results

Comparison of weather conditions for two representative Baltic sea locations

Monthly average number of weather windows

The figure below (Fig. 3) compares the number of weather windows determined based on the significant wave height analysis at two locations, A and B (Fig. 1), for different significant wave height thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m).

The analysis shows that Location B usually has a higher number of weather windows compared to Location A, particularly during the summer months. For the lowest wave height threshold ($H_s \leq 0.5$ m), Location B reaches its peak around July with approximately eight windows lasting at least 12 h, whereas Location A has approximately six such windows. As the wave height threshold increases to $H_s \leq 1.0$ m, the number of weather windows increases for both locations, with Location B again peaking in July at around nine windows of at least 12 h, while Location A has approximately seven windows during this period. At $H_s \leq 1.5$ m, the number of windows remains relatively stable, with Location B having slightly more windows than Location A, especially during the summer. For the highest threshold ($H_s \leq 2.0$ m), the difference between the two locations becomes less pronounced but in Location A slight predominance is still marked, particularly in the longer-duration windows of at least 48 h. Throughout the year, Location B generally offers more favourable conditions for extended operations, with more frequent and longer weather windows, especially during the warmer months. This consistent advantage suggests that Location B is more suitable for activities requiring stable weather conditions and minimal wave heights.

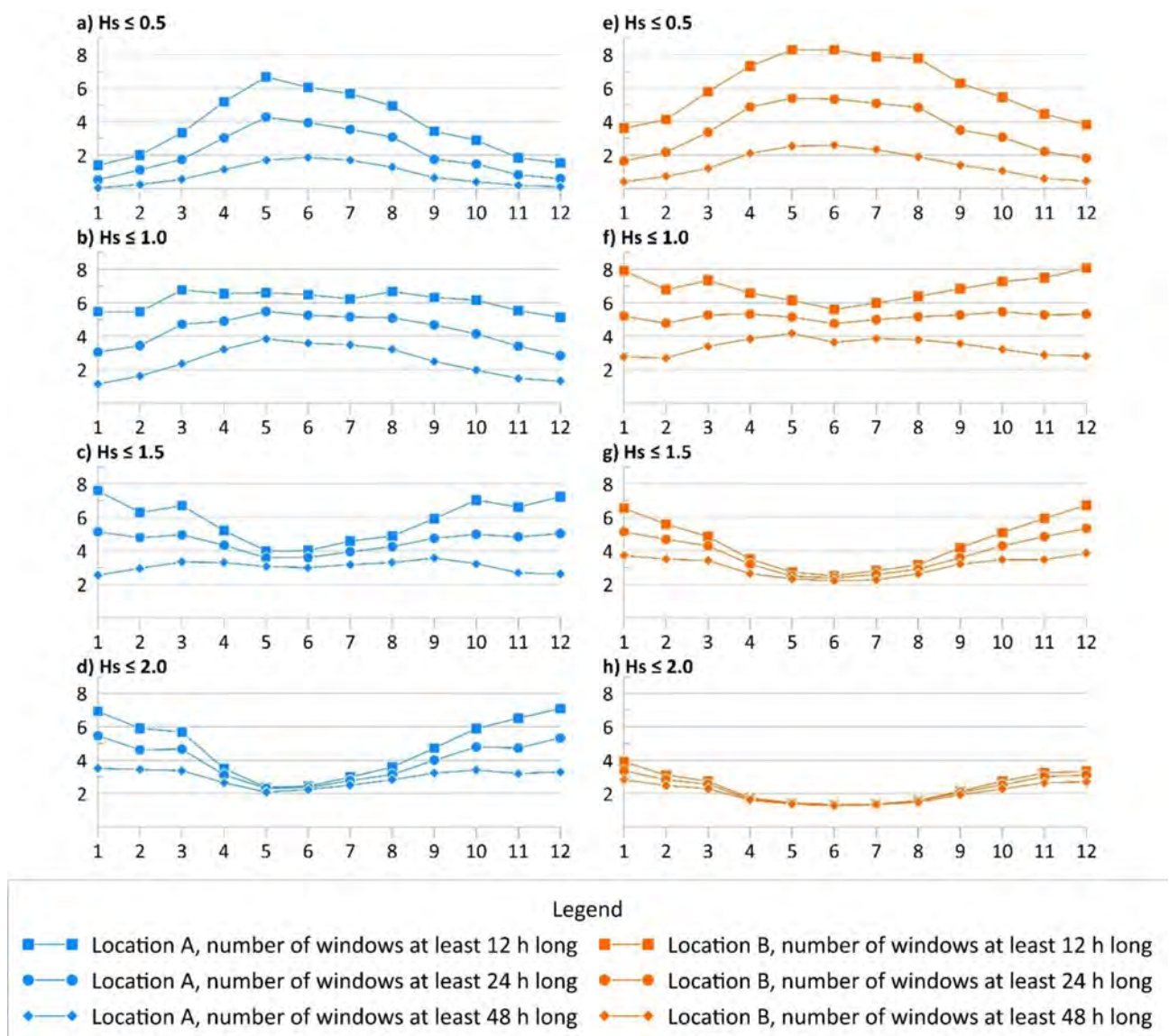


Fig. 3. Monthly average number of weather windows at two locations in the southern Baltic Sea for various H_s thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, $H_s \leq 2.0$ m) and window lengths (≥ 12 h, ≥ 24 h, ≥ 48 h). The x-axis represents the months of the year, and the y-axis represents the number of windows with a duration of at least 12, 24, and 48 h.

Total mean window length

Figure 4. The monthly total duration of weather windows at two locations in the southern Baltic Sea for various H_s thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, $H_s \leq 2.0$ m) and window lengths (≥ 12 h, ≥ 24 h, ≥ 48 h). For each subplot, the y-axis represents the total length of windows (in hours), while the x-axis represents the months (1 for January to 12 for December).

For $H_s \leq 0.5$ m, the total length of windows for Location B consistently exceeds that for Location A across all months. The maximum total window length for Location B reaches around 350 h in May and June for windows of at least 12 h, while for Location A peaks, it reaches about 260 h for the same duration. The number of operating hours in Location A falls below 100 h from October to February, whereas in Location B operating hours are above 100 throughout the year, with the minimum being 102 h in January. For windows lasting at least 24 h, the

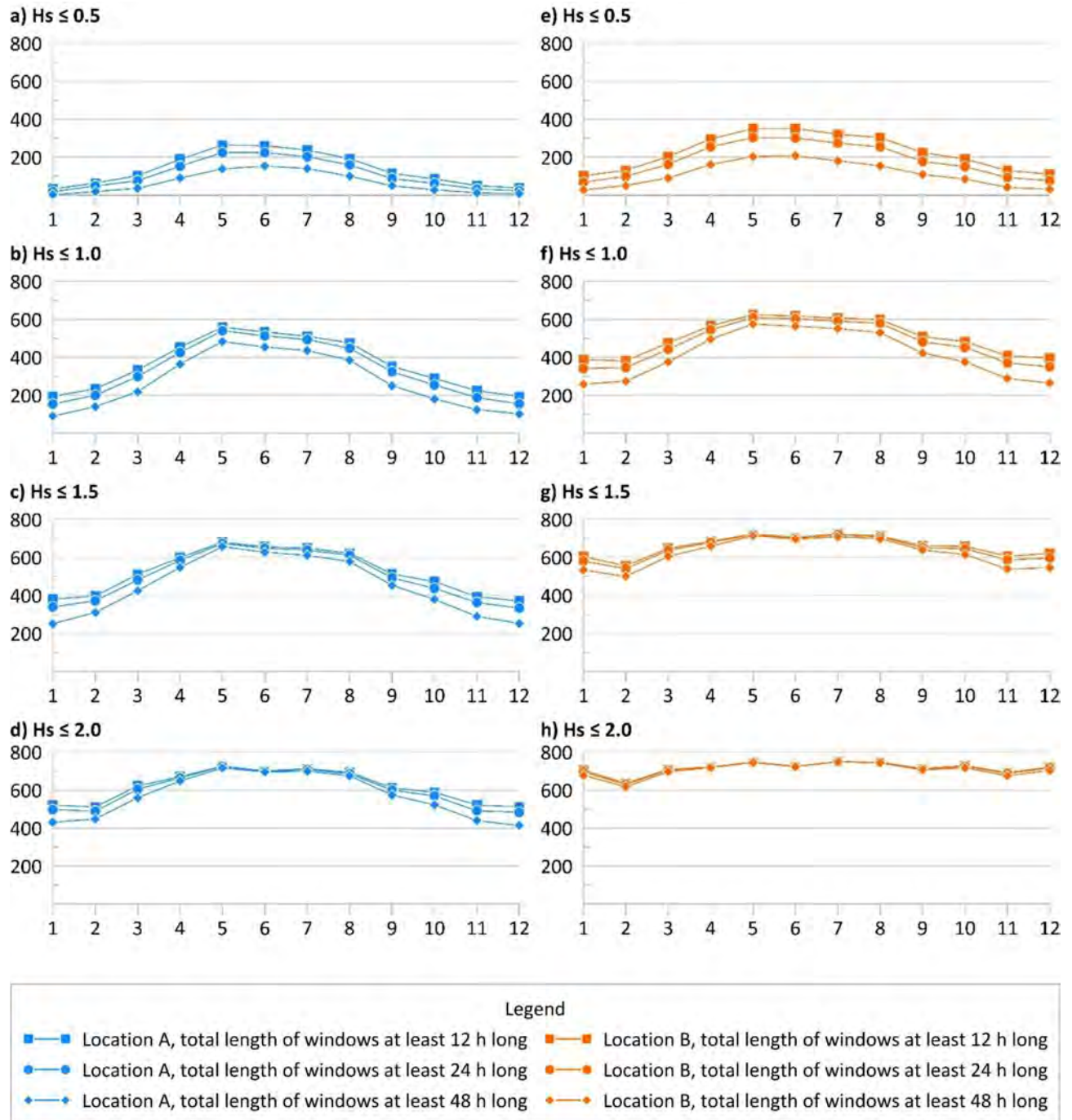


Fig. 4. Figure 4 below compares the total length of windows of specific lengths (at least 12, 24, and 48 h long) for two locations, A and B, under different sea state conditions. The analysis is split into subplots based on the maximum value of $H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m.

operating hours are slightly reduced in each month, with 224 h in May and June for Location A, and 303 h and 301 h in the same months for Location B. For the longest duration (≥ 48 h), the number of operating hours peaks in June (153 h) and July (141 h) for Location A, and in May (204 h) and June (207 h) for Location B.

For the $H_s \leq 1.0$ m threshold (subplots in Fig. 4b and f), the difference between the two locations decreases, but location B still shows longer windows. The highest total for location B is 624 h in May for 12-h windows, whereas location A reaches around 559 h in the same month. The lowest number of operating hours occurs in the winter months, with Location A experiencing 154 h in December and January, while Location B has 388 h in January, 381 h in February, and 396 h in December. For windows lasting at least 24 h, Location A peaks at 608 h in May, while Location B reaches 540 h in the same month. For the longest windows (≥ 48 h), the total operating hours peak at 483 h in May for Location A and 575 h in May for Location B.

$H_s \leq 1.5$ m displays a similar pattern with a slight decrease in total window length compared to higher thresholds (subplots in Fig. 4c and g). Location A's total for 12-hour windows in May is about 680 h, while Location B reaches around 723 h for the same month. The lowest numbers of operating hours for 12-h windows in Location A are 371 h in December and 556 h in February for Location B. For windows of at least 24 h, Location A peaks at 584 h in April, while Location B reaches 720 h in July. For the longest duration (≥ 48 h), the total operational hours peak at 657 h in May for Location A and 714 h in the same month for Location B.

Subplots in Fig. 4d and h ($H_s \leq 2.0$ m) show that the difference between the locations remains consistent, with Location B having slightly longer windows, peaking at around 747 h in May for 12-h windows, compared to Location A's peak of around 726 h. The lowest numbers of operating hours for 12-h windows in Location A are 348 h in January and 522 h in February for Location B. For windows of at least 24 h, Location A peaks at 580 h in May, while Location B reaches 647 h in the same month. For the longest duration (≥ 48 h), the total operating hours peak at 480 h in May for Location A and 561 h in May for Location B. The lowest numbers of operating hours for 12-h windows occur in February with 511 h for Location A and 635 h for Location B. For windows of at least 24 h, Location A peaks at 725 h in May, while Location B reaches 747 h in the same month. For the longest duration (≥ 48 h), the operating hours peak at 716 h in May for Location A and 749 h in July for Location B.

Location B generally exhibits longer weather windows across all months and thresholds, indicating more favourable conditions for operations. In the lowest threshold of $H_s \leq 0.5$ m, Location B maintains operating hours above 100 throughout the year, whereas Location A experiences significantly fewer hours from October to February. As the threshold increases to $H_s \leq 1.0$ m, the difference between the two locations narrows, yet Location B still surpasses Location A in operating hours, particularly during the winter months. For thresholds of $H_s \leq 1.5$ m and $H_s \leq 2.0$ m, the pattern persists, with Location B consistently providing longer windows, especially during the summer months. The maximum numbers of operating hours for both locations occur in May and July, with Location B reaching the highest values for all thresholds. Location A shows more variability, with lower numbers of operating hours in winter and peaks in spring and early summer. The longest windows, lasting at least 48 h, are more frequent at Location B, particularly under lower sea state conditions.

Maximum window length

The following graphs (Fig. 5) illustrate the monthly maximum window lengths at two locations in the southern Baltic Sea for various significant wave height thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, $H_s \leq 2.0$ m). The data is shown for both Location A and Location B.

For Location A, at the $H_s \leq 0.5$ m threshold (Fig. 5a), the length of weather windows fluctuates throughout the year, peaking in May with about 300 h and hitting the lowest point in January with 64 h. At the $H_s \leq 1.0$ m threshold (Fig. 5b), the length of weather windows increases, with a peak from May to August, where values exceed 500 h, reaching a maximum of 633 h in May. The lowest value is observed in December, with less than 200 h. At $H_s \leq 1.5$ m (Fig. 5c), the weather windows are even longer, peaking between May and October at around 700 h. There is a significant drop to about less than 300 h in winter months: January and December. Finally, at $H_s \leq 2.0$ m (Fig. 5d), the values are quite stable throughout the year, consistently staying between 600 and 800 h, with a slight decrease to about 500 h in December and 471 in January.

For Location B, the fluctuations are less pronounced. At the $H_s \leq 0.5$ m threshold (Fig. 5e), the length of weather windows remains relatively consistent throughout the year, hovering around 200 to 300 h, with a minor increase in May (275 h) and July (256 h). For the $H_s \leq 1.0$ m threshold (Fig. 5f), the length of weather windows shows more variability, particularly in spring and summer, where it ranges from about 400 to 700 h, while in January and December, it drops to around 200 h. At $H_s \leq 1.5$ m (Fig. 5g), the length of weather windows becomes more stable, with around 700 h being maintained throughout the year. Lastly, at the $H_s \leq 2.0$ m threshold (Fig. 5h), the weather windows at Location B are very stable, consistently around 700 h year-round (maximum possible time each month), indicating that wave height has a minimal impact on the availability of weather windows at this location.

Comparing both locations, Location A shows greater variability in weather windows depending on the season, while Location B exhibits more stable conditions throughout the year, particularly for higher wave height thresholds.

Accessibility

As stated in the introduction of this article, accessibility refers to the time during which vessels can safely access and operate in specific sea areas. According to Rowell et al.¹⁷, accessibility is the normalized amount of time during which access is possible, but only considering the periods that fall within a weather window of the required length. Taking this into account, the accessibility for both locations was calculated for different weather window lengths and expressed as a percentage. The tables below (Tables 1, 2, 3, 4, 5 and 6) present accessibility in percentage terms, indicating the percentage amount of time during each month when weather windows of at least 12 h occurred (Tables 1 and 4), windows of at least 24 h occurred (Tables 2 and 5), and those of at least 48 h

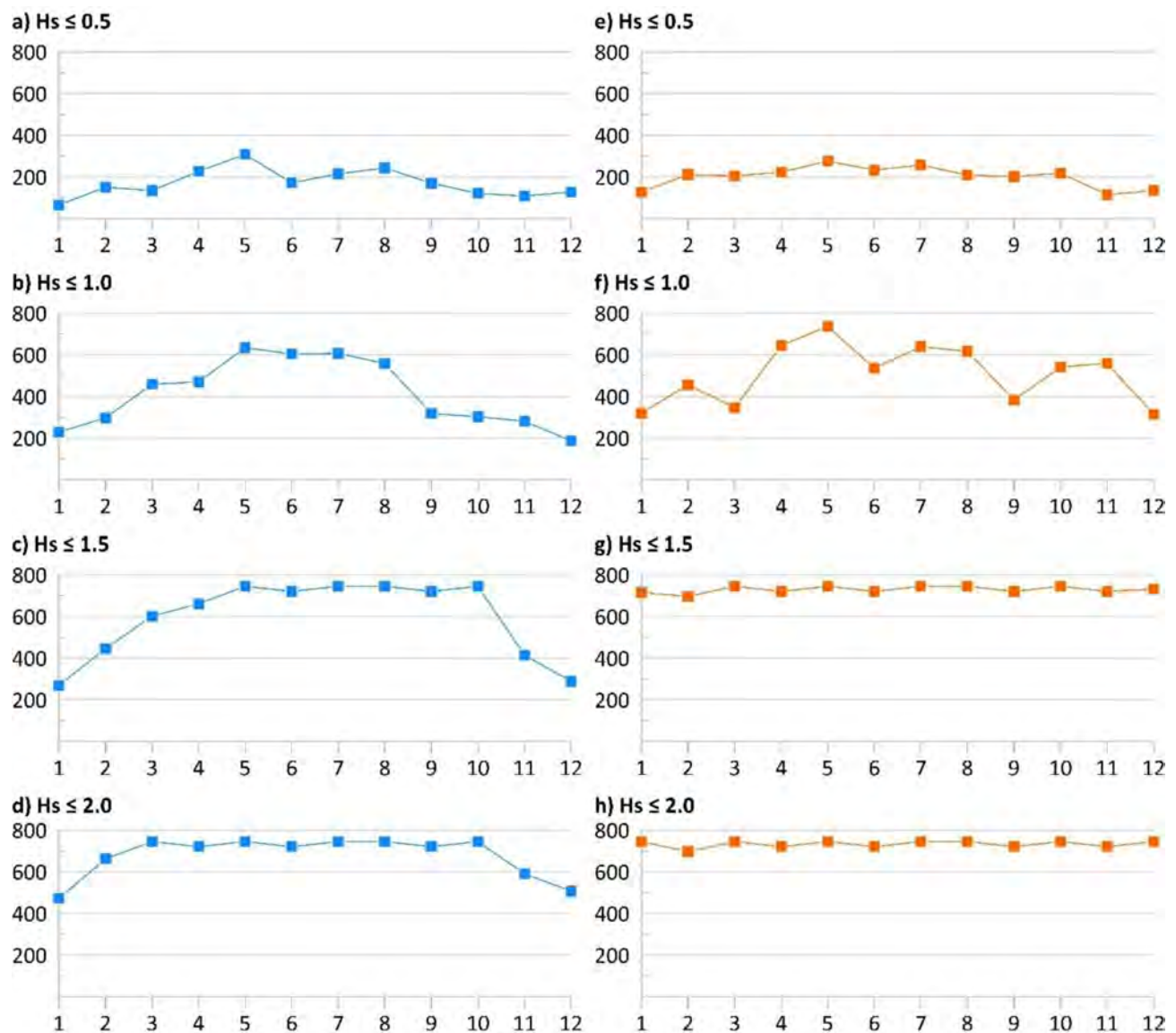


Fig. 5. The monthly maximum lengths of weather windows at two locations, A and B, in the southern Baltic Sea for various H_s thresholds.

H_s (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	4.33	9.25	13.67	25.93	35.12	35.73	31.58	25.51	15.79	11.36	6.92	5.11
≤ 1.0	25.65	34.08	44.18	62.24	74.19	73.16	67.81	63.17	48.28	38.33	30.72	25.77
≤ 1.5	50.03	57.74	67.76	82.21	90.30	89.96	86.15	82.56	70.30	62.74	53.91	49.22
≤ 2.0	68.45	74.43	82.55	91.92	96.34	96.13	94.56	92.01	83.84	78.05	71.53	67.99

Table 1. Percentage accessibility to location A ($18^{\circ} 0' 0''$ E, $55^{\circ} 0' 00''$ N) for different H_s levels when weather windows of at least 12 h occurred.

occurred (Tables 3 and 6), given specific wave height thresholds (H_s). The results are reported for two locations, A and B, across four H_s thresholds and divided into 12 months (1 for January to 12 for December).

The results demonstrate significant variability in accessibility between locations, months, H_s thresholds and weather window lengths. For the longest weather windows of at least 48 h (Tables 3 and 6), the highest accessibility of up to 88.86% was observed for $H_s \leq 2.0$ m at Location B, consistently across all months. In contrast, for the same threshold at Location A, accessibility only exceeded 80% from April to August. The lowest accessibility occurs in winter, particularly for the $H_s \leq 0.5$ m threshold. At Location A, accessibility remains

Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	2.43	7.06	10.10	20.94	29.73	30.72	26.86	21.21	12.00	8.20	4.50	3.07
≤ 1.0	20.23	29.13	39.61	58.32	71.68	70.34	65.47	59.48	44.39	33.77	25.77	20.49
≤ 1.5	44.66	54.11	63.91	80.10	89.36	88.92	84.67	81.17	67.55	58.02	49.69	44.19
≤ 2.0	65.30	71.23	80.21	91.05	96.22	95.95	94.08	90.97	82.24	75.56	67.33	64.09

Table 2. Percentage accessibility to location A (18° 0' 0" E, 55° 0' 00" N) for different Hs levels of when weather windows of at least 24 h occurred.

Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	0.37	2.75	4.80	12.35	18.38	21.03	18.68	13.28	6.80	3.77	1.72	1.08
≤ 1.0	11.99	20.42	29.05	50.03	64.12	62.33	57.81	51.09	34.40	24.01	17.08	13.58
≤ 1.5	33.05	45.10	56.36	75.06	87.21	86.00	81.09	76.71	62.14	50.35	39.67	33.55
≤ 2.0	56.55	65.23	74.32	88.83	95.13	95.40	92.85	89.60	78.63	69.32	60.26	54.85

Table 3. Percentage accessibility to location A (18°0'0"E, 55°0'00"N) for different Hs levels when weather windows of at least 48 h occurred.

Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	13.33	19.16	26.94	40.55	46.57	48.18	42.57	40.31	30.72	25.29	17.84	14.62
≤ 1.0	50.93	55.47	63.21	77.54	82.92	84.68	80.51	79.54	69.72	64.14	56.00	52.57
≤ 1.5	79.26	80.95	85.89	93.90	95.99	96.70	96.02	94.57	90.69	87.42	83.17	82.40
≤ 2.0	92.37	92.47	94.07	98.93	99.20	99.47	99.53	99.07	97.74	96.74	94.88	95.73

Table 4. Percentage accessibility to location B (14°30'0"E, 54°0'00"N) for different Hs levels when weather windows of at least 12 h occurred.

Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	8.94	14.52	21.55	34.99	40.24	41.37	36.44	33.83	24.40	19.96	12.73	10.16
≤ 1.0	44.83	50.43	58.66	74.70	80.78	82.70	78.37	76.86	66.07	60.03	50.76	46.52
≤ 1.5	76.26	78.68	84.60	93.21	95.49	96.37	95.54	94.06	89.34	85.61	80.52	79.22
≤ 2.0	91.19	91.77	93.67	98.76	99.15	99.40	99.53	99.02	97.57	96.24	94.33	95.21

Table 5. Percentage accessibility to location B (14°30'0"E, 54°0'00"N) for different Hs levels when weather windows of at least 24 h occurred.

Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 0.5	3.69	7.47	11.99	22.15	27.07	28.43	24.03	20.52	14.94	11.25	5.65	4.13
≤ 1.0	34.02	39.96	49.87	67.96	76.34	77.35	73.21	70.33	57.95	49.98	39.51	35.13
≤ 1.5	70.04	72.82	80.35	90.40	94.77	95.53	94.02	92.77	87.61	81.68	73.92	72.40
≤ 2.0	88.86	89.90	92.47	98.51	98.93	99.15	99.42	98.63	96.84	95.20	92.61	93.37

Table 6. Percentage accessibility to location B (14°30'0"E, 54°0'00"N) for different Hs levels when weather windows of at least 48 h occurred.

below 5% from January to March and October to December. Location B fares slightly better, with maximum accessibility of 28.43% in June for the same threshold. The shorter the weather windows analysed, the higher the percentage values of accessibility.

The annual mean operating time within the Polish EEZ

The figure below (Fig. 6) presents four maps showing the spatial distribution of the amount of operating time available annually in the Polish EEZ, based on 82 years of historical data for specific Hs thresholds and weather windows lasting at least 48 h. All maps utilise the same colour scale, with different colours assigned to values ranging from 0 to 744, representing the maximum number of hours per month.

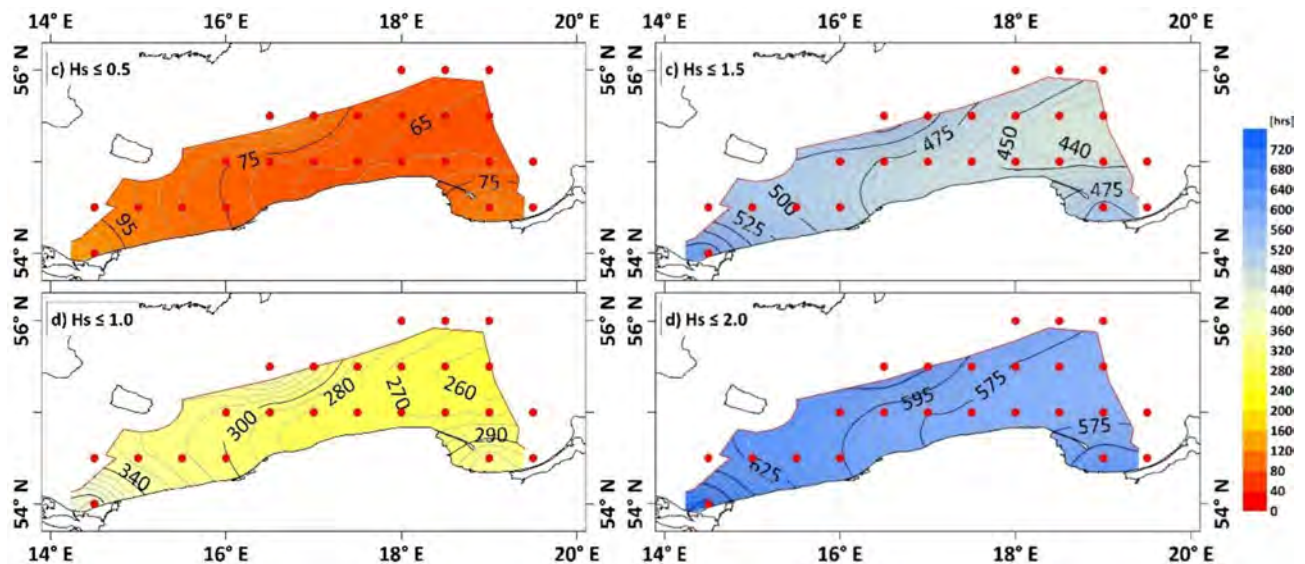


Fig. 6. Maps of operating time availability with (a) $H_s \leq 0.5$ m, (b) $H_s \leq 1.0$ m, (c) $H_s \leq 1.5$ m, (d) $H_s \leq 2.0$ m.

Figure 6a shows the average annual operating time for significant wave heights $H_s \leq 0.5$ m. The areas are displayed in shades of orange, which means that operating hours range from 65 to 110. The darkest orange areas, representing the smallest amount of operating time, are located in the northeastern part of the Polish EEZ. Moving southwest towards the coast, the amount of operating time increases, reaching approximately 110 h along the coastline in the western part of the EEZ. The map (Fig. 6b) with the threshold $H_s \leq 1.0$ utilises yellow tones to show regions where the average annual operating time varies between 260 and 400 h. The largest amounts of operating time are found near the western shore (around 275 h) and near the eastern shore (around 325 h), while the northeastern offshore areas show smaller amount of operating time of about 260 h. In Fig. 6c, where $H_s \leq 1.5$, shaded in light blue, the average annual operating time for wave heights up to 1.5 m ranges from 440 to 615 h. The largest amount of operating time, approximately 615 h, is found along the central and western parts of the Polish EEZ, closer to the coast. As one moves northeast, the amount of operating time decreases to around 440 h. The last map, Fig. 6d, where $H_s \leq 2.0$, uses dark blue tones to represent areas where the average annual operating time for wave heights up to 2 m ranges from 560 h in the western areas of the Polish EEZ to 690 h in the northeastern offshore regions.

The analysis of operating time distribution across the Polish EEZ reveals that shallower coastal waters generally offer more favourable conditions for operational activities due to reduced wave impact. As wave height thresholds increase, the amount of operating time increases, which is particularly evident in offshore regions.

As shown by previous studies, significant wave heights in the examined region vary not only spatially but also seasonally. Consequently, the data were analysed by dividing them into 12 months for four different significant wave height thresholds. This resulted in the production of 48 maps of operating time availability in the Polish EEZ (Fig. 7). All maps employed a consistent colour scale used in the previous maps (Fig. 6).

Operating time with $h_s \leq 0.5$ m

The series of maps illustrates the spatial distribution of average available operating time in hours for significant wave heights $H_s \leq 0.5$ m across different months of the year in the Polish EEZ.

During winter months (January, February, December), potential operating time is short, ranging from 5 to 35 h offshore, reaching a maximum of 50 h nearshore in February. As spring progresses, the amount of available time increases, reaching a maximum of 200 h near the west coast in May. Summer months (June, July, August) show the longest possible operating time, with coastal areas offering the best conditions in June, i.e. 170–225 h. In autumn, the amount of potential operating time gradually decreases, dropping back to 15–60 h, reflecting the return of harsher sea conditions. Coastal areas consistently offer more operating time than offshore regions due to reduced wave impact.

Operating time with $h_s \leq 1.0$ m

The maps (Fig. 8) show the available operating time for wave heights $H_s \leq 1.0$ m in the Polish EEZ across different months. Compared to the previous map set for $H_s \leq 0.5$ m, these maps indicate a significant increase in potential operating time, particularly in offshore areas.

During the winter months (January, February, December), conditions are the least favourable, with operating time ranging from 80 to 270 h, although this is still significantly longer than for $H_s \leq 0.5$ m in the same period. In spring and autumn, the amount of operating time steadily increases, with offshore regions maintaining higher values. May stands out with the greatest amount of operating time, reaching up to 550 h in the western part of

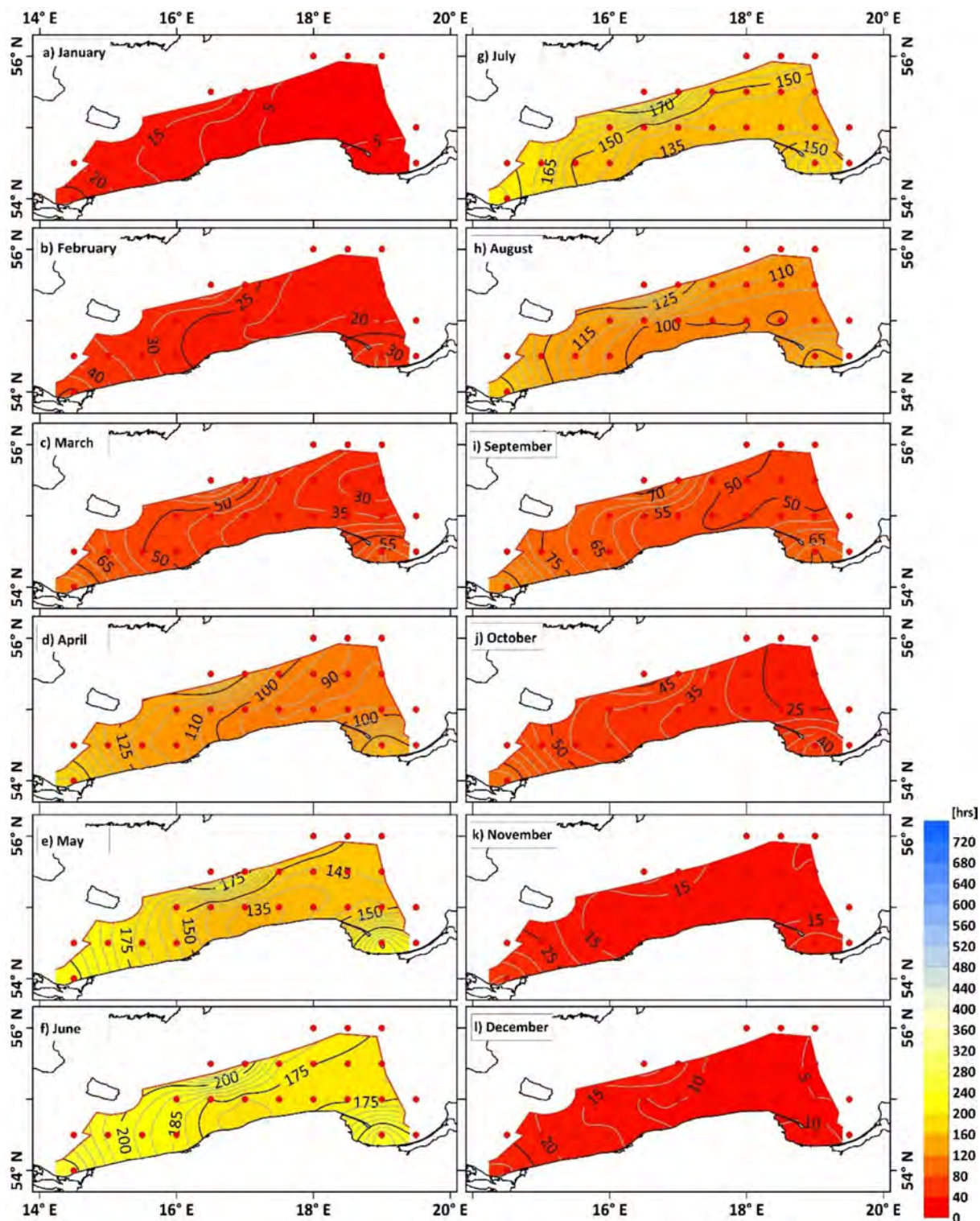


Fig. 7. Maps of operating time availability with $H_s \leq 0.5$ m divided into 12 months.

the Polish EEZ and 500 h in the southeast. During the summer months (June to August), the west coast offers the most favourable conditions, exceeding 500 h of operating time, while offshore areas see slightly lower values. The fewest operating hours in summer occur in the northeastern part of the Polish EEZ, with around 440 h in July.

Operating time with $h_s \leq 1.5$ m

The set of maps (Fig. 9) representing the operating time availability for $H_s \leq 1.5$ m shows a significant increase in operating time compared to the previous thresholds.

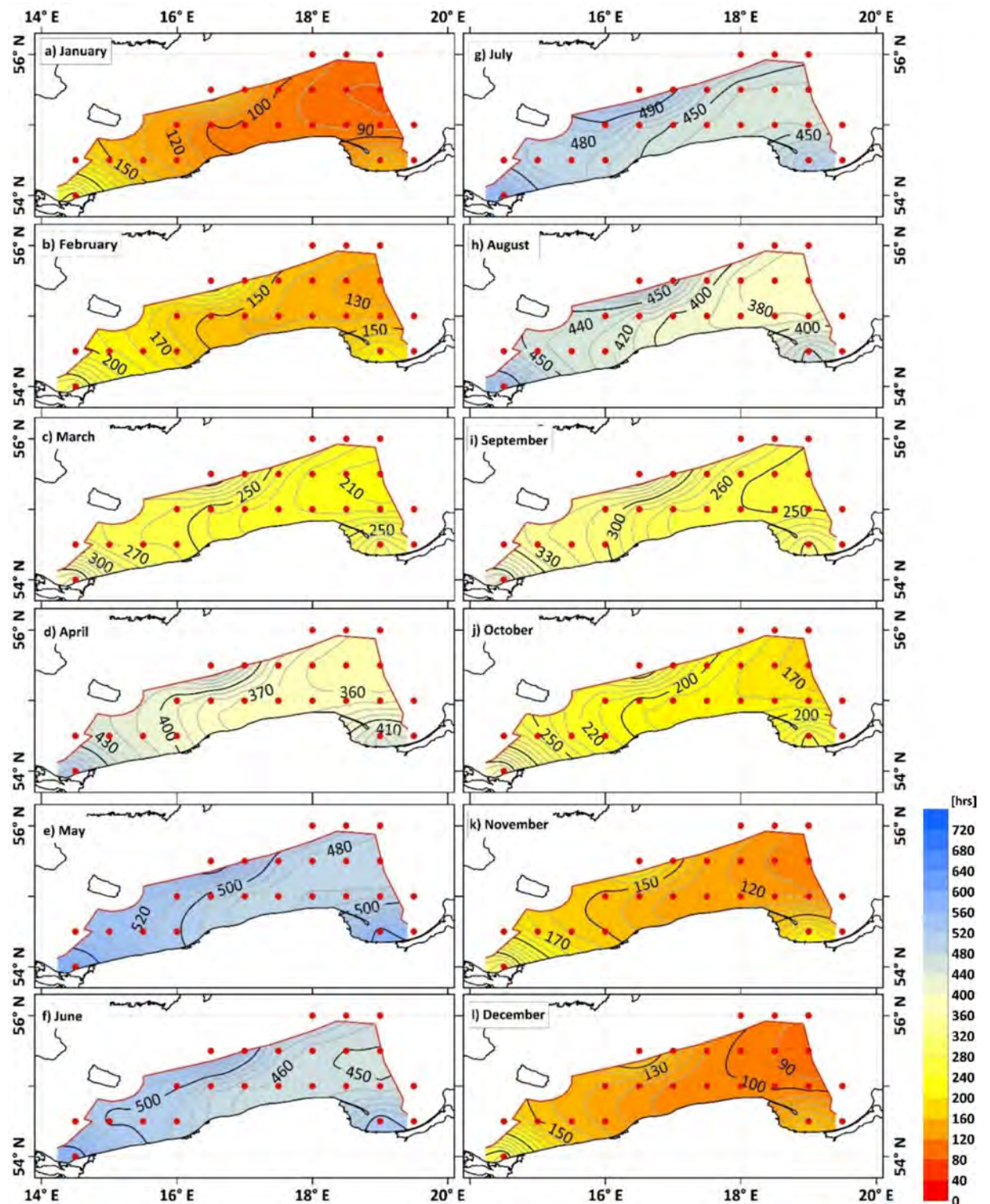


Fig. 8. Maps of operating time availability with $H_s \leq 1.0$ m divided into 12 months.

During the winter months (January, February, December), the operating time ranges from 240 h offshore to 500 h on the east coast, which is notably higher than the 80 to 270 h observed for $H_s \leq 1.0$ m. In the spring and autumn months, the offshore regions see even further improvements, with operating time exceeding 500 h in April in the whole analysed area. The summer months (June and July) show more uniform conditions across the EEZ, with operating time exceeding 620 h, even in the offshore regions, and reaching up to 700 h near the western coast. Compared to the previous maps for $H_s \leq 1.0$ m, the operating time has increased substantially in all seasons, with the largest gains occurring in the offshore and western coastal areas.

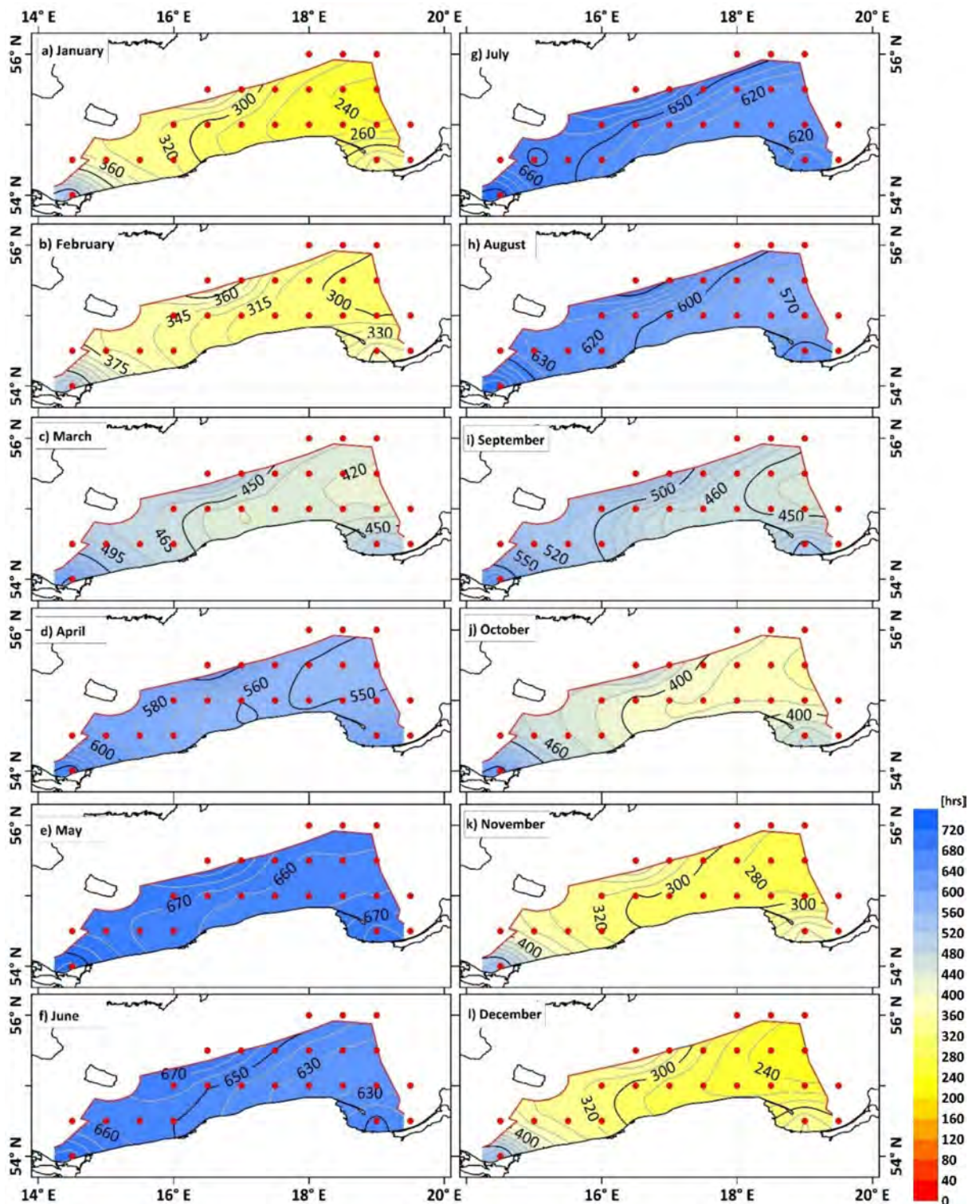


Fig. 9. Maps of operating time availability with $H_s \leq 1.5$ m divided into 12 months.

Operating time with $h_s \leq 2.0$ m

The last set of maps (Fig. 10), illustrating operating time for $H_s \leq 2.0$ m, displays a significant improvement in operating time across all months compared to the previous thresholds of $H_s \leq 1.5$ m, 1.0 m, and 0.5 m.

During the winter months (January, February, and December), operating time ranges from 420 to 700 h, showing a substantial increase from the previously observed 240–500 h for $H_s \leq 1.5$ m. In spring (March to May), conditions improve further, with operating time reaching a minimum of 720 h offshore in May. Summer months (June and July) offer the best conditions, with operating time exceeding 700 h in all regions—a notable

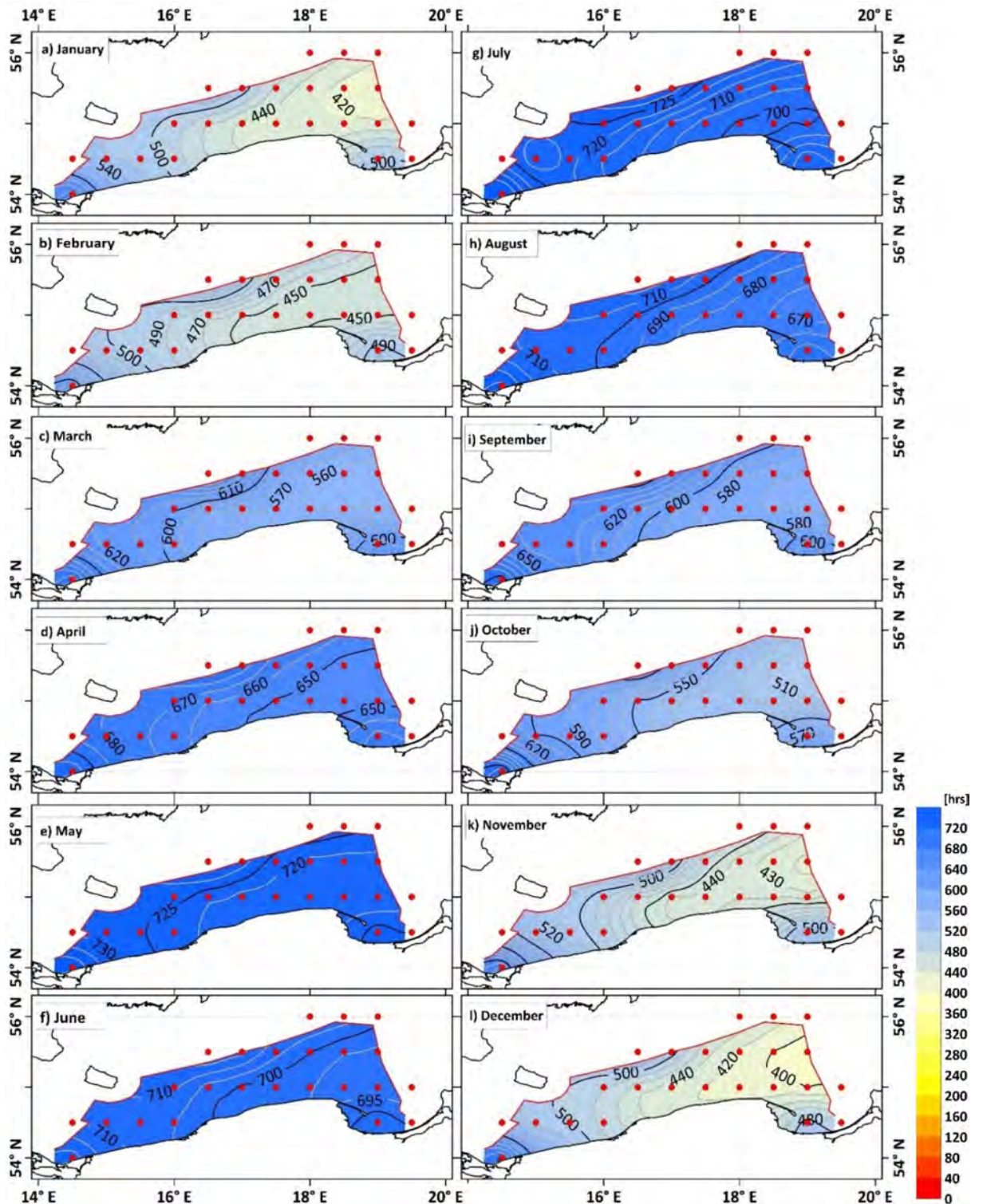


Fig. 10. Maps of operating time availability with $H_s \leq 2.0$ m divided into 12 months.

improvement in comparison with the previous thresholds. Offshore areas show the highest availability, especially from May to July, with operating time between 700 and 744 h, compared to the 620–700 h for $H_s \leq 1.5$ m. The area enclosed by the 744-hour isoline marks regions where H_s theoretically did not exceed 2 m throughout the month. Autumn (September to November) continues to provide favourable conditions, with operating time ranging from 510 to 700 h in September and October, and 420 to 670 h in November, all higher than in the previous maps.

Discussion

Reference to the main research objectives

This study set out to explore the spatial and seasonal variability of weather windows, provide a comparative analysis of offshore operating time, and quantify the total operating time across various wave height thresholds in the Polish EEZ of the Baltic Sea. By considering four wave height thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m) the research aimed to deliver a comprehensive understanding of the availability of operating time for various types of planned activities. Additionally, a more detailed analysis was performed for two specific locations (A and B), providing monthly averages of weather windows, the maximum lengths for each threshold and three weather window lengths of ≥ 12 h, ≥ 24 h, and at least 48 h, and to compare the accessibility in percentage terms of both locations. The last of the intervals, i.e. weather windows lasting at least two days, was used to create accessibility maps of the analysed area.

Article

The Baltic Sea experiences significant seasonal variability in both wind and wave climates (e.g.³¹). As a result, it is reasonable to expect pronounced seasonal patterns in the availability of operating time for maritime activities. Such trends for the southern Baltic Sea were previously obtained by Kubacka et al.^{11,13}. The findings of our paper also support this expectation, confirming that the spatial distribution of operating time is heavily influenced by wave heights and seasonal fluctuations. In general, shallow coastal waters offer better operational conditions, as seen in the maps for $H_s \leq 0.5$ m (Figs. 6a and 7a–l) and $H_s \leq 1.0$ m (Figs. 6b and 8a–l), with the largest amount of operating time observed along Poland's western and southeastern coasts, especially during the spring and summer months (Figs. 7d–i and 8d–i). For the higher thresholds, i.e. $H_s \leq 1.5$ m (Figs. 6c and 9a–l) and $H_s \leq 2.0$ m (Figs. 6d and 10a–l), operating time significantly increased offshore, particularly in the northeastern parts of the EEZ reaching a maximum of 720 h in May (95% accessibility) in this least favourable region of the analysed area (Fig. 10e). Such good conditions persist practically throughout the entire Polish EEZ, which suggests that it is possible to work from the deck of a large ship practically all month long. For comparison, in the same location, in January, with a wave limit of $H_s \leq 0.5$ m, one can expect an average of five operating hours (0.37% accessibility) (Fig. 7e). Such significant spatial variation in accessibility levels, with higher results in shallow nearshore waters than in deeper waters further offshore was shown, for example, in the Irish marine waters¹⁶; however, in this area, monthly accessibility levels for three analysed sites at a 2 m H_s limit do not exceed 70% even in the most favourable months (June and July) and less than 20% in January, February and December. Focusing on accessibility in winter months, the differences are high among different locations in Europe. According to Guanche et al., 2015, for $H_s = 2$ m, the accessibility levels are 40% for Spain, 38% for Portugal and 15% for Scotland. When evaluating accessibility as a percentage of the year, the results also vary significantly depending on wave height thresholds. For example, with a threshold of $H_s = 1$ m, most coastal regions exhibit low accessibility, with values around 30%²⁰. In contrast, semi-enclosed seas such as the Mediterranean and the Baltic display much higher accessibility, reaching nearly 80%^{21,32}. At a higher threshold of $H_s = 1.5$ m, accessibility improves across many locations. In Europe, accessibility levels reach 71% along Denmark's North Sea coast¹⁴, 45% along the northern and western Atlantic coasts of Spain and Portugal, and drop to around 20% on the exposed Atlantic coasts of Ireland and Scotland^{19,20}. Comparing the accessibility of offshore locations in the Polish EEZ with these regions, the conditions for working at sea seem to be more favourable.

The weather window analysis was conducted to assess site accessibility based on vessel operating constraints. Additionally, a detailed analysis of two locations, A and B, highlights the monthly and spatial variability of weather windows. Given the specific requirements of the activities such as conducting the surveys analysed in this paper, available working hours at each site were calculated using weather windows longer than 48 h. Shorter windows were deemed insufficient, as they might not provide enough time for substantial work, and considering the costs of transfer to the research area and the amount of collected data, shorter operations would be unprofitable. In contrast, other studies have assessed accessibility based on shorter, even one-hour weather windows, in the context of accessing marine renewables for operation and maintenance activities (for example^{17,19,33}). For both locations, A and B, the highest number of windows occurred during the summer months for thresholds of up to $H_s \leq 1.5$ m, with windows lasting longer in May and July. The amount of operating time was the highest when summing across thresholds, indicating that certain months and locations within the EEZ offer optimal conditions for maritime operations, particularly between May and September.

The provided information on the number of weather windows can play a crucial role in estimating transfer costs, and choosing a port of refuge and travel time, which, in turn, contributes to more precise planning of offshore project schedules³³. Effective weather window analysis supports better decision-making by helping project managers anticipate weather-related disruptions and allocate resources more efficiently^{16,17}. This is particularly important in offshore operations, where appropriate weather risk management is essential to minimise delays, ensure the safety of personnel, and control operational costs¹¹. Incorporating weather window data into scheduling processes allows for better alignment of activities with favourable weather conditions, thus improving overall project efficiency and reducing downtime.

Limitations of our research

While this research provides valuable insights into the availability of weather windows and operating time, certain limitations should be acknowledged. First, the analysis relies on historical wave data spanning 82 years. Although long-term datasets offer a robust basis for statistical analysis of offshore locations' accessibility^{17,20,34}, they may not fully capture recent changes in climate patterns, such as shifts in storm frequency. The relevance of historical data might diminish over time, especially if the climate is undergoing significant transitions, leading to potential discrepancies between past trends and future conditions. As a result, predictions based solely on past

data could underestimate future risks or overestimate the availability of favourable weather windows, affecting the accuracy of project scheduling and risk assessments.

Additionally, the study focused on wave height as the sole limiting factor, without incorporating other environmental conditions such as visibility, icing, and wind which could also affect operating time^{15,28,35}. In real-world conditions, operational decisions often depend on a combination of factors, which this research does not fully address. Therefore, future studies should consider expanding the analysis to include other environmental factors in this area. Moreover, future studies could explore the economic implications of operating time availability by assessing how different H_s thresholds impact various types of marine research. Such investigations could help determine when it is cost-effective to embark on measurement campaigns and when short weather windows make it more prudent and profitable to remain in port. This approach would provide valuable insights for optimizing research schedules, minimising unnecessary expenses, and improving decision-making processes in marine operations. These considerations can be applied to other sectors such as offshore wind energy, fishing, and shipping logistics, to maximise the utility of favourable weather conditions.

The next and most critical step should involve verifying and comparing the actual operating time required to perform surveys with the projected values from the statistical data. This comparison would provide a reality check, highlighting potential discrepancies between theoretical estimates and practical outcomes. Factors such as unexpected weather changes, equipment failures, or logistics delays^{11,12} might cause deviations from the forecasted windows, underscoring the importance of validating models with real-world data. Analysing completed projects would also help refine the accuracy of weather window assessments, offering deeper insights into the duration and conditions necessary for specific tasks. Furthermore, this comparison could reveal patterns or biases in the statistical models, such as over- or underestimation of downtime, allowing for better calibration of future forecasts. Ultimately, integrating practical experience with statistical predictions would improve the reliability of planning tools, leading to more effective project scheduling, cost management, and risk mitigation in future marine operations.

Conclusions

The study relied on historical wave data spanning 82 years and aimed to explore the spatial and seasonal variability of weather windows, analyse operational time, and quantify its availability across different wave height thresholds within the Polish EEZ of the Baltic Sea. By focusing on four thresholds ($H_s \leq 0.5$ m, $H_s \leq 1.0$ m, $H_s \leq 1.5$ m, and $H_s \leq 2.0$ m), the research offers a comprehensive view of the accessibility for conducting surveys. A detailed analysis of two locations (A and B) further highlighted monthly variations and maximum window lengths, focusing on durations of ≥ 12 h, ≥ 24 h, and at least 48 h. These longer weather windows were used to generate accessibility maps, which can be a vital tool for planning extended operations at sea.

The findings confirmed significant seasonal variability in wave conditions, with more favourable weather windows occurring during spring and summer, especially along the western and southeastern coasts of Poland. Shallow coastal waters offered better accessibility compared to deeper offshore areas, aligning with results from other studies. In contrast, during winter months, operating time was limited, with January showing minimal access at lower thresholds. Comparing accessibility in the Polish EEZ with other European regions highlighted that Poland's maritime conditions are generally more favourable, particularly for higher wave height thresholds ($H_s \leq 1.5$ m and $H_s \leq 2.0$ m). This suggests that, under optimal conditions, maritime operations could be conducted throughout most of the year, especially from May to September.

Incorporating weather window data into operational planning is crucial for optimising schedules, minimising disruptions, and managing transfer costs. The analysis underscores the importance of using long weather windows (≥ 48 h) for activities such as geophysical surveys, where shorter windows might be unprofitable due to the high cost of mobilization. However, the study also acknowledges that other research on marine renewables focuses on shorter weather windows to support frequent operation and maintenance activities. This highlights the need to tailor accessibility assessments to the specific operational context.

Data availability

The datasets used and analysed during the current study available from the corresponding author on reasonable request.

Received: 12 November 2024; Accepted: 20 February 2025

Published online: 27 February 2025

6. References

- Janowski, Ł., Pydyn, A., Popek, M. & Tysiąc, P. Non-invasive investigation of a submerged medieval harbour, a case study from Puck lagoon. *J. Archaeol. Sci. Rep.* **58**, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2024.104717> (2024).
- Trzcinska, K. et al. Measurement of seafloor acoustic backscatter angular dependence at 150 khz using a multibeam echosounder. *Remote Sens.* **13** (23), 4771. <https://doi.org/10.3390/rs13234771> (2021).
- Sloan, S. W. Geotechnical stability analysis. *Géotechnique* **63** (7), 531–571. <https://doi.org/10.1680/geot.12.rl.001> (2013).
- Cerfontaine, B. et al. Anchor geotechnics for floating offshore wind: current technologies and future innovations. *Ocean. Eng.* **279**, 114327. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114327> (2023).
- Le, T. M. H., Eiksund, G. R., Strøm, P. J. & Saue, M. Geological and geotechnical characterisation for offshore wind turbine foundations: A case study of the Sheringham shoal wind farm. *Eng. Geol.* **177**, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.005> (2014).
- Kubacka, M. & Moroz-Kunicka, T. (eds). *Książka abstraktów. Mapowanie siedlisk dennych polskich obszarów morskich z wykorzystaniem metody mozaikowego sonarowania dna w latach 2021–2023, Gdańsk, 19 kwietnia 2024 r.* <https://doi.org/10.26408/GIOS2024> (Uniwersytet Morski w Gdyni, 2024).

7. *The Offshore Wind Development Programme*. (2024). <https://www.gov.pl/web/morska-energetyka-wiatrowa/program-rozwoju-morskich-farm-wiatrowych> (Retrieved 01.10.2024).
8. Solheim, A. et al. International centre for geohazards (ICG): assessment, prevention and mitigation of geohazards. *Nor. J. Geol.* **85** (1), 45–62. <https://njb.geologi.no/publications/international-centre-for-geohazards-icg-assessment-prevention-and-mitigation-of-geohazards/> (2005).
9. Ayyildiz, E. & Erdogan, M. A comprehensive approach to evaluate risk mitigation strategies in offshore wind farms using spherical fuzzy decision making analysis. *Ocean Eng.* **311** (Part 1), 118881. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118881> (2024).
10. Shafiee, M. A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. *Expert Syst. Appl.* **42** (4), 2143–2152. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.019> (2015).
11. Kubacka, M., Matczak, M., Kałas, M., Gajewski, L. & Burchacz, M. Weather risk management in marine survey campaigns for the offshore investment projects in the Polish exclusive economic zone. *WCAS* **13** (4), 899–911. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0168.1> (2021).
12. Kubacka, M. et al. Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis. *PLoS One*. **17** (8), e0272960. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0272960> (2022).
13. Kubacka, M., Krężel, A., Gajewski, J. & Barbuscha, D. Analysing the accessibility of a selected Southern Baltic sea location with relevance to conducting surveys. *Sci. Rep.* **14**, 24596. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75054-4> (2024).
14. van Bussel, G. J. W. & Bierbooms, W. A. A. M. The DOWEC offshore reference windfarm: analysis of transportation for operation and maintenance. *Wind Eng.* **27** (5), 381–391. <https://doi.org/10.1260/030952403322770986> (2003).
15. Konuk, E. B. et al. On the definition of a comprehensive technology-informed accessibility metric for offshore renewable energy site selection. *J. Mar. Sci. Eng.* **11** (9), 1702. <https://doi.org/10.3390/JMSE11091702> (2023).
16. Moore, D., Eftekhari, A. & Nash, S. Weather window analysis for the deployment, operation, and maintenance of marine renewable energy devices in Irish coastal waters. *J. Ocean. Eng. Mar. Energy*. <https://doi.org/10.1007/s40722-024-00340-2> (2024).
17. Rowell, D., Jenkins, B., Carroll, J. & McMillan, D. How does the accessibility of floating wind farm sites compare to existing fixed bottom sites? *Energies*. **15**(23), 8946. <https://doi.org/10.3390/EN15238946> (2022).
18. Weiss, C. V. C., Guanche, R., Ondiviela, B., Castellanos, O. F. & Juanes, J. Marine renewable energy potential: A global perspective for offshore wind and wave exploitation. *Energy Convers. Manag.* **177**, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.059> (2018).
19. O'Connor, M., Lewis, T. & Dalton, G. Weather window analysis of Irish West Coast wave data with relevance to operations & maintenance of marine renewables. *Renew. Energy*. **52**, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.021> (2013).
20. Guanche, R., de Andrés, A., Losada, I. J. & Vidal, C. A global analysis of the operation and maintenance role on the placing of wave energy farms. *Energy Convers. Manag.* **106**, 440–456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.022> (2015).
21. López-Ruiz, A., Bergillos, R. J. & Ortega-Sánchez, M. The importance of wave climate forecasting on the decision-making process for nearshore wave energy exploitation. *Appl. Energy*. **182**, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.088> (2016).
22. Martins, D., Muraleedharan, G. & Guedes Soares, C. Weather window analysis of a site off Portugal. In *Maritime Technology and Engineering*, vol. 1 (eds Guedes, C., Soares & Santos, T. A.) 1329–1338. <https://doi.org/10.1201/b17494> (Taylor & Francis Group, CRC, 2014).
23. Gintautas, T. & Sørensen, J. D. Improved methodology of weather window prediction for offshore operations based on probabilities of operation failure. *J. Mar. Sci. Eng.* **5** (2), 20. <https://doi.org/10.3390/jmse5020020> (2017).
24. Onea, F. & Rusu, L. Long-term analysis of the black sea weather windows. *J. Mar. Sci. Eng.* **7** (9), 303. <https://doi.org/10.3390/jmse7090303> (2019).
25. Dowell, J., Zitrou, A., Walls, L., Bedford, T. & Infield, D. Analysis of wind and wave data to assess maintenance access to offshore wind farms. In *Safety, Reliability and Risk Analysis. Beyond the Horizon*, 1st ed. (eds Steenbergen, R. D. J. M., et al.) 743. <https://doi.org/10.1201/b15938> (CRC, 2013).
26. Szymczycha, B. et al. The Baltic Sea. *World Seas: An Environmental Evaluation*, 85–111. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805068-2.00005-x> (2019).
27. Novotny, K., Liebsch, G., Lehmann, A. & Dietrich, R. Variability of sea surface heights in the Baltic Sea: an intercomparison of observations and model simulations. *Mar. Geod.* **29**, 113–134. <https://doi.org/10.1080/01490410600738054> (2006).
28. O'Connor, M., Bourke, D., Curtin, T., Lewis, T. & Dalton, G. Weather windows analysis incorporating wave height, wave period, wind speed and tidal current with relevance to deployment and maintenance of marine renewables. *4th International Conference on Ocean Energy, 17 October, Dublin*, 1–9. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/icoe/icoe-2012/document/weather-windows-analysis-incorporating-wave-height-wave-period-wind-speed-and-tidal-current-with-relevance-to-deployment-and-maintenance-of-marine-renewables/> (2012).
29. Hersbach, H. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. In *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, vol. 147(741), 4186–4227. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> (Wiley, 2023).
30. Oliver, M. A. & Webster, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* **4** (3), 313–332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549> (1990).
31. Sokolov, A. & Chubarenko, B. Baltic sea wave climate in 1979–2018. Numerical modelling results. *Ocean. Eng.* **297**, 117088. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117088> (2024).
32. Lavidas, G., Agarwal, A. & Venugopal, V. Availability and accessibility for offshore operations in the mediterranean sea. *J. Waterw. Port Coast Ocean. Eng.* **144** (6), 5018006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000467) (2018).
33. Walker, R. T., Van Nieuwkoop-Mccall, J., Johanning, L. & Parkinson, R. J. Calculating weather windows. Application to transit, installation and the implications on deployment success. *Ocean. Eng.* **68**, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.015> (2013).
34. Hobjila, A. D., Onea, F. & Rusu, L. Estimating weather windows availability in the black sea area. In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (Vol. 2020–August)*, 2020-August (4.1), 69–76. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s17.009> (2020).
35. Nilsson, E. et al. Characterization of wave energy potential for the Baltic sea with focus on the Swedish exclusive economic zone. *Energies* **12** (5), 793. <https://doi.org/10.3390/en12050793> (2019).

Acknowledgements

We sincerely thank Karolina Rogóż-Badzińska for her precise translation of this manuscript, and Teresa Moroz-Kunicka and Mateusz Kunicki for their valuable edits, all of which greatly improved the clarity and quality of the final text. This study was funded by the Gdynia Maritime University, the research projects: IM/2025/PZ/03.

Author contributions

Conceptualization, M.K. and D.B.; methodology, M.K. and D.B.; software, M.K. and D.B.; validation, M.K. and D.B.; formal analysis, A.K.; investigation, M.K. and D.B.; resources, J.G.; data curation, M.K., D.B., J.G.; writing—original draft preparation, M. K.; writing—review and editing, M. K.; visualization, M. K.; supervision,

A.K.; project administration, M.K; funding acquisition, J.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Declarations

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to M.K.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

© The Author(s) 2025

Załącznik

Oświadczenia autora i współautorów artykułów naukowych składających się na rozprawę doktorską o ich wkładzie w powstanie tych artykułów.

Publikacja nr 1

Maria Kubacka
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE DOKTORANTA (publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że w artykule naukowym:

Maria Kubacka, Maciej Mateczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz
“*Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone*”; Weather, Climate, and Society, Tom 13, nr 4, 899–911, 2021

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- doborze i opracowaniu metodologii,
- walidacji wyników,
- przeprowadzeniu badań,
- opracowaniu i zarządzaniu danymi,
- wizualizacji wyników
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- pełnienie roli autora korespondencyjnego


(czytelny podpis doktoranta)

Dr hab. Maciej Matczak, Prof. UMG
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

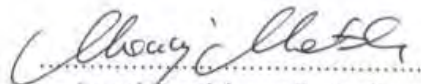
Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Maciej Matczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz "*Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone*"; *Weather, Climate, and Society*, Tom 13, nr 4, 899–911, 2021

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- nadzorze merytorycznym.


(czytelny podpis współautora)

Dr Maciej Kałas
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

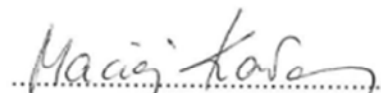
Maria Kubacka, Maciej Matczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz "*Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone*"; *Weather, Climate, and Society*, Tom 13, nr 4, 899–911, 2021

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- analizie danych i walidacji wyników,
- wizualizacji wyników,
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu


(czytelny podpis współautora)

Lucjan Gajewski
MEWO S. A.

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Maciej Matczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz *"Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone"*; Weather, Climate, and Society, Tom 13, nr 4, 899–911, 2021

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu


(czytelny podpis współautora)

Marcin Burchacz
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Maciej Matczak, Maciej Kałas, Lucjan Gajewski i Marcin Burchacz *"Weather Risk Management in Marine Survey Campaigns for the Offshore Investment Projects in the Polish Exclusive Economic Zone"*; *Weather, Climate, and Society*, Tom 13, nr 4, 899–911, 2021

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu


.....
(czytelny podpis współautora)

Publikacja nr 2

Maria Kubacka
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE DOKTORANTA (publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że w artykule naukowym:

Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „*Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis*” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- opracowaniu i zarządzaniu danymi
- analizie formalnej
- pozyskaniu funduszy
- przeprowadzeniu badań
- zarządzaniu zasobami badawczymi
- doborze i opracowaniu metodologii,
- analizie danych i walidacji wyników,
- nadzorze merytorycznym
- wizualizacji wyników
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- pełnienie roli autora korespondencyjnego


.....
(czytelny podpis doktoranta)

Lucjan Gajewski
MEWO S. A.

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- analizie formalnej
- zarządzaniu zasobami badawczymi
- przygotowaniu fragmentów tekstu manuskryptu,

.....
(czytelny podpis współautora)

Marcin Burchacz
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Mateczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu
- wsparciu pierwszego autora w opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, i w przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu
- weryfikacji poprawności przeprowadzonej analizy danych



.....
(czytelny podpis współautora)

Dr hab. Maciej Matczak, prof. UMG
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

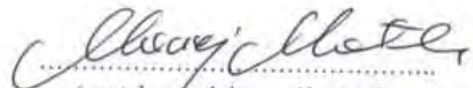
Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „*Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis*” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania
- pozyskaniu funduszy
- doborze i opracowaniu metodologii
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu


(czytelny podpis współautora)

Paweł Janowski
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „*Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis*” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- wizualizacji wyników (Figura 8),
- wsparciu przy pozyskaniu materiałów badawczych,
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu

.....Janowski Paweł.....
(czytelny podpis współautora)

Jakub Piotrowicz
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

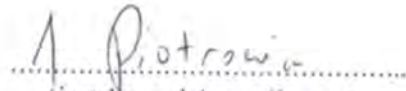
Maria Kubacka, Lucjan Gajewski, Marcin Burchacz, Maciej Matczak, Paweł Janowski, Jakub Piotrowicz „*Many faces of survey equipment failures during marine research at sea—Risk analysis*” PLoS ONE 17(8), 1-23, 2022

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- wsparciu przy pozyskaniu materiałów badawczych,
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu


(czytelny podpis współautora)

Publikacja nr 3

Maria Kubacka
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE DOKTORANTA (publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że w artykule naukowym:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, Dariusz Barbucha; "Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys" *Scientific Reports*, 14, 24596, 1-14, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- opracowaniu i zarządzaniu danymi
- analizie formalnej
- zarządzaniu zasobami badawczymi
- doborze i opracowaniu metodologii,
- analizie danych i walidacji wyników,
- nadzorze merytorycznym
- wizualizacji wyników
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- pełnienie roli autora korespondencyjnego


.....
(czytelny podpis doktoranta)

Prof. dr hab. Adam Krężel
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, Dariusz Barbucha, "Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys", *Scientific Reports*, 14, 24596, 1-14, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu
- analizie danych
- wizualizacji danych (figura 3, figura 4, figura 5, figura 6, figura 7, figura 8, figura 10)
- nadzorze merytorycznym

Adam Krężel

.....
(czytelny podpis współautora)

Juliusz Gajewski
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, Dariusz Barbusa; "Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys" *Scientific Reports*, 14, 24596, 1-14, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania
- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu
- analizie danych
- wizualizacji danych (figura 9)



.....
(czytelny podpis współautora)

Dr hab. Dariusz Barbucha, Prof. UMG
Wydział Informatyki
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, Dariusz Barbucha; "Analysing the accessibility of a selected southern Baltic Sea location with relevance to conducting surveys" *Scientific Reports*, 14, 24596, 1-14, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu fragmentów tekstu manuskryptu
- analizie danych



(czytelny podpis współautora)

Publikacja nr 4

Maria Kubacka
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE DOKTORANTA (publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że w artykule naukowym:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski,; „*Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego*” w książce: ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PRZEMYŚLE OFFSHORE, 2024, Agnieszka Błokus-Dziula, Ed., Gdynia: Uniwersytet Morski w Gdyni, 103–128, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- opracowaniu i zarządzaniu danymi,
- analizie formalnej,
- zarządzaniu zasobami badawczymi,
- doborze i opracowaniu metodologii,
- analizie danych i walidacji wyników,
- nadzorze merytorycznym ,
- wizualizacji wyników,
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- pełnienie roli autora korespondencyjnego


.....
(czytelny podpis doktoranta)

Prof. dr hab. Adam Krężel
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że jestem świadomy, iż rozdział w monografii:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski, „*Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego*” w książce: ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PRZEMYŚLE OFFSHORE, Agnieszka Blokus-Dziula, Ed., Gdynia, Uniwersytet Morski w Gdyni, 103–128, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- przygotowaniu fragmentów tekstu,
- analizie danych,
- wizualizacji danych (Rys. 12, 13)

.....*Adam Krężel*.....
(czytelny podpis współautora)

Dr Jarosław Nowak
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż rozdział w monografii:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski, „*Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego*” w książce: ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PRZEMYSŁE OFFSHORE, 2024, Agnieszka Błokus-Dziula, Ed., Gdynia: Uniwersytet Morski w Gdyni, 103–128, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- nadzór merytoryczny

.....
Jarosław Nowak
(czytelny podpis współautora)

Paweł Janowski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż rozdział w monografii:

Maria Kubacka, Adam Krężel, Jarosław Nowak, Paweł Janowski,; „*Badania geofizyczne w projektach inwestycji morskich – aspekt ryzyka pogodowego*” w książce: ZARZĄDZANIE RYZYKIEM W PRZEMYSŁE OFFSHORE, 2024, Agnieszka Blokus-Dziula, Ed., Gdynia: Uniwersytet Morski w Gdyni, 103–128, 2024

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- przygotowaniu fragmentu tekstu,
- przygotowaniu ilustracji (Rys. 1)

.....*Paweł Janowski*.....
(czytelny podpis współautora)

Publikacja nr 5

Maria Kubacka
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE DOKTORANTA (publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że w artykule naukowym:

Maria Kubacka, Dariusz Barbucha, Adam Krężel, Juliusz Gajewski,; "Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone.", *Scientific Reports*, 15, 7094, 1-18, 2025

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- opracowaniu i zarządzaniu danymi,
- analizie formalnej,
- zarządzaniu zasobami badawczymi,
- doborze i opracowaniu metodologii,
- analizie danych i walidacji wyników,
- nadzorze merytorycznym,
- wizualizacji wyników,
- przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu,
- opracowaniu odpowiedzi na komentarze recenzentów, przygotowaniu ostatecznej wersji tekstu,
- pełnieniu roli autora korespondencyjnego


.....
(czytelny podpis doktoranta)

Dr hab. Dariusz Barbucha, Prof. UMG
Wydział Informatyki
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Dariusz Barbucha, Adam Krężel, Juliusz Gajewski.: "Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone.", *Scientific Reports*, 15, 7094, 1-18, 2025

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji badania,
- analizie danych,
- doborze i opracowaniu metodologii,
- opracowaniu oprogramowania,
- walidacji wyników,
- gromadzeniu i zarządzaniu danymi.


.....
(czytelny podpis współautora)

Juliusz Gajewski
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, iż jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

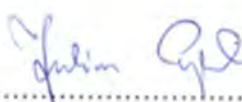
Maria Kubacka, Dariusz Barbucha, Adam Krężel, Juliusz Gajewski,; "Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone.", *Scientific Reports*, **15**, 7094, 1-18, 2025

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- zarządzaniu zasobami badawczymi
- analizie danych
- pozyskaniu funduszy


.....
(czytelny podpis współautora)

Prof. dr hab. Adam Krężel
Instytut Morski
Uniwersytet Morski w Gdyni

OŚWIADCZENIE WSPÓLAUTORA
(publikacja wieloautorska)

Oświadczam, że jestem świadomy, iż artykuł naukowy:

Maria Kubacka, Dariusz Barbucha, Adam Krężel, Juliusz Gajewski, "Spatial and seasonal accessibility of marine research weather windows in the polish exclusive economic zone", *Scientific Reports*, 15, 7094, 1-18, 2025

(autorzy, tytuł, czasopismo lub monografia, tom, strony, rok wydania)

którego jestem współautorem, będzie stanowił część zbioru artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr Marii Kubacka

Oświadczam, iż mój wkład merytoryczny w jego powstanie polegał na:

- Nadzorze merytorycznym


.....
(czytelny podpis współautora)

