

## Streszczenie

Strefa przybrzeżna morza charakteryzuje się występowaniem intensywnych procesów hydrodynamicznych, w wyniku czego dno morskie podlega tu ciągłym zmianom. W przybrzeżnej strefie mórz bezpływowych największe znaczenie ma oddziaływanie na dno fal oraz prądów pochodzenia falowego. Natomiast w większych odległościach od linii brzegowej morza, oddziaływanie fal oraz prądów pochodzenia falowego na dno słabnie. W przeciwieństwie do strefy przyboju, na dużych głębokościach ruch osadów staje się znikomy. W świetle teorii za odmorską granicę wpływu falowania na dno przyjęto tzw. głębokość zamknięcia. Jest to głębokość znajdująca się najbliżej lądu pomiędzy strefą przybrzeżną a strefą dalekiego przybrzeża, poza którą nie zachodzą żadne znaczne zmiany wysokościowe w morskim dnie ani nie występuje transport osadów. Wartość głębokości zamknięcia można wyznaczyć na dwa sposoby: 1) teoretyczny na podstawie parametrów falowania oraz 2) empiryczny oparty na pomiarach batymetrycznych. Wyznaczona w sposób teoretyczny głębokość zamknięcia na podstawie parametrów falowania od 2006 r. w MLB Lubiatowo wynosi 7,6 m. Analiza danych batymetrycznych pokazuje natomiast, że na głębokościach większych, przekraczających 16 m, mogą zachodzić znaczne zmiany w dnie morskim. Dodatkowo poza teoretycznie wyznaczoną głębokością zamknięcia na dnie południowego Bałtyku zaobserwowano występowanie fal piaszczystych znanych w anglojęzycznych opracowaniach jako „*sand-banks*” lub „*sand waves*” o wysokościach ok. 2 m. Formy te wykrywano już od 1995 roku na niektórych odcinkach przybrzeża polskiego (rejon od Helu do Karwii, wzdłuż strefy brzegowej Rozewia, od Rowów do Ustki oraz w okolicach Kołobrzegu) na głębokości od 15 do 30 m. Formy te są typowe dla płytkich, rozległych mórz pływowych a ich geneza wiąże się z występowaniem intensywnych prądów pływowych, których prędkości są rzędu 0,5 – 2,5 m/s. Warunki powstania tych form na dnie morza bezpływowego jakim jest Bałtyk, nie są poznane. Ponadto w sąsiedztwie Władysławowa na głębokościach wynoszących ok. 14 – 17 m zaobserwowano spływanie się wyrobisk powstałych po pracach pogłębiarskich.

W związku z powyżej opisanymi obserwacjami postanowiono podjąć próbę wyjaśnienia możliwych przyczyn oraz zbadania występowania ruchu osadu dna morskiego poza, wyznaczoną w dotychczasowych badaniach oraz publikacjach, głębokością zamknięcia. Dodatkowo z racji, iż wiedza o ruchu osadów dennych w morzu bezpływowym poza strefą transformacji fal jest stosunkowo ograniczona, praca ma na celu jej poszerzenie oraz wzbogacenie informacji na ten temat.

W niniejszej pracy zakłada się wystąpienie szczególnych sytuacji hydrodynamicznych na głębokościach rzędu 15 – 20 metrów, umożliwiających ruch osadów w skali, która pozwala na tworzenie się oraz migrację większych form dennych, czyli fal piaszczystych. W badaniach skupiono uwagę na mechanizmach, które byłyby w stanie umożliwić powstanie tych struktur morfologicznych dna.

Analiza dotychczasowej wiedzy dotyczącej prądów charakterystycznych dla bezpływowego morza szelfowego jakim jest Bałtyk prowadzi do wniosku, że współdziałanie falowania głębokowodnego, głównie w warunkach sztormowych, z prądem wiatrowym tworzy warunki wywołujące ruch rumowiska. Wyniki badań przedstawione w niniejszej rozprawie dowodzą tezy, że to właśnie synergia prądu wiatrowego z falowaniem sztormowym generuje warunki do intensywniejszego transportu osadów mogącego wywołać powstawanie zaobserwowanych na dnie form dna oraz zasypywania wyrobisk po pracach pogłębiarskich.

Transport osadów dennych rozpoczyna się ruchem pojedynczych ziaren i w odpowiednich warunkach może przejść poprzez tworzenie się zmarszczek do ruchu masowego. Przepływ wody wprawia w ruch cząstki osadu poprzez naprężenia styczne (ścinające), na powstawanie których mają wpływ zarówno fale jak i prądy. W celu zbadania reżimu ruchu osadów w analizowanym obszarze wyznaczono parametr Shieldsa, który reprezentuje bezwymiarowe przydennne naprężenie styczne i służy do precyzyjnego określenia intensywności ruchu osadów. Parametr ten wyznaczono dla różnych warunków hydrodynamicznych (dla samego falowania, samego prądu wiatrowego oraz dla sytuacji współdziaływania falowania z prądem wiatrowym). Wykorzystując zaadaptowany do warunków przepływu falowo-prądowego poza strefą przyboju trójwarstwowy model ruchu rumowiska uprzednio opracowany w IBW PAN wyznaczono bezwymiarowe naprężenia ścinające oraz natężenie transportu osadów.

W pracy udowodniono, że prądy wiatrowe współdziałając z falowaniem sztormowym wzmagają jego wpływ na dno morskie do tego stopnia, że osady zostają wprowadzone w intensywniejszy ruch niż przy działaniu na dno naprężeń ścinających wywołanych jedynie ruchem wody pochodzącym od falowania. Dodatkowo zaproponowano prosty dwuwariantowy model prądu wiatrowego, który wyznacza wiarygodne wartości prędkości przepływu wzdłuż polskiego wybrzeża otwartego morza Bałtyckiego w obszarze o głębokościach 12 – 20 m. Model ten został wykorzystany do obliczeń przydennych naprężeń stycznych wywołanych przepływem falowo-prądowym.

Równocześnie z analizą teoretyczną przeprowadzono pomiary terenowe w pobliżu Morskiego Laboratorium Brzegowego IBW PAN w Lubiatowie. Na poligon badawczy został wybrany obszar w odległości ok. 1,5 Mm od linii brzegowej, gdzie głębokość wody wynosi ok. 16 – 20 m.

Przeprowadzono pomiary batymetryczne oraz rejestrację falowania, co umożliwiło obliczenie falowych prędkości orbitalnych przy dnie. Pobrano próby oraz przeprowadzono analizę granulometryczną osadów dennych, której wyniki były niezbędne do teoretycznego modelowania ruchu osadów. Bardzo ważnym elementem danych pomiarowych były pomiary profili prędkości przepływu w kolumnie wody wykonane przez Instytut Morski w Gdańsku.

Baza danych zawiera wyniki pomiarów parametrów wiatru, falowania, przepływów wody oraz rzędnych i uziarnienia dna morskiego. Wyniki pomiarów terenowych stanowiły istotną wartość poznawczą oraz służyły do weryfikacji modelu teoretycznego.

## Summary

The coastal zone is characterized by the occurrence of intense hydrodynamic processes, as a result of which the seabed is constantly changing. In the coastal areas of the non-tidal seas, the waves and wave-driven currents impact on sea bottom is of the greatest importance. However, the further in the seaward direction, the weaker the influence of these factors. Unlike the surf zone, the movement of sediments becomes negligible at greater depths. In the light of theory, the boundary of the influence of waves impact on the sea bottom, a so-called depth of closure, was assumed. It is the depth nearest to the land between the coastal and the offshore zone, beyond which there are no significant changes in the sea bottom or the sediment transport does not occur. Determination of the depth of closure can be achieved within two approaches: 1) in a theoretical way based on wave parameters and 2) an empirical way based on bathymetry measurements. The closure depth determined in the theoretical approach on the basis of wave parameters since 2006 in MLB Lubiatowo equals to 7.6 m. However, the analysis of the bathymetric data show that at depths greater than 16 m, significant changes may occur in the seabed. In addition, at the bottom of the southern Baltic, the occurrence of sandy waves known as "sandbanks" or "sand waves" with heights of approx. 2 m were observed. These features have been observed since 1995 on some sections of the Polish coast (the area from Hel to Karwia, along the Rozewie coast zone, from Rowy to Ustka and around Kołobrzeg) at a depth of 15 to 30 m. This kinds of bed forms are typical for shallow tidal seas and their genesis is associated with the occurrence of intense tidal currents, which velocities are of the magnitude of 0.5 – 2.5 m/s. The reasons for the formation of these forms at the bottom of the non-tidal sea such as the Baltic Sea are not known. In addition, in the vicinity of Władysławowo, at depths of approx. 14 – 17 m, shallowing of the dredging pits was observed.

According to the above observations, it was decided to attempt to explain possible causes and to investigate the occurrence of sediment movement beyond the theoretically determined depth of closure. Additionally, due to the fact that the knowledge about the movement of bottom sediments in the non-tidal sea outside the zone of wave transformation is relatively limited, the work is aimed at expanding it and enriching information on this subject.

This paper assumes the occurrence of specific hydrodynamic situations at depths of 15 – 20 meters, enabling the movement of sediments on a scale that allows the formation and migration of larger bottom forms, i.e. sand waves. The research is focused on mechanisms that would enable the formation of these morphological structures of the bottom.

The analysis of the current knowledge on the currents characteristic for the non-tidal shelf sea such as the Baltic sea leads to the conclusion that the interaction of deepwater waves, mainly in stormy conditions, with the wind-driven current creates conditions causing the intensive movement of the sediment. The results of the research presented in this dissertation prove the thesis that the synergy of wind-driven current with storm waving generates

conditions for more intensive transport of sediments causing the formation of observed bed-forms and shallowing of dredge pits.

The sediment transport at the sea bottom begins with the movement of individual grains and under specific conditions it can go through the formation of the ripplemarks to intensive movement. The flow of water sets the sediment particles in motion through the shear stresses that are created by both waves and currents. In order to investigate the movement regime in the analysed area, the Shields parameter was determined. This parameter represents dimensionless bottom shear stress and is used to determine the intensity of the sediment movement precisely. The Shields parameter was determined for different hydrodynamic conditions (for the wave itself, the wind-driven current alone and for the wave and wind-driven current interaction). Non-dimensional shear stresses and sediment transport intensity were determined by use of the three-layer sediment transport model previously developed in the IBW PAN adapted to the study site conditions.

The study proves that the wind-driven currents, together with storm waves, constitute the impact on the seabed in the way that sediments are introduced into a more intense motion than when triggered by the shear stress caused only by the wave. In addition, the simple two-variant model of wind-induced current was proposed, which gives the reliable velocities for the flow along the Polish coast of the open Baltic Sea at depths of 12 – 20 m. The model was then used to simulate joint wave-current nearbed shear stresses, being the driving forces of sand motion.

Simultaneously with the theoretical analysis, field measurements were carried out near the IBW PAN Coastal Research Station in Lubiatowo. The study site lies at a distance of about 1.5 Nm from the shoreline, where the water depth is approx. 16 – 20 m.

Bathymetric measurements and waves recording were carried out, which enabled the calculation of wave orbital velocities at the bottom. Two samples of bottom sediment were collected and the grain size analysis has been performed, the results of which were necessary for theoretical modelling of sediment movement. Besides, the measurements of flow velocity profiles in the water column made by the Maritime Institute in Gdańsk were a very important element of the field data.

The database contains the results of measurements of wind parameters, waves and water flows, as well as bathymetry and grain sizes of the seabed sand. The results of field measurements constituted a significant cognitive value and were used to verify the theoretical model.