

Optymalizacja miejsca poboru osadów do sztucznego zasilania brzegów

Dr hab. inż. Rafał Ostrowski, inż. Marek Skaja, techn. Danuta Piotrowska
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Inżynieria brzegów morskich oferuje szeroki wachlarz metod ich ochrony. Długa historia i bogate zasoby naukowej wiedzy oraz praktycznych doświadczeń dotyczących przeciwoerozyjnego i przeciwpowodziowego zabezpieczenia brzegów stanowią osnowę efektywnych działań podejmowanych współcześnie. Stosowane z powodzeniem już w XIX wieku na wybrzeżu południowego Bałtyku tradycyjne umocnienia brzegów (opaski brzegowe) oraz ostrogi (prostopadłe do linii brzegowej konstrukcje zatrzymujące piasek plażowy) służyły i służą jako wzorzec skutecznego działania ukierunkowanego na opanowanie żywiołu morskiego atakującego brzeg morski. Pierwotnie chroniące jedynie mieszkańców obszarów przybrzeżnych, ich domostwa i dobytek, przystanie i urzędnia rybackie oraz nadmorskie lasy i pola uprawne stają się obecnie owe umocnienia niezwykle ważnym komponentem państwowej gospo-

darki morskiej. W wielu miejscach bałtyckiego wybrzeża (oraz innych wybrzeży Europy i świata) są one warunkiem *sine qua non* normalnego funkcjonowania lokalnych społeczności, miast, gmin, aglomeracji i większych jednostek administracyjnych. W Polsce, gdzie łączna długość otwartych brzegów morskich wynosi prawie 500 km, problem ochrony brzegów ma wysoką rangę [4].

W drugiej połowie XX wieku do przeciwoerozyjnej ochrony brzegów zaczęto stosować progi podwodne o zanurzonej bądź wynurzonej koronie. Te ostatnie, zwane również falochronami brzegowymi, łączy się niekiedy z ostrogami, uzyskując w efekcie budowle o kształcie liter L lub T (tzw. ostrogi teowe). Równolegle, zarówno w Polsce, jak i za granicą, stosuje się (uznawane za skuteczne i niedrogie) techniczne środki przeciwdziałające niekorzystnym procesom eolicznym mające na celu stabilizację

skarp i koron wydm (nasadzanie traw, zakrzewianie i obkładanie chrustem) oraz powodujące akumulację piasku u podstawy wydmy od strony morza (stawianie płotków faszynowych).

Sztuczne zasilanie brzegów morskich rumowiskiem piaszczystym jest relatywnie nową metodą ochronną, stosowaną w Polsce od lat osiemdziesiątych XX wieku. Jednym z pierwszych miejsc, w których metoda sztucznego zasilania została wdrożona, są brzegi Półwyspu Helskiego. Polskie doświadczenia zebrane w tym rejonie stanowią znakomity punkt wyjścia do rozważań na temat możliwości zwiększenia efektywności sztucznego zasilania brzegów. Rezultaty sztucznego zasilania brzegów Półwyspu (widoczne gołym okiem nawet dla laików, np. dla turystów odwiedzających ten urokliwy i unikalny w skali europejskiej skrawek wybrzeża) budzą z jednej strony podziw ze względu na rozmach i skuteczność, z drugiej zaś skłaniają do podejmowania badań służących optymalizacji tych przedsięwzięć. Liczne studia związane ze sztucznym zasilaniem brzegów Półwyspu Helskiego były prowadzone przez zespoły badawcze różnych instytucji, m.in. Instytutu Budownictwa Wodnego PAN (IBW PAN) w Gdańsku oraz Instytutu Morskiego w Gdańsku, a problemy i zagrożenia Półwyspu Helskiego stały się tematem publikacji i polemik, również na łamach czasopisma Inżynieria Morska i Geotechnika [8, 9, 18]. Zagadnienie ochrony brzegów Półwyspu stanowi jeden z priorytetów dla Inspektoratu Ochrony Wybrzeża Urzędu Morskiego w Gdyni. Było ono i jest przedmiotem wielu prac naukowych [1, 10, 16, 20]. Z tych względów poddawane sztuczemu zasilaniu brzegi Półwyspu Helskiego są swoistym poligonem inżyniersko-badawczym, a wnioski wyciągnięte z badań i obserwacji tam prowadzonych mogą mieć według wszelkiego prawdopodobieństwa charakter uniwersalny, przynajmniej dla piaszczystych brzegów południowego Bałtyku.

SZTUCZNE ZASILANIE BRZEGÓW PÓŁWYSPU HELSKIEGO

Procesy erozyjne brzegów Półwyspu Helskiego oraz zjawiska związane z jego przerywaniem i lokalnym przelewaniem się wód w poprzek Półwyspu obserwowano już w dalekiej przeszłości i udokumentowano na starych mapach, np. z XVII i XIX wieku, jak również w archiwalnych relacjach opisujących skutki ekstremalnych sztormów, np. z 15.01.1904 r. oraz 9.01.1914 r. [1]. Od kilkudziesięciu lat ujemny wpływ na stabilność brzegów Półwyspu Helskiego mają również falochrony wybudowanego w 1936 roku portu we Władysławowie, zaburzające wzdłuż-brzegowy ruch rumowiska morskiego. Wpływ ów w świetle wyników większości badań (np. [20]) nie powinien być jednak przeceniany.

Za początek intensywnej ochrony brzegów Półwyspu Helskiego (zob. [20]) należy uznać 1937 rok, kiedy to po wschodniej stronie nowo zbudowanego portu we Władysławowie wzniesiono masywną opaskę betonową, którą przedłużono w 1952 roku. Ponadto lokalnie budowano na Półwyspie opaski palisadowo-faszynowe, a w Kuźnicy wykonano w latach 1983-1988 wał ziemno-narzutowy. Od kilku lat w sztuczne wydmy wbudowuje się lekkie opaski, stanowiące drugą linię ochrony brzegu, uaktywniającą się w przypadku rozmycia plaży i wydmy podczas długotrwałych i silnych sztormów. W latach 1946-1969 brzegi

Półwyspu Helskiego zabudowano ostrogami aż do Kuźnicy, położonej około 12 km od Władysławowa, przy czym na pierwszych dziesięciu kilometrach brzegu wykonano ostrogi drewniane, zaś na ostatnich dwóch – żelbetowe. Budowle te stopniowo ulegały uszkodzeniom, co w efekcie doprowadziło do prawie całkowitego ich zniszczenia na kilku odcinkach brzegu, szczególnie u nasady Półwyspu (ostrogi drewniane) i na zakończeniu grupy ostróg (ostrogi żelbetowe). Ostatnio usunięto resztki wszystkich zniszczonych ostróg żelbetowych i podjęto remont ostróg drewnianych.

Po katastrofalnym sztormie, który w styczniu 1983 roku spowodował nie tylko erozję plaż i wydm Półwyspu Helskiego, ale również unieruchomienie linii komunikacyjnych, stało się oczywiste, że skuteczność dotychczas stosowanych metod ochrony brzegów Półwyspu Helskiego jest niezadowalająca. Erozja plaż i wydm oraz podtopienia terenów na zapleczu wydm, a także przypadki podmycia nasypu i toru kolejowego skłoniły Urząd Morski w Gdyni do rozpoczęcia w 1984 roku sztucznego zasilania piaskiem brzegów Półwyspu.

Pierwsze operacje sztucznego zasilania prowadzono sposobem refulacji z hydromonitora zainstalowanego na dziobie pogłębiarki nasiębierniej podpływającej na małe głębokości w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu morskiego. Pompowana przez hydromonitor (rodzaj działka wodnego) mieszanina wodno-piaszczysta układała się w strugę w kształcie tęczy (stąd nazwa tej technologii w języku angielskim – *rainbow*) i spadała na dno morskie w odległości około 150 ÷ 200 m od linii brzegowej. Efektywność tak prowadzonego zasilania brzegu w znacznej mierze zależała od warunków falowych występujących w dniach następujących po zasilaniu i była najwyższa w przypadku oddziaływania słabego lub umiarkowanego falowania, powodującego dobrzegowy ruch osadów. Piasek do zasilania brzegu pozyskiwano głównie podczas pogłębiania toru podejściowego do portu we Władysławowie.

Pod koniec lat osiemdziesiątych XX w., w celu zwiększenia efektywności sztucznego zasilania brzegów Półwyspu, mieszaninę wodno-piaszczystą refulowano już bezpośrednio na wynurzonej części przekroju brzegu, a następnie za pomocą sypcharek formowano sztuczną plażę i sztuczną wydmy. Stosowano w tym celu rumowisko piaszczyste czerpane z dna Zatoki Puckiej przez pogłębiarkę typu śródlądowego i transportowane rurociągiem (pływającym, a następnie lądowym) w poprzek Półwyspu, przepustami pod drogą i linią kolejową, na jego odmorską stronę. W ten sposób na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego przepompowano około 2 mln m³ piasku. Na początku lat dziewięćdziesiątych XX w. wdrożono pozyskiwanie materiału do zasilania z dna otwartego morza przez pogłębiarkę morską i jego przepompowywanie rurociągiem podwodnym na plażę. Według studium [1] piasek ten był lepszej jakości niż ten z Zatoki Puckiej, ale też trzykrotnie droższy ze względów technologicznych.

Na mocy Ustawy [21], bezpieczne utrzymanie brzegów Półwyspu Helskiego zapewnić ma system przesyłowy osadów przy porcie Władysławowo oraz sztuczne zasilanie brzegów Półwyspu na odcinku 23,5 km od jego nasady. Od czasu wejścia w życie Ustawy [21] ochrona brzegów Półwyspu jest bardzo dobrze zorganizowana i ma charakter w wysokim stopniu profesjonalny. Dotyczy to zarówno kwestii technicznych, jak prawnych

(oprócz Ustawy niezwykle pomocne okazało się Rozporządzenie Rady Ministrów [17] dotyczące tzw. pasa technicznego). Jednakże, pomimo zagwarantowania w Ustawie [21] środków finansowych na realizację ochrony brzegów, rzeczywiste potrzeby często okazują się większe niż fundusze przeznaczone na ich spełnienie i dlatego praktyczna realizacja regulacji prawnych nastęrcza nieco trudności. Trudności te polegają między innymi na ograniczonych zasobach odpowiedniego rumowiska w złożach znajdujących się w pobliżu odcinków brzegu Półwyspu Helskiego, na których sztuczne zasilanie jest wykonywane i planowane w niedalekiej przyszłości.

Opracowana przez Państwowy Instytut Geologiczny i Instytut Morski w Gdańsku na zamówienie Urzędu Morskiego w Gdyni „Dokumentacja geologiczno-batymetryczna...” [6] zawiera szczegółowy opis i lokalizację sześciu „pól nagromadzeń piasków do sztucznego zasilania brzegu” w tzw. obszarze perspektywnym Półwysp Helski o powierzchni 33,33 km², położonym w sąsiedztwie Półwyspu Helskiego (rys. 1).

Ustalone pola nagromadzeń piasków określono w rezultacie zakrojonych na szeroką skalę pomiarów terenowych i analiz laboratoryjnych, w ramach których poddano badaniom setki prób gruntu pobranych z dna morskiego w „obszarze perspektywnym Półwysp Helski”. Odlądowa granica „obszaru perspektywnego” przebiega w odległości około 2,7 ÷ 3,3 km od linii brzegowej, a odległość jego odmorskiej granicy od brzegu waha się w przedziale 5,7 ÷ 7,9 km. „Obszar perspektywny” znajduje się w rejonie Kuźnicy a jego rozciągłość wzdłużbrzegowa wynosi około 8 km (w przybliżeniu na kilometrażu KmH 7,5 ÷ 15,5). W badanym obszarze występuje ciągła pokrywa piaszczysta o miąższości od 0,7 m do ponad 10 m.

Stwierdzono, że w wytypowanych sześciu polach nagromadzeń piasków o łącznej powierzchni 3,24 km² teoretycznie dostępnych jest ponad 6 mln m³ osadów piaszczystych o ce-



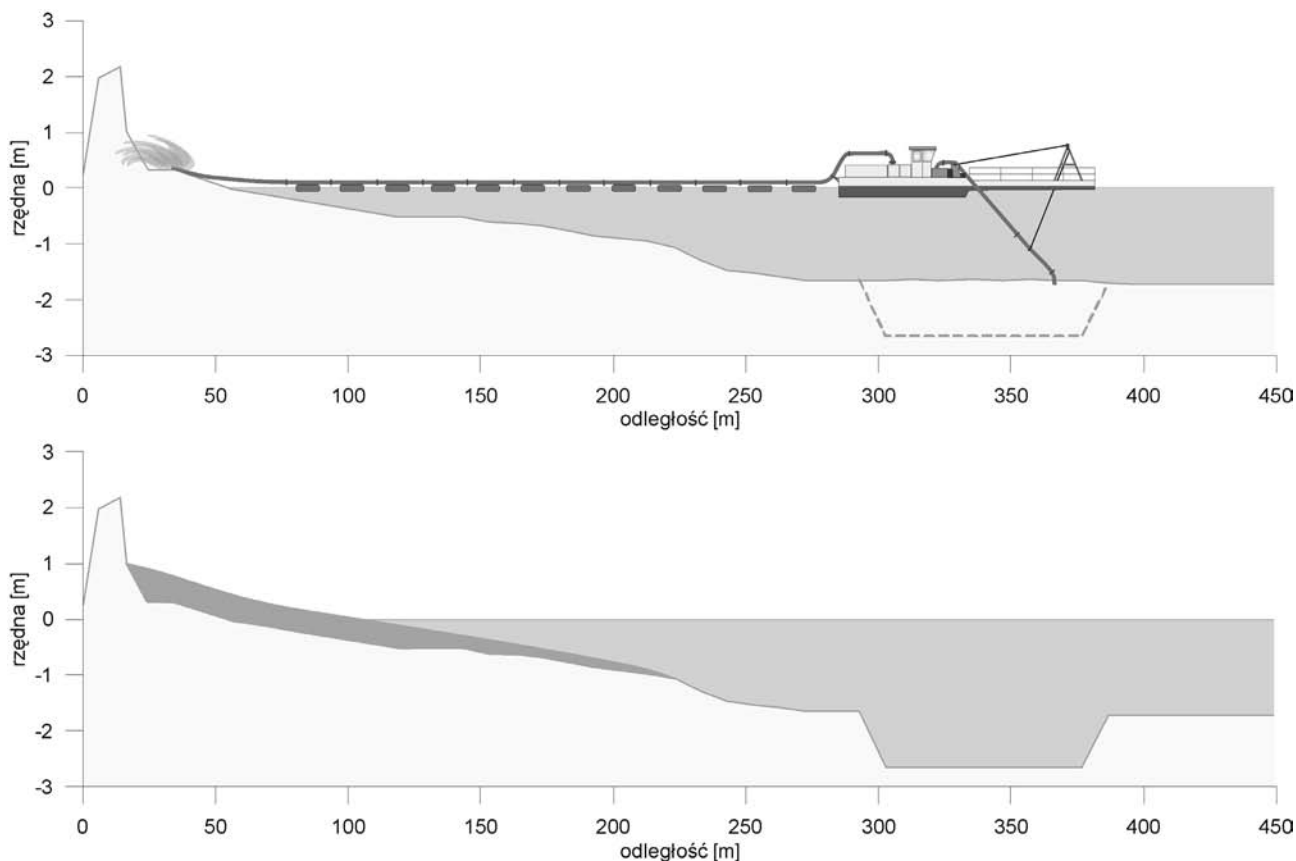
Rys. 1. Lokalizacja „obszaru perspektywnego Półwysp Helski” [6]

chach granulometrycznych kwalifikujących te osady do sztucznego zasilania brzegów Półwyspu. Praktycznie należy liczyć się z możliwością wydobycia najwyżej 5 mln m³ [6]. Osady te mają zaspokoić potrzeby sztucznego zasilania brzegów Półwyspu Helskiego do 2020 roku. Zapewne okażą się wystarczające, skoro w latach 2003-2010 na sztuczne zasilanie brzegów Półwyspu spożytkowano nieco ponad 3,5 mln m³. Rodzi się jednak przypuszczenie, że wobec zmian klimatu, przejawiających się intensyfikacją oddziaływań hydrodynamicznych bezpośrednio wpływających na morfodynamikę morskiej strefy brzegowej (zob. [3, 16]) kubatury sztucznego zasilania będą musiały ulec zwiększeniu. Po drugie, po wyczerpaniu zasobów rumowiska w „obszarze perspektywnym” zajdzie konieczność poszukiwań kolejnych złóż osadów o odpowiednim uziarnieniu. Może w tej sytuacji warto wziąć pod uwagę osady dostępne w mniejszej odległości od linii brzegowej, bliżej miejsc, gdzie sztuczne zasilanie jest planowane?

WPLYW PRZYBRZEŻNYCH WYROBISK NA HYDRO- I LITODYNAMIKĘ STREFY BRZEGOWEJ

Sztuczne zasilanie brzegu osadami czerpanymi w jego bliskim sąsiedztwie jest dopuszczalne i stosowane, szczególnie w przypadku płytkich akwenów i mało intensywnych oddziaływań hydrodynamicznych. Dobrym tego przykładem mogą być zachodnie i południowe brzegi Zalewu Wiślanego, erodowane wskutek działania fal i prądów oraz zjawisk lodowych, od szeregu lat poddawane sztuczemu zasilaniu rumowiskiem pobieranym w odległości 200 ÷ 300 m od linii brzegowej. Rozwiązania takie były proponowane [11], a następnie z powodzeniem realizowane na Zalewie Wiślanym, np. dla przedpoła wału przeciwpowodziowego w Kadynach (KmZW 30,4 ÷ 30,8) oraz w rejonie Tolkmicka (KmZW 22,6 ÷ 23,6). W rejonie Kadyn i Tolkmicka wydobyto w strefie przybrzeżnej, a następnie odłożono na brzegu odpowiednio 24 tys. m³ i 78 tys. m³ materiału piaszczystego. Prace wykonano pogłębiarką ssąco-refulującą. Czerpany przez pogłębiarkę urobek przesyłany był rurociągiem pływającym na pole refulacyjne, a następnie, po odwodnieniu, rozprowadzony spycharką w celu uformowania pożądanego profilu brzegu. Osady wydobywane były z warstwy powierzchniowej dna o miąższości 1 m. Schemat prac pogłębiarsko-refulacyjnych oraz uzyskany efekt przedstawiono na rys. 2.

Za granicą podobne schematy sztucznego zasilania stosowane są na brzegach otwartych mórz [5] z tą różnicą, że miejsca poboru osadów znajdują się w nieco większych odległościach od brzegu. Na przykład, dla potrzeb sztucznego zasilania brzegu Oceanu Atlantyckiego w USA (Delray Beach, Floryda) urobek czerpano z pola, którego odlądowa krawędź znajdowała się w odległości około 7500 stóp (762 m) od linii brzegowej. Pole poboru osadów miało szerokość około 300 m i rozciągało się równoległe do brzegu na odcinku około 2500 m. Jak podaje [5], miejsce czerpania urobku o tak zaprojektowanych granicach znajdowało się między rewami. Podobna sytuacja miała miejsce przy sztucznej zasilaniu brzegu w Miami Beach na Florydzie (również wybrzeże atlantyckie), gdzie roboty pogłębiarskie prowadzono na przybrzeżnych obszarach o kształcie dwóch równoległych pasów położonych pomiędzy rewami. Podczas zasilania 18-milowego odcinka wybrzeża Zatoki Meksykańskiej w rejo-



Rys. 2. Sztuczne zasilanie brzegów Zalewu Wiślanego

nie Panama City na Florydzie pola poboru osadów rozciągały się równoległymi do brzegu pasami w odległości kilkuset metrów od plaż, na których odbywała się refulacja.

Zgodnie z zaleceniami [5], pola robót czerpalnych powinny znajdować się „w rozsądnym” sąsiedztwie linii brzegowej (*reasonable proximity to the shoreline*), tj. w strefie wystarczająco dużych głębokości, gdzie nie wystąpi znaczny napływ rumowiska do wykopów podwodnych. Chodzi tu przede wszystkim o to, żeby osady tworzące świeżo uformowaną plażę nie spływały natychmiast do przybrzeżnych wyrobisk, z których zostały pobrane. Czytamy ponadto w pracy [5], że wyrobiska w dnie morskiej strefy brzegowej nie powinny zakłócać naturalnego dobrego transportu osadów.

Odrębnym zagadnieniem (również wspomnianym w pracy [5]) jest wpływ podwodnych wyrobisk na transformację fali w strefie brzegowej. Zmiany batymetryczne powstałe wskutek robót pogłębiarskich mogą oddziaływać w sposób znaczny na takie procesy jak refrakcja, dyfrakcja, odbicie i interferencja fal oraz dyssypacja energii falowej. Dwa głębokie wykopy w strefie przybrzeżnej Grand Isle (USA, stan Luizjana) zaowocowały powstaniem dwóch rozległych form akumulacyjnych w postaci występów brzegowych (tzw. salientów) i trzech miejsc erozji (kompensującej wymienioną akumulację).

Zdaniem autorów niniejszego studium największy może być jednak wpływ wyrobisk przybrzeżnych na dyssypację energii fali, szczególnie w warunkach batymetrycznych Półwyspu Helskiego, charakteryzujących się umiarkowanym nachyleniem przybrzeżnego dna ($1 \div 2\%$). Jest to brzeg morski w małym

stopniu odbijający energię falową. Przy tak małym nachyleniu profilu brzegu kluczową rolę w transformacji fali odgrywa dyssypacja energii, głównie wskutek załamania fali [14]. Podczas silnego falowania dochodzi w wielorewowej strefie brzegowej do kilkukrotnego załamania fali. Dzięki temu zjawisku w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu dociera znikoma część energii falowania w stosunku do energii fal głębokowodnych. Z tej przyczyny nie można dopuścić, aby roboty czerpalne prowadzone w morskiej strefie brzegowej Półwyspu Helskiego (i na innych odcinkach wybrzeża południowego Bałtyku) naruszyły system przybrzeżnych form akumulacyjnych sprzyjających rozpraszaniu energii fal [15]. Mogłoby to nastąpić, gdyby na przykład zbyt gwałtowna akumulacja osadów w przybrzeżnych wyrobiskach odbywała się kosztem erozji znajdujących się w pobliżu dużych form dennych (rew), jeżeli rewy te odgrywają korzystną rolę w procesie dyssypacji energii falowania.

Tradycyjnie, za odmorską granicę wpływu falowania na brzeg morski przyjmuje się tzw. głębokość zamknięcia, występującą na profilu poprzecznym brzegu w miejscu, gdzie ekstremalne fale sztormowe nie wywołują intensywnego ruchu osadów dennych. Najczęściej odnośne ekstremalne warunki sztormowe określane są wysokością fal występujących przez co najmniej 12 godzin w ciągu roku. Proste równania (oparte na opracowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. koncepcjach Hallermeiera i Birkemeiera), umożliwiające wyznaczenie głębokości zamknięcia na podstawie parametrów fali lub maksymalnej przydennej prędkości orbitalnej, podane są w pracy [5].

Bardziej precyzyjne określenie reżimu ruchu osadów dennych (czyli określenie, czy jest to ruch pojedynczych ziaren, intensywny ruch ziaren w warunkach występowania zmarszczek dennych, czy też transport osadów o charakterze masowym) jest możliwe poprzez obliczenie wartości parametru Shieldsa, tj. bezwymiarowego przydennego naprężenia ścinającego, opisanego formułą:

$$\theta = \frac{u_f^2}{(s-1)gd} \quad (1)$$

gdzie:

u_f – prędkość tarcia dennego (ang. *friction velocity*),

s – stosunek gęstości szkieletu gruntowego dna do gęstości wody ($s = \rho_s/\rho$, dla piasku kwarcowego równy około 2,65),

g – przyspieszenie ziemskie,

d – średnica ziaren osadów tworzących dno.

Określenie wartości prędkości tarcia dennego u_f może nastężyć sporo kłopotów. Prędkość tarcia odzwierciedla przydenną naprężenie ścinające τ (definiowane jako $\tau = \rho u_f^2$), będące główną siłą sprawczą ruchu osadów dennych. Zgodnie z podstawami mechaniki płynów, naprężenie ścinające (albo styczne, ang. *shear stress*) τ zależne jest od prędkości przepływu wody na górnej granicy warstwy przyściennej (w tym przypadku przydennej) oraz szorstkości ściany (w tym przypadku dna). Zbudowane z osadów piaszczystych dno morza staje się ruchome pod wpływem oddziaływania wymuszeń hydrodynamicznych (fal i prądów), co dodatkowo utrudnia rozwiązanie zagadnienia warstwy przyściennej i precyzyjne określenie wartości prędkości tarcia u_f . Z tego względu jest godne polecenia (zob. [13]) skorzystanie z nieco uproszczonego podejścia, uwzględniającego tylko tarcie denne związane z szorstkością tworzoną przez ziarna osadów, a pomijającego szorstkość dna wywołaną obecnością form dennych (zmarszczek). Takie założenie jest dopuszczalne w badaniach dotyczących warunków początku ruchu ziaren (kiedy dno jest płaskie lub słabo rozwinięte formy denne są źródłem relatywnie małego tarcia) oraz w przypadku silnych przydennych przepływów pochodzenia falowo-prądowego, pod wpływem których formy denne są rozmywane i ma miejsce masowy ruch „dywanu” osadów (ang. *sheet flow*). Bezwymiarowe przydenną naprężenie ścinające w warunkach oddziaływania na przepływ „piaskowej” szorstkości dennej (charakteryzującej się wymiarem $2,5d$) wyznacza się, stosując następujące równanie [13]:

$$\theta_{2,5} = \frac{1}{2} f_{2,5} \frac{(a_{1m}\omega)^2}{(s-1)gd} \quad (2)$$

w którym:

$$f_{2,5} = \exp \left[5,213 \left(\frac{2,5d}{a_{1m}} \right)^{0,194} - 5,977 \right]$$

gdzie:

ω – częstotliwość kątowa w ruchu falowym o okresie T ($\omega = 2\pi/T$),

a_{1m} – amplituda wywołanych falowaniem poziomych przydennych wychyleń elementów wody ($a_{1m} = U_{1m}/\omega$),

U_{1m} – maksymalna przydenna prędkość w oscylacyjnym przepływie pochodzenia falowego, przy czym dla fal sinusoidalnych prędkość oscylacyjnego ruchu przydennego wyraża się wzorem:

$$U(\omega t) = U_{1m} \sin(\omega t) \quad (3)$$

Jako warunek początku ruchu osadów zwykle przyjmuje się [13] wartość $\theta_{2,5}$ równą około 0,05. Należy podkreślić, że przy takiej wartości $\theta_{2,5}$ oczekiwać można bardzo powolnego ruchu

pojedynczych ziaren. Dopiero dla $\theta_{2,5} = 0,2 \div 0,3$ obserwuje się intensywniejszy ruch osadów i występowanie rozwiniętego systemu zmarszczek dennych. Przy jeszcze silniejszych oddziaływaniach hydrodynamicznych, przejawiających się wartością parametru $\theta_{2,5}$ równą około $0,8 \div 1,0$, zmarszczki denne ulegają rozmyciu, a ruch osadów przybiera charakter masowy.

Wartości bezwymiarowych naprężeń ścinających $\theta_{2,5}$ przełożyć można dla przykładowych warunków wyrażających się średnicą ziaren piasku kwarcowego $d = 0,2$ mm oraz falowaniem o okresie np. 5 s i 10 s i wyrazić poprzez maksymalne prędkości oscylacji przydennych pochodzenia falowego U_{1m} , użyteczniejsze z inżynierskiego punktu widzenia. Otrzymane przykładowe wartości wyszczególniono poniżej (w nawiasach podano prędkości dla okresu fali wynoszącego 10 s):

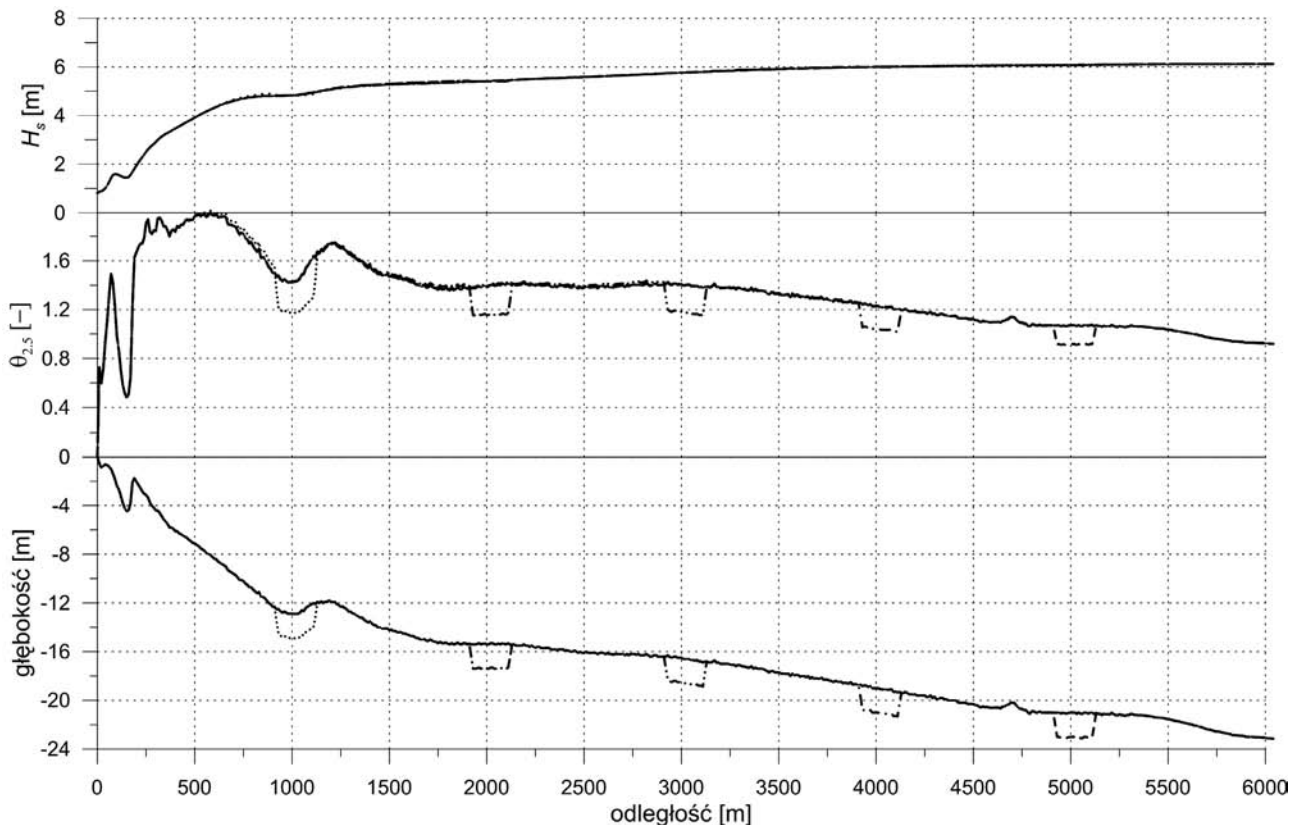
$\theta_{2,5} = 0,05$	$U_{1m} = 0,18$ (0,19) m/s
$\theta_{2,5} = 0,10$	$U_{1m} = 0,26$ (0,30) m/s
$\theta_{2,5} = 0,20$	$U_{1m} = 0,39$ (0,44) m/s
$\theta_{2,5} = 0,30$	$U_{1m} = 0,50$ (0,55) m/s
$\theta_{2,5} = 0,40$	$U_{1m} = 0,59$ (0,65) m/s
$\theta_{2,5} = 0,80$	$U_{1m} = 0,88$ (0,97) m/s
$\theta_{2,5} = 1,00$	$U_{1m} = 1,00$ (1,10) m/s
$\theta_{2,5} = 1,50$	$U_{1m} = 1,26$ (1,38) m/s
$\theta_{2,5} = 2,00$	$U_{1m} = 1,48$ (1,62) m/s

Obliczenia zmienności wysokości fali H i bezwymiarowego przydennego naprężenia ścinającego $\theta_{2,5}$ na profilu poprzecznym brzegu wykonano dla rzeczywistego przekroju batymetrycznego pomierzonego w rejonie Kuźnicy na Półwyspie Helskim (KmH 11,5). Proces transformacji fali poddano modelowaniu teoretycznemu przy użyciu koncepcji [2], zaadaptowanej dla wielorewowego profilu dna [19]. Średnicę ziaren osadów budujących dno (d) przyjęto równą 0,2 mm.

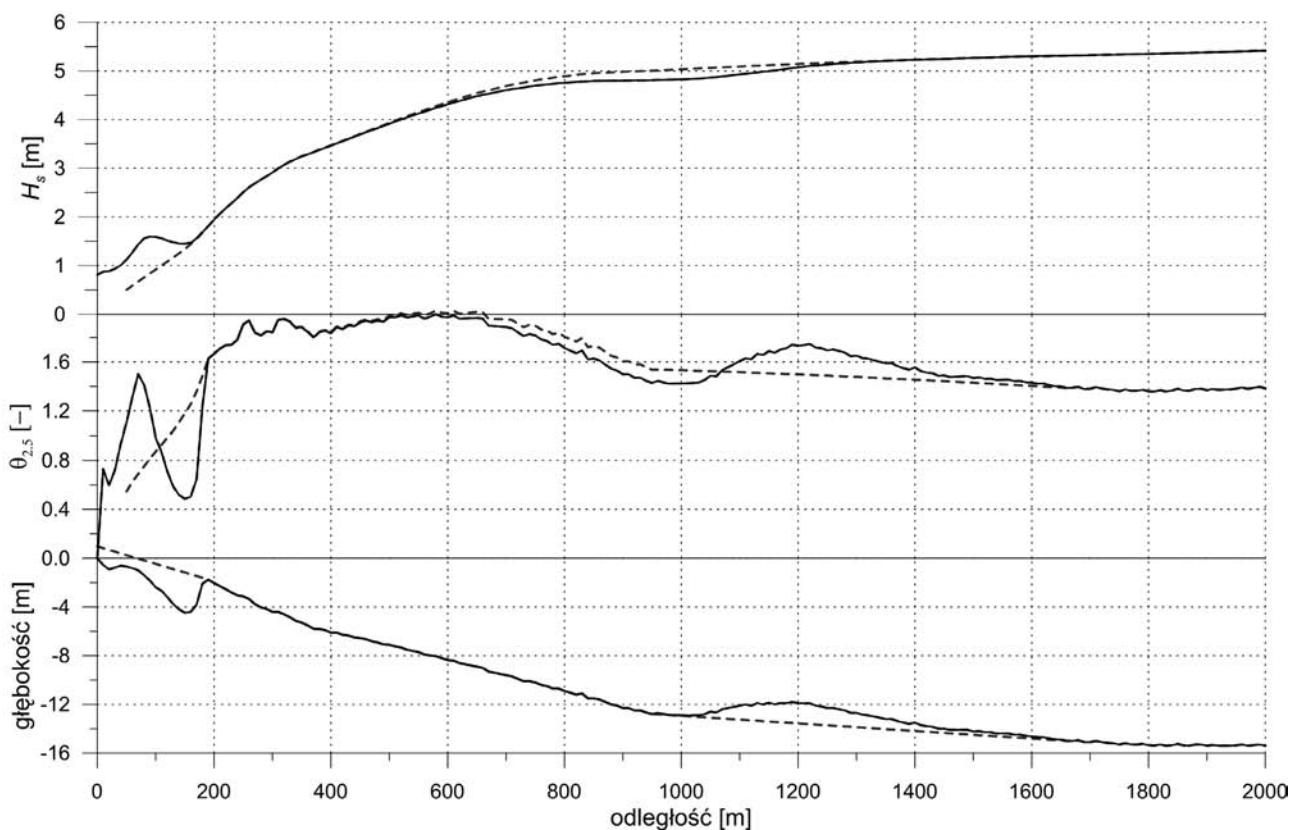
W obliczeniach wykorzystano parametry wiatru i falowania zrekonstruowanego dla okresu 1958-2001 w ramach międzynarodowego projektu HIPOCAS, w którym uczestniczył IBW PAN. Rekonstrukcja ta, wraz z długoterminowymi prognozami klimatycznymi dla Bałtyku, stanowiła podstawę oceny zagrożenia erozyjnego brzegów Półwyspu Helskiego w przyszłości [3].

Na rys. 3 przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla przypadku transformacji na profilu brzegu ekstremalnego falowania głębokowodnego o okresie powtarzalności 10 lat. Parametry takiego falowania na głębokości 90 m (na północny-wschód od Kuźnicy, w odległości około 13,5 km od brzegu Półwyspu Helskiego) są następujące: wysokość fali znacznej $H_s = 6,27$ m, okres piku widma energii fali $T_p = 12$ s. Rozpatrzono najniekorzystniejszy przypadek, w którym fale podchodzą prostopadle do brzegu, tj. z sektora N-NE. W ramach serii wykonanych obliczeń przyjęto rzeczywisty naturalny profil batymetryczny na KmH 11,5 oraz ten sam profil z teoretycznie założoną obecnością wyrobisk o głębokości 2 m i szerokości 200 m znajdujących się w różnych odległościach od brzegu (odpowiadających różnym głębokościom wody).

Z oglądu rys. 3 wynika, że żadne z rozpatrywanych wyrobisk nie ma wpływu na proces transformacji fali i dyssypację energii falowania. Zmienność wysokości fali znacznej H_s na skłonie brzegowym jest taka sama dla naturalnego profilu brzegu jak dla profilu z podwodnym wykopem usytuowanym w dużej od-



Rys. 3. Obliczone rozkłady wysokości fali znacznej H_s i bezwymiarowego przydenne naprężenia ścinającego $\theta_{2,5}$ na profilu poprzecznym brzegu Półwyspu Helskiego – naturalnym (linie ciągłe) i z wyrobiskami o przekroju 2×200 m znajdującymi się w różnych odległościach od linii brzegowej (linie przerywane) dla sztormu o okresie powtarzalności 10 lat



Rys. 4. Obliczone rozkłady wysokości fali znacznej H_s i bezwymiarowego przydenne naprężenia ścinającego $\theta_{2,5}$ na profilu poprzecznym brzegu Półwyspu Helskiego – naturalnym (linie ciągłe) oraz z wyrobiskiem w miejscu występowania odmorskiej rewy i odkładem w strefie przybrzeżnej (linie przerywane) dla sztormu o okresie powtarzalności 10 lat

głębości od brzegu (1000 ÷ 5000 m), na głębokościach rzędu 12 ÷ 20 m. Obliczone wartości przydennych naprężeń ścinających $\theta_{2,5}$ (od niespełna 1,0 w odległości 6 km od linii brzegowej do 2,0 w strefie 300 ÷ 700 m od brzegu) wskazują na intensywny ruch osadów dennych w całej strefie brzegowej. Ponadto na rys. 3 widać, że w wyrobiskach uzyskano redukcję wartości $\theta_{2,5}$ (przy zwiększonej głębokości oddziaływanie ruchu falowego na dno jest mniejsze), aczkolwiek na całym profilu brzegu wartości $\theta_{2,5}$ wskazują na istnienie masowego ruchu osadów dennych.

Analogiczne obliczenia wykonano dla przypadku, w którym naturalny profil brzegu jest zmieniony w ten sposób, że odmorska (zewnątrzna) rewa, położona w odległości 1000 ÷ 1600 m od linii brzegowej, przestała istnieć wskutek pobrania tworzącego ją piaszczystego materiału dla potrzeb sztucznego zasilania, przy czym materiał ten odłożono w strefie przybrzeżnej w tym samym profilu – w odległości 0 ÷ 190 m od linii brzegowej (rys. 4).

Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 4 ukazują, w porównaniu z sytuacją odpowiadającą naturalnemu brzegowi, niewielki wzrost wysokości fali znacznej H_s nad pogłębionym dnem w miejscu występowania odmorskiej rewy i wyraźny spadek wysokości fali w bezpośrednim sąsiedztwie linii brzegowej. W strefie przybrzeżnej, tj. w miejscu odkładu rumowiska, energia fal ulega dyssypacji w znacznie większym stopniu (co jest korzystne dla stabilności brzegu) niż w przypadku brzegu naturalnego, charakteryzującego się przegłębieniem do rzędnej -4 m w odległości około 150 m od linii brzegowej. W bezpośrednim sąsiedztwie linii brzegowej (ca 0 ÷ 110 m) maleją też znacznie przydenne naprężenia ścinające $\theta_{2,5}$ (do wartości 0,6 ÷ 1,0), co skutkuje redukcją natężenia ruchu osadów dennych. Na pozostałej części profilu poprzecznego brzegu wartości przydennych naprężeń ścinających są równie wysokie jak dla naturalnego przekroju brzegu (1,4 ÷ 2,0) i generują masowy ruch osadów o dużym natężeniu.

W przypadku, gdy będzie dokonany pobór osadów z głębokowodnej rewy i odkład tego materiału będzie miał miejsce na innym odcinku brzegu, profil morskiej strefy przybrzeżnej nie ulegnie zmianie. Wyniki teoretycznego modelowania transformacji fali i przydennych naprężeń ścinających w takiej sytuacji przedstawiono na rys. 5.

Z rys. 5 wynika, że w ekstremalnych warunkach sztormowych energia falowania i przydenne naprężenia ścinające w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu, tj. w odległości mniejszej niż 600 m od linii brzegowej, nie ulegną zmianie (w porównaniu z oddziaływaniami hydrodynamicznymi na naturalnym profilu brzegu). Można zatem wnioskować, że pobór materiału dennego w strefie brzegowej Półwyspu Helskiego na głębokościach rzędu 12 m nie będzie miał najmniejszego wpływu na oddziaływania hydrodynamiczne w strefie przybrzeżnej i nie ma prawa zintensyfikować erozji brzegu. Co więcej, obliczone wartości przydennych naprężeń ścinających wskazują na istnienie w rejonie wyrobiska intensywnego ruchu osadów dennych. Stwarza to korzystne warunki do zapiaszczania wyrobiska lub odtwarzania się głębokowodnej rewy, z której pobrano materiał na potrzeby sztucznego zasilania.

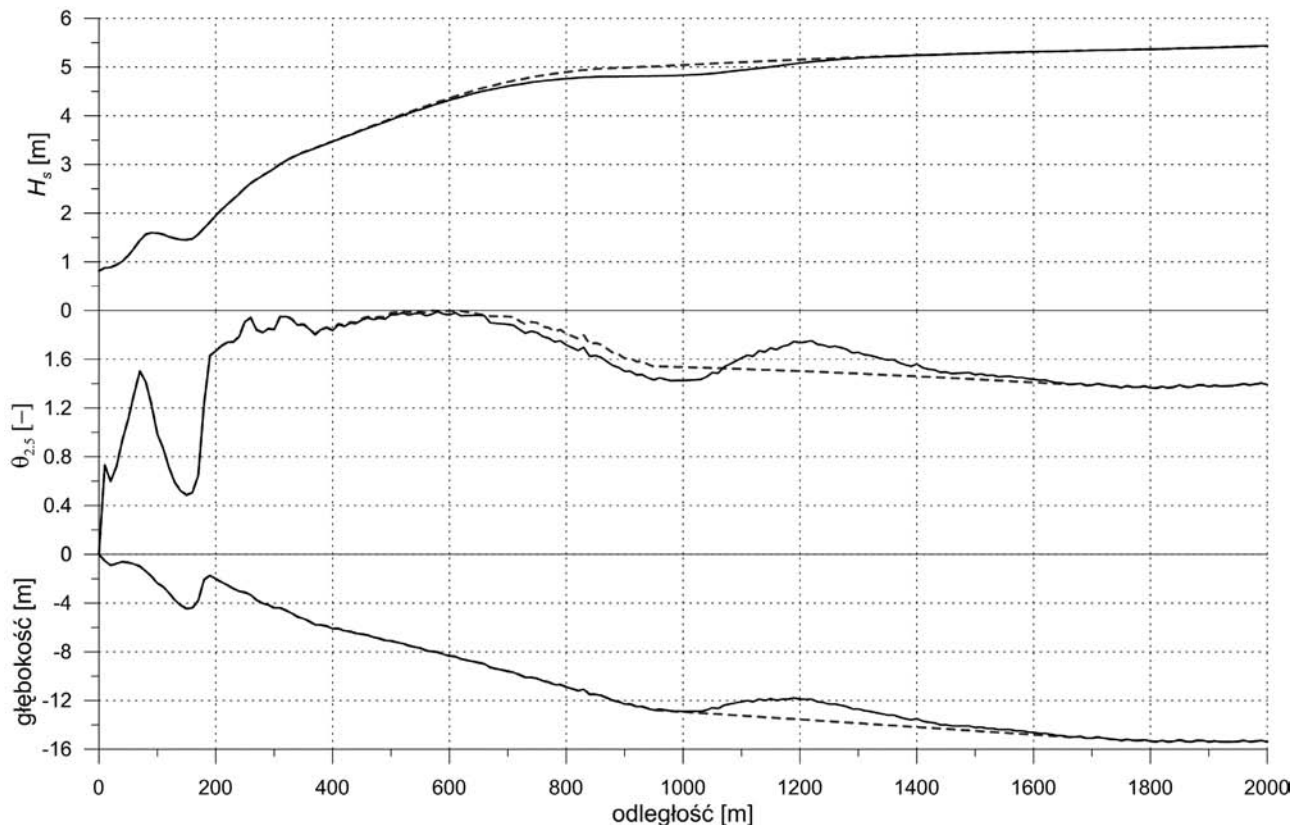
Skoro pobór rumowiska dennego z zewnętrznej głębokowodnej rewy nie stwarza zagrożenia dla równowagi litodynamicznej brzegu i strefy przybrzeżnej, nawet w ekstremalnych warunkach sztormowych (o okresie powtarzalności 10 lat), to

interesującą jawi się kwestia, czy pobór materiału piaszczystego z nieco mniejszych głębokości będzie również nieszkodliwy dla brzegu morskiego w analizowanym rejonie. W celu wyjaśnienia tak sformułowanej wątpliwości wykonano symulację numeryczną (z zastosowaniem tych samych modeli teoretycznych) dla przypadku dna strefy brzegowej, w którym przeprowadzono roboty pogłębiarskie skutkujące powstaniem wyrobiska o głębokości 2 m i szerokości 200 m w strefie głębokości 8 ÷ 11 m (tj. w odległości około 600 ÷ 800 m od linii brzegowej). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 6.

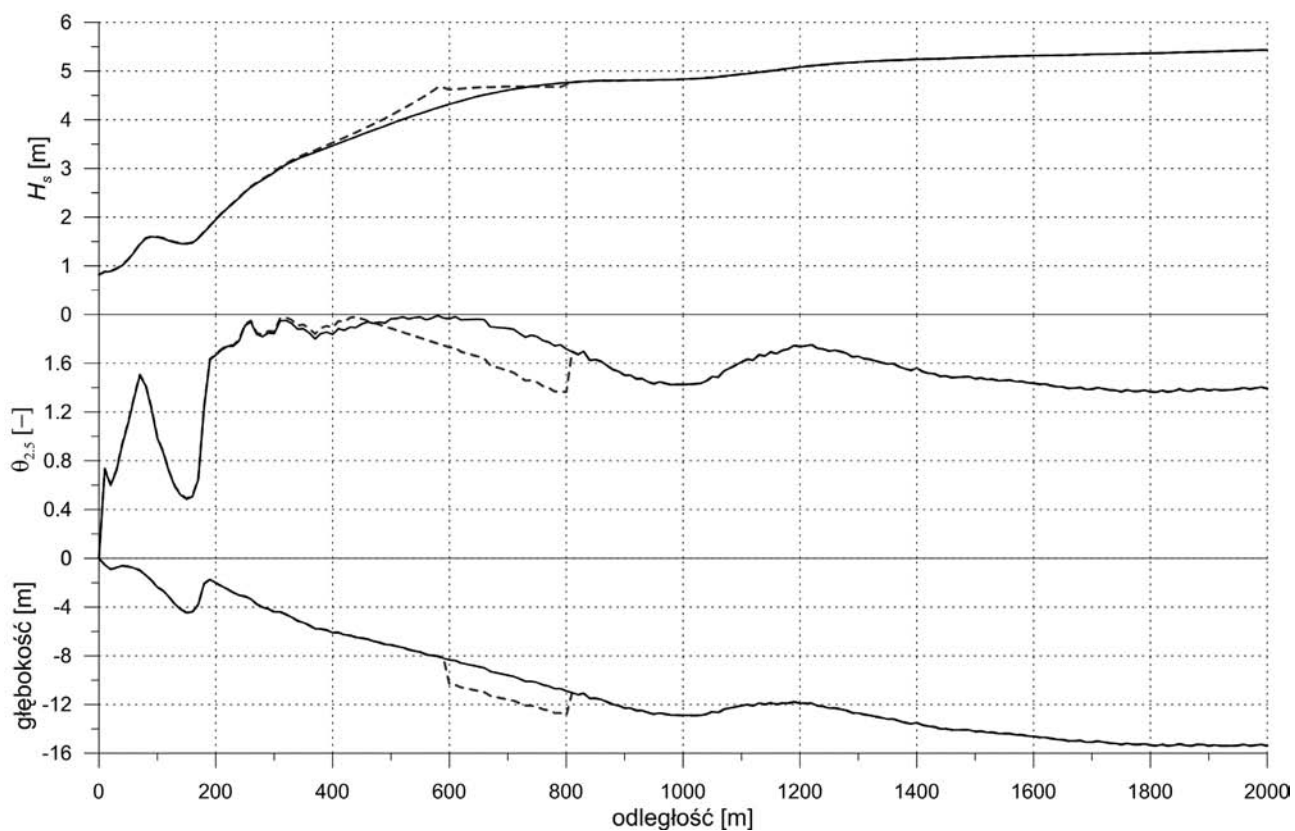
Przedstawione na rys. 6 obliczone wysokości fali i przydenne naprężenia ścinające świadczą o tym, że znajdujące się w odległości 600 ÷ 800 m od linii brzegowej (w rejonie naturalnych głębokości 8 ÷ 11 m) wyrobisko o głębokości 2 m będzie miało wpływ na ruch wody i osadów w strefie przybrzeżnej (aż do odległości około 300 m od linii brzegowej, gdzie głębokość wynosi nieco ponad 4 m). Może to skutkować zwiększoną erozją dna morskiego w tym obszarze.

Wyniki obliczeń zobrazowane na rys. 3 ÷ 6 dotyczą sytuacji ekstremalnych, związanych z oddziaływaniem na brzeg morski falowania sztormowego o okresie powtarzalności 10 lat. Konwencjonalnie przyjmuje się zwykle, że reprezentatywne oddziaływanie czynników hydrodynamicznych na brzeg morski (skutkujące znacznymi zmianami dennymi w morskiej strefie brzegowej) związane jest z ekstremalnym sztormowym falowaniem o okresie powtarzalności 1 roku (zob. uprzednia dyskusja na temat głębokości zamknięcia, zależnej od wysokości fal występujących przez co najmniej 12 godzin w ciągu roku). W tym kontekście warto postawić pytanie, czy również nieco mniej intensywne falowanie ekstremalne, mianowicie falowanie sztormowe pojawiające się raz na rok, może niekorzystnie oddziaływać na brzeg morski, jeżeli w strefie głębokości większych niż 8 m będą wykonane podwodne wykopy. Wyniki modelowania odnośnych procesów hydrodynamicznych dla parametrów fali głębokowodnej o okresie powtarzalności 1 roku ($H_s = 3,13$ m, $T_p = 8$ s) przedstawiono na rys. 7. W przypadku obliczeń dla fali „jednorocznej” przyjęto, podobnie jak uprzednio dla fali „dziesięcioletniej”, najniekorzystniejszą sytuację, w której fale podchodzą prostopadle do brzegu, tj. z sektora N-NE.

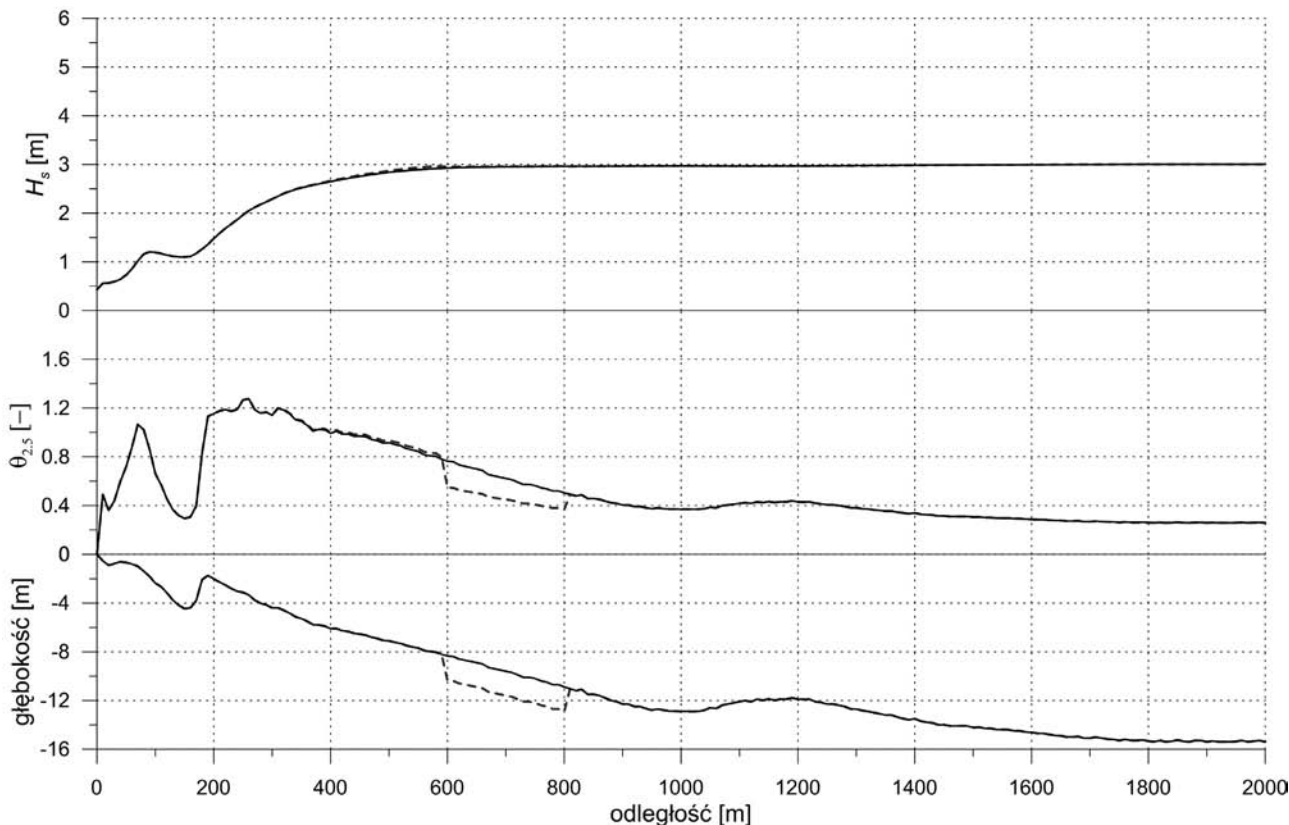
Jak należało spodziewać się, wyniki obliczeń przedstawione na rys. 7 wskazują na brak oddziaływania wykopu na transformację fali (wysokość fali H_s) i siły sprawcze ruchu rumowiska dennego (naprężenie $\theta_{2,5}$) w strefie pomiędzy wykopem i linią brzegową w porównaniu z sytuacją odpowiadającą naturalnemu kształtowi przybrzeżnego dna. Naprężenia $\theta_{2,5}$ w strefie przybrzeżnej są wprawdzie znaczne, lokalnie o wartościach powyżej 1,0, co wskazuje na masowy ruch osadów dennych. W takich warunkach niewątpliwie wystąpi intensywna przebudowa dna morskiego, ale proces ten przebiegać będzie w strefie przybrzeżnej tak samo w przypadku naturalnego profilu brzegu jak dla profilu z wyrobiskiem. Różnica pojawi się zapewne w rejonie wykopu, który ulegać będzie zapiaszczaniu kosztem erozji jego krawędzi i przyległego dna morskiego. Te niekorzystne zmiany denne wystąpią jednak w znacznej odległości od brzegu i w znikomym stopniu wpłyną na transformację fali i dyssypację energii, która dla parametrów rozpatrywanego sztormu dokonuje się głównie w strefie głębokości 2 ÷ 6 m (maksymalnie 7 m), tj. w odległości 200 ÷ 400 m (maksymalnie 500 m) od linii brzegowej.



Rys. 5. Obliczone rozkłady wysokości fali znacznej H_s i bezwymiarowego przydenne naprężenia ścinającego $\theta_{2.5}$ na profilu poprzecznym brzegu Półwyspu Helskiego – naturalnym (linie ciągłe) oraz z wyrobiskiem w miejscu występowania odmorskiej rewy (linie przerywane) dla sztormu o okresie powtarzalności 10 lat



Rys. 6. Obliczone rozkłady wysokości fali znacznej H_s i bezwymiarowego przydenne naprężenia ścinającego $\theta_{2.5}$ na profilu poprzecznym brzegu Półwyspu Helskiego – naturalnym (linie ciągłe) oraz z wyrobiskiem o głębokości 2 m i szerokości 200 m w odległości około 600 ÷ 800 m od linii brzegowej (linie przerywane) dla sztormu o okresie powtarzalności 10 lat



Rys. 7. Obliczone rozkłady wysokości fali znacznej H_s i bezwymiarowego przy dennego naprężenia ścinającego $\theta_{2,5}$ na profilu poprzecznym brzegu Półwyspu Helskiego – naturalnym (linie ciągłe) oraz z wyrobiskiem o głębokości 2 m i szerokości 200 m w odległości około 600 ÷ 800 m od linii brzegowej (linie przerywane) dla sztormu o okresie powtarzalności 1 roku

Pozostaje jednak wątpliwość, czy analizowane warunki falowe (falowanie o okresie powtarzalności 1 roku) są miarodajne jako wyznacznik ekstremalnego hydrodynamicznego oddziaływania na brzeg morski. Jest wielce prawdopodobne, że falowanie o okresie powtarzalności 10 lat (a może nawet 100 lat), skutkujące wystąpieniem procesów litodynamicznych generujących krótkotrwałą ale intensywną erozję brzegu, stanowi sytuację reprezentatywną i że takie projektowe obciążenie brzegu morskiego jest uwzględniane w systemie podejmowania decyzji dotyczących przeciwoerozyjnego zabezpieczenia brzegów.

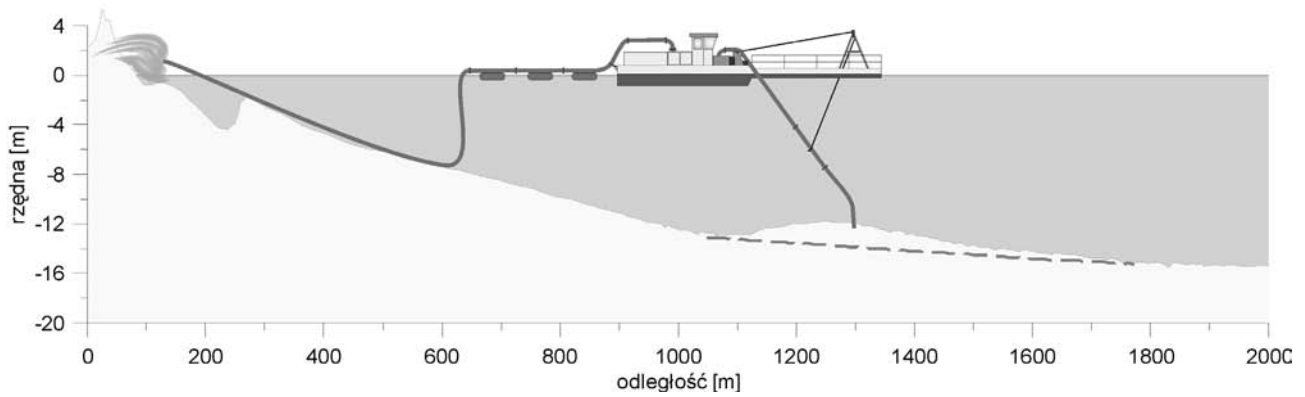
Zakładając, że w planowaniu odnośnych przedsięwzięć obowiązują zasady zawarte w pracy [12], w planowaniu przybrzeżnych robót pogłębiarsko-refulacyjnych należałoby skorzystać z parametrów projektowych odpowiadających ekstremalnym warunkom sztormowym o okresie powtarzalności co najmniej 10 lat. Mają one bowiem (według [12]) zastosowanie w odniesieniu do „tymczasowych budowli morskich”. Czy jednak sztuczna plaża (wraz z podbrzeżem) i wydma oraz przybrzeżne wyrobiska są tymczasową budowlą hydrotechniczną (jak np. grodzia lub wał ziemny)? Być może wystarczyłoby projektować wyrobiska i odkłady tak, aby spełniały kryterium braku wzrostu niekorzystnych oddziaływań na brzeg morski w warunkach sztormowych o okresie powtarzalności jednego roku. Absurdalne byłoby zastosowanie kryterium dotyczącego „morskich tam i obwałowań gęsto zamieszkałych obszarów depresyjnych i nisko położonych” (choć Półwysep Helski jest gęsto zaludniony i charakteryzuje się niskimi rzędnymi terenu na zapleczu wydym), ponieważ w takim przypadku obowiązuje zalecenie wy-

znaczania parametrów projektowych według ekstremów o okresie powtarzalności aż 1000 lat!

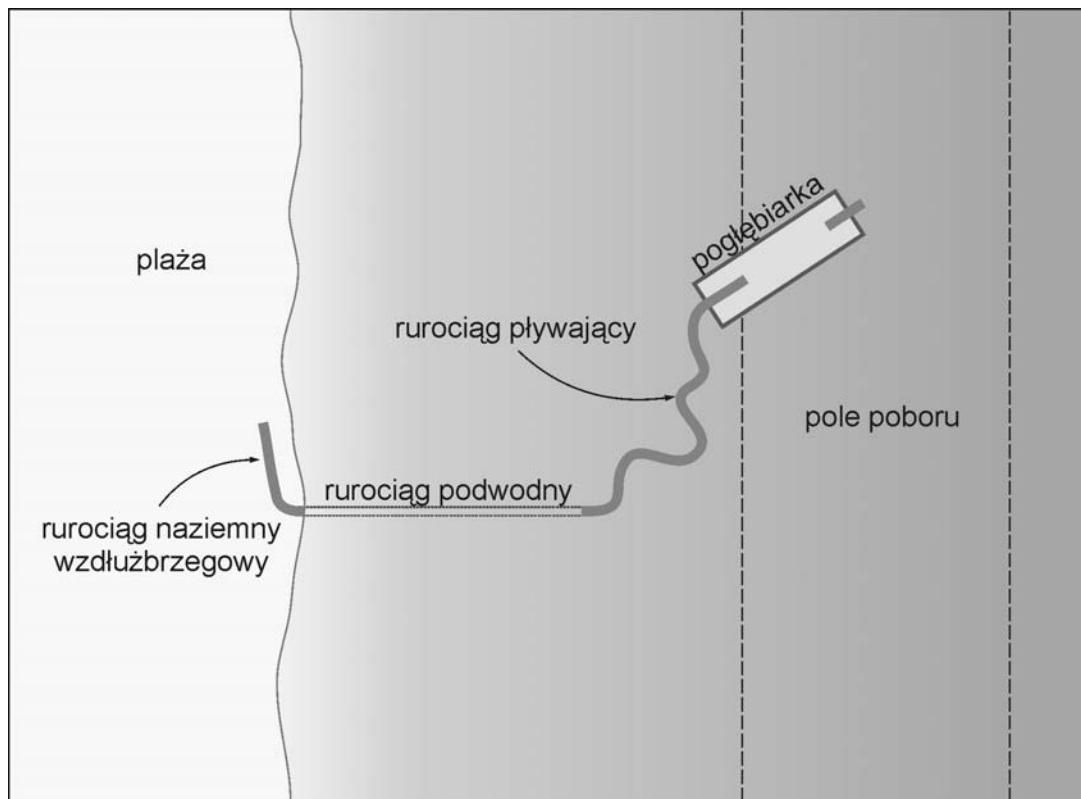
Brak jakichkolwiek wytycznych dotyczących tego zagadnienia (zarówno norm, jak ustaw i rozporządzeń) stawia władze odpowiedzialne za ochronę brzegów w nie lada kłopotliwej sytuacji i zmusza je do działań obwarowanych intuicyjną, aczkolwiek z wszech miar uzasadnioną, ostrożnością. Nic więc dziwnego, że „dmuchając na zimne” z jednej strony administracja morska dąży do jak największego oddalenia miejsc poboru osadów od linii brzegowej, z drugiej zaś zdroworozsądkowo przestrzega podstawowych zasad inżyniersko-ekonomicznych poprzez poszukiwanie odpowiednich złóż położonych niezbyt daleko od zasilanych brzegów morskich.

ZAKOŃCZENIE

Dotychczasowe doświadczenia oraz zapisy poczynione w Ustawie [21] jednoznacznie wskazują, że sztuczne zasilanie brzegów przez długie lata pozostanie w Polsce podstawową metodą ich przeciwoerozyjnej ochrony. Nie ulega wątpliwości, że sztuczne zasilanie plaż Półwyspu Helskiego w ilości kilkuset tysięcy metrów sześciennych w skali roku jest warunkiem koniecznym funkcjonowania Półwyspu według obecnych standardów. Obserwowane zmiany klimatyczne, niezależnie od tego czy są spowodowane czynnikami antropogenicznymi, czy też wpisane w naturalny globalny trend, każą przypuszczać, że potrzeby związane z poborem rumowiska do sztucznego zasilania



Rys. 8. Z optymalizowany przykładowy schemat sztucznego zasilania brzegów Półwyspu Helskiego – przekrój poprzeczny



Rys. 9. Z optymalizowany przykładowy schemat sztucznego zasilania brzegów Półwyspu Helskiego – widok w planie

Półwyspu i innych odcinków polskiego wybrzeża będą rosły. W tej sytuacji konieczne jest zastanowienie się nad możliwościami obniżenia kosztów operacji pogłębiarsko-refulacyjnych ukierunkowanych na sztuczne zasilanie brzegów. Mogą tu być pomocne wzorce zagraniczne, w szczególności w kontekście wyjaśnienia poważnych i uzasadnionych obaw dotyczących zagrożeń wywołanych obecnością wyrobisk w sąsiedztwie linii brzozowej. W szczególności należy odpowiedzieć na pytanie, czy koncepcja sztucznego zasilania przedstawiona na rys. 8 i 9 może być wdrożona w warunkach polskiego otwartego brzoza morskiego.

Wyniki obliczeń przedstawione w niniejszej pracy pozwalają na sformułowanie następującej tezy: sztuczne zasilanie brzoza morskiego materiałem pobieranym z przybrzeżnych wyrobisk nie będzie skutkowało negatywnymi konsekwencjami pod wa-

runkiem odpowiedniego określenia lokalizacji i wymiarów tych wyrobisk. Wskazanie pól poboru osadów i ich zaprojektowanie powinno być wykonywane osobno dla wydzielonych odcinków wybrzeża, charakteryzujących się lokalnymi specyficznymi profilami brzoza i lokalnym głębokowodnym klimatem falowym.

Na zakończenie należy podkreślić, że osobną bardzo ważną kwestią była, jest i będzie dostępność piaszczystego rumowiska odpowiedniego pod względem granulometrycznym. Może okazać się, że pomimo okoliczności sprzyjających poborowi osadów w strefie przybrzeżnej, ich uziarnienie lub brak właściwych frakcji piaszczystych dyskwalifikuje pola poboru wyznaczone na podstawie modelowania procesów hydrodynamicznych. W takiej sytuacji konieczne będzie dostarczenie piaszczystego materiału z bardziej odległych lokalizacji, zgodnie z procedurami stosowanymi współcześnie.

LITERATURA

1. Basiński T., Sawicki A., Szmytkiewicz M.: Półwysep Helski – utrzymać, powiększyć czy poddać się przyrodzie? *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1993.
2. Battjes J. A., Janssen J. P. F. M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering*, Vol. I, 1978.
3. Cerkowniak G. R., Ostrowski R., Szmytkiewicz P.: **The impact of climate change on stability of south Baltic sandy beaches**. *Ocean and Coastal Management*, 2013 (przedłożony do druku, maszynopis dostępny w IBW PAN).
4. Cieślak A.: Zarys strategii ochrony brzegów morskich. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/2001.
5. Dean R. G.: *Beach Nourishment. Theory and Practice*. *Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 18*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.
6. Dokumentacja geologiczno-batymetryczna dotycząca poboru materiału do sztucznego zasilania dla obszaru będącego w gestii Urzędu Morskiego w Gdyni – obszar perspektywiczny „Półwysep Helski”. Konsorcjum: Państwo-wy Instytut Geologiczny – PIB i Instytut Morski w Gdańsku, 2011.
7. Hüchel S.: *Z dziejów hydrotechniki morskiej w Polsce*. Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 1968.
8. Jednorą T.: Problemy ochrony środowiska województwa gdańskiego i Południowego Bałtyku. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1993.
9. Jednorą T.: Uwagi do artykułu polemicznego Prof. dr hab. inż. Andrzeja Sawickiego – dyrektora Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku „O stateczności, filtracji i upłynnieniu oraz o porozrywaniu Półwyspu Helskiego”. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1994.
10. Kaczmarek L. M., Ostrowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M.: Matematyczne modelowanie zmian brzegu morskiego u nasady Półwyspu Helskiego z uwzględnieniem sztucznego zasilania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1/1998.
11. Kapiński J., Ostrowski R., Piotrowska D., Różyński G., Skaja M., Szmytkiewicz M.: Ocena stanu istniejącego oraz zalecenia wykonawcze do sztucznego zasilania celem odbudowy przedpola wału czołowego w Kadynach (ZW KM 30.4-30.8) i torów kolejowych w rej. Tolkmicka (ZW KM 22.6-23.6). Raport C2-9/2004 wykonany na zamówienie Urzędu Morskiego w Gdyni, IBW PAN, Gdańsk, 2004.
12. *Morskie budowle hydrotechniczne. Zalecenia do projektowania i wykonywania*. Z 1 – Z 45 (pod red. B. Mazurkiewicza), wydanie IV, Gdańsk, 2006.
13. Nielsen P.: *Coastal and Estuarine Processes*. *Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 29*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
14. Ostrowski R., Pruszek Z., Szmytkiewicz M., Szmytkiewicz P.: Hydro- i litodynamika strefy przyboju w funkcji typu brzegu odmiennie rozpraszającego energię falowania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1/2009, 25-34.
15. Ostrowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M.: Lokalizacja osadnika na przedpola falochronu północnego we Władysławowie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2009, 345-351.
16. Ostrowski R., Skaja M.: Zależność stabilności brzegów Półwyspu Helskiego od sztucznego zasilania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2011.
17. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 29 kwietnia 2003 r. w sprawie określenia minimalnej i maksymalnej szerokości pasa technicznego i ochronnego oraz sposobu wyznaczania ich granic. *Dz. U. Nr 89, poz. 820*.
18. Sawicki A.: O stateczności, filtracji i upłynnieniu oraz o porozrywaniu Półwyspu Helskiego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1994.
19. Szmytkiewicz M.: *Prądy pochodzenia falowego w morskiej strefie brzegowej*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2002.
20. Szmytkiewicz M.: Ocena oddziaływania portu we Władysławowie na brzegi Półwyspu Helskiego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2003.
21. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich”. *Dz. U. Nr 67 z dn. 18 kwietnia 2003 r., Warszawa*.

PODZIĘKOWANIE: Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule uzyskano dzięki środkom finansowym udzielonym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na rzecz działalności statutowej IBW PAN (temat 2.2) oraz częściowo w ramach realizacji międzynarodowego projektu badawczego pt. „*Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate*” (FP7.2009-1, Contract 244104 – THESEUS). Autorzy wyrażają podziękowanie Urzędowi Morskiemu w Gdyni za udostępnienie „Dokumentacji geologiczno-batymetrycznej dotyczącej poboru materiału do sztucznego zasilania dla obszaru będącego w gestii Urzędu Morskiego w Gdyni – obszar perspektywiczny Półwysep Helski”.