



Współczesne doświadczenia i trendy w stosowaniu sztucznego zasilania polskich brzegów morskich i zalewów ze szczególnym uwzględnieniem Półwyspu Helskiego

Recent experience with and trends in the artificial nourishment of marine and lagoon beaches in Poland, with a particular focus on the Hel Peninsula

Helena Boniecka 

Uniwersytet Morski w Gdyni

Instytut Morski

ul. Grunwaldzka 311, 80-309 Gdańsk

hboniecka@im.umg.edu.pl

Zarys treści. W artykule dokonano przeglądu literatury omawiającej problematykę sztucznego zasilania polskich brzegów morskich. Uporządkowano i wykorzystano informacje z różnych źródeł o przebiegu prac ochronnych wykonywanych metodą sztucznego zasilania w latach 1980-2014. Stosowana na świecie od wielu lat, w Polsce znalazła szerokie zastosowanie od końca lat 80. ubiegłego wieku. W okresie 1980-2014 na polskich brzegach morskich i na brzegach zalewów odłożono łącznie około 32,2 mln m³ materiału osadowego. Odbudowano strefę brzegową, w tym plaże i wydmy, ważne z punktu widzenia kształtowania i wykorzystania przestrzeni nadmorskiej. Działania te powstrzymały brzeg przed erozją, która postępuje nadal, kosztem odkładanego osadu piaszczystego, co wymaga dalszej kontynuacji prac. Szczególną uwagę poświęcono pracom zasileniowym prowadzonym na Półwyspie Helskim, dla którego po intensywnych sztormach na przełomie 1988 i 1989 r. istniało realne zagrożenie przerwania w jego części nasadowej i centralnej. W okresie 1989-1993 zrealizowano masowe sztuczne zasilanie, które powstrzymało dalszą erozję brzegów półwyspu. Średnioroczne zasilanie wynosiło 1,24 mln m³. Zastosowanie metody sztucznego zasilania przez zwiększenie parametrów morfologicznych wydym i plaż pozwoliło na szybkie zabezpieczenie zagrożonych odcinków. Po okresie masowego zasilania od 1994 r. prowadzone jest zasilanie wyrównawcze, którego wielkość zależy od intensywności oddziaływania hydrodynamicznego w strefie brzegowej. W analizowanym okresie ponad 50% całej objętości sztucznego zasilania polskich brzegów morskich przypadła na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego. Zgromadzony materiał pomiarowy pozwolił na ocenę morfodynamiki brzegów półwyspu w warunkach realizacji Programu ochrony brzegów morskich przez pryzmat zmian kubatury osadów zgromadzonych na odcinkach brzegu zasilanych materiałem ze złóż podmorskich oraz jego stabilności w warunkach zachodzących zmian klimatu. Prezentowany artykuł omawia również propozycje zasad i warunków realizacji ochrony polskich brzegów morskich metodą sztucznego zasilania.

Słowa kluczowe: sztuczne zasilanie, brzeg morski, erozja, deficyt osadów strefy brzegowej, kubatura osadów.

Keywords: beach fill, coast, erosion, nearshore sediment deficit, fill volume.

Wstęp

Sztuczne zasilanie brzegów morskich piaskiem pochodzącym z dna morskiego jest jedną z metod technicznej ochrony brzegów zabezpieczającą zaplecze przed zjawiskami erozji i powodziami sztormowymi (Szawernowski, 1971; Semrau, 1979; Basiński et al., 1993; Zawadzka et al., 1998). Polega na pobieraniu piasku z wybranego obszaru morskiego lub lą-

dowego oraz jego transporcie do zasilanego odcinka brzegu i następnie odłożeniu na tym odcinku w celu poszerzenia plaży, budowy lub odbudowy wału wydmowego czy sptyczenia podbrzeża. Jest to rozwiązanie pozwalające na zachowanie walorów przyrodniczych brzegu oraz jego funkcji rekreacyjnych, wiodących dla rozwoju gmin nadmorskich, przy jednoczesnym istotnym powiększeniu odporności strefy brzegowej na erozję. Stosowane jest na ogół na brzegu o utrwalonych tendencjach erozyjnych. Materiał piaszczysty odłożony na takim brzegu również będzie podlegał procesom erozji. Sztucznie utworzony profil plażowo-wydmowy pod wpływem czynników hydrodynamicznych stopniowo przebudowuje się do kształtu profilu naturalnego. Następuje między innymi przemieszczenie części materiału osadowego z nasypu utworzonego w wyniku zasilania do podbrzeża i akumulowanie tego materiału w rewach będących bardzo ważną barierą dla falowania dochodzącego do brzegu.

Nasyp plażowy (lub plażowo-wydmowy), będący efektem sztucznego zasilania, harmonizuje z naturalnym krajobrazem, nie stwarza bariery dla rekreacji, a wręcz przeciwnie – za jego pomocą tworzona jest szeroka i wysoka plaża, stanowiąca jednocześnie wzmocnienie funkcji ochronnej. Zmiana litodynamiki w strefie brzegowej morza w rejonie refulacji (odbudowy) plaż jest celowym efektem przedsięwzięcia mającym ograniczyć abrazję brzegu i przybrzeża zasilanego rejonu.

Zasilanie może być uruchomione stosunkowo szybko w reakcji na zdarzenie brzegowe, np. zaraz po sztormowym wymyciu plaży. Ograniczenia techniczne dotyczą głównie czasu wykonania zasilania. Związane są z okresami sztormowymi i wynikają z nadmiernego falowania i nabiegania fali występującego w tych okresach. Takie warunki uniemożliwiają pracę sprzętu pogłębiarskiego.

Niewątpliwie jedną z zasadniczych wad metody jest stosunkowo mała trwałość nasypu sztucznego zasilania oraz konieczność dysponowania źródłami osadów o odpowiedniej granulacji. W związku ze sztucznym zasilaniem brzegu mogą pojawić się ujemne efekty środowiskowe, najpierw głównie w obszarze pobierania osadów z dna morskiego, takie jak okresowe zmętnienie wód, powstawanie deniwelacji dna mogących gromadzić zanieczyszczenia, hałas płoszący ptaki, ryby i ssaki. Następnie w obszarze zasilanym może dochodzić do zasypywania siedlisk flory i fauny brzegowej, a w przypadku zbyt drobnego materiału osad może być przenoszony w głąb lądu. Zmiany w morfologii strefy brzegowej mogą prowadzić do tworzenia się poprzecznych przegród podwodnych, zaburzeń w ruchu rumowiska, zmian w rozkładzie falowania i prądów. Podobnie jak dla innych rozwiązań ochronnych możliwe jest wykazanie różnorodnych zaburzeń (skutków) w środowisku i biocenozach morskich. W przypadku sztucznego zasilania mają one jednak charakter ograniczony przestrzennie i czasowo. Zasypane siedliska przeważnie po krótszym lub dłuższym czasie odnawiają się same w sposób naturalny (Wpływ eksploatacji piasku..., 2010).

Pomimo wad metoda ochrony polegająca na sztucznym zasilaniu brzegów piaskiem jest bardzo przydatna przede wszystkim dlatego, że jest jedyną, która naśladuje naturalne ekosystemy i najmniej szkodzi naturalnemu środowisku. Te właśnie cechy będą w najbliższych latach w coraz większym stopniu decydowały o wartości i możliwości zastosowania poszczególnych metod ochrony brzegów morskich.

Wykorzystane dane i materiały

Przeprowadzono przegląd i analizę dokumentacji dotyczącej sztucznego zasilania brzegów morskich i zalewów, w tym wyników prac zrealizowanych w Zakładzie Hydrotechniki Morskiej oraz materiałów gromadzonych systematycznie w Bibliotece Instytutu Morskiego w Gdańsku, począwszy od lat 60. i 70. ubiegłego wieku. Wykorzystano również dane przekazywane przez urzędy morskie w Gdyni, Słupsku i Szczecinie, będące jednostkami administracji morskiej, do kompetencji których należy m.in. realizacja prac związanych z ochroną brzegu morskiego, w tym w zakresie sztucznego zasilania strefy brzegowej. Skorzystano także z opracowań innych jednostek naukowych związanych z tematyką sztucznego zasilania. Materiały te wymieniono poniżej, omawiając dotychczasowy przebieg prac związanych z realizacją sztucznego zasilania polskich brzegów morskich. W przypadku Półwyspu Helskiego wykorzystano przede wszystkim opracowania Semrau et al. (1974), Semrau et al. (1979), coroczne oceny efektywności realizowanych prac zasileniowych (Cieślak et al., 1990-1995) oraz wyniki monitoringu strefy brzegowej wykonywanego od 2004 r. przez Urząd Morski w Gdyni.

Dotychczasowy przebieg prac w zakresie sztucznego zasilania na polskim wybrzeżu

Ochrona brzegów morskich metodą sztucznego zasilania stosowana jest na świecie od lat 30. ubiegłego wieku (Hamm et al., 2002). Pierwsze realizacje dotyczyły brzegów morskich Stanów Zjednoczonych, gdzie do roku 1952 zrealizowano ponad 60 projektów zasilania brzegów (Semrau, 1979). Po roku 1960 sztuczne zasilanie brzegów morskich zastosowano na większą skalę także w innych krajach – m.in. w Niemczech, Holandii, Wielkiej Brytanii, Francji, Portugalii i Brazylii (Vera-Crus, 1972; Hamm et al., 2002; Hanson et al., 2002).

W większości projektów sztuczne zasilanie realizowano w celu ochrony brzegów morskich przed zachodzącymi procesami erozji, uzupełniając brakujące ilości materiału osadowego na chronionym odcinku. Niektóre z projektów nie wynikały z potrzeb ochronnych, lecz ukierunkowane były na poprawę warunków rekreacyjnych poprzez poszerzenie istniejących plaż (Francja, Bразylia) czy na pozyskanie nowych terenów dla celów inwestycyjnych (Holandia). Uzyskiwane rezultaty nie zawsze były zadowalające. Niezbyt dobre efekty osiągnęto w przypadku, gdy zasilano tylko strefę podwodną. Obecnie, po dziesiątkach lat zdobywania doświadczeń, efektywność metody sztucznego zasilania znacznie wzrosła.

Pierwsze w Polsce opracowania studialne na temat sztucznego zasilania wykonano w Instytucie Morskim w latach 60. i 70. XX w. Zawierały one m.in. omówienie doświadczeń światowych w tym zakresie (Szawernowski, 1971; Semrau, 1979). Ówczesne i późniejsze prace Instytutu Morskiego były poświęcone m.in. zasadom projektowania sztucznego zasilania, w tym metodom doboru materiału zasilającego, oraz zagadnieniom podstawowym dla racjonalnego prowadzenia zasilania, takim jak: rozpoznanie procesów hydro- i litodynamicznych, szczególnie charakterystyki materiału budującego strefę brzegową oraz rozpoznanie zasobów potencjalnych złóż piasku nadających się do sztucznego zasilania i określenie zasad ich eksploatacji (Semrau et al., 1979; Mierzyński, 1983; Mierzyński et al., 1983; Mierzyński, 1987a; Mierzyński, 1989; Jednorał, 1987; Boniecka i Zawadzka, 2006; Boniecka et al., 2010).

W wielu pracach Instytutu Morskiego z lat 60. i 70. proponowano zastosowanie sztucznego zasilania piaskiem do umocnienia erodowanych przyportowych wschodnich (z reguły) odcinków brzegu. Takie koncepcje dotyczyły między innymi: Darłówka (Semrau i Kowalski, 1969), Dziwnowa (Skurczyński, 1967), Kołobrzegu (Kowalski et al., 1971; Jednorąg, 1974, Skurczyński et al., 1974), Ustki (Semrau et al., 1978) i Łeby (Mierzyński et al., 1971). Rozważano również możliwość sztucznego zasilania brzegów Zalewu Wiślanego (Słomianko et al., 1965; Skurczyński et al., 1972; Michowski, 1978). Przedmiotem analizy były różne metody sztucznego zasilania i możliwość ich zastosowania do ochrony brzegów zalewu.

Postulowano maksymalne wykorzystanie do zasilania abradowanych brzegów przyportowych urobku pochodzącego z systematycznego pogłębiania portowych kanałów, torów wodnych i red, wykonywanego z powodu ciągłego zapiaszczania tych akwenów (Cieślak i Mierzyński, 1978; Michowski, 1980; Mierzyński et al., 1987a).

W 1978 r. w rejonach wejść do przystani rybackich w Rowach i Dźwirzynie zastosowano z powodzeniem przesyłanie urobku pochodzącego z toru i kanału portowego rurociągiem na plażę po zawietrznej stronie falochronów portowych. Systemy zasilania zainstalowane tam wówczas działają do chwili obecnej.

Metodą polegającą na okresowym magazynowaniu materiału zasilającego jest stosowanie różnego typu osadników zlokalizowanych na morzu w sąsiedztwie zapiaszczanych torów podejściowych do portów, których zadaniem jest przynajmniej częściowe przechwycenie osadów transportowanych przez fale i prądy morskie, skąd okresowo czerpie się rumowisko i przekazuje na stronę zawietrzną. Rozwiązanie takie zastosowano w rejonie portu Władysławowo i Łeba (Kowalski, 1977; Ostrowski et al., 2009; Boniecka et al., 2013; Samolong, 2015).

Wykorzystanie urobku z prac czerpalnych do sztucznego zasilania jest jednym z ważniejszych sposobów pozyskania osadów do ochrony przyległych do portów wschodnich odcinków brzegu. Wychodzące w morze falochrony portowe, w warunkach jednokierunkowej przewagi transportu osadów, jaki występuje wzdłuż polskich brzegów Morza Bałtyckiego (Rosa, 1963; Cieślak, 1985; Racinowski i Baraniecki, 1989), przecinają potok rumowiska, przez co dochodzi do zapiaszczania red oraz portowych torów wodnych. Blokada rumowiska skutkuje stale utrzymującym się niedoborem piasku na przyległych do portów wschodnich odcinkach brzegu. Negatywny wpływ falochronów portowych na brzeg obserwowany jest w postaci erozji przyległych odcinków o długości około 3 km (Semrau, 1990; Dudzińska-Nowak, 2015).

Przykładem może być zbudowany w latach 30. XX w. falochron portowy Władysławowa, który skutecznie hamuje dostawy materiału osadowego na Półwysp Helski, co jest jedną z przyczyn jego niszczenia i utrudnia naturalną odbudowę niszczonej kosa. Pierwsze próby sztucznego zasilania brzegów półwyspu podjęto w latach 1982-1987. Jednak użycie niewielkich ilości materiału zasilającego na krótkich odcinkach brzegu nie dało zadowalających rezultatów. Katastrofalny stan nasadowej części półwyspu po intensywnych sztormach na przełomie lat 1988/1989, grożący jego przerwaniem w części nasadowej i centralnej, spowodował podjęcie decyzji o zastosowaniu masowego sztucznego zasilania, które realizowano w latach 1989-1995. Z uwagi na czasowy charakter uzyskanych rezultatów ochronnych sztuczne zasilanie brzegów Półwyspu Helskiego jest kontynuowane po dzień dzisiejszy.

Objętość materiału pochodzącego z prac czerpalnych w latach 1990-2008 na redach i w portach otwartego morza, w Łebie, Ustce, Darłowie i Kołobrzegu, wyniosła ponad

6,85 mln m³. Taka ilość materiału czerpana z red i portów, obok innych działań prowadzonych w strefie brzegowej, istotnie zaburzała równowagę osadów brzegowych. Od połowy lat 90. XX w. znaczna ilość materiału pochodzącego z torów wodnych i kanałów portowych odkładana jest na przyległe wschodnie odcinki brzegów. To przyczyniło się do częściowego odbudowania transportu osadów i zwiększenia odporności strefy brzegowej na erozyjne oddziaływanie morza (Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006). Niestety, część materiału czerpanego z torów podejściowych do portów nadal trafia na klapowiska znajdujące się w morzu, w strefie nieaktywnej, zamiast zasilać erodowane odcinki brzegów przy portach. W wymienionym okresie zaledwie 43% urobku wykorzystano do zasilania strefy brzegowej. Pozostałą ilość nadal odkładano na klapowiskach. Największa ilość urobku wykorzystana do zasilania strefy brzegowej przypadła na lata 1994-1996, kiedy to nawet trzykrotnie więcej osadów odkładano na brzeg niż klapowano w morzu (Staniszewska et al., 2014).

Należy podkreślić, że urobek z prac czerpalnych nie zawsze nadaje się do sztucznego zasilania brzegu z uwagi na stopień i charakter jego zanieczyszczeń czy skład osadów (namuty, ility, bardzo drobne piaski). Sztuczne zasilanie wymaga bowiem odpowiednio dużych i dobrych jakościowo (odpowiednich co do rodzaju i granulacji) zasobów materiału zasilającego. Dotychczas jednak nie ma ustanowionych jasnych kryteriów wykorzystania urobku z pogłębiania do sztucznego zasilania brzegów (Staniszewska et al., 2014).

Ograniczenie innego rodzaju dotyczy położenia miejsca poboru piasku do zasilania. W świetle doświadczeń z rozpoznania geologicznego dna morskiego oraz dotychczasowej realizacji sztucznych zasilań stwierdzono, że możliwe jest czerpanie osadów z ukopów morskich położonych na skłonie południowo-bałtyckim, jeżeli w miejscu ukopu głębokość wody jest $\geq 12-15$ m, a odległość ukopu od brzegu nie jest mniejsza niż 3 km (Mierzyński, 1987b; Masłowska i Michałowska, 1988; Boniecka et al., 2008).

Dużą rolę w badaniach hydrodynamiki i litodynamiki morskiej strefy brzegowej w warunkach sztucznego zasilania oraz w ocenie uzyskanych efektów ochronnych odegrał również Instytut Budownictwa Wodnego PAN. Należy w tym miejscu wymienić opracowania m.in. Basińskiego (1985), Pawluk (1985), Skaji et al. (1987), Basińskiego i Szmytkiewiczza (1991), Kaczmarka et al. (1998), Ostrowskiego i Skaji (2011), Pruszaka et al. (2012).

Podstawowe informacje o sztucznym zasilaniu polskich brzegów morskich i brzegów zalewów do roku 2014 w postaci syntetycznej przedstawiono w tabeli 1. Zestawienie podzielono na dwie części. Pierwsza dotyczy tylko zasilań do 2003 r., druga natomiast przedstawia zasilania ogółem do 2014 r. Taki podział wynika z radykalnej zmiany podejścia do ochrony brzegów po 2003 r., kiedy zaczęto wdrażać zapisy ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz.U. Nr 67 z dnia 18 kwietnia 2003 r., poz. 621 z późn. zm.). Z uwagi na brak danych w zestawieniu nie uwzględniono pierwszych zasilań wykonanych w końcu lat 70. XX w. Miejsca realizacji sztucznego zasilania wzdłuż polskiego wybrzeża prezentuje rycina 1.

W okresie 1980-2014 na polskich brzegach morskich i na brzegach zalewów odłożono łącznie około 32,2 mln m³ materiału osadowego. Zasilaniem objęto ponad 80 km brzegu, z czego na wielu odcinkach zasilanie wykonano kilkakrotnie. Wzdłuż brzegów Zatoki Gdańskiej, w rejonie: Jelitkowa, Sopotu, Gdyni, Pucka i na odzatkowy brzeg Półwyspu Helskiego odłożono około 1,4 mln m³ piasku, częściowo redukując deficyt osadów strefy brzegowej. Na brzegach otwartego morza od Łeby po Dziwnów w powyższym okresie odłożono około 8,3 mln m³ osadów piaszczystych, co po części zniwelowało braki w materiale osadowym strefy brzegowej i nadbrzeża, przyczyniając się do zmniejszenia

Tabela 1. Sztuczne zasilanie polskich brzegów morskich i zalewów w latach 1980-2014
Artificial beach fills along the Polish coast and lagoon shores between 1980 and 2014

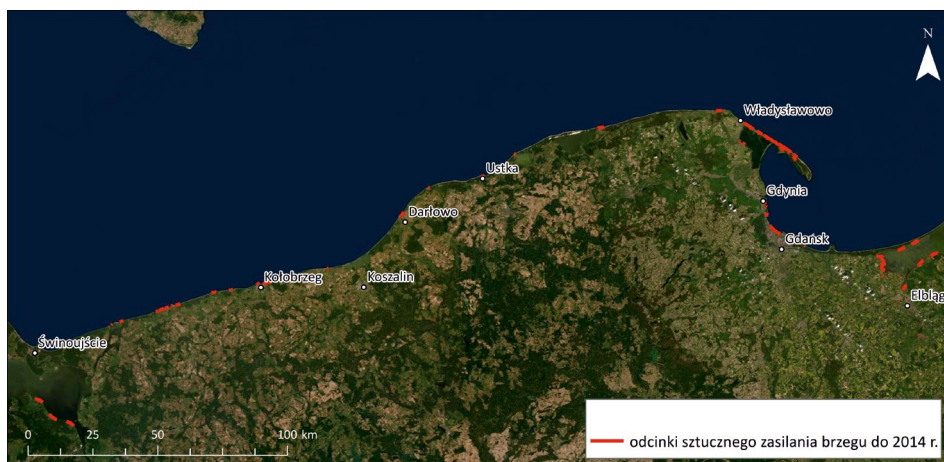
L.p.	Rejon	Sztuczne zasilanie do 2003 r.			Sztuczne zasilanie ogółem (do 2014 r.)		
		Początek odcinka zasilanego	Koniec odcinka zasilanego	Objętość całkowita zasilania (do 2003 r.)	Początek odcinka zasilanego	Koniec odcinka zasilanego	Objętość całkowita zasilania (do 2014 r.)
		km	km	tys. m ³	km	km	tys. m ³
1	Zalew Wiślany	22,70	25,50	3 955,7	22,60	25,50	4 152,0
		29,43	32,75		29,43	32,75	
		41,65	44,27		41,65	44,27	
		60,40	67,37		58,90	59,00	
		67,50	70,00		60,40	67,37	
		78,70	81,30		67,50	70,00	
		85,35	85,55		78,70	81,30	
		87,05	87,25		84,40	87,30	
2	Górki Wschodnie	b.d.	b.d.	–	58,75 ¹	59,00	110,5
3	Gdańsk-Sopot	–	–	0,0	70,20	75,50	488,7
4	Gdynia-Południe	79,40	80,85	385,2	79,40	80,85	445,2
		83,03	83,53		83,03	83,53	
		84,53	85,28		84,53	85,28	
5	Puck	113,90	114,50	137,6	113,90	114,50	147,8
		116,40	116,50		114,60	114,70	
		–	–		116,40	116,50	
6	Płw. Helski (od Zatoki Gdańskiej)	48,00	48,30	228,8	44,30	46,00	244,3
		48,40	48,84		48,00	48,30	
		51,70	53,00		48,40	48,84	
		54,70	55,40		51,70	53,00	
		59,20	59,50		54,70	55,40	
		63,30	63,50		59,20	59,50	
		67,10	67,20		63,30	63,50	
	–	–	67,10	67,20			
	Płw. Helski (pola kempingowe)	2 pola kempingowe		10,3	8 pól kempingowych w latach 2004-2012		33,4
7	Płw. Helski (od morza)	0,00	4,60	13 165,4	0,00	4,60	17 593,8
		5,90	8,40		5,90	8,40	
		8,80	13,80		8,80	13,80	
		14,40	17,20		14,40	20,50	
		17,90	19,40		21,50	23,50	
		21,50	23,50				

Lp.	Rejon	Sztuczne zasilanie do 2003 r.			Sztuczne zasilanie ogółem (do 2014 r.)		
		Początek odcinka zasilanego	Koniec odcinka zasilanego	Objętość całkowita zasilania (do 2003 r.)	Początek odcinka zasilanego	Koniec odcinka zasilanego	Objętość całkowita zasilania (do 2014 r.)
		km	km	tys. m ³	km	km	tys. m ³
8	Ostrowo-Karwia	–	–	0,0	134,60 135,50 136,10	135,50 136,10 136,80	269,4
9	Łeba	181,60	183,00	484,3	180,70	183,00	1 087,0
10	Rowy	216,97	217,47	254,8	216,97	217,47	430,8
11	Ustka	231,94	233,40	1 077,9	231,94	233,4	1 636,2
12	Jarosławiec	–	–	0,0	253,65	254,3	10,0
13	Darłowo	268,50	269,60	559,9	268,00	270,20	1 073,8
14	Sarbinowo	–	–	0,0	305,60	306,30	44,5
15	Ustronie Morskie	–	–	0,0	319,00	319,90	251,2
16	Kołobrzeg	330,40	331,67	598,2	328,90 330,40 333,30	330,28 331,83 334,00	913,6
17	Dźwirzyno	345,00	345,50	228,9	344,00 345,00	344,60 345,50	481,0
18	Mrzeżyno-Rogowo	351,40	352,26	98,0	350,50	352,26	611,0
19	Niechorze	–	–	0,0	365,20 368,10	367,20 368,80	278,0
20	Rewal-Trzęsacz	–	–	0,0	369,75 371,80	371,35 373,80	710,0
21	Pustkowo	–	–	0,0	374,00	375,00	113,0
22	Dziwnów	391,08	391,40	122,0	388,10 389,00 392,50	389,00 390,40 393,05	672,0
23	Zalew Szczeciński Nowe Warpno	b.d.	b.d.	255,0	b.d. ²	b.d. ²	255,0
24	Zalew Szczeciński Brzózki Warnołęka Trzebież	b.d.	b.d.	150,0	b.d. ²	b.d. ²	150,0
Ogółem		–	–	21 702,8	–	–	32 202,2

¹ 80 tys. m³ odfosforyzowano na Mierzei Messyńskiej w ramach przebudowy toru wodnego na Wiśle Śmiałej.

² Zalew Szczeciński nie ma wyznaczonego kilometrażu.

Opracowanie własne na podstawie danych zgromadzonych w Zakładzie Hydrotechniki Morskiej oraz przekazanych przez Urzędy Morskie w Gdyni, Słupsku i Szczecinie.



Ryc. 1. Lokalizacja sztucznego zasilania zrealizowanego latach 1980-2014 wzdłuż polskich brzegów morskich i zalewów

Beach fills engaged in between 1980 and 2014 along the Polish coast and lagoon shores

Opracowanie własne, źródło ortofotomapy: Google Earth Pro.

zagrożenia erozją i powodzią sztormową zainwestowanego zaplecza. Ponad połowa całej objętości sztucznego zasilania przypadała na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego, gdzie w latach 1989-1995 realizowano projekt kompleksowej ochrony półwyspu. Sztuczne zasilanie brzegów jest tam realizowane do chwili obecnej.

Na brzegach otwartego morza do końca lat 80. ubiegłego wieku pojedyncze sztuczne zasilania wykonano jedynie w rejonie Kołobrzegu i Ustki. Utworzone nasypy miały niewielką objętość, ich parametry nie były dostosowane do panujących tam warunków morfo- i litodynamicznych, zostały szybko rozmyte, nie pozostawiając trwałych efektów na brzegu i w podbrzeżu. Dopiero w latach 90. XX w. dzięki możliwościom technicznym rozpoczęto zasilanie na większą skalę, widząc, że twarda ochrona nie wystarcza. Zaczęto stosować sztuczne zasilanie plaż i odbudowę wydym na odcinkach abrazyjnych, pozostających w cieniu falochronów portowych oraz najczęściej na odcinkach o dużych wartościach użytkowych, na wysokości miejscowości wczasowych. Wykorzystano osad pochodzący z pogłębiania red i kanałów portowych. Wielokrotnie zasilano rejon przyportowe Łeby, Rowów, Ustki, Darłowa, Kołobrzegu i Dźwirzyna. W okresie 1990-2003 na plaże wybrzeża środkowego odłożono około 3,2 mln m³ piasku. Na wybrzeżu zachodnim w tym okresie zasilono plaże i odbudowano wydmy w dwóch rejonach chronionych: Mrzeżynie i Dziwnowie, odkładając 0,22 mln m³ osadów. Zasilono również podlegające erozji brzegi Zalewu Szczecińskiego w rejonie Nowego Warpna, Trzebieży, Brzózek i Warnołęki, odkładając na brzeg około 0,4 mln m³ osadów.

Po roku 2003, od kiedy ochrona brzegu odbywa się zgodnie z zapisami ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich”, sztuczne zasilanie jest bardzo często metodą uzupełniającą zabiegi hydrotechniczne. W latach 2004-2014 sztuczne zasilanie wykonywano głównie na odmorskich brzegach Półwyspu Helskiego oraz na odcinkach przyportowych położonych po wschodniej stronie falochronów por-

tów otwartego morza: Łeby, Rowów, Ustki, Darłowa, Kołobrzegu, Dźwirzyna, Mrzeżyna i Dziwnowa.

Ponadto sztucznie zasilono brzegi Zatoki Gdańskiej, gdzie w ostatnich dekadach proces erozji uległ przyspieszeniu oraz zasilono brzegi w rejonie Jarosławca, Ustronia Morskiego i Niechorza, wspomagając istniejące tam systemy ochronne. Przystąpiono również do kompleksowej ochrony klifowego odcinka brzegu od Rewala po Trzęsacz, gdzie na erozyjną działalność morza nałożyły się procesy geodynamiczne klifu, wynikające zarówno z uwarunkowań naturalnych, jak i antropogenicznych. Dla zmniejszenia zagrożenia dalszą erozją stopy i ściany klifu zastosowano sztuczne zasilanie plaży, a za nim opaskę narzutową, stanowiącą zabezpieczenie podnóża klifu przed oddziaływaniem falowania podczas wysokich stanów wody w morzu.

Zasilanie brzegów Zalewu Wiślanego polegało głównie na tworzeniu przedpoli wałów przeciwpowodziowych, wzmacniając tym samym ochronę nisko położonych obszarów przed powodzią morską.

Łączna objętość sztucznego zasilania w okresie działania Programu ochrony brzegów morskich wyniosła około 10,5 mln m³ (tab. 1), co stanowi około 1/3 zasilania zrealizowanego w latach 1980-2014. Od 2004 r. realizacja sztucznego zasilania na wielu odcinkach brzegu poprzedzona jest opracowaniem wytycznych, pozwalających na bardziej efektywne wykonanie zasilania i uzyskanie planowanych rezultatów ochronnych. Wytyczne oparte na szerokiej analizie stanu strefy brzegowej oraz na ocenie wartości materialnych i niematerialnych zaplecza brzegu, określają kształt i położenie projektowanego nasypu, objętość materiału piaszczystego niezbędną do uzyskania bezpiecznego profilu brzegu, z uwzględnieniem stopnia niedopasowania osadów ze złoża do osadów macierzystych strefy brzegowej (np. Boniecka et al., 2008; Boniecka et al., 2011; Boniecka et al., 2016).

Zasilanie brzegów Półwyspu Helskiego

Sztuczne zasilanie szczególnie dużą rolę odgrywa w ochronie morskich brzegów Półwyspu Helskiego (ryc. 2). Badania dotyczące hydrodynamiki oraz litodynamiki, w tym zjawisk erozji oraz akumulacji piasku w rejonie Półwyspu Helskiego, były prowadzone od dawna. W rezultacie ten odcinek brzegu jest stosunkowo dobrze rozpoznany w zakresie oddziaływań hydrodynamicznych, charakterystyki morfologicznej oraz podatności na erozję poszczególnych jego fragmentów. Zrealizowane badania i pomiary oraz wykonane symulacje numeryczne dostarczyły informacji o warunkach falowych, prądowych i transporcie osadów oraz umożliwiły szczegółowe rozpoznanie morfolitodynamiki podbrzeża Półwyspu Helskiego. Modelowanie warunków hydrodynamicznych wskazało na maksymalne prądy przy wiatrach z kierunków NW. W warunkach wiatru z tego kierunku występuje najintensywniejszy transport wzdłużbrzegowy w kierunku E i odbrzegowy w kierunku NE (Skąja i Szymkiewicz, 1995). Na odcinku pomiędzy Władysławowem a Kuźnicą występuje zróżnicowanie przepływów związanych z topografią dna. Formy dna ze skośnię do brzegu ułożonymi wałami i obniżeniami deformują wzdłużbrzegowy transport osadów, będąc przyczyną wzmożonej erozji brzegu na odcinku nasadowym po rejon Kuźnicy (Gajewski, 1996; Łęczyński i Jędrasik, 2006; Łęczyński, 2009). Modelowanie procesów litodynamicznych wykazało związki pomiędzy formami występującymi na dnie półwyspu a transformacją dna w ekstremalnych warunkach sztormowych (Łęczyński, 2009). Problematyka zmian położe-



Ryc. 2. Odcinki brzegu Półwyspu Helskiego sztucznie zasilone w latach 1989-2014

Sections of the Hel Peninsula shore nourished between 1989 and 2014

Opracowanie własne, źródło ortofotomapy: Google Earth Pro.

nia linii brzegowej i podstawy wydmy w różnych okresach badawczych była przedmiotem publikacji m.in.: Furmańczyka i Musielaka (1993), Furmańczyka (1995), Zawadzkiej-Kahlau (1999) i Stachurskiej (2012). Na podstawie uzyskanych danych autorzy potwierdzili, że w wąskiej, nasadowej części półwyspu przeważają procesy abrazyjne, w środkowej części zamiennie występują procesy erozji i akumulacji, natomiast we wschodniej dominują procesy akumulacyjne. Wszystkie przeanalizowane przez autorów okresy wskazują na podobny układ przestrzenny zmian brzegowych Półwyspu Helskiego.

Już w latach 70. XX w. w pracach Instytutu Morskiego (Semrau et al., 1974; Semrau et al., 1979) wskazano, że jedynym rozwiązaniem przeciwdziałającym niekorzystnym procesom erozyjnym zachodzącym na półwyspie może być sztuczne zasilanie plaż, wydmy i płytkiego podbrzeża.

W okresie od 1978 do 1987 r. przeprowadzono szereg eksperymentalnych zasilń dna strefy przybrzeżnej Półwyspu Helskiego. Przy pomocy urobku pochodzącego z pogłębiania toru wodnego do portu Władysławowo, dawniej zatopianego w morzu na dużych głębokościach, zasilano obszary dna położone na głębokości ok. 3-5 m w odległości 150-200 m od linii brzegowej. Odcinki zasilane miały zróżnicowane długości – od 70 do 1000 m, zlokalizowane od km H 3,4 do km H 13,45. Objętości zdeponowanego refultatu były także bardzo zróżnicowane, od 440 tys. m³ (1980 r.) do 32,4 tys. m³ (1987 r.). Celem tych eksperymentów było sprawdzenie, czy po wypełnieniu przegłębień dna występujących blisko brzegu (150-200 m od linii wody) stan brzegu w tym rejonie trwale poprawi się (Michowski, 1979; Mierzyński, 1985; Skaja et al., 1987).

Te eksperymenty nie przyniosły oczekiwanych, pozytywnych rezultatów. Niska efektywność metody wynikała z użycia zbyt małych ilości piasku w stosunku do występującego deficytu osadów oraz wykonania refulacji w najbardziej aktywnej części podbrzeża. Dlatego do 1989 r. prace te nie były kontynuowane. Od tamtej pory zasilana jest bezpośrednio plaża i płytkie podbrzeże oraz ewentualnie wydma.

W związku z nasilającą się w latach 80. XX w. erozją brzegów Półwyspu Helskiego i groźbą jego przerwania (fot. 1, 2, 3), w roku 1989 przyjęto uchwałę Komitetu Ekonomicznego Rady Ministrów (108/89), w wyniku której rozpoczęto kompleksową ochronę Półwyspu Helskiego, w tym wielkoskalowe sztuczne zasilanie nadbrzeża i plaży dużymi ilościami piasku. Początkowo zasilano głównie dwa najbardziej erodowane odcinki brzegu: km H 0,0-4,6 i 9,5-13,7, potem zasilano także inne odcinki położone pomiędzy nasadą Półwyspu a Juratą (km H 23,5).

W latach 1989-1995 na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego od jego nasady – km H 0,0 po km H 22,8 odłożono około 8,34 mln m³ piasku. Było to największe na polskim wybrzeżu przedsięwzięcie sztucznego zasilania brzegów wydmowych. Na brzegu o łącznej długości 13,8 km odbudowano plaże i wydmy uzyskując założone parametry tzw.



Fot. 1. Kuźnica z lotu ptaka 06.03.1989 r. (fot. Z. Grabowiecki) *Kuźnica, bird's-eye view of 6th Mar. 1989 r.*
Źródło: Nadmorski Park Krajobrazowy (<http://npk.org.pl>).



Fot. 2. Awaryjne zabezpieczenie brzegu w rejonie Kuźnicy (wał z gliny z narzutem z żelbetowych podkładów kolejowych, gruzu betonowego i kamieni) wykonane po katastrofalnym sztormie z 1983 r. (październik 1989 r.) (autor nieznany)
Emergency coastal protection near Kuźnica (a clay embankment with RC railway sleepers, concrete debris and stones) installed following the catastrophic 1983 storm (as pictured in October 1989)
Źródło: Archiwum Zakładu Hydrotechniki Morskiej, Instytut Morski.



Fot. 3. Erozja wydmy w rejonie Juraty w 1991 r. (fot. E. Zawadzka)
Dune erosion near Jurata in 1991

„normy helskiej”, która zapewniła bezpieczeństwo zaplecza wydmy w warunkach wystąpienia sztormu stuletniego (Cieślak et al., 1990-1995).

W latach 1989-1995 sztuczne zasilanie prowadzono w celu likwidacji zagrożenia przerwaniem wyerodowanego nadbrzeża, a także dla osiągnięcia stabilizacji procesów litodynamicznych zachodzących w strefie brzegowej, rozwinięcia tarasów brzegowych (plażowych) i rozbudowy strefy rew.

Najintensywniejsze zasilanie prowadzono w rejonie Chałup i Kuźnicy, gdzie stwierdzono największy deficyt osadów i zagrożenie powodziowe terenów na zapleczu wąskiej niszczonej wydmy. W latach 1989-1995 na nasadowym odcinku brzegu km H 0,0-4,6 wykonano 17 zasilających, odkładając 3,37 mln m³ osadów. Na drugim silnie erodowanym odcinku km H 9,55-13,73 w tym okresie wyrefulowano 3,13 mln m³ osadów w trakcie 7 zasilających wydmy, plaży i bliskiego podbrzeża, z czego ponad 1/3 objętości przypadła na odcinek km H 10,6-13,6. Pozostałe 1,84 mln m³ piasku odłożono na brzegi w okolicy Jastarni i Juraty.

Począwszy od 1995 r. sukcesywnie rozszerzano obszar objęty zasilaniem. Do 2003 r. odbudowano wydmy i plaże na odcinkach brzegu o łącznej długości blisko 18 km, wykorzystując do tego celu łącznie ok. 13,2 mln m³ piasku.

Od roku 1995 do chwili obecnej sztuczne zasilanie prowadzone jest w celu uzupełnienia ubytków i tworzenia rezerw materiału w podbrzeżu, które zapewniają bezpieczeństwo brzegów na wypadek sztormu o prawdopodobieństwie wystąpienia 1 raz na 100 lat (fot. 4, 5). Uzyskane efekty ochrony brzegów Półwyspu Helskiego metodą sztucznego zasilania pozwalają na lepsze zarządzanie środowiskiem, pozwalają zabezpieczyć półwysep przed zmianami klimatu i zaplanować lepsze użytkowanie pasa nadbrzeżnego.

Początkowo materiał osadowy pochodził z dna Zatoki Puckiej oraz z osadnika portu Władysławowo. Później (od 1995 r.), z uwagi na konieczność uwzględnienia aspektów ekologicznych, znaczne niedopasowanie materiału zasilającego pochodzącego z dna Zatoki Puckiej (konieczność od dwu- do pięciokrotnego zwiększenia objętości w stosunku do niedoboru objętości osadów) oraz nowe możliwości techniczne, wykorzystywano materiał ze złoża podmorskiego na wysokości Rozewia oraz ze złoża podmorskiego w centralnej części Półwyspu Helskiego na wysokości Jastarni. Były to pierwsze próby wykorzystania materiału zasilającego dostosowanego do materiału macierzystego oraz warunków fałowo-prądowych panujących w rejonie przewidzianym do zasilania. Z dotychczasowych



Fot. 4. Stan plaży i wydm w rejonie Kuźnicy w 1999 r. (fot. P. Domaradzki)
Condition of the beach and dunes near Kuźnica as of 1999



Fot. 5. Brzeg w rejonie Kuźnicy w 2012 r. Szerokie plaże – efekt sztucznego zasilania (fot. H. Boniecka)
The beach near Kuźnica as of 2012. Wide beaches are maintained by fill nourishment

doświadczeń wynika, że zasilanie plaży z uwzględnieniem średnich warunków sztormowych wymaga użycia materiału o medianie średnicy ziaren 0,25-0,5 mm. Materiał taki podlegać będzie stopniowemu rozmywaniu w zależności od zmiennych warunków hydrodynamicznych.

W 2011 r. opracowano dokumentację geologiczno-batymetryczną dotyczącą poboru materiału do sztucznego zasilania dla obszaru perspektywicznego „Półwysep Helski” położonego w płytkowodnej strefie Bałtyku, na wysokości Chałup i Kuźnicy od 6,5 do 16,0 km wybrzeża Półwyspu Helskiego wraz z raportem oddziaływania prac czerpalno-refulacyjnych na środowisko (Boniecka, 2011; Kramarska i Przeździecki, 2011). W wyniku przeprowadzonych badań i prac kameralnych zostały rozpoznane nagromadzenia piasków odpowiednich do zasilania brzegu. Wyznaczono 6 pól złożowych piasków o powierzchni od 0,26 do 1,33 km² rozmieszczonych nieregularnie w różnych strefach badanego obszaru.

Obecnie piasek do zasilania pochodzi głównie z pola poboru w rejonie Kuźnicy i Jastarni, pola „Rozewie” oraz z osadnika i toru wodnego do portu Władysławowo.

Ogółem od 1989 do 2014 r. na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego odłożono ponad 17,5 mln m³ piasku (tab. 1, ryc. 2). Sztucznym zasilaniem objęto 22,8 km plaży i wydm

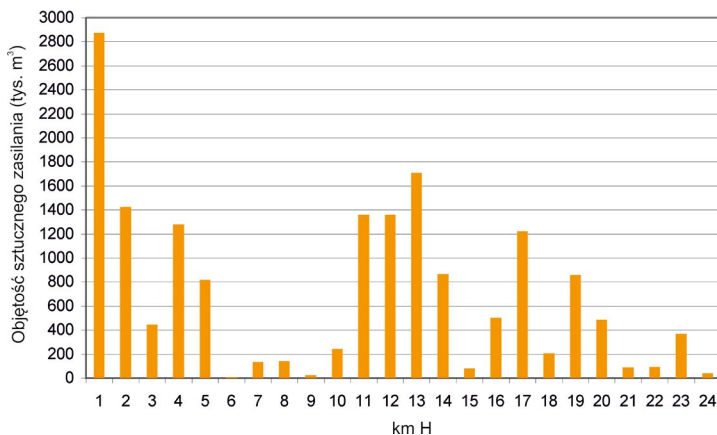
od Władysławowa (km H 0,00) do Juraty (km H 23,50), tj. blisko 63% długości odmorskiej części Półwyspu Helskiego.

Analiza uzyskanych rezultatów sztucznego zasilania odmorskich brzegów Półwyspu Helskiego

Rozkład zasilania wzdłuż Półwyspu Helskiego zależał m.in. od stopnia zagrożenia obiektów i terenów znajdujących się na zapleczu brzegu. Stąd też wynika dodatkowa koncentracja zasilania w rejonie Władysławowa, Chatup, Kuźnicy i Jastarni (ryc. 3).

Sz szczególnie duża (ponad 2,8 mln m³) objętość zasilania na pierwszym kilometrze półwyspu (km H 0,0-1,0) wynika z bardzo dużej erozji na tym odcinku brzegu. Procesy erozyjne w nasadowej części Półwyspu Helskiego (km H 0,0-4,20), związane z deficytem rumowiska wywołanym m.in. oddziaływaniem falochronów portu we Władysławowie są na tyle intensywne, że nawet wielkoskalowe zasilanie brzegów nie powoduje trwałego wzrostu wielkości zasobów osadów w strefie brzegowej, a jedynie wpływa na jego względne utrzymanie w stanie równowagi litodynamicznej. Stałe predyspozycje do erozji w określonych rejonach brzegu są również związane z występowaniem w przybrzeżu form rynnowych, przebiegających pod kątem 25-27° do linii brzegowej (Tomczak, 1994). Ich lokalizacja ma wpływ na występowanie rejonów o permanentnej erozji brzegu i dna (tzw. erozji strukturalnej), a tym samym na potrzebę kumulacji sztucznego zasilania strefy brzegowej właśnie w tych obszarach.

Przebieg rozkładu objętości zasilania erodowanego odcinka Półwyspu Helskiego (km H 0,0-23,5) w poszczególnych latach okresu 1989-2014 r. (ryc. 4) związany jest realizacją wspomnianej wcześniej ustawy KERM. Szczególnie intensywne zasilanie wykonywano w okresie 1989-1993. Na te lata przypadała również duża aktywność sztormowa, co wpły-



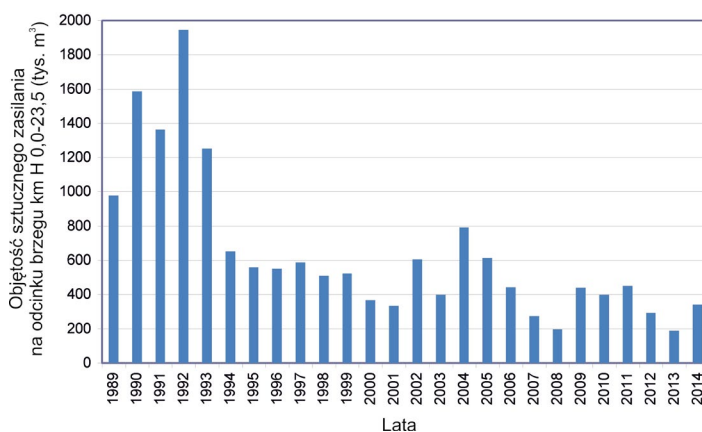
Ryc. 3. Objętość sztucznego zasilania na poszczególnych kilometrach brzegu Półwyspu Helskiego, od 1989 do 2014 r.

Fill volumes at given kilometers along the Hel Peninsula between 1989 and 2014

Opracowanie własne na podstawie danych zgromadzonych w Zakładzie Hydrotechniki Morskiej oraz przekazanych przez Urząd Morski w Gdyni.

wało na rozmywanie sztucznej plaży i podmywanie sztucznej wydmy. Osady z nasypów były odprowadzane obrzégowo w obrębie komórek cyrkulacyjnych zróżnicowanej wielkości. Ta forma transportu osadów z nasypu przypisywana jest prądom grawitacyjnym i rozrywającym (Zawadzka-Kahlau, 2012). Po roku 1995 liczba dni ze sztormem nad południowym Bałtykiem znacznie się zmniejszyła, co sprzyjało dłuższemu utrzymywaniu się refulatu. Wyjątkiem były lata 2002-2004, w których nad południowym Bałtykiem liczba dni ze sztormem wyniosła 10-11 dni (Formela i Marsz, 2011). W listopadzie 2004 r. we Władysławowie wystąpiło wezbranie sztormowe z maksymalnym poziomem morza 644 cm, stanowiące absolutne maksimum z okresu 1951-2014. W sytuacjach intensywnych warunków hydrodynamicznych nastąpiło ponowne zwiększenie erozji stref morfologicznych w obrębie odcinków o utrwalonych tendencjach erozyjnych, co wiązało się koniecznością zwiększenia objętości sztucznego zasilania na tych odcinkach. W latach 2004-2005 średnioroczne zasilanie wynosiło 702 tys. m³/rok. W latach późniejszych roczne objętości były znacząco mniejsze. Średnia z lat 2006-2014 nie przekracza 400 tys. m³/rok. Wyływa stąd wniosek, że duże objętościowo zasilania w pierwszych pięciu latach realizacji kompleksowej ochrony brzegów Półwyspu Helskiego doprowadziły do skutecznej odbudowy brzegu na tyle, że zasilania w następnych latach mogły być dużo mniejsze. Można postawić tezę, że do zmniejszenia objętości zasilania (ryc. 4) przyczyniła się również wiedza zdobyta przy realizacji początkowych zasilania, a także malejąca liczba dni sztormowych po 1995 r. W wyniku doświadczeń uzyskanych podczas pierwszych lat kompleksowej ochrony półwyspu (Cieślak et al., 1990÷1995) sztuczne zasilanie zostało w pewnym stopniu zoptymalizowane.

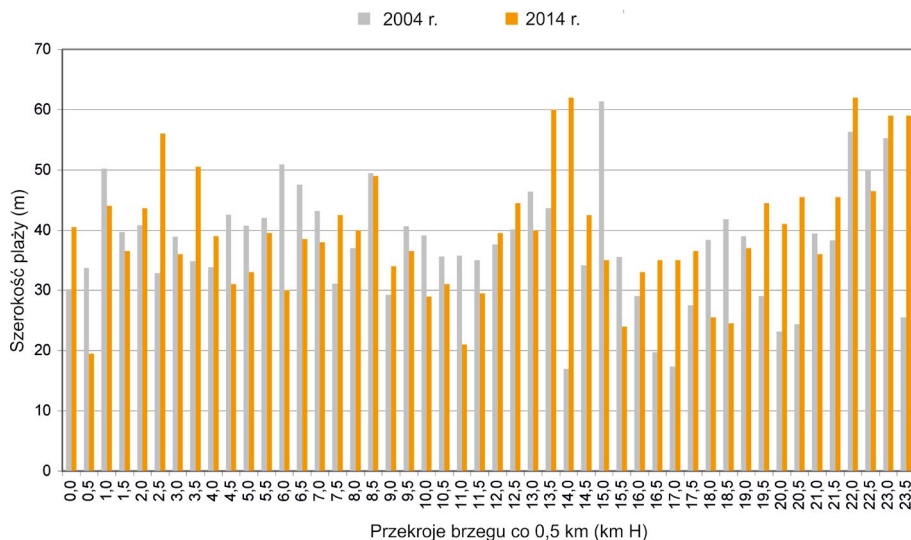
Plaże po odmorskiej stronie Półwyspu Helskiego, km H 0,0-22,80, generalnie należą do plaż o małej i średniej szerokości (20-40 m). Wykres zmian szerokości plaży na rozpatrywanym odcinku brzegu od km H 0,0 do km H 23,5 w latach 2004-2014 (ryc. 5), oparty na wynikach pomiarów strefy brzegowej realizowanych na szeroką skalę podczas prac refulacyjnych, dobrze obrazuje związek tego parametru z rozkładem objętości zasilania na poszczególnych kilometrach brzegu Półwyspu Helskiego. Jak widać, różnice między da-



Ryc. 4. Objętość sztucznego zasilania brzegu Półwyspu Helskiego od km H 0,0 do km H 23,5 w okresie od 1989 do 2014 roku

Fill volume along the Hel Peninsula from km H 0.0 to km H 23.5, between 1989 and 2014

Opracowanie własne na podst. danych zgromadzonych w Zakładzie Hydrotechniki Morskiej oraz przekazanych przez Urząd Morski w Gdyni.



Ryc. 5. Szerokość plaży Półwyspu Helskiego na profilach brzegu, co 500 m, od km H 0,0 do km H 23,5 m na podstawie pomiarów w 2004 i 2014 r.

Beach width along the Hel Peninsula every 500 m from km H 0,0 to km H 23,5, on the basis of surveys carried out in 2004 and 2014

Opracowanie własne na podstawie danych z monitoringu polskich brzegów morskich.

nymi wg pomiaru z 2014 r. a danymi o 10 lat wcześniejszymi (z 2004 r.) są w wielu przekrojach duże. Jednocześnie średnia szerokość plaży z 2014 r. (39,6 m) tylko nieznacznie odbiega od średniej szerokości plaży z 2004 r. (37,6 m), przekraczając ją zaledwie o 2,0 m. Lokalnie po zasilaniu ich szerokość przekracza 50 m (ryc. 5, fot. 6, 7), co według tego parametru czasowo sytuuje te odcinki plaż w klasie o bardzo dużej odporności na działanie czynników hydrodynamicznych. Fotografie 6 i 7 pokazują, jak wyglądały, głównie dzięki wielokrotnemu zasilaniu, plaże w Chałupach i Juracie we wrześniu 2012 r. W Juracie w czerwcu 2012 r. w sąsiedztwie Hotelu Bryza na brzeg morski odłożono około 45 tys. m³ osadów, co skutkowało widoczną na zdjęciu bardzo szeroką plażą (fot. 7). Można zatem stwierdzić, że odporność plaży Półwyspu Helskiego od km H 0,0 do km H 23,5 wzrosła w rozpatrywanym okresie (od 2004 do 2014 r.). Poprawiono ją w latach 90. XX w. i utrzymano do dziś.

Brzeg i podbrzeże Półwyspu Helskiego nadal charakteryzują się semistabilnym systemem erozyjno-akumulacyjnym o przewadze tendencji erozyjnych, na co wpływ mają uwarunkowania hydrogeomorfologiczne i morfodynamika rejonu (Bączyk, 1963; Zawadzka-Kahlau, 1999; Łęczyński, 2009; Ostrowski i Skąja, 2011; Boniecka i Kaźmierczak, 2016).

Wprowadzenie do strefy brzegowej tak dużej ilości osadów w znacznym stopniu zmniejszyło deficyt osadów wzdłuż półwyspu i zwiększyło jego odporność na działanie czynników hydrodynamicznych. Realizowane kompleksowe zasilanie Półwyspu Helskiego do roku 2000 było przedmiotem intensywnych prac badawczo-analitycznych, które pozwoliły na dopracowanie tej metody ochrony brzegów, szczególnie w zakresie określenia wielkości zasilania niezbędnej do uzyskania bezpiecznego profilu brzegu i nadbrzeża w rejonie przewidzianym do ochrony oraz doboru materiału zasilającego z potencjalnych



Fot. 6. Szerokie plaże w rejonie Chałup w 2012 r. (fot. H. Boniecka)
Wide beaches near Chatupy as of 2012



Fot. 7. Stan plaży i nadbrzeża w rejonie hotelu Bryza w Juracie w 2012 r. (fot. H. Boniecka)
Condition of the beach and backshore near the Bryza Hotel at Jurata as of 2012

miejsz poboru o charakterystyce granulometrycznej zbliżonej do materiału rodzimego zasilanego odcinka. Kontynuowanie prac zasileniowych na erodowanych odcinkach brzegów Półwyspu Helskiego jest warunkiem utrzymania strefy brzegowej na poziomie odporności na sztorm stuletni. Przez sztorm o prawdopodobieństwie zdarzenia 1 raz na 100 lat na obszarze Morza Bałtyckiego rozumiany jest sztorm wywołany wiatrem o średniej prędkości 18 m/s, wiejącym z najbardziej niekorzystnego kierunku w stosunku do brzegu przez 5 godzin, przy jednoczesnym wystąpieniu wysokiego poziomu wody w morzu.

Metoda analizy morfometrycznej zastosowana do oceny odporności strefy brzegowej oraz efektywności prac umożliwiła udokumentowanie istnienia układu erozyjno-akumulacyjnego strefy brzegowej oraz ocenę zmian morfo- i litodynamicznych zachodzących w układzie w warunkach sztucznego zasilania (Dubrawski, 2000; Zawadzka, 2000; Boniecka i Kaźmierczak, 2015; Boniecka i Kaźmierczak, 2016).

Doświadczenia zdobyte podczas realizacji kompleksowej ochrony półwyspu zostały wykorzystane w innych przedsięwzięciach z zakresu ochrony brzegów, szczególnie przy zastosowaniu sztucznego zasilania. Dostrzeżono zalety tej metody, tj. przeciwdziałanie podstawowej przyczynie procesów erozyjnych, jaką jest niedobór osadów. W przypad-

ku realizacji zgodnie z wypracowanymi założeniami nie występują niekorzystne efekty uboczne cechujące umocnienia trwałe. Ponadto uzyskiwano dodatkowy efekt społeczny – poszerzenie plaż służących rekreacji i efekt estetyczny – krajobraz plażowo-wydmowy zbliżony do naturalnego.

Z uwagi na predyspozycje (uwarunkowania, charakterystykę) oraz strategię gmin nadmorskich ukierunkowane na rozwój turystyki, istnienie szerokich plaż jest warunkiem ich dalszego rozwoju oraz czynnikiem decydującym o utrzymaniu wartości użytkowej zaplecza rekreacyjnego.

Perspektywy, kierunki rozwoju i uwarunkowania (stosowania) sztucznego zasilania

Obecnie sztuczne zasilanie strefy brzegowej i nadbrzeża to metoda stosowana na szeroką skalę w ochronie brzegów morskich przed zjawiskami erozji i powodzi sztormowych. Jak każda z metod wymaga doskonalenia, z uwagi zarówno na oczekiwane rezultaty ochronne, jak i zminimalizowanie jej oddziaływania na środowisko przyrodnicze.

Polem do optymalizacji sztucznego zasilania jest kształt nasypu i jego parametry (szerokość, rzędna korony nasypu, nachylenie powierzchni ku morzu), które muszą gwarantować poziom bezpieczeństwa brzegu na sztorm o określonym prawdopodobieństwie występowania. Poziom bezpieczeństwa zależy od wartości materialnych i niematerialnych ulokowanych na zapleczu odcinka wskazanego do ochrony. Należy znaleźć odpowiedź na pytanie: jak długo projektowany nasyp ma zachowywać wymagane parametry? Czy ma je zachowywać stale czy w określonym czasie?

Projektując nasyp należy również uwzględnić naturalną geometrię brzegu w jego sąsiedztwie. Nowa linia brzegowa powinna wyrównywać istniejące załamania, nie może tworzyć ostrych łuków i powinna przechodzić łagodnie do styku z plażą naturalną. Zachowanie charakteru krajobrazu nadmorskiego to jeden z ważniejszych argumentów za stosowaniem tej metody ochrony brzegów. Powstaje jednak pytanie, jak duży może być nasyp plażowy (wydmowy), który jednocześnie spełnia wymagania ochronne i wymagania naturalności? Zatem tutaj też jest pole do optymalizacji.

Do optymalizacji metody sztucznego zasilania przyczyni się rozwój modelowania matematycznego ruchu rumowiska w strefie brzegowej dzięki możliwości zbadania bardzo wielu wariantów w krótkim czasie. W związku z rozwojem technik informatycznych można się spodziewać dość dużego i szybkiego postępu na tym polu.

Przestrzenią do optymalizacji sztucznego zasilania pozostaje również kwestia monitorowania jego efektów. Rola monitoringu jako podstawowej bazy danych do projektowania zasilania (również gdy chodzi o wielkości uzupełniające) jest nie do przecenienia. Pomiaru należy wykonywać przed zasilaniem, zaraz po zasilaniu oraz w okresie pomiędzy kolejnymi zasilaniami – minimum 2 pomiary każdego roku (wiosna i jesień). Drony oraz inne urządzenia, rozwój systemów monitorowania ciągłego oraz przesyłu i przetwarzania danych *online* (łatwiejsze i tańsze pomiary) pozwalają już obecnie na lepszą ocenę stanu środowiska, a tym samym dobór takich parametrów zasilania, aby jego skuteczność była coraz wyższa.

Monitorowaniem należy objąć również miejsce poboru osadów do sztucznego zasilania, co pozwoli na ocenę stanu złoża (określenie obszaru eksploatacji, morfologii dna, stanu zasobów piasku). Należy dążyć do tego, aby prowadzenie monitoringu morfo- i litodynamicznego strefy brzegowej w rejonach zasilanych było dla urzędów morskich

obowiązkowe. Należy zwiększyć rangę monitoringu i kontrolę jego realizacji. Tego nie powinien robić wykonawca zasilania, lecz niezależne jednostki badawcze.

Z dotychczasowych prognoz zmian brzegowych w warunkach wzrostu poziomu morza i zwiększającej się częstości spiętrzeń sztormowych (Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006) oraz oceny stanu strefy brzegowej na podstawie wyników zrealizowanego w latach 2004-2006 pierwszego monitoringu polskich brzegów morskich wynika, że do 2023 r. utrzymanie odporności rejonów zagrożonych erozją wymagać będzie użycia około 61 mln m³ osadów (Dubrawski, 2008). Potrzeby materiałowe na odcinkach brzegu wymagających uzupełnienia deficytu osadów strefy brzegowej określane są w wytycznych do sztucznego zasilania na podstawie oceny stanu strefy brzegowej i nadbrzeża, porównania składu granulometrycznego osadów ze złoża i osadów macierzystych strefy brzegowej oraz na podstawie wymaganych rozporządzeniem poziomów bezpieczeństwa brzegu morskiego (Dz.U. z 2017 r. poz. 2266; Rozporządzenie..., 2017). Jednak niekiedy to finanse administracji morskiej określają, jakie są możliwości prowadzenia prac.

Ważną kwestią pozostaje również dostęp do złóż osadów nadających się do sztucznego zasilania. Dobór materiału jak najbardziej zbliżonego do osadu macierzystego rejonu przewidzianego do zasilania oraz odległość rejonu czerpania od rejonu zasilania mają podstawowe znaczenie dla uzyskania zakładanej efektywności. Wyznaczając podmorskie złoża osadów nadających się do sztucznego zasilania brzegów, należy uwzględnić wiele czynników, z których najbardziej istotne są uwarunkowania środowiskowe i biocenotyczne oraz możliwe oddziaływanie na obszary Natura 2000 położone w granicach pól poboru i w ich sąsiedztwie, a także w miejscu odkładania urobku.

Ważnym zagadnieniem pozostaje również kwestia wzmocnienia efektów uzyskanych w wyniku sztucznego zasilania poprzez powiązanie stosowania tej metody z różnymi budowlami ochronnymi. Symulacje numeryczne dla geometrycznego układu ostróg na Półwyspie Helskim i typowego układu batymetrycznego w strefie brzegowej półwyspu pokazały, że odłożony materiał w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu w polach między ostrogami utrzymuje się o około 30% czasu dłużej niż w przypadku brzegu niezabudowanego (Pruszek et al., 2012). W przypadku brzegu sztucznie zasilanego szczególnie istotna jest długość ostróg, które powinny sięgać do pierwszej rewy, co sprzyja odtworzeniu naturalnego profilu rewowego oraz polepsza stabilizację brzegu (Pruszek et al., 2012). Symulacje te powinny być poparte badaniami terenowymi, które pozwolą na określenie faktycznego oddziaływania ostróg i innych budowli ochronnych na odkładany na brzegu refulat.

Zasilanie, ze względu na potrzeby i wymagania rekreacyjne (szeroka plaża i brak zakłóceń wypoczynku na brzegu morskim w sezonie letnim) oraz warunki hydrodynamiczne (fallowanie, wezbrania sztormowe), powinno odbywać się przede wszystkim wiosną, najlepiej od drugiej połowy kwietnia do pierwszej połowy czerwca. Nasyp utworzony w takim okresie ma większe szanse na stabilizację i dodatkowo będzie służył rekreacji. Ponadto należy mieć na uwadze istniejące wymagania ekologiczne, m.in. zwiększone wymagania dotyczące czystości chemicznej i biologicznej materiału do zasilania, a także ograniczenia wynikające z konieczności zachowania siedlisk i gatunków przyrodniczych w stanie nie pogorszonym w ramach sieci krajowych form ochrony przyrody, w tym obszarów Natura 2000.

W ostatnich dwudziestu latach, a szczególnie od czasu przystąpienia Polski do UE, zwiększyło się znaczenie działań zmierzających do zachowania albo odtworzenia walorów naturalnego środowiska przyrodniczego. Wzrosła potrzeba zachowania przyrody w stanie naturalnym. W związku z tym pojawiło się krytyczne nastawienie także do sztucznego

zasilania, jego efektów oraz technicznych metod jego realizacji. Należy pamiętać, że budowa systemów ochrony brzegów, w tym stosowanie sztucznego zasilania, ogranicza postęp erozji oraz przyczynia się do poprawy jakości środowiska nadmorskiego i rozwoju ekosystemów plażowych. Według listy biotopów morskich Helcom wśród biotopów lądowych wyróżniono m.in. piaszczyste plaże (*sandy beaches*, kod biotopu: 3.2.1). Plaże to element strefy brzegowej spełniający bardzo ważną rolę, zarówno ochronną, jak i w oczyszczaniu środowiska morskiego. Ich odbudowa i utrzymanie metodą sztucznego zasilania przyczynia się do zmniejszenia negatywnej reakcji systemu brzegowego na techniczną ochronę brzegów i w warunkach zmian klimatu stanowi zasadniczy sposób ich ochrony.

Jednym z nowoczesnych rozwiązań w dziedzinie ochrony brzegu są stosowane maszynowe zasilania brzegu, tj. sztuczne tworzenie obszernych magazynów piasku *sand motor* w strefie brzegowej, które w wyniku swobodnego, naturalnego przemieszczania refulatu zasilają brzeg na znacznie dłuższym odcinku niż ten, na którym pierwotnie odłożono materiał (Waterman, 2008). W warunkach morza bezpływowego, w którym kierunek prądu wzdłużbrzegowego jest zmienny (uzależniony od wymuszeń meteorologicznych) efektywność megazasilania byłaby mniejsza od uzyskiwanej w warunkach morza pływowego.

Budowle ochrony brzegów, zarówno te twarde, jak i miękkie, ograniczając podatność pasa nadbrzeżnego na ekstremalne zjawiska klimatyczne, szczególnie powodzie morskie, powinny poprawiać warunki dla ochrony walorów przyrodniczych. Respektowanie zasad Zintegrowanego Zarządzania Obszarami Przybrzeżnymi wpłynie pozytywnie na zrównoważone gospodarowanie w pasie nadbrzeżnym, zapobiegając jego dewastacji, działając korzystnie zarówno na siedliska przyrodnicze, jak i działalność ludzką (społeczno-gospodarczą). Uwzględnienie w planowaniu przestrzennym granic bezpiecznego inwestowania ograniczy konieczność podejmowania działań ochronnych na dalszych odcinkach brzegu morskiego, ograniczając je do miejsc z zagospodarowanym zapleczem, tam gdzie występuje zagrożenie erozją i powodzią morską.

Podsumowanie

Sztuczne zasilanie jest obecnie jedyną metodą wywołującą stosunkowo najmniejsze skutki uboczne dla systemu geomorfologicznego brzegów morskich. Pozwala na przynajmniej częściowe zniwelowanie efektów ubocznych generowanych przez istniejące falochrony portowe oraz systemy ochronne brzegów, poprzez uzupełnienie deficytu osadów strefy brzegowej i poprawę jej odporności na działanie czynników hydrodynamicznych, a dodatkowo poprawia walory rekreacyjne plaży.

Zweryfikowana wielokrotnymi pomiarami efektywność wielkoskalowego sztucznego zasilania strefy brzegowej Półwyspu Helskiego zdecydowała o przyjęciu tej metody jako preferowanego sposobu uzupełniania deficytu osadów na innych odcinkach brzegu, szczególnie na przyległych do portów wschodnich odcinkach brzegu (Łeba, Rowy, Ustka, Dźwirzyno, Mrzeżyno, Kołobrzeg, Dziwnów) oraz w sąsiedztwie budowli ochronnych (m.in. Ustronie Morskie, Niechorze, Rewal, Trzęsacz).

Po 2003 r., od kiedy ochrona brzegu odbywa się zgodnie z zapisami ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (tj. Dz.U. z 2016 r. poz. 678), sztuczne zasilanie jest rozpowszechnioną metodą ochrony brzegów morskich.

łączna objętość sztucznego zasilania w okresie działania Programu wyniosła około 10,5 mln m³ (tab. 1), co stanowi około 1/3 zasilania zrealizowanego w latach 1980-2014.

W okresie 1980-2014 na polskich brzegach morskich i na brzegach zalewów odłożono łącznie około 32,2 mln m³ materiału osadowego, co po części zniwelowało braki w materiale osadowym strefy brzegowej i nadbrzeża, przyczyniając się do zmniejszenia zagrożenia erozją i powodzią sztormową zainwestowanego zaplecza oraz zanieczyszczenia środowiska morskiego. Ponad połowa całej objętości sztucznego zasilania przypadła na odmorskie brzegi Półwyspu Helskiego. Półwysep Helski jest jednym z najbardziej wrażliwych fragmentów wybrzeża, gdzie sztuczne zasilanie realizowane jest od 1989 r. do chwili obecnej.

Realizacja ochrony brzegów morskich metodą sztucznego zasilania zgodnie z nowym Programem ochrony brzegów morskich (Dz.U. z 2016 r. poz. 678, zob. również ustawa z dnia 25 września 2015 r. o zmianie ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” – Dz.U. z 23 października 2015 r. poz. 1700) wymaga szerokich analiz ukierunkowanych na ocenę skuteczności podejmowanych działań i rozpoznania zasobów osadów piaszczystych. Wymaga również uwzględnienia warunków wynikających z funkcjonowania europejskiej sieci ekologicznej Natura 2000 oraz innych form ochrony przyrody. Celem obszarów Natura 2000 jest zapewnienie zachowania w dobrym stanie najważniejszych w Europie gatunków i siedlisk przyrodniczych, zapobieganie ich przekształcaniu, poprzez monitorowanie stanu przedmiotów ochrony i skuteczne zarządzanie poszczególnymi obszarami. Tym samym występuje konieczność ochrony przed zniszczeniem (uszkodzeniem) nie tylko zabudowanych odcinków brzegu morskiego, gdzie występuje sieć osadnicza, porty i przystanie morskie, w tym obiekty militarne, ale także konieczność ochrony wielu siedlisk i gatunków związanych ze specyfiką ich występowania na styku lądu i morza. Sztuczne zasilanie zagrożonych abrazją odcinków pozwala na zachowanie siedliska nadmorskich wydm białych i ich odtworzenie, co prawda z cechami wydm sztucznie odtworzonych, które przy zachowaniu zasady nieobsadzania ich gatunkami obcego pochodzenia podlegają procesom naturalizacji (Prognoza..., 2015).

Bez wątplenia należy wprowadzać zmiany w strategiach rozwoju gmin nadmorskich i nadzalewowych, aby dla zmniejszenia skali zagrożeń uwzględniać strefę bezpiecznego inwestowania i preferować ich rozwój w obszarach nienarażonych na zjawiska erozyjno-powodziowe. Dzięki takim działaniom długość odcinków brzegu niezbędnych do ochrony nie będzie się wydłużać, nie zmniejszając przy tym walorów estetycznych pasa nadbrzeżnego. Warto przy tym zauważyć, że nawet tak przyjazna środowisku naturalnemu metoda jak sztuczne zasilanie piaskiem jest jednak ingerencją zmieniającą warunki na brzegu morskim. Powinna być ona stosowana jedynie w zakresie koniecznym z punktu widzenia zabezpieczenia przed erozją i – dodatkowo – zapewnienia warunków odpowiednich do rekreacji.

Szacuje się, że z uwagi na postępujące zmiany klimatyczne i antropogeniczne całkowita realizacja Programu ochrony brzegów morskich w zakresie sztucznego zasilania wymaga użycia około 61 mln m³ piasku o granulacji odpowiedniej dla odcinków przewidzianych do zasilania. Według obowiązującej, wymienionej wyżej ustawy, do ochrony brzegów metodą sztucznego zasilania, któremu mogą towarzyszyć budowle wspomagające i umocnienia brzegowe, wskazano 196,85 km brzegów otwartego morza. Zgodnie z programem sztuczne zasilanie, jako jedyna metoda ochrony brzegów, może być realizowana w sześciu rejonach, łącznie na 8,5 km brzegów morskich i zalewów.

Piśmiennictwo

- Basiński, T. (1985). Eksperymentalna technologia sztucznego zasilania brzegu. *Inżynieria Morska*, 6(6), 201-203.
- Basiński, T., Pruszek, Z., Tarnowska, M., & Zeidler, R. (1993). *Ochrona brzegów morskich*. Gdańsk: Wydawnictwo PAN.
- Basiński, T., & Szmytkiewicz, M. (1991). Effectiveness of different artificial nearshore and beach nourishment technologies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Coastal and Port Development Countries*, Mombasa.
- Bączny, J. (1963). *Geneza Półwyspu Helskiego na tle rozwoju Zatoki Gdańskiej*. Dokumentacja Geograficzna, 6. Warszawa: Instytut Geografii PAN.
- Boniecka, H. (red.). (2011). Raport o oddziaływaniu prac czerpalno-refulacyjnych na środowisko. W: *Opracowanie dokumentacji geologiczno-batymetrycznej dotyczącej poboru materiału do sztucznego zasilania dla obszaru będącego w gestii Urzędu Morskiego w Gdyni „Półwysep Helski”*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 6596. Gdańsk: Instytut Morski.
- Boniecka, H., Cylkowska, H., Gajda, A., & Gawlik, W. (2011). *Wykonanie wytycznych do sztucznego zasilania plaży pomiędzy Rewalem i Trzęsaczem: km 371, 80-372, 90*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 6627. Gdańsk: Instytut Morski.
- Boniecka, H., Cylkowska, H., Gajecka, A., & Gawlik, W. (2008). *Wykonanie założeń do sztucznego zasilania plaży w Rewalu km 369,65-371,65*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 6382. Gdańsk: Instytut Morski.
- Boniecka, H., Gajda, A., & Staniszevska, M. (2013). *Opracowanie z badań 6 prób rdzeniowych pobranych z redy portu w Łebie*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 6771. Gdańsk: Instytut Morski.
- Boniecka, H., Gajda, A., Gawlik, W., & Kaźmierczak, A. (2016). *Wykonanie wytycznych do sztucznego zasilania brzegu w Mrzeżynie km: 351,60-352,20*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 7015. Gdańsk: Instytut Morski.
- Boniecka, H., Gawlik, W., & Zawadzka-Kahlau, E. (2010). Aspekty sztucznego zasilania Mierzei Dziwnowskiej. *Geologia i Geomorfologia Pobrzeża i Południowego Bałtyku*, 8, 7-24.
- Boniecka, H., & Kaźmierczak, A. (2015). State of shore and backshore on the basis of monitoring results for selected Polish seashores. *Bulletin of the Maritime Institute of Gdańsk*, 30(1), 150-163.
- Boniecka, H., & Kaźmierczak, A. (2016). Dynamika form strefy brzegowej i nadbrzeża w warunkach sztucznego zasilania na przykładzie Półwyspu Helskiego (km H 0,0-23,5). Konferencja Naukowa Procesy geologiczne w strefie brzegowej morza-GEOST II, 31.05-03.06.2016. Jastrzębia Góra.
- Boniecka, H., & Zawadzka, E. (2006). Protection of the Polish Coast by Artificial Nourishment. W: *Coastal Dynamics, Geomorphology and Protection* (s. 51-60). EUROCOAST – LITTORAL 2006. Gdańsk: Politechnika Gdańska.
- Cieślak, A. (1985). Ruch rumowiska wzdłuż wybrzeża Polski. W: Sesja „35 lat Instytutu Morskiego w Gdańsku”. Materiały na Sesję Naukową. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Cieślak, A., Boniecka, H., Michowski, A., Niemkiewicz, E., Semrau, I., & Zawadzka-Kahlau, E. (1990-1995). *Kompleksowa ochrona Półwyspu Helskiego. Etap 1990-1995*. Gdańsk: Instytut Morski.
- Cieślak, A., & Mierzyński, S. (1978). *Zagospodarowanie i utrzymanie torów wodnych do portów położonych w zatokach i ujściach rzek*. Materiały Instytutu Morskiego, 823. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.

- Dubrawski, R. (2000). Wpływ sztucznego zasilania brzegów morskich na strefę brzegową Półwyspu Helskiego w okresie 1989-1997. W: Konferencja naukowo-techniczna z okazji 50-lecia Instytutu Morskiego (s. 13-25). Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Dubrawski, R. (red.). (2008). *Elementy monitoringu morfodynamicznego polskich brzegów morskich*. Gdańsk: Instytut Morski.
- Dubrawski, R., & Zawadzka-Kahlau, E. (red.). (2006). *Przeszłość ochrony polskich brzegów morskich*. Gdańsk: Instytut Morski.
- Formela, K., & Marsz, A. (2011). Zmienność liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem (1971-2007). *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 189-196.
- Furmańczyk, K. (1995). Coast changes of the Hel Spit over the last 40 years. W: K. Rotnicki (red.), Polish coast: past, present, future. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 22, 193-196.
- Furmańczyk, K., & Musielak, S. (1993). Analiza zmian brzegowych i prognoza zagrożeń Półwyspu Helskiego w świetle badań teledetekcyjnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 14(1), 18-23.
- Gajewski, L. (1996). *Badania prądów przydennych w rejonie Półwyspu Helskiego*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 5196. Gdańsk: Instytut Morski.
- Hamm, L., Capobianco, B., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., & Stive, M.J.F. (2002). A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering*, 47, 237-264. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00127-8)
- Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, B., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., & Spanhoff, R. (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives – a European overview. *Coastal Engineering*, 47, 81-111. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00122-9)
- Jednorąf, T. (1974). *Badania przedinwestycyjne rozbudowy portu Kołobrzeg*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 1147. Gdańsk: Instytut Morski.
- Jednorąf, T. (1987). *Charakterystyka środowiska morskiego oraz jego związki z atmosferą i dnem nad złożami kruszyw naturalnych w polskim obszarze morskim Bałtyku. Z.1. Zatoka Koszalińska*. Seria Sprawozdania z badań, 392. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Kaczmarek, L.M., Ostrowski, R., Skaja, M., & Szmytkiewicz, M. (1998). Matematyczne modelowanie zmian brzegu morskiego u nasady Półwyspu Helskiego z uwzględnieniem sztucznego zasilania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 19(1), 13-20.
- Kowalski, T. (1977). *Osadnik rumowiska dla portu Władysławowo*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 1886. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Kowalski, T., Gruszczyński, B., Grunwald, A., Semrau, I., Cieślak, A., & Niespodzińska, L. (1971). *Ochrona brzegu w rejonie Kołobrzegu*. Gdańsk: Instytut Morski.
- Kramarska, R., & Przeździecki, P. (2011). Rozpoznanie geologiczne piasków do sztucznego zasilania brzegu w obszarze perspektywicznym „Półwysep Helski”. W: *Opracowania dokumentacji geologiczno-batymetrycznej dotyczącej poboru materiału do sztucznego zasilania dla obszaru będącego w gestii urzędu morskiego w Gdyni „Półwysep Helski”*. Gdańsk: PIG-PIB, Oddział Geologii Morza w Gdańsku.
- Łęczyński, L. (2009). *Morfolitodynamika przybrzeża Półwyspu Helskiego*. Gdańsk: Uniwersytet Gdański.
- Łęczyński, L., & Jędrasik, J. (2006). Numerical modelling of hydrodynamic process influencing movement of bottom sediments in shoreface of the Hel Peninsula. W: *Coastal Dynamics, Geomorphology and Protection*. EUROCOAST – LITTORAL 2006. Gdańsk: Politechnika Gdańska.
- Masłowska, M., & Michałowska, M. (1988). Dokumentacja zasobowa w kategorii C2 złoża kruszywa naturalnego. W: *Zatoka Koszalińska*. Archiwum Państwowego Instytutu Geologicznego. Gdańsk: Oddział Geologii Morza, Państwowy Instytut Geologiczny.

- Michowski, A. (1978). *Charakterystyka warunków naturalnych i program badań kontrolnych zasilania brzegu na Zalewie Wiślanym*. Seria Sprawozdania z badań, 87. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Michowski, A. (1979). *Próba zasilania podwodnego na Półwyspie Helskim*. Seria Sprawozdania z badań, 150. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Michowski, A. (1980). Racjonalna gospodarka urobkiem z prac czerpalnych w pasie polskiego wybrzeża. W: *Ochrona brzegów morskich i torów wodnych i wejść portowych*. Seria Sprawozdania z badań, 279. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Mierzyński, S. (1983). *Omówienie wyników ważniejszych prac Instytutu Morskiego dotyczących sztucznego zasilania*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 3110. Gdańsk: Instytut Morski.
- Mierzyński, S. (1987a). *System sztucznego przesyłania rumowiska dla portów otwartego morza. Etap I. Określenie stopnia skuteczności metody sztucznego zasilania*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 3959. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Mierzyński, S. (1987b). *Wymogi ochrony brzegu i strefy brzegowej w aspekcie podjęcia eksploatacji kruszyw ze złóż podmorskich na Ławicy Słupskiej i w Zatoce Koszalińskiej*. Gdańsk: Wydawnictwo NOT.
- Mierzyński, S. (1989). Problemy sztucznego zasilania rumowiskiem brzegu morskiego na przykładzie Półwyspu Helskiego. *Studia i Materiały Oceanologiczne*, 55. *Brzeg Morski*, 1, 163-183.
- Mierzyński, S., Cieślak, A., Gorski, J., Kowalski, T., Michowski, A., & Semrau, I. (1983). *Badanie efektywności sztucznego zasilania brzegów*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 2994. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Mierzyński, S., Cieślak, A., Kowalski, T., Michowski, A., Semrau, I., & Skurczyński, M. (1971). *Badania zapiaszczania wejścia do portu Łeba*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 610. Gdańsk: Instytut Morski.
- Ostrowski, R., Skaja, M., & Szymkiewicz, M. (2009). *Analiza aktualnych możliwości poboru rumowiska z miejsca „potencjalnego osadnika” w rejonie falochronu północnego portu Władysławowo*. Gdańsk: Instytut Budownictwa Wodnego PAN.
- Ostrowski, R., & Skaja, M. (2011). Zależność stabilności brzegów Półwyspu Helskiego od sztucznego zasilania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 32(6), 495-502.
- Pawluk, K. (1985). Sztuczne zasilanie – efektywność metody i miejsce odkładu materiału zasilającego. *Inżynieria Morska*, 6(2), 69-72.
- Prognoza oddziaływania na środowisko dla zmiany programu wieloletniego na lata 2004-2023 pn.: „Program ochrony brzegów morskich” ustanowionego ustawą z dnia 28 marca 2003 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich”. (2015). Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego. Gdańsk: Instytut Morski.
- Pruszk, Z., Schönhofer, J., Skaja, M., Szymkiewicz, P., & Szymkiewicz, M. (2012). Wpływ ostróg na skuteczność sztucznego zasilania brzegów Półwyspu Helskiego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 33(5), 593-597.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 17 listopada 2017 r. w sprawie minimalnych poziomów bezpieczeństwa brzegu morskiego oraz przebiegu granicznej linii ochrony brzegu morskiego (Dz.U. z 2017 r. poz. 2266).
- Samolong, W. (2015). *Łeba port – roboty czerpalno-refulacyjne na rok 2015*. Projekt nr 454/Łeba/1. Szczecin: Biuro Hydrotechniczne Samolong & Włodarczyk.
- Semrau, I. (1979). *Zasady ochrony brzegów morskich przy pomocy sztucznego zasilania*. Seria Sprawozdania z badań, 149. Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.

- Semrau, I., Cieślak, A., Gruszczyński, B., Kowalski, T., Michowski, A., Subotowicz, W., & Zawadzka-Kahlau, E. (1978). *Ochrona brzegu w rejonie Ustka-Wschód z uwzględnieniem wpływu przebudowy falochronów portowych*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 2183. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Semrau, I., & Kowalski, T. (1969). *Ochrona brzegu w rejonie Darłówka. Część I. Opracowanie tematyczne*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 102. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Semrau, I., Kowalski, T., & Cieślak, A. (1974). *Ochrona brzegów Półwyspu Helskiego*. Zeszyt 3. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 1245. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Semrau, I., Kowalski, T., & Michowski, A. (1979). *Zastosowanie sztucznego zasilania dla ochrony brzegów Półwyspu Hel*. Seria Sprawozdania z badań, 148, Gdańsk-Słupsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Skaja, M., & Szmytkiewicz, M. (1995). *Obliczenie falowania i prądów wzdłuż Półwyspu Helskiego*. Raport wewnętrzny. Gdańsk: Instytut Budownictwa Wodnego PAN.
- Skaja, M., Szmytkiewicz, M., & Tarnowska, M. (1987). Przebudowa strefy brzegowej w Kuźnicy po przeprowadzeniu sztucznego zasilania. *Inżynieria Morska*, 8(6), 245-248.
- Skurczyński, M. (1967). *Studium dotyczące przedsięwzięć awaryjnych w rejonie Dziwnowa. Zagadnienia możliwości wykorzystania urobku z prac pogłębiarskich do ochrony brzegów*. Seria I nr PM-760. Gdańsk: Instytut Morski.
- Skurczyński, M., Kowalski, T., Michowski, A., & Semrau, I. (1972). *Opracowanie metody sztucznego zasilania brzegów na Zalewie Wiślany*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 769. Gdańsk: Instytut Morski.
- Skurczyński, M., Michowski, A., & Potylicki, W. (1974). Prace pogłębiarskie i wykorzystanie urobku. W: T. Jednorąf (red.), *Badania przedinwestycyjne rozbudowy portu Kołobrzeg*. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, 1147. Gdańsk: Instytut Morski.
- Słomianko, P. (1965). *Analiza techniczno-ekonomiczna budowy umocnień brzegowych na Zalewie Wiślany w rejonie Krynicy Morskiej*. Seria I nr PM-698. Gdańsk: Instytut Morski.
- Stachurska, B. (2012). Analiza zmian położenia brzegu odmorskiej strony Półwyspu Helskiego na podstawie zdjęć lotniczych z lat 1947-1991. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 33(4), 541-551.
- Staniszewska, M., Boniecka, H., & Gajda, A., 2014, Prace pogłębiarskie w polskiej strefie przybrzeżnej – Aktualne problemy. *Inżynieria Ekologiczna*, 40, 157-172. <https://doi.org/10.12912/2081139X.79>
- Szawernowski, P. (1971). *Sztuczne zasilanie brzegów morskich w rumowisko*. Materiały Instytutu Morskiego, 765. Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Tomczak, A. (1994). Hel Peninsula – relief, geology, evolution. W: *Changes of the Polish Coastal Zone (Guide-Book of the Field Symposium)* (s. 45-49). Polish Coast '94, 27.08-01.09.1994. Gdynia-Poznań: UAM.
- Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz.U. z dnia 18 kwietnia 2003 r. poz. 621).
- Ustawa z dnia 25 września 2015 r. o zmianie ustawy o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz.U. z 23 października 2015 r. poz. 1700).
- Ustawa z dnia 11 maja 2016 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” (Dz.U. z 18 maja 2016 r. poz. 678).
- Vera-Crus, D. (1972). Artificial nourishment of Copacabana Beach. Conference Proceedings. *Coastal Engineering*, 13. <https://doi.org/10.9753/icce.v13.76>
- Waterman, R.E. (2008). Integrated Coastal Policy via Building with Nature, Delft, the Netherlands. Pobrane z: <https://repository.tudelft.nl> (20.03.2020).

- Wpływ eksploatacji piasku z dna południowego Bałtyku na strukturę dna i zbiorowiska meio- i makrobentosu.* (2010). Gdańsk: Państwowy Instytut Geologiczny (praca zbiorowa, archiwalna, niepublikowana).
- Zawadzka, E. (2000). Wpływ sztucznego zasilania na dynamikę osadów strefy brzegowej Półwyspu Helskiego. W: Konferencja naukowo-techniczna z okazji 50-lecia Instytutu Morskiego (s. 27-46). Gdańsk-Szczecin: Instytut Morski.
- Zawadzka-Kahlau, E. (1999). *Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku południowego.* Gdańsk: Gdańskie Towarzystwo Naukowe.
- Zawadzka-Kahlau, E. (2012). *Morfodynamika brzegów wydmywnych południowego Bałtyku.* Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- Zawadzka, E., Basiński, T., & Boniecka, H. (1998). Ekotechnologie w ochronie brzegów morskich. W: R. Bogdanowicz (red.), *Ekotechnologie, Zeszyty Zielonej Akademii*, 6 (s. 23-55). Gdańsk: Polski Klub Ekologiczny.

Summary

Artificial beach nourishment is one of key methods preventing coastal erosion and flooding, acting in support of the maintenance of much-disturbed coastal environments and their much-desired recreational functions.

Beach fills have been implemented since the 1930s, though relevant conceptual studies in Poland were elaborated in the 1960s and 1970s. These summarised the worldwide experience focusing on the rational implementation of beach fills in Poland. Recommendations at that time included a maximisation of the use made of sand dredged from navigation channels and canals, with a view to this being used to nourish abraded beaches near ports.

In 1978, sand by-passing was implemented successfully at the Dźwirzyno and Rowy fishing harbors, with regular dredging of the approach channels and harbour canals being combined with the pumping of a water-sand mixture on the lee (eastern) side of breakwaters. These systems have remained operational through to the present day. The largest fills were generated in the 1994-1996 period; being ca. three times greater than the volume of sand dumped offshore.

Between 1980 and 2014, 32.2 M m³ of sand were deposited along the Polish coast and lagoon shores. This offered partial compensation of the reduced nearshore sand deficit, and served to increase resilience of beaches and the backshore in the face of erosion and inundation, while also helping with the contamination of beaches due to uncontrolled emissions in the course of events of the latter type. More than half of the total fill volume was deposited along the offshore coast of the Hel Peninsula, where a comprehensive scheme for coastal protection was implemented between 1989 and 1995. The Peninsula, and particularly its root and central part, are among sites in Poland most vulnerable to erosion, often subject to catastrophic inundation threats.

Following Poland's adoption of the Coastal Protection Act 2003 (see the *Dziennik Ustaw* Official Journal of Laws of 2016, item 678), fills became the most popular coastal-protection measure.

Between 2004 and 2014 this measure was resorted to predominantly along offshore stretches of the Hel Peninsula, and at beaches adjacent to open sea ports on their lee (eastern) sides (including harbours from Łeba along to Dziwnów).

Fills were also performed along the shores of the Gulf of Gdańsk, where erosion processes have accelerated in recent decades; and at the open-sea beaches near Jarosławiec, Ustronie Morskie and Niechorze. The latter installations operated in support of existing protection schemes. Comprehensive protection of the soft cliff between Rewal and Trzęsacz was also inaugurated, the background erosion tendencies ongoing their having coincided with anthropogenic activities causing disruption to local geodynamic processes.

Since the time of adoption of the Coastal Protection Act, a total fill volume of 10.5 M m³ has been deployed, see Table 1. This represents about one-third of all the filling done from 1980 until 2014.

Many positive changes are to be identified along the open-sea coast of the Hel Peninsula, on which more than 17.5M m³ of sand were deposited in the years from 1989 through to 2014, *cf.* Table 1, Figs. 3, 4 and 5. The large fill volumes achieved during the first 5 years of implementation of the protection scheme along the Peninsula resulted in rehabilitation of the nearshore seabed to such an extent that follow-up re-nourishment only needed to assume a lesser intensity. Morphometric parameters along the nourished beaches allow for them to be classified as very highly resilient in the face of hydrodynamic forces.

Since erosion tendencies prevail in Poland's coastal zones, any cessation of beach fills may result in a gradual loss depletion of the level of safety achieved. Thus, annual deposition of several hundred thousand m³ of sand along the offshore beaches of the Hel Peninsula continues to represent an absolute necessity if the current level of resilience is to be maintained.

Reduction of nearshore sand deficits by way of beach filling represents the only method of preventing negative beach responses. Re-nourishments are determined by hydrological and morphodynamic factors, and should gain incorporation into the protection actions being planned by coastal authorities.

There can be no doubt that the experience acquired thus far can provide for successive optimisation of the method under consideration, with a view to level of protection efficacy being raised, even as respect for environmental sustainability is also achieved.