

Wpływ spiętrzeń sztormowych na erozję plaż i ich sztuczne zasilanie w Łebie

Dr hab. Tomasz Arkadiusz Łabuz, prof. US
Uniwersytet Szczeciński, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku

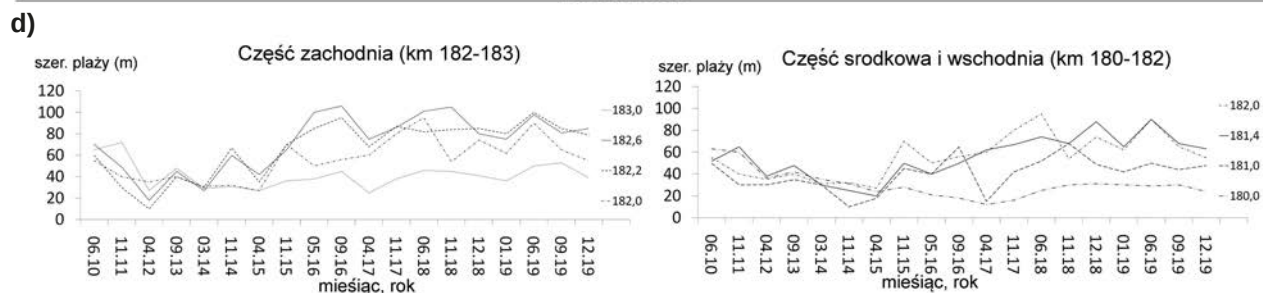
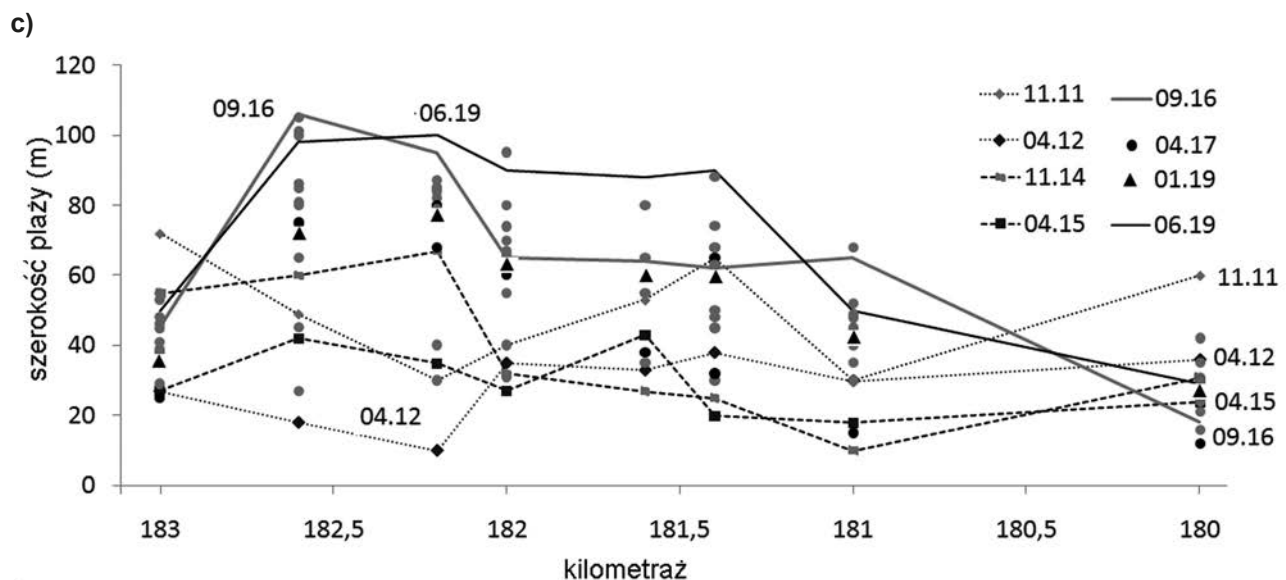
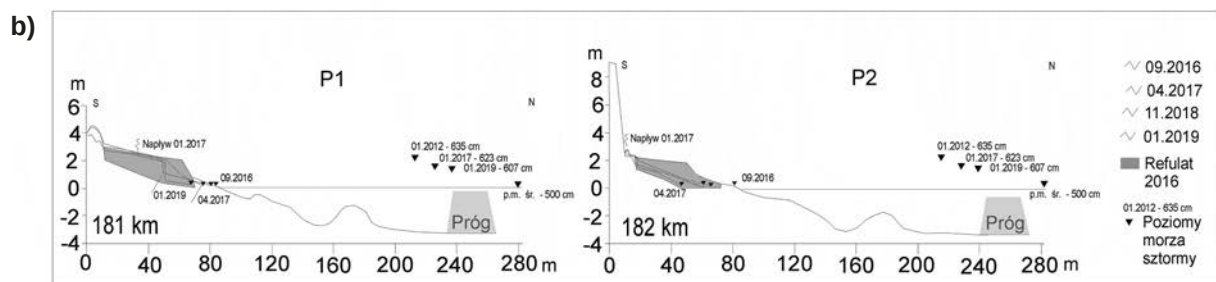
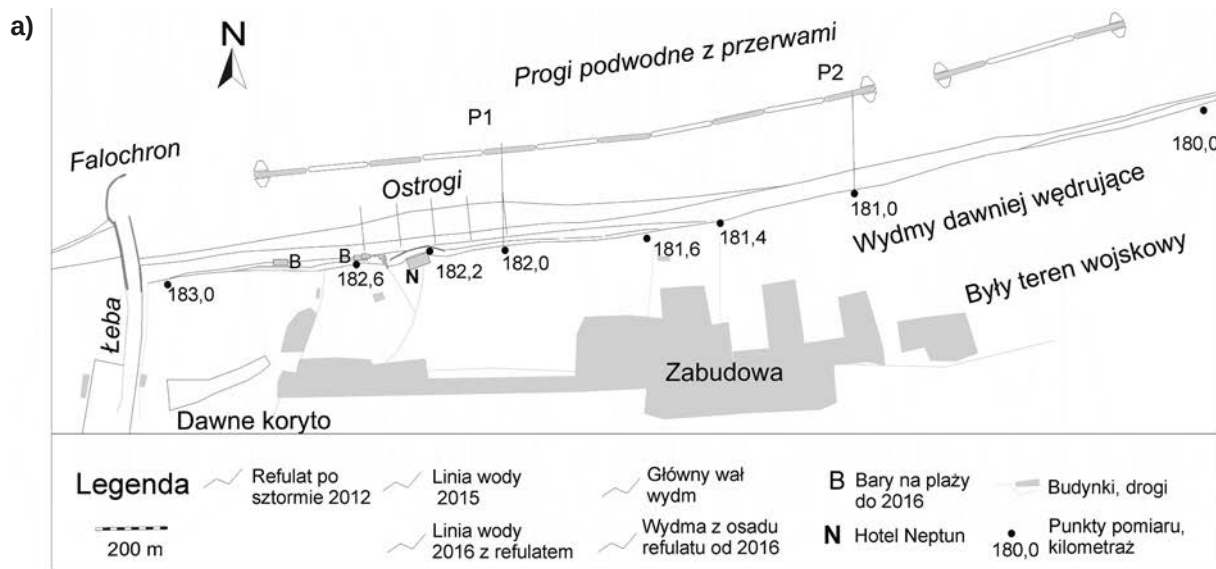
Erozja brzegu w Łebie związana jest z budową falochronów portowych i wzrostem intensywności oddziaływania czynników naturalnych, które nie mogą równoważyć ujemnego bilansu osadu w podbrzeżu i na plaży. Są to: okresowy wzrost poziomu morza i rozwój falowania dobrzegowego podczas spiętrzeń sztormowych oraz stałe i przyspieszające podnoszenie jego poziomu. W Łebie po wybudowaniu falochronów osad zatrzymywany jest po ich zachodniej stronie, wpływając na przyrost plaż i wydmy (km 183,5 ÷ 185) oraz powodując zapiaszczanie wejścia do portu. Po wschodniej stronie przeważa erozja nad akumulacją (km 183 ÷ 181). Dopiero około 3 km na wschód (km 175 ÷ 180) bilans jest równoważony, a brzeg znajduje się na przemian w fazie erozji i akumulacji. Historia ochrony brzegu w Łebie, po wschodniej stronie ujścia rzeki Łeby, sięga początku XX wieku (rys. 1a, tabl. 1). Nieuregulowana Łeba, jak wszystkie rzeki, zmieniała swoje ujście w wyniku oddziaływania prądów i falowania, co powodowało utrudnienia w rozwoju portu. W latach 1884-1900 skrócono i wyprostowano odcinek ujściowy rzeki. W celu uregulowania wejścia do portu w 1908 roku ukończono budowę pierwszych drewnianych falochronów wypełnionych glazami narzutowymi. W tym czasie, w latach 1906-1907 około 1 km na wschód od nowego ujścia rzeki, na nadmorskiej wydmy wybudowano pałacyk (pełniący funkcję domu zdrojowego). Po starym korycie przesuniętym 400 m na zachód na zapleczu odtworzonych sztucznie wydmy pozostał staw i teren podmokły.

Spiętrzenia sztormowe z 1911, 1913 i 1914 roku spowodowały dużą erozję wydmy nadbrzeża, zagrażając powstałemu na wydmy pałacykowi [4, 10]. Z tego powodu podjęto pierwsze próby ochrony wydmy przed erozją, budując palisadę, a następnie mur betonowy o długości 160 m i wysokości do 2 m. Ponadto wykonano ostrogi [4]. Wydmy na odcinku od pałacyku do portu odbudowano, usypując piasek i sadząc trawy wydmy. W latach 1915-1916 pierwszy raz pogłębiano zapiaszczany tor wodny. Od 1949 roku ponownie wykonywano prace pogłębiające tor wodny, najwięcej osadu do 88 tys. m³ uzyskano w latach 1964-1974 [5]. Do lat sześćdziesiątych XX wieku sztucznie uformowana wydma rozrosła się, osiągając 8 m wysokości. Do tego czasu przy falochronie plaża i podstawa wydmy nie zmie-

niły swego położenia. Na wschód od opaski pod pałacykiem, na zakończeniu grupy ostróg powstała zatoka erozyjna. Brzeg uległ cofnięciu o 50 ÷ 80 m względem początku XX wieku. Po szeregu silnych sztormów w latach 1962, 1973, 1976 [12] wydma przed pałacykiem (obecnie hotel Neptun) oraz na zakończeniu opaski została zniszczona. Cofnięcie podstawy wydmy od osi opaski sięgało 10 ÷ 20 m. W latach 1960-1983 podstawa wydmy cofała się o 1 m/r pomiędzy falochronem a hotelem Neptun i 0,5 m/r na brzegu położonym na wschód [23]. W 1983 roku na wybrzeżu wschodnim wystąpiło najwyższe spiętrzenie w XX wieku, podczas którego w Łebie poziom wody sięgał 634 cm, to jest 134 cm powyżej poziomu średniego. Wydma była ponownie erodowana, cofnięcie wyniosło od 4 do 8 m. Uszkodzone zostały zejścia na plażę (km 182,5). Na wschód od pałacyku brzeg cofnął się znacznie więcej, pogłębiając powstającą na końcu grupy ostróg zatokę (km 181 ÷ 182). Po kolejnym bardzo silnym spiętrzeniu w styczniu 1992 roku z poziomem morza do 616 cm rozpoczęto refulację plaż.

Od 2003 roku w Polsce działa Program Ochrony Brzegów Morskich, w którym odcinek położony na wschodnim brzegu ujścia Łeby jest ujęty do stałej ochrony przed erozją. Od 2010 roku Urzędy Morskie korzystają z dużych środków finansowych z programu Infrastruktura i Środowisko, z zadania 2.2. Ochrona brzegów morskich i przywracanie środowiska do stanu właściwego [8]. Z tego programu w latach 2014-2016 wykonano kosztowne obiekty hydrotechniczne i refulację na odcinku o długości 3 km. Pod koniec XX wieku na ochronę wybrzeża środkowego przeznaczano 2 ÷ 3 mln zł rocznie. Na początku XXI wieku, po wprowadzeniu w 2003 roku Strategii Ochrony Brzegów Morskich, było to już 8 mln. W tym czasie wzrosły koszty pozyskania osadu do refulacji za m³ z 10 ÷ 15 zł do 40 ÷ 50 zł obecnie. Koszt jednej refulacji na odcinku do 1 km wzrósł z 1,5 do 4 ÷ 5 mln zł.

Celem pracy jest przedstawienie okresów i wielkości erozji plaż przez spiętrzenia sztormowe i jej wpływu na działania refulacyjne w Łebie od 1992 roku ze szczególnym uwzględnieniem okresu w XXI wieku.



Rys. 1. Wschodnia część brzegu w Łebie

a) lokalizacja zabiegów hydrotechnicznych; b) profile poprzeczne z refulatem i maksymalnym poziomem morza podczas spiętrzeń sztormowych od 2012 roku, p1 – 182 km, p2 – 181 km, lokalizacja na rys. 1.A; c) zmiany szerokości plaży przed i po okresie ostatniej refulacji; d) zmiany szerokości plaży od 2010 do 2019

Tabl. 1. Działania ochrony brzegu w Łebie: rodzaje, ich powody i skutki

Lata	Działanie	Powód	Efekty/skutki
1906-1908	Budowa falochronów, budowa pałacyku na wydmy (ob. hotel Neptun)	Zapiaszczanie niestabilnego ujścia rzeki	Zatrzymanie transportu wzdłużbrzegowego, rozwój erozji po stronie wschodniej ujścia Łeby
1911-1914	Opaska palisadowa, betonowa, dosypywanie osadu, odbudowa wydmy, rozległe zatrawienie, falochrony	Sztormy erodujące wydmy 1911, 1913, 1914	Zatrzymanie erozji i ochrona pałacyku
1915-1960	Pierwsze pogłębianie toru przy falochronach (1915/16). Brak danych, po II WŚ. umocnienia biotechniczne	Zapiaszczanie. Możliwa erozja w 1921, 1942	Naturalna odbudowa sztucznie odtworzonej wydmy, okresowo erozja
1961-1991	Tylko umocnienia biotechniczne: trawy, faszyna, chrust	Duże sztormy 1962, 1973, 1976, 1983 > 610 cm. Postępująca erozja, cofanie się wydmy do 1 m/r. (1960-1983)	Okresowa odbudowa, przewaga erozji wydmy. Erozja na wschód od ostróg (zat. erozyjna)
1992-2000	Pierwsza refulacja plaży, w latach kolejnych powtarzana na wysokości hotelu Neptun	Refulacja po dużej erozji z 1992 r. Kolejne sztormy 1993, 1995, 1997, 2000 > 600 cm	Odbudowa plaż do czasu kolejnego dużego sztormu
2001-2007	Do 2003 - wydłużenie falochronów, 2005 - remont i przedłużenie opaski, 2007 - podwyższenie opaski, głązy u podstawy	Duże sztormy 2002, 2004, 2006, 2007 > 600 cm. Za każdym razem erozja prawie całego refulatu	Odbudowa plaż do czasu kolejnego dużego sztormu
2008-2014	Kolejne refulacje co roku. Pierwsza refulacja 1 km na wschód od hotelu	Duże sztormy 2009, 2012 > 600 cm	Odbudowa plaż do czasu kolejnego dużego sztormu
2015-2016	Ochrona kompleksowa: progi podwodne (2 km), ostrogi, refulacja (2,2 km)	Brak skuteczności refulacji. Erozja plaż równa refulacji	Zahamowanie dużej erozji plaż. Rozwój erozji 2 km na wschód od hotelu (180 ÷ 181 km)
2017-2020	Refulacja na wschód od hotelu (181 km) i przy falochronie (183 km)	Duże sztormy 2017, 2019 > 600 cm. Erozja refulatu na zakończeniu grupy ostróg i w przerwie progów	Erozja plaży i wydmy 2 km na wschód od hotelu (180 ÷ 181 km)

METODY I MATERIAŁ BADAŃ

Obszar badań obejmuje odcinek od km 180 do 183 według podziału stosowanego przez Urząd Morski (rys. 1a). Analizę historyczną zmian brzegu i stosowanych umocnień hydrotechnicznych w Łebie przeprowadzono na podstawie dostępnych publikacji [4], fotografii oraz map [10]. Analizę zmian, które zaszły w XX i XXI wieku, przeprowadzono na podstawie zebranych danych z Urzędu Morskiego w Słupsku oraz publikacji [3, 13, 23]. Dane z lat 2004–2019 opracowano na podstawie własnych obserwacji i pomiarów niwelacyjnych. Obserwacje zmian morfologii brzegu na tym odcinku prowadzone są przez autora od 2004 roku. Szczegółowe badania zmian morfologii pod wpływem spiętrzeń sztormowych i stosowanej refulacji plaż wykonywane są od 2010 roku. Pomiarów terenowych polegały na wykonywaniu profili niwelacyjnych od zaplecza nadbrzeża do linii wody. Wyznaczono kilka stałych punktów pomiarowych zlokalizowanych w miejscach charakterystycznych, gdzie zmienia się przebieg linii brzegowej, występuje przewężenie plaży lub zachodzi akumulacja na wydmach. Za pomocą urządzeń GPS wykonywano pomiar położenia linii wody. Prace realizowano 2 ÷ 3 razy w roku, w tym po spiętrzeniach sztormowych. W opracowaniu wykorzystano materiały informacyjne Urzędu Morskiego w Słupsku o miejscu i wielkości refulacji plaż. Ponadto opracowano dane dotyczące największych spiętrzeń sztormowych w XX i XXI wieku. Na podstawie zebranych danych obliczono szerokość plaży i jej zmiany pod wpływem refulacji i sztormów. W wybranych miejscach obliczono objętość osadu odkładanego i erodowanego w metrach sześciennych na 1 m szerokości plaży (metr bieżący).

NATURALNE PRZYCZYNY EROZJI BRZEGU W ŁEBIE

W ostatnich dziesięcioleciach systematycznie wzrasta średni poziom morza rejestrowany w portach polskiego wybrzeża [2, 16, 20, 21, 24]. Trend ten zauważono już w latach osiemnastych i dziewiętnastych ubiegłego wieku [2, 24]. Pomiędzy końcem XIX a XX wiekiem (1883-1985) roczny wzrost poziomu morza wynosił w Świnoujściu do 0,7 mm, a w Gdańsku do 1,2 mm [2]. Tempo wzrostu zwiększyło się pod koniec XX wieku, w Świnoujściu do 1,4 mm/r i w Gdańsku do 2,9 mm/r. W Łebie w XIX wieku średni poziom morza wynosił 499 cm, w XX wieku 502 cm i od XXI wieku już 506 cm. Skutkiem wzrostu średniego poziomu morza jest wyższy zasięg napływu wody na ląd podczas spiętrzeń sztormowych [9].

Podczas przechodzenia nad południowym Bałtykiem układów niskiego ciśnienia powstaje wiatr powodujący rozwój falowania sztormowego. Ostrzeżenia przed sztormem obejmują prognozy dla wiatru o sile powyżej 8° w skali Beauforta i prędkości 14 ÷ 17 m/s. Z tego powodu wiatr o prędkości minimum 15 m/s nazwano sztormowym [18]. Prawdopodobieństwo wystąpienia w ciągu roku bardzo silnych wiatrów (powyżej 15 m/s) wynosi do 6% [18, 24]. W Łebie wiatr o takiej prędkości, powodujący rozwój falowania sztormowego, występuje 5 ÷ 6 dni w ciągu miesiąca, od października do kwietnia. W latach 1961-1990 ponad 40% wiatrów sztormowych pochodziło z kierunku W-NW, około 15% z N i do 10% z NE [18]. Wiatr wiejący wzdłuż brzegu, z kierunku W, powoduje zwiewanie osadu z plaży i jego transport w kierunku wschodnim. Generuje ruch rumowiska z zachodu na wschód, które zasila erodowane brzegi i podbrzeże.

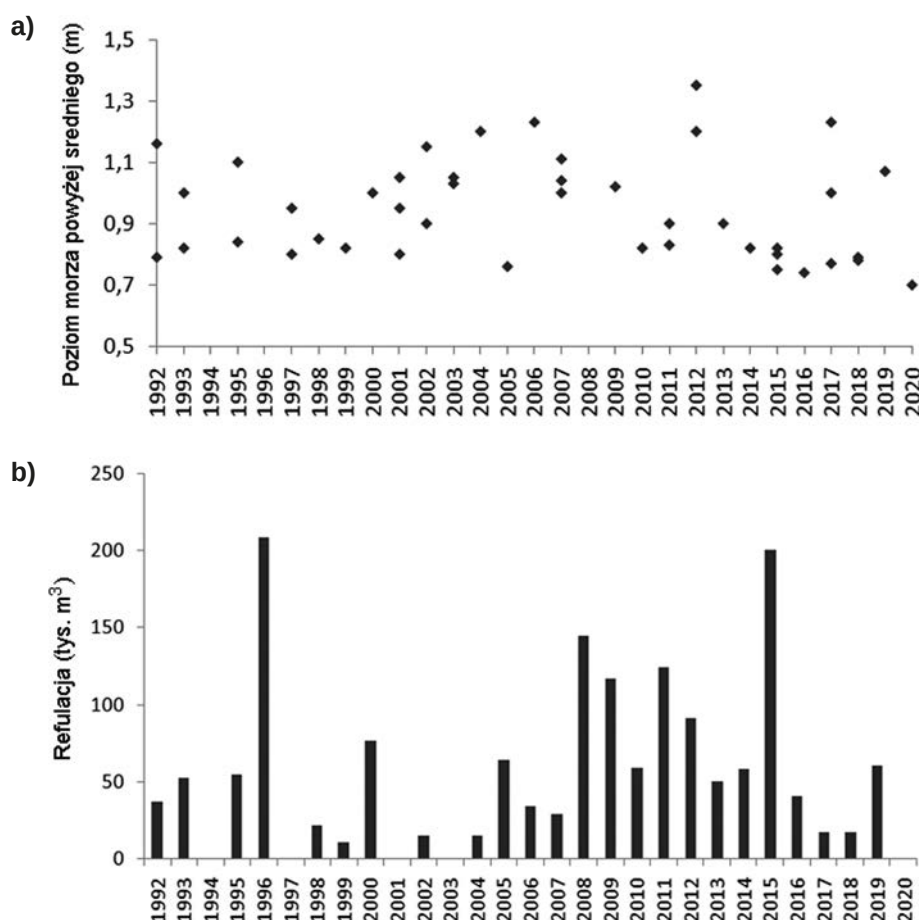
Długotrwały i silny wiatr, wiejący z sektora odmorskiego, powoduje powstawanie falowania sztormowego, któremu zwykle towarzyszy wzrost poziomu wody przy brzegu, wzmagające rozmywanie plaż, wydmy oraz klifów [12]. Wezbraniem (spiętrzeniem) sztormowym jest gwałtowny wzrost poziomu morza przy silnym wietrze doładowym [17]. Wzrost ten wynosi zazwyczaj $40 \div 60$ cm od poziomu średniego przyjmowanego za 500 cm. Największe spiętrzenia powstają przy wiatrach dobrzegowych zmieniających kierunek od SW do NW, co skutkuje napływem wód przez cieśniny z Morza Północnego [12, 17, 22, 24]. W ciągu roku prawdopodobieństwo wystąpienia stanów wody przekraczających poziom ostrzegawczy (co najmniej 570 cm) wynosi do 75% [12, 17, 22]. Co roku lub czasem $2 \div 3$ razy w ciągu roku obserwuje się spiętrzenie wody na części lub na całym polskim wybrzeżu z poziomem morza do 570 cm, które powoduje erozję plaż i miejscami podstawy wydmy lub klifów [6, 7]. Przykładowo w 2019 roku w Łebie wystąpiło 6 spiętrzeń sztormowych z poziomem morza do $550 \div 570$ cm i jedno znaczące z poziomem morza 607 cm. Na rys. 2a pokazano liczbę spiętrzeń sztormowych w Łebie od 1992 roku z poziomem morza co najmniej powyżej stanu ostrzegawczego, to jest 570 cm. W tym okresie co $2 \div 3$ lata występowało spiętrzenie z poziomem morza powyżej 1 m od średniego (około 500 cm). W XX wieku najwyższy poziom 634 cm wystąpił w styczniu 1983 roku. W XXI wieku najwyższy poziom morza wystąpił w listopadzie 2006 i styczniu 2012 roku, do 635 cm oraz w styczniu 2007 roku na krótko do 620 cm. Dużą erozję na

całym wybrzeżu obserwowano podczas sztormu o nazwie Axel ze stycznia 2017 roku, podczas którego w Łebie poziom morza wynosił 623 cm. Maksymalny zarejestrowany w porcie Łeba poziom morza wyniósł 668 cm w grudniu 1893 roku.

Według polskich badań na południowym Bałtyku zwiększa się liczba spiętrzeń sztormowych mniejszych z poziomem morza przekraczającym w portach stany alarmowe [11, 12, 16, 20, 21, 22]. Zwiększa się też liczba godzin z wysokim poziomem morza oraz długość trwania maksymalnych rocznych poziomów morza w wieloleciu [16, 21].

Podczas spiętrzeń sztormowych wzrasta nie tylko poziom morza, ale i wysokość fal. Prawdopodobieństwo w ciągu roku wystąpienia fali przekraczającej wysokość 1 m z kierunku W-NW i NNE wynosi do 29% na wybrzeżu wschodnim (Lubiatowo), a fale o wysokości powyżej 2 m charakteryzują się prawdopodobieństwem wystąpienia wynoszącym 6% [1].

Im większa wysokość poziomu morza i fal, tym wyższy napływ wody na brzeg [7, 9]. Podczas spiętrzeń przy poziomie morza do 570 cm woda sięga maksymalnie do 1,5 m n.p.m. Podczas sztormu z poziomem morza 620 cm napływ sięga już do 3 m n.p.m., zalewając całą plażę, niszczy podstawę wydmy. Istotną ochronę przed abrazją stanowi wysokość plaży nad poziomem morza. Plaże niższe niż 2 m n.p.m. nie chronią zaplecza przed sztormami. W przypadku największych spiętrzeń minimalna wysokość plaży to 3,5 m n.p.m. [7]. Tak wysokie plaże występują tylko na odcinkach akumulacyjnych lub są refulowane.



Rys. 2. Spiętrzenia sztormowe i refulacja plaży w Łebie od 1992 roku
a) liczba spiętrzeń powyżej 0,7 m ponad średni (powyżej stanu ostrzegawczego); b) wielkość refulacji plaży (w tys. m sześciennych)

OKRES REFULACJI PLAŻ W LATACH 1992-2000

Sztuczne zasilanie plaż po wschodniej stronie ujścia rzeki rozpoczęto w 1992 roku [3, 13]. Jego celem jest pogłębianie toru podejściowego do portu i odkładanie osadu (refulacja) na wąskich i nisko położonych nad poziom morza plażach. Realizowano je praktycznie co roku (rys. 2b). Początkowo wykonywano je na odcinku od km 183 do 182. W latach 1992-2000 zasilanie odbywało się od falochronu do końca opaski osłaniającej hotel Neptun. Pierwsze refulacje nie były duże, rzędu $20 \div 40 \text{ m}^3$ na metr bieżący. Plaża poszerzana była do $35 \div 40 \text{ m}$. W tym czasie odłożono do 450 tys. m^3 osadu na długości do 1 km brzegu (rys. 2b).

Po wystąpieniu sztormów w 1995 roku, w tym jednego z poziomem morza 610 cm, wykonano bardzo dużą refulację. W 1996 roku odłożono ponad 200 tys. m^3 na odcinku km 183 ÷ 181,5. W kolejnych latach, po niższych spiętrzeniach, refulacje były znacznie mniejsze. W tym czasie osad z refulatu uformował niewysoką wydmy przednią pomiędzy falochronem i hotelem Neptun. Przeważający wiatr zachodni przy prędkościach powyżej 10 m/s przewiewał osad w kierunku wschodnim, gdzie pomiędzy km 182 ÷ 181 również powstawała wydma przednia.

Ujemny bilans osadu brzegu na zakończeniu grupy ostróg powodował stale przewagę erozji nad akumulacją i powiększanie zatoki erozyjnej. Plaża na tym odcinku zazwyczaj nie refulowana miała małą wysokość i niewielką szerokość, co umożliwiało stałą erozję wydmy podczas sztormów.

W latach 1998-2003 przebudowano falochrony, dodając od strony zachodniej wydłużoną osłonę w kierunku morza.

OKRES ZWIĘKSZONEJ REFULACJI PLAŻ W LATACH 2001-2014

W XXI wieku największe refulacje zrealizowano po dużych sztormach z 2004, 2006 i 2007, 2009 oraz 2012 roku, odkładając na plaży od 60 do 140 tys. m^3 . Średnio dawało to od 30 do 60 m^3 na mb plaży. Refulowana plaża obejmowała odcinek od km 183 do 182,5, a po 2007 roku także do km 181,5. Refulację wykonywano najczęściej wiosną przy porcie (km 183), a jesienią po stronie wschodniej od opaski (km 182). Refulat był niszczoney przez każde spiętrzenie sztormowe, podczas którego średni poziom morza był przekroczony o co najmniej 1 m. Podczas takiego spiętrzenia napływ wody na brzeg sięgał $2,5 \div 3 \text{ m}$ n.p.m., czyli pokrywał cały refulat niższy od 3 m i podmywał podstawę wydmy. Największe straty osadu występowały na wysokości opaski osłaniającej hotel Neptun, gdzie w wyniku odbić fal od opaski plaża była obniżana do 0,5 m n.p.m. i zwyżana do $10 \div 15 \text{ m}$. Na jej zakończeniach występowała także większa erozja wydmy. Osad stale wywiewany z refulatu zaczął formować wydmy embrionalne na odcinku o długości 1,2 km pomiędzy km 180,5 ÷ 179. W latach 2001-2004 powstały tam pojedyncze pagórki, które do 2010 roku uformowały wał o wysokości 5 m i szerokości $10 \div 20 \text{ m}$. Wał ten wzrastał do 2015 roku, do czasu wybudowania progów podwodnych kończących się na wysokości km 180.

W styczniu 2002 roku wystąpiło znaczne spiętrzenie z poziomem morza 635 cm, powodujące erozję plaż i wydmy na całym wybrzeżu, w tym w Łebie. Kolejne, mniejsze spiętrzenie

sztormowe wystąpiło w lutym. Po spiętrzeniach tych i dwóch mniejszych z grudnia 2003 roku plażę uzupełniono niewielkim refulatem do 15 tys. m^3 osadu w 2004 roku [3].

Po spiętrzeniu sztormowym z listopada 2004 roku z poziomem morza w Łebie do 620 cm erozja plaży była znaczna. Maksymalna wysokość plaży wynosiła zaledwie 0,7 m n.p.m. Jej szerokość nie przekraczała 15 m. Przy opasce okalającej hotel Neptun plaża zanikła (rys. 3). Od stycznia do maja 2005 roku obserwowano $1 \div 2 \text{ m}$ wysokości podcięcia zerodowanych wydmy. Ich cofnięcie sięgało $3 \div 4 \text{ m}$ w części zachodniej analizowanego odcinka. Na zakończeniu opaski zaobserwowano zwiększoną erozję w postaci uformowanych nisz abrazyjnych. Ich cofnięcie sięgało 6 m. Na odcinku naturalnym, nierefulowanym, na km 181 uległa erozji czterometrowej szerokości wydma przednia, formująca się dotychczas z osadu wywiewanego z refulatu. W 2005 roku wykonano remont opaski i jej przedłużenie w postaci narzutowej z granitu na km 181,1 ÷ 182,28 [3]. Odłożono do 106 m^3 osadu na mb plaży. Była to największa ilość od początku refulacji w 1992 roku.

Pomimo dużej refulacji w 2005 roku i mniejszej w 2006 roku, podczas bardzo dużego spiętrzenia Britta w listopadzie 2006 roku zniszczony został cały refulat oraz wał wydmy przedniej u podstawy wysokiej wydmy pomiędzy km 180,5 a 182 km [8]. Cofnięcie jego podstawy wynosiło $3 \div 5 \text{ m}$. Plaże zostały obniżone do 1 m n.p.m., tworząc u podstawy zniszczonej wydmy skarpe o wysokości $2 \div 3 \text{ m}$. Woda podczas tego sztormu przelewała się ponad opaską, niszcząc nawierzchnię i zatrawienia. Długotrwałe podpiętrzenie w styczniu 2007 roku, trwające przez cały miesiąc z maksymalnym poziomem morza do 620 cm, powodowało dalsze obniżanie plaży i erozję wydmy. W 2007 roku opaskę rozbudowano, podwyższając i układając u jej podnóża głazy. Od wewnątrz umocniono ją gabionami, fašzyną, a stok pokryto nowymi zatrawieniami. U jej podstawy odłożono do 95 m^3 osadu na mb. Po sztormach z 2006 i 2007 roku refulację rozpoczęto również na wschód od opaski. Odbudowywany odcinek wydłużył się do 1,5 km. W 2008 roku na tym odcinku odłożono 145 tys. m^3 osadu, około $50 \div 70 \text{ m}^3$ mb plaży. Poszerzono ją z $15 \div 20 \text{ m}$ do $40 \div 50 \text{ m}$. Wysokość u podstawy wydmy podniesiono do ponad 2,5 m n.p.m.

W 2009 roku refulację wykonano trzykrotnie. W maju po stronie wschodniej, we wrześniu po stronie zachodniej opaski w ilości ponad 50 tys. m^3 oraz kolejną refulację zabezpieczającą w październiku po spiętrzeniu sztormowym. Po bardzo silnym jesiennym sztormie, tym razem z kierunku NE w dniach 13-15 października 2009 roku, erozja przy opasce sięgała do 70 m^3 /mb. Tuż po sztormie odłożono kolejne 60 tys. m^3 osadu, tylko na odcinku wokół opaski [8]. W tym czasie wielkość odkładanego osadu wzrosła do $60 \div 80 \text{ m}^3$ na metr bieżący. Dopiero w 2010 roku odbudowano plażę w części wschodniej odcinka, gdzie wystąpiła duża erozja wydmy, na kilometrażu 180,7 ÷ 181,7. Po tym spiętrzeniu zupełnej erozji uległa wydma przednia o wysokości ponad 4 m, uformowana przed stokiem wysokiego wału na km 181. W listopadzie 2004 roku jej cofnięcie wyniosło 3 m, pomiędzy 2006 i 2007 do 5 m i w 2009 kolejne 4 m.

W latach 2002-2010 odłożono 460 tys. m^3 osadu. Materiału odkładano tym więcej, im większa nastąpiła erozja od ostatniego zasilania. Przykład wielkości erozji i ponownej refulacji tuż przy zachodnim zakończeniu opaski pod hotelem Neptun

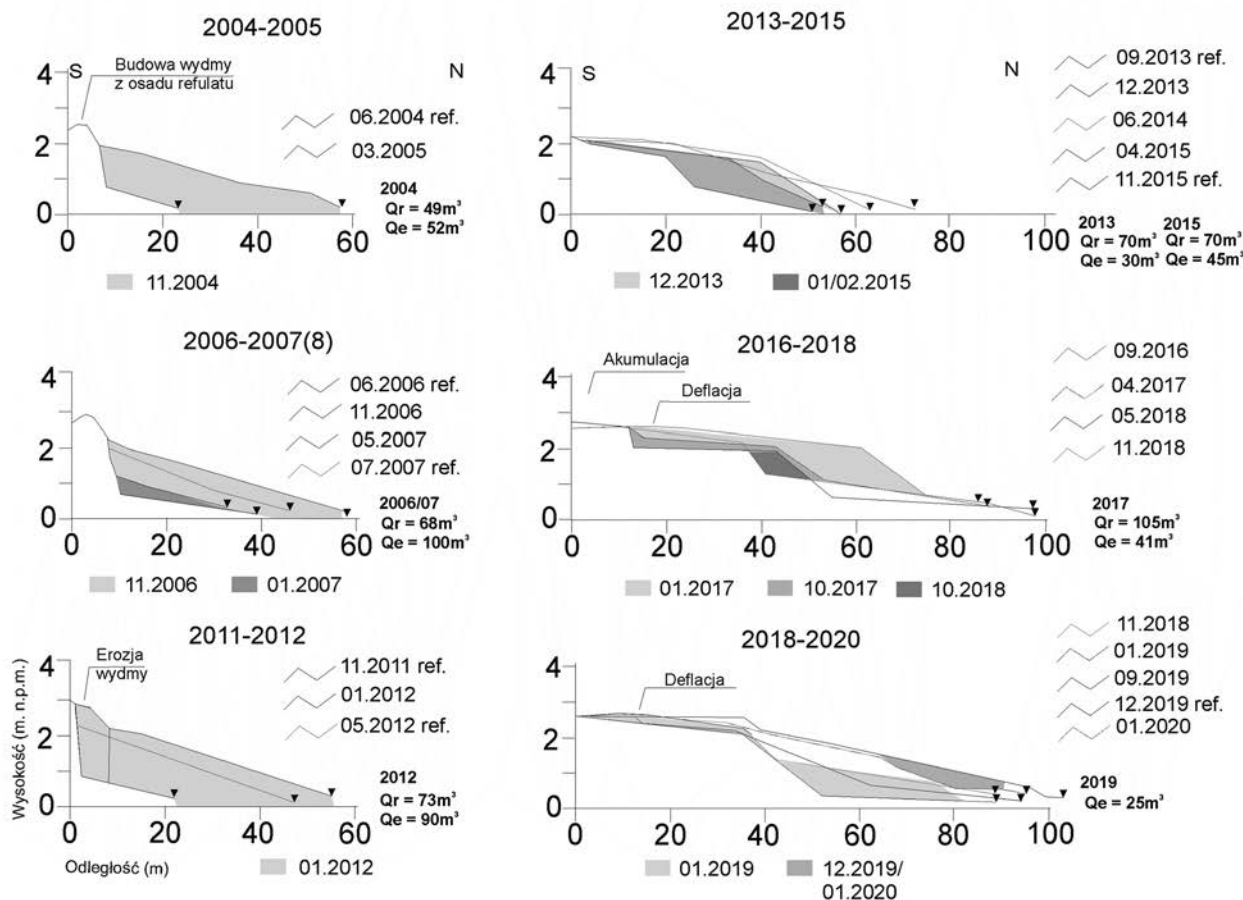
przedstawiono na rys. 3. Od 2004 roku od 1/2 do 3/4 refulatu było niszczone przez każdy kolejny silny sztorm. Plaża zwężała się do 10 ÷ 15 m, miejscami erodowana była także wydma. W latach 2004-2010 osad odkładano najczęściej dopiero rok po spiętrzeniach. Przez sezon turystyczny plaża była wąska i nisko położona nad poziom morza. Najwyższa na wysokości opaski odbijającej fale i zwiększającej przez to usuwanie osadu. Szczegółowe zmiany szerokości plaż w Łebie od 2010 roku pokazano na rys. 1c i 1d. W latach 2011-2014 w części zachodniej pomiędzy falochronem a opaską szerokość plaż wynosiła do 10 ÷ 20 m po sztormach i do 60 m po refulacji. W części środkowej i wschodniej szerokość plaży była zazwyczaj zbliżona, około 35 m. Na tym odcinku plaże szybciej się odbudowywały poprzez transport eoliczny osadu i prąd wzdłużbrzegowy, niosące osad z zachodu.

W kolejnych latach pomimo braku większej erozji osad odkładano na plaży w 2010 i 2011 r. Materiał wywiewany stale z refulatu akumulował się ponad opaską oraz na zapleczu plaży, powodując wzrost nowej wydmy przedniej (km 181,5 ÷ 182). Po mniejszym sztormie z końca 2011 i dwóch z początku 2012 roku cały odcinek ponownie zerodował. Po dwóch sztormach Andrea ze stycznia 2012 roku z poziomem morza do 635 cm plaże obniżyły się do około 1 m n.p.m. (rys. 3). Z refulatu o szerokości 40 ÷ 45 m pozostało jedynie do 5 m szerokiego nasypu ze skarpą

o wysokości 1,5 ÷ 2 m. Woda zabrała średnio do 50 m³ osadu na mb plaży i maksymalnie do 90 m³ przy opasce. Pomiędzy falochronem a opaską była niszczona wydma, co poskutkowało cofnięciem się jej podstawy o około 3 m. Po sztormach pod opaską plaża miała zaledwie 10 m szerokości i do 0,5 m wysokości (rys. 1c, 1d). Na pozostałym odcinku, aż do km 181 szerokość plaż nie była znacznie zmniejszona, wynosiła do 30 m. Jednak jej wysokość u podstawy wydmy nie przekraczała 1 m n.p.m. Na całym odcinku powstały erozyjne podcięcia w wydmy (km 182 ÷ 181). Na podmytym, wysokim stoku wydmy na km 181 powstały osuwiska niszczące kilkuletnie sosny. Po sztormach ze stycznia 2012 roku osad uzupełniano w maju w ilości 91 tys. m³, to jest 50 ÷ 80 m³ na mb plaży.

Podczas huraganu Xavier z grudnia 2013 roku bardzo silny wiatr zachodni o prędkości do 20 m/s nie spowodował dużego sztormu (poziom morza tylko 590 cm), ale plaże obniżyły się o 20 ÷ 30 cm w wyniku przewiania osadu w kierunku wschodnim. Z powodu deflacji powierzchnia refulatu przykryta była żwirem i fragmentami muszli. Był to najsilniejszy wiatr w XXI wieku do czasu wystąpienia huraganu Sabina w lutym 2020 roku. W latach 2013 i 2014 odłożono po 50 tys. m³ na km 182,3 do 181,5. Plaże miały szerokość 45 m i wysokość do 2,5 m n.p.m. Tylko w ciągu 4 lat, od 2011 do 2014 roku, odłożono już ponad 320 tys. m³ osadu.

Erozja refulatu (182,6 km)



Rys. 3. Przykład zmian profilu brzegu z powodu odkładania i erozji refulatu w latach 2004-2020

(Q_r – ilość odłożonego osadu przed sztormem, Q_e – ilość zerodowanego osadu przez sztorm (na metr bieżący), kolor szary – erozja przez sztorm w danym roku)

POCZĄTEK KOMPLEKSOWEJ OCHRONY W LATACH 2014-2016

W latach 2014-2016 wykonano bardziej złożoną i kosztowną inwestycję polegającą na budowie 2 km podwodnych progów, kilku ostróg oraz na znacznym poszerzeniu plaży. Projekt zaplanowano z powodu powtarzającej się erozji po spiętrzeniach z lat 2006-2012. Prace realizowano z kosztownego projektu z funduszy programu Infrastruktura i Środowisko pt. „Ochrona brzegów morskich na wysokości Łeby, Rowów i Ustki”. Na podobną skalę prace wykonano w Ustce oraz Rowach w ramach jednego projektu oraz wcześniej w Darłowie (2014) i Kołobrzegu (2012).

Progi podwodne konstruuje się jako pojedyncze lub ciągle podwodne wały wykonane z różnego materiału, od głazów po prefabrykaty lite lub ażurowe, czasem o nieregularnym kształcie i przebiegu oraz przypominające wały lub podwodną rafę [14, 15]. Progi często wykonane są jako pojedyncze wały rozdzielone przerwami, mającymi ułatwiać wymianę wody pomiędzy otwartym zbiornikiem a częścią przybrzeża nimi oddzieloną. Skutkuje to również transportem osadu do brzegu, umożliwiającym odbudowę plaż. Wybór długości progów, jego głębokości posadowienia i odległości od brzegu oddziałuje na transport osadu wzdłuż brzegu [15].

Podwodny próg wybudowany w Łebie składa się z dwóch części: dłuższego na 1750 m, położonego pomiędzy km 182,6 i 181 i krótszego długości 550 m pomiędzy km 181 ÷ 180. Zbudowany jest z odcinków długości do 120 m, rozdzielonych przerwami. Położone są około 200 m od brzegu na głębokości około 2,5 ÷ 3,0 m (rys. 1b). Zanurzenie progów to około 0,7 ÷ 0,9 m p.p.m.

Ostatni refulat przed inwestycją, odłożony w 2014 roku, został w 2/3 zniszczony na początku 2015 roku. W trakcie prac prowadzonych przy budowie progów i ostróg w styczniu i lutym 2015 roku wystąpiły dwa sztormy Felix i Ole z poziomem morza do 582 cm. Spiętrzenia zniszczyły refulat z 2014 roku, pozostawiając do 10 ÷ 15 m szerokości osadu zakończonego skarpą erozyjną o wysokości do 1,5 m (km 182). W części wschodniej woda podchodziła do podstawy wydmy, nie powodując jej erozji. Jednak to spiętrzenie spowodowało erozję na wschodnim zakończeniu budowanego progów na wysokości km 180. Pierwszy raz od wielu lat niszczone była wydma rozrastająca się do 2010 roku, a powstająca od 2004 roku. Cofnięcie podstawy sięgało 6 m. Przyczyną było przeniesienie energii falowania hamowanej przez progi na odcinek na ich zakończeniu.

Pod koniec 2015 roku rozpoczęto wykonywanie refulacji w ramach wspomnianego projektu. Odłożono 200 tys. m³ osadu, tym razem pochodzącego ze złóż morskich. Osad odłożono na 2 kilometrowym odcinku od falochronu do km 180. Wiosną 2016 roku odbudowana plaża miała 80 m szerokości i do 3 m wysokości n.p.m., to jest średnio 100 m³/mb i maksymalnie około 160 m³/mb brzegu na odcinku km 182 ÷ 183 przy hotelu Neptun (rys. 3). Mniejszą refulację wykonano w części wschodniej na km 181 ÷ 182. Działanie spowodowało znaczne poszerzenie plaż i podniesienie do ponad 2,2 m n.p.m. w części zachodniej odcinka (rys. 1c, 1d). Szerokość plaż zwiększono do 80 m.

Pierwsze oddziaływanie progów podczas falowania sztormowego i trwałość refulatu obserwowano już na początku 2016 roku. Po niewielkim spiętrzeniu sztormowym z początku 2016 roku refulowana plaża kończyła się skarpą o wysokości

do 1,5 m. Erozja była jednak niewielka. Plaże uległy nawet poszerzeniu na odcinku z ostrogami w wyniku wytrącenia osadu z wygaszanego falowania rozmywającego skarpę refulatu. Ich szerokość wzrosła do 95 ÷ 106 m. Niewielką erozję dolnej części plaży obserwowano podczas kilku jesiennych spiętrzeń sztormowych z 2016 roku z poziomem morza do 574 cm, w tym Angus z początku października. Przy takim poziomie woda zazwyczaj rozmywa plaże maksymalnie do wysokości 1,2 ÷ 1,4 m n.p.m. Nie niszczyła więc refulatu zakończonego skarpą o wysokości ponad 2 m. Progi ograniczyły erozję, przyczyniając się do poszerzenia plaż, ale osadem z rozmytego refulatu. Ten proces obserwowano również po sztormach w kolejnych latach.

DYNAMIKA PLAŻY I REFULACJE UZUPEŁNIAJĄCE PO WYBUDOWANIU PROGÓW W LATACH 2017-2020

Podczas dużego spiętrzenia Axel z początku stycznia 2017 roku z poziomem morza 623 cm plaże do wysokości 2,5 m n.p.m. znalazły się pod wodą. W zachodniej części, pomiędzy falochronem a ostrogami refulat został zwięziony o 10 ÷ 20 m. W środkowej części sztucznie odtworzonego odcinka zwięzienie sięgało do 10 m. Straty refulatu wynosiły zaledwie 23 m³/mb plaży. Największa erozja refulatu wystąpiła w części wschodniej, w przerwie między progami na km 181 oraz na jego wschodnim zakończeniu, to jest na km 180. Na km 181 na metr bieżący ubyło aż 51 m³ refulatu i 20 m³ uprzednio poszerzonej naturalnie plaży. Maksymalna erozja wyniosła do 75 m³/mb plaży. Łącznie sztormy zabrały do 1/4 sztucznie odtworzonej plaży w części zachodniej i 2/3 w części wschodniej. W części środkowej osłoniętej progami i wzmocnionej ostrogami (km 181,5 ÷ 182,6) erozja wynosiła od 15 do 22 m³/mb.

W wyniku akumulacji eolicznej spowodowanej przez silny wiatr, dochodzący do 17 m/s z kierunku od WNW do NNE, wzrosła o 10 ÷ 20 cm wysokość refulowanej plaży w części górnej u podstawy wydmy. Wał wydmy był również nadbudowany o 10 ÷ 15 cm. Po obniżeniu poziomu morza do średniego, na wysokości ostróg, plaża została poszerzona osadem z rozmycia refulatu, tworząc nadbudowaną niską powierzchnię o szerokości 15 ÷ 20 m. Od tego czasu w kształcie refulowanej plaży zachował się stromy próg podcienia o wysokości do 2 m.

Podczas tego spiętrzenia progi osłoniły szeroki refulat przed erozją tylko w części środkowej. Jego dolna część została obniżona i uległa zwięzieniu o 10 ÷ 15 m. Podwodne progi nie są w stanie skutecznie hamować abrazji brzegu podczas największych ponadprzeciętnych spiętrzeń sztormowych. Podczas wzrostu poziomu wody w trakcie spiętrzenia sztormowego zanurzenie progów wzrasta, co powoduje swobodniejsze przelewanie się fal na ich zaplecze i erozję brzegu [19].

Po sztormach w październiku 2017 i 2018 roku refulat plaży cofnął się o kolejne 2 m w rejonie hotelu Neptun. W obu latach był rozmywany znacznie na km 181 brzegu, w ilości do 20 ÷ 30 m³/mb osadu plaży. W części wschodniej na km 180, gdzie kończy się próg podwodny, erodowana była wydma (początek erozji tuż po wybudowaniu progów w 2015 roku). W latach 2017 i 2018 refulaty uzupełniano w miejscach największej erozji. Osad pochodził z pogłębiania toru wodnego w porcie w ilości około 17 tys. m³ na rok. Odłożono go na km 181 ÷ 181,4, w ilości do 68 m³/mb w grudniu 2017 i 60 m³/mb w grudniu 2018.

W styczniu 2019 roku sztorm Zeetje przy poziomie morza 607 cm erodował refulat w ilości 34 m^3 osadu na mb. Na całym odcinku refulat został zwężony z $60 \div 80 \text{ m}$ do $40 \div 60 \text{ m}$. Po między km 182,5 a 181,5 w środkowej części refulowanej plaży powstała skarpa o wysokości $1 \div 1,3 \text{ m}$. Na km 180,5 $\div$ 181 napływ sięgał wysokości 2,6 m n.p.m. i erodował wał wydmy. Na linii zasięgów napływu na plażę z pozostawionej materii organicznej po sztormach z 2017 i 2019 roku zaczęły wyrastać trawy wydmy, które powodują rozwój niewielkich wydymbrionalnych (km 181,5).

Odbudowana plaża była ponownie erodowana jesienią 2019 roku przez 4 spiętrzenia sztormowe z poziomem morza do 565 cm. Podczas sztormu Ignaz, z początku września, połowa pozostałego refulatu w części wschodniej plaży została rozmyta (km 181). W trakcie sztucznego zasilania w grudniu 2019 roku wystąpiło spiętrzenie, które ponownie obniżało plażę pomiędzy km 180 a 181. Napływ sięgał 1,4 m n.p.m., powodując zatapiając naturalnie poszerzonej plaży u podstawy refulatu w części zachodniej i środkowej obszaru (km 181,5 $\div$ 183). Na początku stycznia 2020 roku sztorm Fabian z poziomem 570 cm zwęził plażę o $8 \div 15 \text{ m}$. Napływ sięgał podnóża skarpy refulatu, nie powodując jego erozji. Kolejne podcinanie refulatu przy falochronie i na odcinku przerwy między progami wystąpiło podczas trzech spiętrzeń w lutym 2020 roku z poziomem morza do 560 cm, w tym huraganu Sabina przy wietrze dochodzącym do 18 m/s z kierunku WSW w dniach 10-12 lutego (poziom morza 565 cm). Przy takim poziomie morza refulat osłonięty progami nie był niszczone, ale podlegał znacznej deflacji.

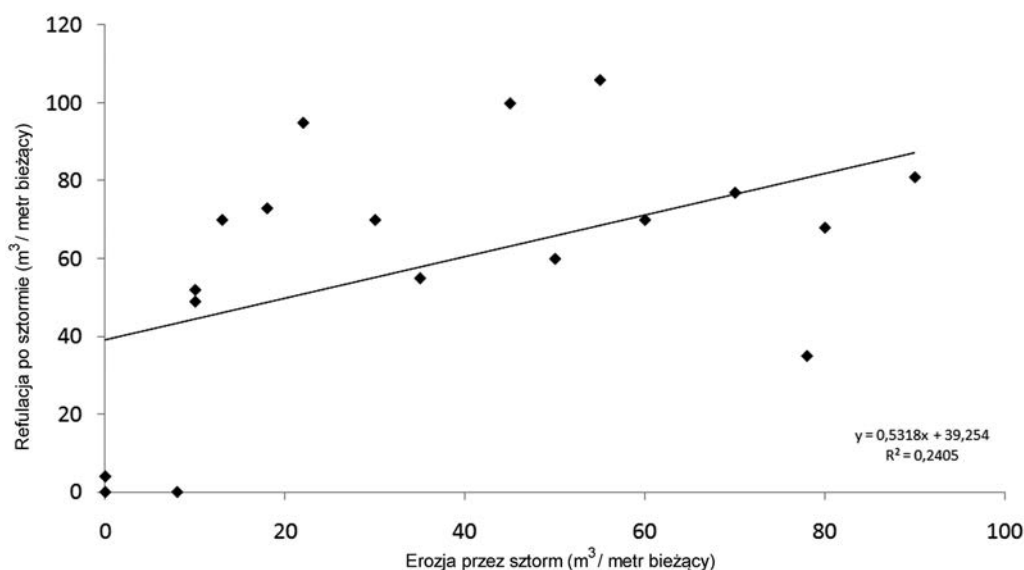
WNIOSKI

Od początku XX wieku z powodu spiętrzeń sztormowych i obecności falochronów odcinek po wschodniej stronie ujścia Łeby jest stale erodowany na odcinku km 181 $\div$ 183. Od 1992 roku plaże były sztucznie zasilane osadem pochodzącym z pogłębiania toru wodnego i podejścia do portu. Zestawienie wielkości refulatu na metr bieżący linii brzegowej morza w relacji do erozji wykazuje zależności przedstawione na rys. 4.

Im większa była w danym roku erozja, tym więcej osadu było odkładane po sztormie. Po 2006 roku refulację prowadzono już na ponad 2 km odcinku brzegu. Odbudowane plaże były zawsze za niskie w porównaniu do napływu podczas sztormów z lat 2002-2012. Wysokość plaż nie przekraczała 2,5 m, a spiętrzenia sięgały do 3,5 m n.p.m. Powodowało to erozję całego odłożonego refulatu. Silne sztormy z poziomem morza 1 m ponad średni zabierały od 60 do 90% odłożonego w roku poprzednim osadu.

Refulowana plaża jest formą dynamiczną, jej wysokość wzrasta w wyniku transportu eolicznego, który powoduje także powstawanie nowych wydym, zasypujących dawno ustabilizowane. Silne wiatry z kierunku W powodowały zwiewanie osadu z refulatu i jego przenoszenie na wschód, gdzie odbudowują się wydmy. Refulat w części zachodniej ulegał więc obniżaniu o $10 \div 20 \text{ cm}$ po każdym silnym wietrze. W latach 1992-2004 z osadu refulatu powstawała wydma na km 181. Po wydłużeniu strefy refulacji na wschód w latach 2006-2014 szybko powstała wydma na km 180. Wiatry sztormowe z kierunku odmorskiego nawiewają osad na zaplecze, formując nowe wydmy przednie na zapleczu plaż. Wiatry silne i częste z sektora SW powodują zwiewanie osadu do morza. Refulat w części zachodniej zawsze obniżał się (km 183 $\div$ 182,5), a jego wysokość wzrastała w części środkowej (km 181 $\div$ 182).

W XXI wieku największa erozja dochodziła do $70 \div 90 \text{ m}^3/\text{mb}$ plaży podczas spiętrzeń przekraczających poziom morza 600 cm. Uzupełniany po nich refulat wynosił $60 \div 100 \text{ m}^3/\text{mb}$. Do 2014 roku największe spiętrzenia zabierały praktycznie 80% osadu odłożonego w roku poprzednim. Najwięcej osadu odłożono po sztormach z lat 2004, 2006/07, 2009 i 2012. Sztormy te po usunięciu refulatu oraz na odcinku bez sztucznego zasilania powodowały erozję wydym, w tym zniszczenie do 2012 roku wysokiego na 5 m wału w części wschodniej (km 181). Po zastosowaniu progów podwodnych refulacja z 2015 roku była niszczone w 2017 i 2019 roku w ilości do $20 \text{ m}^3/\text{mb}$. Część rozmytego osadu pozostawała na poszerzonej naturalnie plaży. W części wschodniej analizowanego odcinka (km 181) spiętrzenia sztormowe z lat 2017-2019 w przerwie pomiędzy progami zabierały do 3/4 refulatu w ilości $35 \div 60 \text{ m}^3/\text{mb}$.



Rys. 4. Zależność wielkości refulacji plaży po sztormie od wielkości erozji (w m sześciennych na metr bieżący)

Budowa progów podwodnych wzmocnionych ostrogami powstrzymała erozję większości refulatu w części środkowej odcinka. Pomiędzy ostrogami w części dolnej plaży jest okresowo poszerzana. Największy jej przyrost, o ponad 20 m, wystąpił w latach 2016-2020 w części wschodniej na zakończeniu grupy ostróg.

Progi zmniejszają falowanie, jednak podczas wysokich spiętrzeń sztormowych poziom wody nad nimi sięga ponad 1,5 m, a fale przechodzą swobodnie i erodują refulat. Erozja jest mniejsza w porównaniu z okresem poprzednim. Stale jednak obniża się wysokość refulatu, co będzie skutkować erozją i potrzebą jego uzupełnienia. Zastosowane zabiegi przyczyniły się do wyhamowania tempa erozji plaż w Łebie, ale spowodowały erozję na zakończeniu powstałego progu podwodnego, na odcinku naturalnym, który dotychczas wykazywał tendencje akumulacyjne (km 180). Ponadto erozja postępuje nadal przy falochronach oraz w przerwie pomiędzy progami (km 183 i 181). Wraz z dalszym wzrostem poziomu morza i liczby spiętrzeń sztormowych będą rosły koszty powstrzymania erozji brzegu na badanym odcinku.

LITERATURA

1. Cieślakiewicz W., Paplińska-Swepel B.: A 44-year hindcast of wind wave fields over the Baltic Sea. *Coastal Engineering* 55(11), 2008, 894-905.
2. Dziadziuszko Z., Jednorat T.: Wahania poziomów morza na polskim wybrzeżu Bałtyku, *Studia i Materiały Oceanologiczne* 52(6) *Dynamika Morza*, Ossolineum, 1988, 215-238.
3. Dziedzic W.: Zagrożenia i ochrona brzegu morskiego Wybrzeża Środkowego w pracach Urzędu Morskiego w Słupsku w latach 2005-2006, *Czas Morza* 3 (24), grudzień 2005, 7-10.
4. Hartnack W.: Die Küste Hinterpommerns unter besonderer Berücksichtigung der Morphologie. *Jahrbuch der Pommerschen Geographischen Gesellschaft*, Bd. 43/44, Greifswald, 1926.
5. Kaczmarek L. M., Mielczarski A., Ostrowski R.: Zastosowanie nowego modelu transportu osadów do oceny zapiaszczania portowych torów podejściowych, *Inżynieria Morska i Geotechnika* 21, Gdańsk, 1997, 113-117.
6. Łabuz T. A.: Brzegi wydymowe polskiego wybrzeża Bałtyku. *Czasopismo Geograficzne* 76 (1-2), 2005, 19-47.
7. Łabuz T. A.: Polish coastal dunes – affecting factors and morphology, *Landform Analysis*, 22, 2013, 33-59.
8. Łabuz T. A.: Raport: Sposoby ochrony brzegów morskich i ich wpływ na środowisko przyrodnicze polskiego wybrzeża Bałtyku. Wydawnictwo Fundacja WWF, Warszawa 2013.
9. Łabuz T. A.: Environmental Impacts - Coastal Erosion and Coast-line Changes. Chapter 20. In: BACC II Team, Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, Springer, 2015, 381-396.
10. Łabuz T. A.: Coastal dunes landscape change in Poland – research method based on photography studies, w: Thornbush M. J., (ed) *Photogeomorphology and Landscape Change*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2016, 79-98.
11. Majewski A.: Katastrofalne sztormy i powodzie u południowych brzegów Morza Bałtyckiego, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/1998, 67-69.
12. Majewski A., Dziadziuszko Z., Wiśniewska A.: Monografia powodzi sztormowych 1951-1975. Ogólna charakterystyka powodzi sztormowych u polskiego wybrzeża Bałtyku, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
13. Onoszko J.: Problematyka morskiej inżynierii brzegowej w Polsce. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/1999 278-288.
14. Silvester R., Hsu J. R.: Coastal stabilization. *Advanced Series on Ocean Engineering – Vol 14*, World Scientific, 1997.
15. Sorenson R. M.: Basic coastal engineering. Chapman & Hall, New York 1997.
16. Stanisławczyk I., Bolek A., Kubicka A., Kowalska B.: Poziom morza. W: Miętus M., Sztobryn M., (red.), *Stan środowiska polskiej strefy przybrzeżnej Bałtyku w latach 1986-2005*. IMGW, Warszawa 2011.
17. Sztobryn M., Stigge H.-J., Wielbińska D., Weidig B., Stanisławczyk I., Kańska A., Krzysztofik K., Kowalska B., Letkiewicz B., Mykita M.: Storm Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts). *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*, Nr 39/2005.
18. Trzeciak S.: Wiatry sztormowe na polskim wybrzeżu Bałtyku. Wydawnictwa Wyższej Szkoły Morskiej nr 36, Szczecin, 2001.
19. van Rijn L. C.: Coastal erosion and control, *Ocean & Coastal Management*, 54 (12), 867-887, 2011.
20. Wiśniewski B., Wolski T.: Katalogi wezbrań i obniżeń sztormowych poziomów morza oraz ekstremalne poziomy wód na polskim wybrzeżu. Wydawnictwo Akademia Morska, Szczecin, 2009.
21. Wolski T.: Czasowa i przestrzenna charakterystyka ekstremalnych poziomów wód Morza Bałtyckiego. *Uniwersytet Szczeciński Rozprawy i Studia T. (MXXVI) 952*, Szczecin, 2017.
22. Wróblewski A.: Analysis and forecast of long-term sea level changes along the Polish Baltic Sea coast. Part I. Annual sea level maxima. *Oceanologia* 33, 1992, 65-85.
23. Zawadzka-Kahlau E.: Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku Południowego. *Gdańskie Towarzystwo Naukowe*, Gdańsk 1999.
24. Zeidler R. B., Wróblewski A., Miętus M., Dziadziuszko Z., Cyberski J.: Wind, wave and storm surge regime at the Polish Baltic coast. In: Rotnicki K., (ed.), *Polish coast: past, present, future. Journal of Coastal Research, Special Issue* 22, 1995, 33-55.