



Erozja wydm na mierzejach Zatoki Koszalińskiej jako efekt ponadprzeciętnych zdarzeń sztormowych Barbara i Axel z przełomu 2016 i 2017 r.

Erosion of sandbar dunes of Koszalin Bay resulting from extreme storm events Barbara and Axel from the turn of 2016 and 2017

Tomasz A. Łabuz

Uniwersytet Szczeciński, Instytut Nauk o Morzu
ul. Mickiewicza 16, 70-383 Szczecin
tomasz.labuz@usz.edu.pl

Zarys treści. W prezentowanej pracy dokonano oceny wpływu wezbrań sztormowych z sezonu jesienno-zimowego 2016/2017 na zmiany ukształtowania wybrzeża środkowego pomiędzy Kołobrzegiem i Jarosławcem, należącego do Zatoki Koszalińskiej. Jest to obszar zachodniej i środkowej części Pobrzeża Koszalińskiego. Analiza obejmuje cykl kilku spiętrzeń, w tym znacznych o nazwach Angus, Barbara i Axel z przełomu roku 2016/2017. Spiętrzenia te spowodowały obniżenie plaż o 1–1,2 m wysokości i miejscami zwężenie o 10–15 m. Osad z rozmytych wydm utworzył rozległy wał brzegowy i został odłożony w płytkim podbrzeżu. Wydmę cofnęły się średnio o 2–6 m. Powstały wysokie podcięcia klifowe wydm, a po sztormach w miesiącach wiosennych – liczne osuwiska. Erozja spowodowała ubytek do 20–30 m³ osadu w wałach wydmowych. Uszkodzona została infrastruktura, w tym większość zejść i zjazdów na plaże. W wielu miejscach woda wdarła się na ląd, pozostawiając tak zwane stożki spiętrzeń sztormowych. Określone parametry zmian nadbrzeży i brzegu pozwalają twierdzić, że była to erozja wybrzeża porównywalna do ekstremalnych stuletnich spiętrzeń sztormowych. Sekwencja silnych sztormów z okresu jesienno-zimowego 2016/2017 spowodowała w wielu miejscach cofnięcie nadbrzeży do stanu z lat 80. XX w.

Słowa kluczowe: erozja wydm, zmiany morfologiczne wybrzeża, stożki spiętrzeń sztormowych, ekstremalne sztormy, Zatoka Koszalińska.

Wstęp

W wyniku wzrostu poziomu morza i częstości występowania silnych spiętrzeń sztormowych wydmy nadmorskie na polskim wybrzeżu zagrożone są erozją. Na większości polskiego wybrzeża zbudowanego przez wydmy widoczne jest jego cofanie (Zawadzka-Kahlau, 1999, 2012; Łabuz, 2005, 2013) średnio około 0,9 m na rok (Zawadzka-Kahlau, 1999; Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006). Nisko położone nadmorskie obszary lądowe zagrożone są podtopieniami (Rotnicki i inni,

1995; Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006). Zagrożenie to i skala erozji wzrasta w związku ze stałym podnoszeniem się poziomu morza (Zeidler i inni, 1995; Zawadzka-Kahlau, 1999). Przyjmuje się, że kolejne spiętrzenia sztormowe pojawiają się częściej i z większą energią falowania, a średni poziom morza w portach nadbałtyckich wzrasta co roku (Zeidler i inni, 1995; Sztobryn i Stigge, 2005). Określenie tempa cofania się nadbrzeży i rejonów występowania erozji wybrzeża wymaga prowadzenia nieustannych pomiarów oraz monitoringu. Ma ono na celu podjęcie działań zabezpieczających i rekonstrukcyjnych plaż oraz nadbrzeży lądowych (Boniecka, 2000; Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2015).

Warunki powstawania i parametry spiętrzeń (wezbrań) sztormowych na polskim wybrzeżu zostały omówione szczegółowo w wielu pracach (Dziadziuszko i Jednorat, 1987; Zeidler i inni, 1995; Sztobryn i Stigge, 2005). Określono ich wpływ na dynamikę i ukształtowanie wybrzeża (Zawadzka-Kahlau, 1999, 2012; Boniecka, 2000; Pruszek i Zawadzka, 2005; Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006; Furmańczyk i inni, 2012; Łabuz i Kowalewska-Kalkowska, 2011; Łabuz, 2009, 2011, 2014). Obserwowane zmiany brzegu i nadbrzeża uwarunkowane są czynnikami hydrometeorologicznymi, decydującymi o rozwoju spiętrzeń sztormowych (Dziadziuszko i Jednorat, 1987; Borówka, 1999; Boniecka, 2000; Johansson i inni, 2001; Miętus i inni, 2004; Sztobryn i Stigge, 2005; Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006, 2015; Koźmiński i inni, 2007; Tarnowska, 2011; Wolski i inni, 2014). Spiętrzenia sztormowe wywoływane są przez zmienne układy ciśnienia i wiatry o dużej prędkości, wiejące z sektora odmorskiego (NW-N-NE) w kierunku brzegu morskiego. Procesy te ulegają intensyfikacji w sezonie jesienno-zimowym. Najwyższe spiętrzenia sztormowe na polskim wybrzeżu obserwuje się od listopada do lutego (Johansson i inni, 2001; Miętus i inni, 2004; Sztobryn i Stigge, 2005; Wolski i inni, 2014; Wolski, 2017).

Od wielu lat prowadzone są badania nad modelem zmian brzegu wydmowego w wyniku spiętrzenia sztormowego (Van de Graaff, 1986; Davidson-Arnott, 2005; Kowalewska-Kalkowska i Kowalewski, 2005; Roelvink i inni, 2009; Hünicke, 2010; Kowalewski i Kowalewska-Kalkowska, 2011). Wykonywane są również eksperymenty terenowe i analizowane powstające formy erozyjne (Van de Graaff, 1977; Basiński, 1995; Carter i inni, 1990; Davidson-Arnott, 2005; Tönisson i inni, 2008; Van Rijn, 2009; Van Thiel de Vries, 2009; Łabuz, 2011). Nadal jednak istotne jest określenie wielkości erozji brzegu morskiego i przyległego nadbrzeża lądowego strefy brzegowej w celu ustalenia zależności pomiędzy parametrami spiętrzeń a erozją nadbrzeży i brzegu morskiego.

W pracy tej nadbrzeże rozumiane jest jako lądowa, nadwodna część wybrzeża, niezalewana przez morze. Na wybrzeżu mierzejowo-wydmowym stanowią je wały wydmy nadmorskich i rozdzielające je rynny międzywydmowe oraz obniżenia pokryte piaskami eolicznymi, zaś na wybrzeżu morenowym – wierzchowiny i krawędzie oraz stoki klifów. Brzeg to obszar plaży lub platformy abrazyjnej wyciętej w glinach morenowych, okresowo zalewanej lub odsłanianej przy zmia-

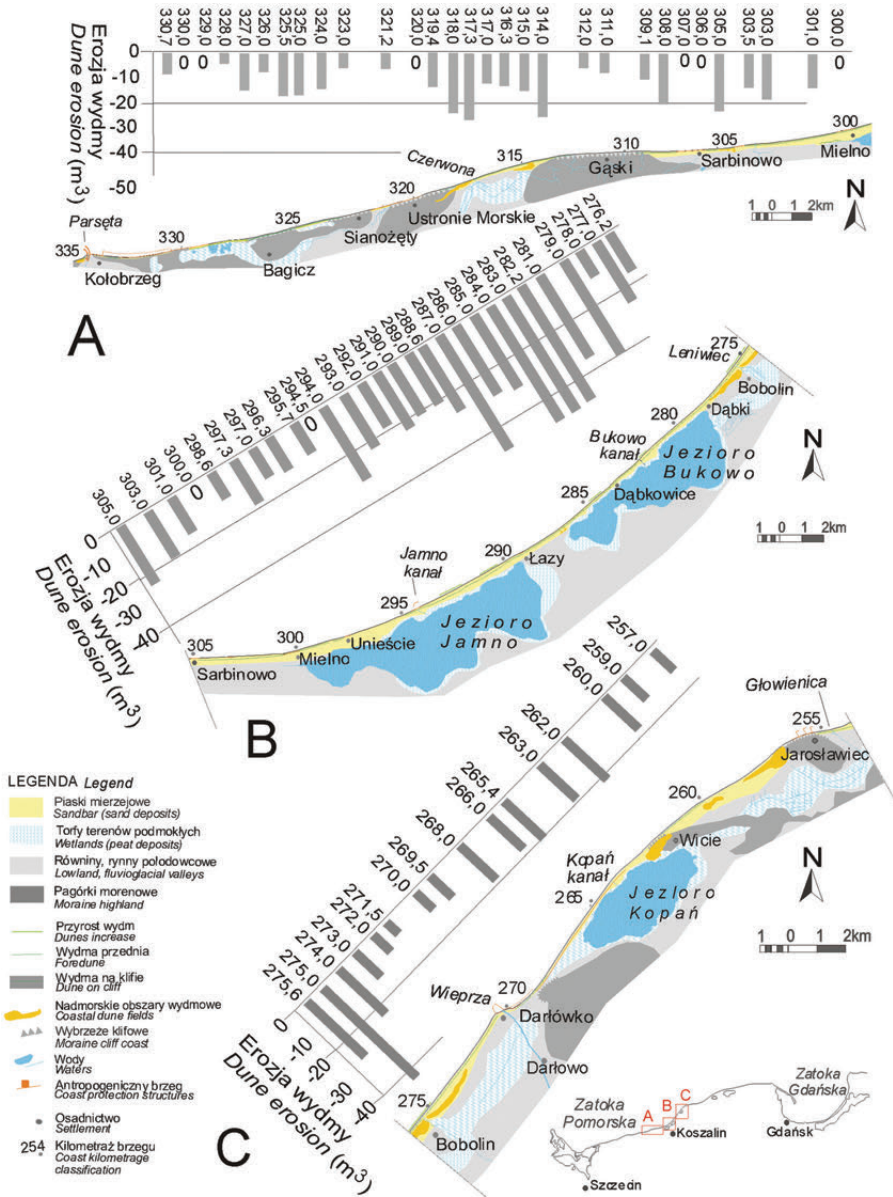
nach poziomemu morza. W górnej części plaży powstają okresowo lub trwale wydmy embrionalne – formy inicjalne, które mogą się przekształcić w wydmy przednie w wyniku stałego rozwoju (akumulacji eolicznej). Podbrzeże to podwodna część wybrzeża, stanowiąca dno morza w strefie płytkowodnej, gdzie falowanie wpływa na przebudowę osadu.

Mając na uwadze wzrost zagrożenia stabilności wybrzeża ze strony morza przeanalizowano zmiany morfologiczne wybrzeża w Zatoce Koszalińskiej na odcinku Kołobrzeg – Jarosławiec, na podstawie pomiarów geodezyjnych nadbrzeży wydmy przednie przed i po spiętrzeniach sztormowych z sezonu jesienno-zimowego 2016/2017. Celem badań było określenie wielkości erozji, obliczonej dla podstawowych parametrów morfologicznych brzegu i nadbrzeża z powodu zaistniałych sztormów. Ponadto celem było wykazanie istniejących i potencjalnych zagrożeń dla stabilności wybrzeża na obszarach zagospodarowanych.

Morfologia, budowa i ochrona wybrzeża w rejonie badań

Teren badań należy do zachodniej i środkowej części Pobrzeża Koszalińskiego (ryc. 1). Obejmuje on odcinek wybrzeża o urozmaiconym ukształtowaniu i długości 75 km, od 255 (Jarosławiec) do 330 kilometra (Kołobrzeg) (według kilometrażu wybrzeża Urzędu Morskiego). Prace badawcze wykonywane na tym odcinku w latach 60. (Bohdziewicz, 1963) i 90. (Racinowski i inni, 1995), wskazują na przewagę procesów erozji. Według analiz Zawadzkiej-Kahlau (1999) na podstawie map topograficznych w różnych skalach, na tym odcinku od lat przeważała erozja i cofanie się podnóża wydmy/klifu do 1 m na rok. Badania prowadzone przez autora od 2002 r. w kilkuletnich odstępach czasu wskazują w wielu miejscach na erozję rzędu 1,5 m na rok. Dotyczy to przede wszystkim mierzei jezior Jamno, Bukowo i Kopań (Łabuz, 2003a, 2012, 2013). Plaże na całym odcinku są wąskie (do 25–35 m) i nisko położone, nie zapewniają więc ochrony lądu podczas sztormów. Niewielka ilość osadu piaszczystego na plaży powoduje, że często w okresie wiosennym odsłaniana jest platforma abrazyjna zbudowana z gliny i żwirów lub wychodnie torfów, rozwiniętych na glinach den pradolin. W związku z brakiem prac badawczych opisujących morfodynamikę tego odcinka wybrzeża, w niniejszym artykule podawane są informacje uzyskane podczas własnych badań prowadzonych od 1998 r. i często dotychczas niepublikowanych.

Część zachodnia badanego odcinka linii brzegowej od Kołobrzegu do Mielna (ryc. 1A) przebiega z kierunku WSW do NNE (330–300 km według klasyfikacji kilometrażu linii brzegowej). W tym rejonie, pomiędzy niskimi wysoczyznami moreny dennej budującej wybrzeże i brzeg morski, występują krótkie odcinki wydmy przednie, zamykające wąskie i krótkie pradoliny, z obecnym ujściem rzeki Czerwonej i rozległym obszarem bagiennym (Ekopark Wschodni), położonym pomiędzy Kołobrzegiem a Bagiczem (fot. 1, ryc. 5a). Wybrzeże jest tu niskie (do 6 m n.p.m.),



Ryc. 1. Lokalizacja profili pomiarowych i erozja nadbrzeża na środkowym wybrzeżu w Zatoce Koszalińskiej po sekwencji sztormów z sezonu 2016/2017
 A – odcinek morenowo-wydmy Kolobrzeg – Mielenka, B – mierzeje jezior Jamno i Bukowo, C – ujścia rzek Leniwca, Wieprzy i mierzeja jeziora Kopań
 Location of measured cross-sections and erosion on the middle coast of Koszalin Bay following the storm surges of the 2016/2017 season
 A – section of the Kolobrzeg – Mielenka moraine-dunes, B – section of the Lakes Jamno and Bukowo sandbars, C – section of the mouths of the Leniwiec and Wieprza and the Lake Kopań sandbar
 Opracowanie własne/Author's own elaboration.

miejskami osiąga tylko 2–3 m wysokości (328 km, 321 km, 317 km). Dominuje typ wybrzeża zbudowanego z niskiego klifu morenowego, miejscami z pokrywowymi piaskami eolicznymi (Tomczak, 1995). W rejonie Sianożęty – Ustronie Morskie i Gąski wybrzeże buduje wysoczyzna morenowa, zakończona klifem o wysokości do 11 m n.p.m. W wielu miejscach niskie wybrzeże morenowe z aktywnym klifem pokrywają piaski wydymowe – tzw. wydmy nakrawędziowe (Bohdziewicz, 1963). U podstawy klifu miejscami rozwija się wydma przednia (np. 323 km, 314 km).

Pomiędzy Gąskami a Sarbinowem niski klif nadmorski zastępują miejscami krótkie odcinki wydymowe (np. 309 km). Odcinki te to najczęściej bardzo krótkie, do 50 m długości brzegu, strefy piasków eolicznych, rozwiniętych na płytko zalegającym podłożu torfów i glin, które po spiętrzeniach sztormowych tworzą wychodnie budujące platformy abrazyjne. Na wschód od Ustronia Morskiego występuje nisko położone nadbrzeże z pokrywami eolicznymi. W bliskim sąsiedztwie jego krawędzi występuje wał poprzecznych wydm do wysokości 18 m n.p.m. Są to ustabilizowane dawne wydmy ruchome, powstałe w wyniku przewiania piasku ze strefy brzegowej w głąb łądu. Jego geneza nie jest ustalona, przypuszczalnie zbudowany jest z piasków odkładanych na brzegu, a dostarczanych przez dawne rzeki, uchodzące do morza odcinkami pradolinnymi w rejonie Sianożętów i na wschód od Ustronia Morskiego. Przy ujściu rzeki Czerwonej ten wysoki wał jest obecnie w fazie abrazyj morskiej.

Cały odcinek brzegu od Kołobrzegu do Ustronia Morskiego cechuje erozja, stąd w miejscach występowania osadnictwa zastosowano szereg zabiegów technicznej ochrony brzegu. Są to opaski z kamienia łamanego i tetrapod (zamienionych częściowo na kamień łamany w 2015 r.) np. w Kołobrzegu, Sianożętach i Ustroniu Morskim (ryc. 5a, profil 320 km), ścianki stalowo-betonowe w Sarbinowie i Kołobrzegu, mieszane opaski w Chłopach, falochrony podłużne w Kołobrzegu (z 2012 r.) i liczne, stare już i nieefektywne ostrogi w Kołobrzegu i Ustroniu Morskim. Ponadto w Kołobrzegu, Ustroniu Morskim oraz Darłównu stosowana jest od kilku lat refulacja plaży (w Kołobrzegu od 1992 r., w pozostałych od drugiej połowy lat 90.), którą po 2–3 latach cyklicznie się powtarza. W kolejnych latach planuje się nowe formy ochrony na odcinku Sarbinowo – Unieście (w 2018 r. przystąpiono do prac inżynierskich), które uzupełnią ostatnie zabiegi dodane w 2015 r. – nadbudowa opaski w Sarbinowie, umocnienie w Chłopach, budowa zbędnego, w opinii autora, falochronu przy kanale Jeziora Jamno (z niepotrzebnie uregulowanym w 2012 r. jego ujściem oraz tzw. wrotami sztormowymi). Cały praktycznie odcinek brzegu od Kołobrzegu po Unieście jest uważany za zagrożony erozją. Świadczą o tym ponad dwudziestokilometrowej długości umocnienia brzegu i nadbrzeża. W wielu miejscach tego odcinka wybrzeże wydymowe zastępowane jest przez klify morenowe o wysokości 3–10 m n.p.m.

Część wschodnia wybrzeża od Mielna przez Dąbki, Darłówno do Jarosławca, to pas wąskich mierzei o orientacji brzegu eksponowanej na częste i silne spiętrzenia sztormowe oraz wiatry z sektora północno-zachodniego. Mierzeje te od-

cinają od morza trzy duże, płytkie jeziora przybrzeżne otoczone zabagnionymi pradolinami pokrytymi torfami o wysokości do 2 m n.p.m., (ryc. 1B, C). Torfy te miejscami zalegają bezpośrednio na glinie zwałowej, co dokumentują odsłonięcia po sztormach w łąkach czy Dąbkach. Na tym odcinku do morza uchodzą kanały z jezior przybrzeżnych oraz rzeki Leniwiec koło Bobolina i Wieprza w Darłównku. Przebieg linii brzegowej tego odcinka odbiega od typowego dla polskiego wybrzeża kierunku jej ekspozycji. Od Unieścia linia brzegowa zmienia kierunek z SW ku NE. Brzeg jest więc eksponowany na kierunki wiatrów i sztormów z W do NW. To odcinek brzegu morskiego wyjątkowo narażony na dominujące na polskim wybrzeżu wiatry z W i sztormy z NW. Z tego powodu na całym tym odcinku plaże są zawsze węższe i niższe niż na pozostałym polskim wybrzeżu, a wydmy nadmorskie są porozcinane licznymi rynnami deflacyjnymi. Wał nadbrzeżny jest wąską formą najczęściej z podcięciem erozyjnym po poprzednich spiętrzeniach sztormowych. Wydmy mają kształt kopuł wydłużonych i poprzecznych do brzegu oraz połączonych przez obniżenia o charakterze deflacyjnym (np. na 294 km na mierzei jeziora Jamno czy na 280 km w okolicy Dąbek). Wybrzeże na tym odcinku zbudowane jest z tylko jednej, nieregularnej w przebiegu wydmy wałowej o szerokości 30–50 m, a zaplecze jest pokryte przez piaski pokrywowe (Bohdziewicz i Piątkowski, 1963). Jej wysokość to średnio 6–8 m n.p.m. Tylko na odcinku brzegu Bobolina (Dąbki) – Darłównko występuje szerszy pas wydmy z dwoma wałami, o szerokości do 70 m. Na mierzei jeziora Kopań wydmy są w szczątkowej formie, a sama mierzeja jest bardzo wąska. W jej zachodniej części, do kanału, nadbrzeże ma wysokość 2–3 m n.p.m., a wydma już nie występuje. Podobny kształt nadbrzeża występuje od Unieścia do kanału łączącego jezioro Jamno z morzem (296–294,5 km).

Od wschodniej strony kanału jeziora Kopań do miejscowości Wicie nadbrzeże zbudowane jest również z glin morenowych przykrytych piaskami eolicznymi. Ten niewysoki, aktywny od dwudziestu lat klif osłania wąska i niska plaża. Na wschód, za Wiciem w kierunku Jarosławca, początkowo siedmiometrowej wysokości erodowana wydma przechodzi w odcinek niskiego brzegu wydmy utworzonego w piaskach pokrywowych. Ostatni fragment badanego wybrzeża, tuż przed Jarosławcem, położonym na wysokim klifie morenowym, nadbrzeże buduje wysoka do 16 m starsza wydma transgresywna.

Na całym odcinku Mielno – Jarosławiec formy akumulacyjne występują sporadycznie (w czasie i przestrzeni). Miejscami u podnóża wału wydmy, podcinanego stale przez coroczną erozję, okresowo rozwijają się wydmy embrionalne (fot. 4, 5). Przyjmują one najczęściej postać progu/półki, przrastającej do pionowego podcięcia starszej wydmy (293 km, 265–266 km). Są to najczęściej półkilometrowej długości odcinki o bardzo powolnym rozwoju wydmy przedniej. W kilku miejscach brak jest wydmy, a nadbrzeże jest niskim (4–5 m), piaszczystym progiem, utworzonym w piaskach pokrywowych zaplecza wydmy (Unieście – kanał Jamno, zachodnia część Dąbek, Darłównko Wschodnie, mierzeja Kopań, odcinek Wicie – Jarosławiec). Z kolei w rejonach, gdzie wybrzeże zbudowane

jest z wyższych form wydmowych, występują rozległe rynny deflacyjne, lokowane na osi NW-SE, powstałe w wyniku deflacji powodowanej przez częste wiatry o dużej prędkości z kierunku NW (na wschód od kanału jeziora Jamno i na zachód od Dąbek). Formy te rozcinają wąskie lecz wysokie wały wydmy. Ułożenie wydm sugeruje, że nie są to typowe wałowe formy powstające wzdłuż brzegu, a fragmenty form skośnych (możliwe, że wędrujących w przeszłości i nasuniętych na organiczne zaplecze mierzei), które są ze sobą połączone niższymi formami usypanymi w strefie rozwoju wydm na zapleczu plaży. Ich ułożenie i ukształtowanie odbiega od form z innych odcinków polskiego wybrzeża. Typowe wałowe wydmy przednie, jako efekt akumulacji eolicznej osadu z plaży, są unikatowe. Rozwijają się na kilku krótkich odcinkach i często są efektem wieloletnich prac Urzędu Morskiego, polegających na odtwarzaniu wydmy metodami biotechnicznymi.

Wobec cofania się lądu, w wielu miejscach zastosowano i nadal wykonuje się zabiegi tak zwanej „ochrony brzegu”, czyli zabezpieczenia przed erozją lub powodzią sztormową. W Mielnie jest to ścianka szczelna i tetrapody (w 2017 r. rozpoczęto plan pierwszej refulacji). W Unieściu od 12 lat istnieje ścianka szczelna, a w Łazach – tetrapody (Łabuz, 2003b). W Darłównu Wschodnim przebudowano stare falochrony wzdłużbrzegowe i refulowano plaże, finansując to z funduszy unijnych w 2013 r. Zadanie to zrealizowano też w zachodniej części mierzei Kopań. Powstały nowe ostrogi, wzmocnione płyty z faszyny, które zostały zniszczone przez omawiane zjawiska sztormowe w 2017 r. (fot. 6, 7). W 2004 r. na zachodniej części mierzei zbudowano wał przeciwsztormowy, oddzielający szczytkową mierzeję od jeziora Kopań (ryc. 5c, profil 267,5 i 265,4 km). Jego rozbudowę i podwyższenie planuje się od 2016 r. W 2015 r. powstały masywne kamienne ostrogi w Jarosławcu (u podnóża starego betonowego falochronu wzdłużbrzegowego). Stare ostrogi palisadowe występują w Mielnie, na mierzei jeziora Bukowo i Kopań (na mierzei Kopań od 2013 r. są też nowe). Mierzeja jeziora Bukowo, przerwana przez spiętrzenia sztormowe z 1914 r., została odbudowana i wzmocniona betonowymi blokami, które przez lata były zasypane przez osad utworzonych wydm, a po sztormach z okresu 2016/2017 zostały odsłonięte na plaży.

Charakterystyka spiętrzeń sztormowych w rejonie badań

Średnie roczne temperatury na tym obszarze osiągają wartość 8°C. Średnia roczna suma opadów dochodzi do 700 mm z przewagą opadów w porze letniej. Okres wegetacyjny trwa do 223 dni (Kozłowski i inni, 2007). Dominują wiatry z kierunków SW i W (Miętus i inni, 2004). Na podstawie róży prędkości i częstotliwości wykonanej na podstawie danych z lat 1961–1995 dla Kołobrzegu (Borówka, 1999) należy stwierdzić, że w tej części wybrzeża przeważają wiatry z sektora W, SW, NW i NE. Wiatry te powodują rozwiewanie wydm i przewiewanie osadu na ich zaplecze (w miejscach, gdzie wydmy nie są pokryte lasem) oraz powodują transport

po plaży wzdłuż brzegu. Wiatry te nie sprzyjają odbudowie plaż i wydym pomiędzy Mielnem i Jarosławcem, ze względu na ekspozycję tego odcinka brzegu (Łabuz, 2003a, 2012). Wiatry o prędkości powyżej 9 m/s występują najczęściej z sektorów północnych i zachodnich. Roczny rozkład częstotliwości i prędkości wiatrów w tym rejonie decyduje o znacznych spiętrzeniach sztormowych (Rosa, 1984; Zawadzka-Kahlau, 1999) oraz o niekorzystnym kierunku przebiegu procesów eolicznych dla rozwoju wydym. Sztormy generowane są przez wiatry z sektorów od NW do NE. Największa częstość wezbrań sztormowych występuje od listopada do lutego (Sztobryn i Stigge, 2005).

Wahania poziomu morza osiągają w Kołobrzegu wartość 3,4 m. W tym rejonie notuje się powolny lecz stały wzrost średniego poziomu morza, rzędu 1,2 mm/rok (Zeidler i inni, 1995). Długotrwałe wiatry o dużych prędkościach od otwartego morza powodują powstawanie silnego falowania zwanego sztormowym. Najwięcej spiętrzeń (wezbrań) w rejonie Kołobrzeg – Darłówko przypada na okres jesienno-zimowy (tab. 1). Największe sztormy, o sile 10–12 B powstają przy wiatrach z sektora NE. Najczęściej sztormy powstają przy kierunku wiatru z NW wywołwanego przez cyrkulację mas powietrza przemieszczającego się znad Atlantyku w głąb Europy (Dziadziuszko i Jednorąg, 1987; Sztobryn i Stigge, 2005; Hünicke, 2010; Wolski, 2017). W latach 1995–2017 co rok notowano w portach 1–2 spiętrzenia sztormowe z przekroczonym alarmowym poziomem morza 570 cm w Kołobrzegu i Darłówku. Parametry najsilniejszych spiętrzeń sztormowych, z poziomem wody powyżej 1 m, w okresie 2002–2015, zawiera tabela 1. Podczas tych zjawisk woda zawsze erodowała plażę i sięgała co najmniej do podnóża wydmy (Łabuz, 2012). Wielokrotnie w przeszłości takie zjawiska powodowały rozmycie wydym i przerwanie wąskich mierzei jezior Jamno czy Bukowo, m.in. sztormy z 1962 r. znacznie uszkodziły wydmy, doprowadzając w wielu miejscach do rozerwania wałów i zagrożenia niektórych budynków w Mielnie (Bohdziewicz i Piątkowski, 1963).

W latach 1995–2017 najsilniejsze spiętrzenia sztormowe, erodujące wybrzeże wydymowe, zaobserwowano w Kołobrzegu w następujących terminach (poziom morza ponad średni): 11.1995 – 1,65 m, 11.2001 – 1,10 m, 01.2002 – 1,20 m, 11.2004 – 1,03 m, 11.2006 – 1,44 m, 01.2007 – 1,40 m, 10.2009 – 1,40 m, 01.2012 – 1,35 m, 12.2013 – 1,05 m, 02.2015 – 0,94 m. W Darłówku, eksponowanym bardziej na sztormy z kierunku W-NW, najwyższy poziom morza występował podczas innych spiętrzeń niż te zaobserwowane w Kołobrzegu czy Ustce. Za każdym razem podczas wymienionych spiętrzeń notowano erozję plaż i cofanie nadbrzeży wydymowych i klifowych. W sumie w okresie od 1995 r. do 2015 r. wystąpiło na tym odcinku 29 spiętrzeń z poziomem morza 0,8 m powyżej średniego. Spiętrzenia te można pogrupować w siedem sekwencji po kilka sztormów następujących po sobie w danym sezonie. Sekwencje te wyznaczono dla okresów: 1994/1995 – 4 sztormy, 2001/2002 – 5 sztormów, 2003/2004 – 3 sztormy, 2006/2007 – 4 sztormy, 2011/2012 – 3 sztormy, 2014/2015 – 3 sztormy oraz dla sezonu 2016/17, opisaną poniżej. Znaczne, cykliczne spiętrzenia występowały więc w odstępach

Tabela 1. Wybrane znaczące spiętrzenia sztormowe niszczące wydmy na wybrzeżu Zatoki Koszalińskiej w okresie 1995–2017*Selected storm surges that eroded the coastal dunes of Koszalin Bay over the period from 1995 to 2017*

Grupa / Group ¹	Lp. sztormów No. of storms	Główny / Nazwa Main / Name	Rok Year	Dzień, miesiąc Day, month	Prędkość wiatru Wind velocity (Vw) m/s	Kierunek wiatru i falowania Wind, waves direc- tion (Azw)	Poziom morza ponad średni Sea level (Hm) m AMSL	Maksymalny na- pływ na ląd Max runoff on land (Nf) m AMSL
1994/1995	1	-	1995	03–05.11	10–15	N-NE	1,65	N/D
-	2	-	1997	11–13.04	10–12	NNW-N	1,15	N/D
2001/2002	3	-	2001	15–17.11	11–13	NW	1,10	3,1
	4	-	2001	22–25.11	13–15	NW	1,04	N/D
	5	-	2002	01–03.01	13–15	NNE	1,20	3,4
	6	-	2002	19–22.02	14–16	NE	1,02	N/D
2003/2004	7	-	2003	06–07.12	14–16	N	1,10	2,9
	8	-	2003	21–25.12	16–18	NW-N	1,08	N/D
-	9	Pia	2004	22–25.11	17–20	NW	1,03	3,3
2006/2007	10	Brita	2006	01–04.11	16–20	N	1,44	3,6
	11	Cyryl	2007	18–21.01	15–19	NW	1,22	3,4
	12	-	2007	25–29.01	14–16	NW-NNE	1,06	3,1
-	13	-	2009	14–16.10	12–15	NE	1,09	3,2
2011/2012	14	Andrea	2012	05–06.01	15–17	NW	1,22	3,4
	15	-	2012	13–14.01	13–15	NNW	1,40	N/D
-	16	Xavier	2013	06–07.12	16–22	WNW	1,05	2,8
2014/2015	17	Aleksandra	2014	20–21.12	18–20	W-NW	0,78	2,5
	18	Felix	2015	04–05.01	11–15	WNW	0,82	2,9
	19	Ole	2015	07–08.02	10–15	NW	0,94	3,0
2016/2017	20	Angus	2016	04-06.10	13-17	NE-NNE	0,60	2,5
	21	Barbara	2016	28–29.12	12–17	NNW-NW	1,12	3,2
	22	Axel	2017	04–06.01	16–20	NW-NE	1,50	3,8
-	23	Gregory	2017	29–31.10	14–17	WNW-N	1,08	3,4

¹ Sekwencja kilku spiętrzeń sztormowych, w tym znaczącego / *Where there was a sequence of several storm surges, the extreme one has been included*

Opracowanie własne, poziom morza za Kapitanatem Portu Kołobrzeg / *Author's own elaboration, with sea levels on the basis of data from the Harbour Master's office in Kołobrzeg.*

2-4 letnich. Dane pochodzą ze zbioru obserwacji własnych i dzienników Kapitanatu Portu w Kołobrzegu. Ostatnie takie cykliczne zdarzenie miało miejsce w sezonie jesienno-zimowym 2016/2017. Wystąpiły wtedy 4 znaczne spiętrzenia, poczynając od października 2016 r. Towarzyszyły im 3 mniejsze spiętrzenia, które nie były istotne z punktu widzenia zmian morfologii brzegu. Ponadto zdarza się, że w okre-

sie letnim powstaje spiętrzenie, którego efektem jest erozja dolnej części plaży, np. ostatnio 07.2016, 07.2017 lub pod koniec lata: 09.2016, 09.2017 i 09.2018 – przy poziomie morza do 0,5 m wyższym od średniego.

Metody i materiał badawczy

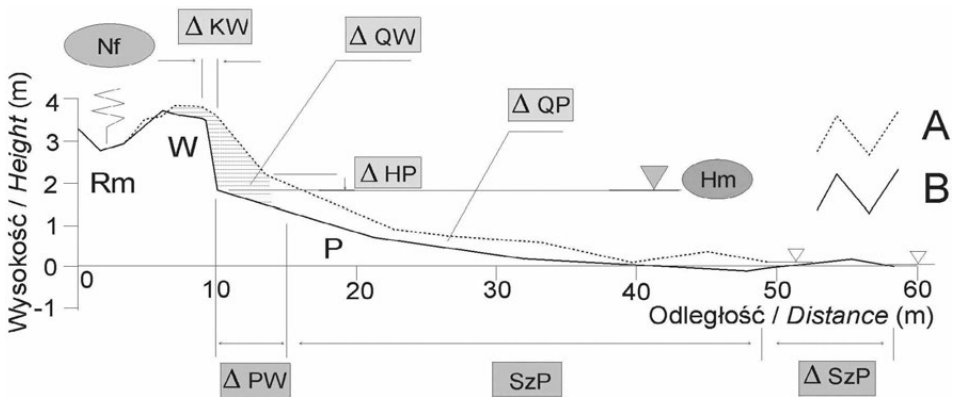
Zmiany morfologii wybrzeża morskiego obliczono w oparciu o badania terenowe prowadzone jesienią: 09–11.2016 r. oraz po spiętrzeniach sztormowych w okresie 30.01–06.02.2017 r. W okresie wiosenno-letnim 2017 r. (maj–lipiec) przeprowadzono obserwacje na wybranych odcinkach. Pomiarów jesienne, przed sztormami, prowadzone w okresie 11–16.09.2016 r. polegały na oznaczeniu szerokości i wysokości plaż na całym odcinku od Kołobrzegu do Jarosławca w wyznaczonych uprzednio miejscach. W okresie 05–20.11 kartowano morfologię nadbrzeży na odcinku Grzybowo – Kołobrzeg – Mielno. W trakcie prac wykonywano powtarzalne profile poprzeczne do brzegu, celem określenia ukształtowania wydmy i plaż, monitorowanych od kilkunastu lat. Dzięki temu zarejestrowano zmiany plaż i nadbrzeży spowodowane przez spiętrzenie z 04–06.10.2016 r. oraz mniejsze z 05–07.11.2016 r. Pomiarów zimowe z przełomu stycznia i lutego 2017 r., wykonane po spiętrzeniu Barbara i Axel, polegały na określeniu szerokości i wysokości plaż na całym omawianym odcinku oraz na profilowaniu w wyznaczonych dotychczas miejscach monitorowanych. W rejonach, gdzie woda wdarła się na obszar lądu, kartowano rozmieszczenie i budowę stożków spiętrzeń sztormowych – form akumulacji morskiej na nisko położonym nadbrzeżu. Oznaczano miejsca, w których na plaży i w stoku nadbrzeża odsłoniły się utwory morenowe i torfowe. Uzupełnieniem prac była wykonana szczegółowa dokumentacja fotograficzna. Do badań wykorzystywano m.in. GPS z możliwością śledzenia trasy – do pomiarów odległości, szerokości i lokalizacji form. Pomiarów na profilach wykonywano w oparciu o niwelator lub urządzenie GPS RTK. Wzdłuż całego odcinka badań prowadzono kartowanie zmian wysokości za pomocą taśmy, ręcznej laserowej poziomicy i dalmierza. Urządzenia te były przydatne zwłaszcza na wysokich skarpach podcięć klifowych wydmy przednich, do 6–8 m wysokości. W związku z tym, że badania porównujące zmiany dla całego odcinka Kołobrzeg – Jarosławiec przeprowadzono we wrześniu 2016 r. oraz w lutym 2017 r., efekt rejestrowanej erozji jest sumą kilku spiętrzeń sztormowych (10.2016–01.2017). Dane z badań terenowych i lokalne obserwacje potwierdzają, że zarejestrowane ubytki lądu nadbrzeża są efektem głównie ostatniego ponadprzeciętnego wezbrania, jakim był sztorm Axel. Zmiany szerokości i wysokości plaż są efektem obu spiętrzeń Barbara i Axel. W kilku przypadkach erozję lądu zainicjowało pierwsze spiętrzenie z października 2016 r.

Do analizy morfometrycznej zmian brzegu i nadbrzeża wybrano następujące parametry (ryc. 2):

- wał wydmy (W): wysokość (HW), zmiana szerokości (ΔSzW), zmiana położenia podstawy (ΔPW), zmiana położenia krawędzi (ΔKW), zmiana objętości na m^2 ($\Delta Q1W$), sumaryczna zmiana objętości ($\Delta \Sigma QW$),
- wydma embrionalna (We): suma zmian objętości ($\Delta \Sigma QWe$),
- plaża górna (Pg): zmiana wysokości (ΔHPG),
- plaża (P): zmiana objętości osadu plaży ($\Delta \Sigma QP$), zmiana szerokości (ΔSzP) – nie jest to jednak dobry parametr, ponieważ plaża może być szersza w związku z cofnięciem wydmy, z kolei często używane położenie linii wody (np. Zawadzka-Kahlau, 1999) jest w krótkim czasie względne i uzależnione np. od poziomu morza (Hm).

W analizach uwzględniono czynniki hydrometeorologiczne: maksymalny poziom morza (Hm), napływ fali na ląd (Nf) – suma poziomu morza i wysokości fali, czas trwania spiętrzenia (Tm), kierunek podejścia falowania (Azm), prędkość wiatru (Vw) i kierunek wypadkowy wiatru (Azw).

Parametry powyższe zostały obliczone na podstawie zestawionych profili poprzecznych przed sztormami (before b) oraz po sztormach (after a). Obliczenia dokonano w programach Grapher Golden Software oraz wykorzystując dodatkową aplikację w programie Microsoft Excel. Wysokości H_i obliczone co 1 m wzdłuż profilu dla poszczególnych form: wydmy głównej (przedniej lub nadbrzeża wydmo-



Ryc. 2. Mierzone parametry profilu brzegu

Rm – rynna międzywydmowa, W – wydma przednia, P – plaża, ΔPW – zmiana podstawy wydmy, ΔKW – zmiana krawędzi grzbietu wydmy, ΔHP – zmiana wysokości plaży, ΔSzP – zmiana szerokości plaży, SzP – szerokość plaży, ΔQW – zmiana objętości wydmy (na 1 mb), ΔQP – zmiana objętości plaży (na 1 mb), Hm – poziom morza podczas spiętrzenia, Nf – napływ wody podczas spiętrzenia (maks. 4,0 m); A – profil przed sztormem, B – profil po sztormie

The measured parameters of the coastal profile

Rm – interdune runnel, W – foredune, P – beach, ΔPW – dune foot changes, ΔKW – foredune ridge edge changes, ΔHP – beach height changes, ΔSzP – beach width changes, SzP – beach width, ΔQW – sand volume changes in foredune (per 1 m wide profile), ΔQP – sand volume changes in beach (per 1 m wide profile), Hm – storm sea level, Nf – wave run-up (max. 4.0 m); A – profile before storm, B – profile after storm

Opracowanie własne / Author's own elaboration.

wego, w tym wydmy na klfie), wydmy embrionalnej i plaży, przeliczano na zmiany objętości osadu, przypadające na każdy metr powierzchni formy Q_i , gdzie i = liczba metrów szerokości (1). Suma zmian objętości co 1 m dała całkowitą objętość osadu oraz jej zmianę $\Delta\Sigma Q$ (2):

$$Q_x = (\Sigma H_i) \times 1 \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$\Delta\Sigma Q_{ix} = \Delta Qa_{ix} - \Delta Q_{bix} \quad (2)$$

W programach kalkulacyjnych obliczono parametry morfologiczne, charakteryzujące rzeźbę przed (before *b*) oraz po sztormach (after *a*). Pomierzone wartości zmian rzeźby na profilu poprzecznym zestawiono z określonymi wartościami spiętrzeń sztormowych. Na tej podstawie możliwe było określenie wpływu wysokości wody i jej napływu na brzeg oraz na morfologię form nadbrzeża i plaży. Wyniki obliczonych zmian zawarto w tabelach 3a–c. Zmiany morfologiczne przedstawiono na wybranych profilach poprzecznych i oznaczono na mapach całego odcinka badanego wybrzeża. Na końcowym etapie uśredniono parametry dla dziewięciu odcinków wyodrębnionych na obszarze badań. Ponadto podjęto próbę statystycznej korelacji uzyskanych zmian parametrów morfologicznych nadbrzeża i plaży przed i po spiętrzeniach oraz poziomów morza. W oznaczeniach lokalizacji profili posłużono się klasyfikacją kilometrażu wybrzeża wykorzystywaną przez urzędy morskie.

Charakterystyka spiętrzeń w sezonie sztormowym 2016/2017

Spiętrzenia poprzedzające sztorm Barbara i Axel występowały w krótkich po sobie okresach (tab. 2). Należy podkreślić, że pierwsze niespodziewane spiętrzenie, które spowodowało obniżenie dolnej części plaży, wystąpiło 7 lipca 2016 r. (podobne wystąpiło 13 lipca 2017 r. – poziom morza w Darłowie sięgał 541 cm – 0,4 m powyżej średniego). Pierwsze silniejsze spiętrzenie o nazwie Angus wystąpiło 04–06.10.2016 r. Poziom morza sięgał 0,4–0,6 m powyżej średniego, a wiatr i falowanie rozwijały się z kierunku NE. Przez 3 dni w portach utrzymywał się poziom wody tylko o 20–30 cm niższy od stanów alarmowych. Na omawianym odcinku spiętrzenie to nie spowodowało erozji wydmy, z powodu specyficznego rozwinięcia linii brzegowej, ostioniętej na działanie sztormów z kierunku NE. Spiętrzenie to spowodowało erozję na wschodnim wybrzeżu Polski, np. erozja nowego refulatu w Ustce i Rowach (ubytek do 10-20 m szerokości), uszkodzenie nowej podwodnej rafy w Ustce, cofnięcie o 2–3 m wysokich, podciętych uprzednio wydmy na Mierzei Kaszubskiej, Karwieńskiej i Helskiej. Na analizowanym odcinku środkowego wybrzeża erozja plaż wystąpiła tylko w okolicy Kołobrzegu i Ustronia Morskiego. Ich szerokość zmniejszyła się o 10–15 m, a wysokość o około 0,3 m u podnóża nadbrzeża. Było to pierwsze spiętrzenie od 2013 r., które znacznie

Tabela 2. Spiętrzenia sztormowe w 2016 r. poprzedzające sztorm Axel – maksymalny poziom morza w cm
Storm surges in 2016 prior to Storm Axel – maximum sea level in cm

Lp. / No.	1	2	3	4	5	6	7
Data / Date	2016.07.07	2016.10.05	2016.11.03	2016.11.27	2016.12.08	2016.12.27	2017.01.04
Nazwa / Name	„sztorm letni”/ summer surge	Angus	N.N.	N.N.	N.N.	Barbara	Axel
Prędkość wiatru (m/s) Wind velocity (Vw)	12–13	13–17	11–14	12–15	11–14	13–19	16–20
Kierunek wiatru i falowania Wind, waves direction (Azmw)	W-NNW	NE-NNE	W-NNW	WNW-NNW	W-WNW	NNW-N	WNW-NNE
Kg/o.570, a.610	540	548	553	572	564	612	650
Dar/o.570,a.610	556	550	544	556	555	589	665
Ust/o.570, a.600	539	560	546	556	553	588	645

Kg – Kołobrzeg, Dar – Darłowo, Ust – Ustka, poziom wody: o. – stan ostrzegawczy, a. – stan alarmowy

Kg – Kołobrzeg, Dar – Darłowo, Ust – Ustka, sea level: o. – warning level, a. – alarm level

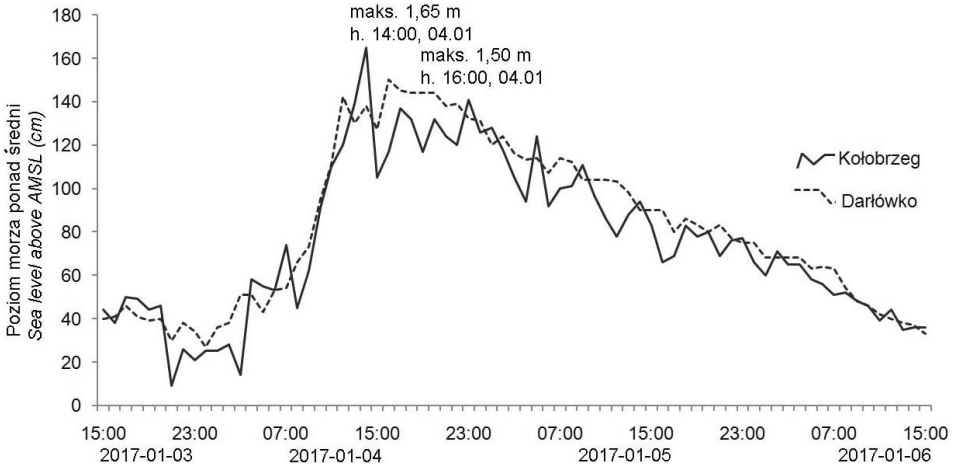
Źródło: kapitanaty portów / *Source: harbour masters' offices.*

przebudowało refulowaną w listopadzie 2012 r. plażę w Kołobrzegu.

Kolejne mniejsze i krótkotrwałe spiętrzenia, które wystąpiły w listopadzie, rozwijały się zawsze z kierunku W do NW. Trwały do półtora dnia i towarzyszyły im podpiętrzenia morza o około 0,4–0,5 m powyżej poziomu średniego, powodujące stopniowe obniżanie wysokości plaż. Występujące wiatry o dużych prędkościach przewiewały osad z plaż na stok wału wydmowego. Tuż przed spiętrzeniem wiatr o dużej sile obniża plażę, a osad jest „bezpiecznie” odkładany na zapleczu brzegu – wiatr w pierwszej fazie sztormu ogranicza wielkość ubytku osadu z danego odcinka, co zostało potwierdzone w innych badaniach (Łabuz, 2014). Dopiero spiętrzenie o nazwie Barbara z 27–29.12.2016, spowodowało znaczne rozmycie plaż do podstawy stoku wydmy. W dniu 27 grudnia od 8.00 do 12.00, w ciągu 4–5 godzin poziom wody wzrósł o 0,5 m. W portach całego wybrzeża przekroczony został alarmowy poziom morza, który wynosi 0,7 m powyżej średniego. Sytuacja taka utrzymywała się przez półtora dnia. Woda przy poziomie morza do 590 cm rozmyła formy embrionalne na plażach o wysokości do 3 m n.p.m. Refulowane plaże w Kołobrzegu, Ustroniu Morskim, Darłównu czy Ustce (poza obszarem omawianym) zostały rozmyte w 1/3 swojej objętości. Spiętrzenie było efektem silnego wiatru wywołanego przez przemieszczający się typowy układ niżowy znad Morza Północnego, powodującego napływ wody z kierunku NW. Po tym spiętrzeniu plaże w wielu miejscach omawianego odcinka brzegu były już wąskie i niskie.

Kilka dni później nastąpiło jeszcze silniejsze spiętrzenie sztormowe Axel w dniach 04–06.01.2017, które dopełniło dzieła zniszczenia plaż. W wyniku napływu mas powietrza z zachodu utworzył się głęboki niż, powodujący rozwój falowania generowanego przez wiatry północno-zachodnie. Poziom wody na wybrzeżu w dniu 03.01 wynosił około 550 cm, a następnie w krótkim czasie woda podniosła się o metr (ryc. 3), osiągając maksymalnie 665 cm w Darłównu. Tak wysokich poziomów morza nie notowano od pamiętnego spiętrzenia z listopada 1995 r. Był to znacznie wyższy poziom wody niż podczas innych, katastrofalnych w skutkach spiętrzeń w ostatnich latach (np. 01.2006, 02.2007, 10.2009 i 01.2012).

Duża dynamika cyrkulacji atmosferycznej i zmienność prędkości oraz kierunków wiatru (dochodzących w porywach do 30 m/s) spowodowała podpiętrzenie wód Bałtyku u południowego wybrzeża Polski, początkowo z kierunku WNW (03/04.01), a następnie z NNE (04/05). To z kolei spowodowało ekstremalne podpiętrzenie wody (ryc. 3), oddziałujące niszcząco na całe polskie wybrzeże. Znaczne spiętrzenie sztormowe, przekraczające stany alarmowe, na badanym odcinku trwało od godz. 12.00 dnia 04.01 do 20.00 dnia 05.01. Dopiero o godz. 8.00 dnia 06.01 poziom wody obniżył się do 540 cm. Zdarzenie trwało prawie 3 dni. Sztorm ten, w związku z zanotowaną wysokością wody w portach (tab. 2), skutkami morfologicznymi i zasięgiem w głąb lądu, należy porównywać z tak zwanymi stuletnimi spiętrzeniami (ostatnie porównywalne w skutkach wystąpiło w 1995 r.). Jego niszczące efekty były przedstawiane w prasie lokalnej, jednakże nie zostało uznane za zdarzenie bardziej znaczące niż te z lat poprzednich. Jest to o tyle istotne, że nie



Ryc. 3. Zmiany godzinne poziomu morza podczas spiętrzenia sztormowego Axel (w cm nad poziom średni)

Hourly water levels during Axel storm surges (in cm AMSL)

Źródło: kapitanaty portów / *Source: harbour masters' offices.*

podano faktów związanych z erozją brzegu i uszkodzeniem wielu obiektów infrastruktury. Uszkodzeniu uległo większość zejść na plaże (schody) i wszystkie zjazdy techniczne. w wielu miejscowościach zejścia były zupełnie zniszczone, zerwane lub oderwane od nadbrzeżnej wydmy. Obniżenie plaż i cofnięcie wydm spowodowało odsłonięcie fundamentów wszystkich zejść na plażę. Należy podkreślić, że spiętrzenie to, bardzo podobne do rozwijających się w latach poprzednich, było od nich znacznie większe. W portach odnotowano maksymalny od lat poziom morza – około 1,5–1,6 m powyżej średniego. Ponadto było ono kolejnym i ostatnim sztormem z okresu jesienno-zimowego 2016/2017, który spowodował dużą erozję nadbrzeży w wyniku uprzedniego obniżenia plaż przez sztormy poprzedzające (tab. 2). Poprzednie spiętrzenia, zwłaszcza z października i grudnia, obniżyły plaże na całym wybrzeżu, a ostatnie – Axel – spowodowało erozję niechronionych już wydm. W wyniku własnych wieloletnich pomiarów stwierdzono, że woda podczas sztormów sięga do wysokości 3,2–3,5 m n.p.m. (Łabuz, 2013). Jest to maksymalny napływ, który wyznaczają powstające na nadbrzeżu stożki spiętrzeń sztormowych. Formy na plaży o wysokości powyżej 3 m n.p.m. skutecznie chronią wydmy przed erozją. Jednak większość plaż polskiego wybrzeża, w tym na badanym odcinku, ma wysokość tylko do 2 m n.p.m. i jest raczej pozbawiona wydm embrionalnych. Na mierzei jeziora Kopań, będącej w szczątkowej formie już od co najmniej 15 lat, wysokość plaży nie przekracza 1,8 m n.p.m. Maksymalnie podczas spiętrzenia Axel woda sięgała na lądzie do wysokości 3,8–4,0 m n.p.m. co wyznaczono na podstawie zasięgu osadu w stożkach spiętrzeń sztormowych.

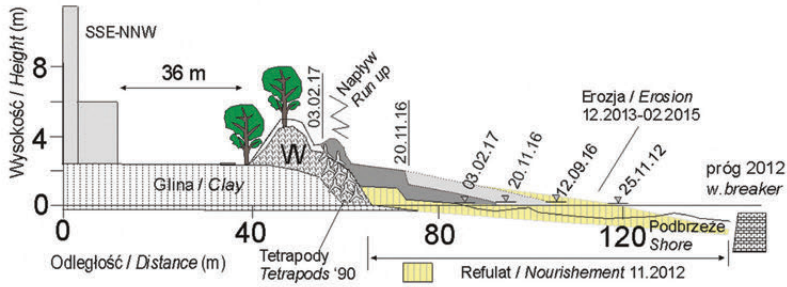
Wyniki badań – zmiany morfologiczne nadbrzeży i brzegu

Urozmaicone ukształtowanie i odporność nadbrzeża na rozmywanie, wynikające z budowy geologicznej (morena, piaski mierzejowe i wydmowe), spowodowało zróżnicowanie erozji. Klify morenowe cofnęły się do 1 m, a odcinki mierzejowe średnio o 2–6 m, maksymalnie do 12 m. Plaże na całym odcinku obniżone zostały o 1–1,2 m ($\Delta H P g$), zniszczone zostały wydmy embrionalne na plaży górnej i rozbudowujące się w ostatnich latach wydmy przednie. Znacznej erozji uległy refulatory plaż w Kołobrzegu i DarłóWKu oraz Ustce (ryc. 4). Zniszczeniu uległy wszystkie wydmy przednie rozwijające się od 2012 r. W wielu miejscach cofnięcie krawędzi nadbrzeża ($\Delta K W$) osiągnęło stan położenia łądu sprzed 20–25 lat. O skali erozji, rozumianej jako cofnięcie nadbrzeży wydmowych ($-\Delta K W$) świadczy fakt, że nie spotykane dotąd ilości artefaktów antropogenicznych (śmieci) zostały wyflukane z rozwijających się od lat 80./90. XX w. wydm. Były to jedne z pierwszych opakowań plastikowych i aluminiowych produkowanych w latach 80. XX w., które zaległy w osadzie utworzonych plaż, a następnie powstałych na tych plażach wydmach. Na podstawie wyflukanych śmieci należy wnioskować, że spiętrzenie Axel spowodowało cofnięcie łądu do miejsca jego położenia w latach 80. XX w. Potwierdzają to również wykonane pomiary morfometryczne. We wszystkich miejscach, w których prowadzę badania, zniszczone zostały wydmy powstające od 1997–2001 r. (mierzeje jezior Jamno i Bukowo). Cofnięcie nadbrzeży wydmowych na mierzei jeziora Bukowo odstąpiło opaskę niemiecką 1914 r. Osad usunięty z plaż odstąpił podłoże torfów i glin zwałowych: mierzeja jeziora Kopań, Łazy, Bagicz.

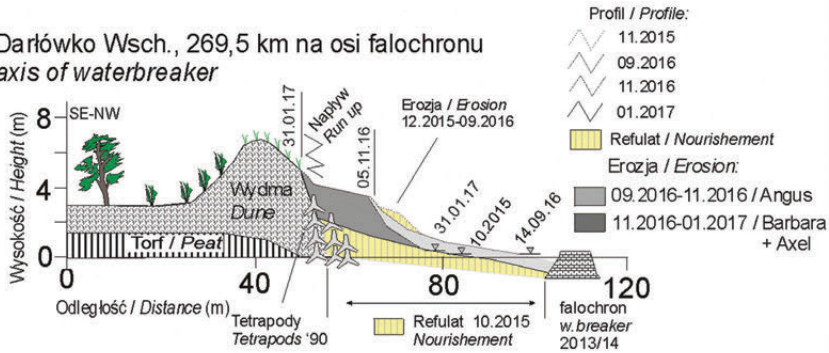
Plaże po sztormach nie wszędzie były zupełnie rozmyte, pokrył je osad wyflukany ze zniszczonych wydm. W wielu miejscach plaże po sztormie Axel były szersze niż we wrześniu 2016 r. Było to wynikiem cofnięcia podstawy wydm i odłożenia wyerodowanego osadu z ich niszczenia na plaży i w płytkim podbrzeżu. Do marca 2017 r. część plaży była nadbudowana formą przypominającą równię pływową – szeroką i płaską powierzchnię zakończoną wysokim wałem brzegowym (uformowanym z rewy tworzonej podczas wysokiego poziomu morza podczas trwania sztormu). Formę tę, obserwowaną wielokrotnie po silnych spiętrzeniach nazwano równią posztormową. Wysokość plaż w górnej części u podnóża nadbrzeża ($\Delta H P g$) obniżyła się do 1,0–1,2 m n.p.m., a w części dolnej powstał rozległy wał brzegowy, oddzielony od górnej części głęboką laguną, wypełnioną wodą i wspomnianą równią. Do maja 2017 r. laguna oraz wał brzegowy uległy wyrównaniu. Duża ilość osadu z brzegu spowodowała znaczne wyptycenie podbrzeża, co można było jeszcze obserwować w okresie letnim 2017 r.

Na odcinkach, gdzie wybrzeże buduje wysoki do 6–8 m wał wydmowy, powstały rozległe skarpy klifowe oraz osuwiska. Krawędź ($K W$) lub podstawa ($P W$) wydmy w takich miejscach uległa cofnięciu o 6–11 m. W miejscach, gdzie łąd był niski 4–5 m ($H W$), rozmyciu uległy szczątkowe już wały i formy niskiego wybrzeża wydmowego – ich objętość ($Q W$) zmniejszyła się co najmniej o 1/3, a cofnięcie

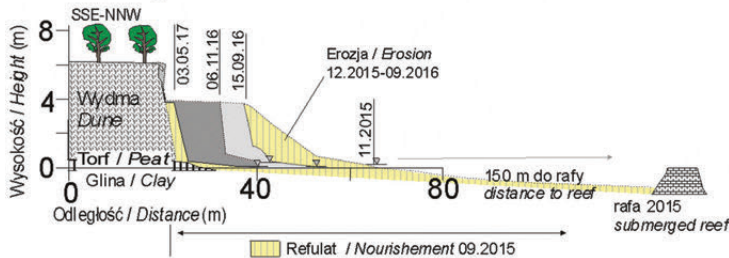
Kołobrzeg, 330,7 km, wsch. koniec progów i refulatu
 east end of nourishment and waterbreakers



Darłówek Wsch., 269,5 km na osi falochronu
 axis of waterbreaker



Ustka, 231,5 km, wsch. zakończenie podwodnej rafy
 end of submerged artificial reef



Ryc. 4. Straty refulatu plaż po sztormach 2016/2017 na środkowym wybrzeżu

Nourished beach losses after surges 2016/2017 on the middle coast

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny / Author's own elaboration, like remaining figures.

wyniosło 3–4 m. Szczegółowe parametry zmian plaż i wydm (klifu) zawierają ta-
 bele 3a–c.

Na odcinkach z niską wydumą lub nadbrzeżem zbudowanym obecnie tylko
 z pokryw eolicznych, na niskim zapleczu powstały stożki spiętrzeń sztormowych.
 Utworzyły się one do 40–90 m w głąb lądu, co stanowi ewenement w ciągu ostat-
 nych 20 lat (od 1995 r.). Nigdy do tej pory nie powstały stożki sięgające tak daleko
 w głąb lądu, z tak dużą ilością naniesionych artefaktów antropogenicznych oraz

materii organicznej, o znacznych gabarytach (pnie drzew oraz korzenie). Stożki spiętrzeń sztormowych powstały:

- a) na wysokości Ekoparku Wschodniego, gdzie woda przelewając się przez ścieżkę wlewała się do zbiornika; naniesione zostały duże ilości materii organicznej oraz śmieci (327–328 km);
- b) na wschód od Ustronia Morskiego; na niskim wybrzeżu woda wdarła się do 20 m od krawędzi lądu, pozostawiając duże fragmenty drewna i całe pnie, gruboziarnisty osad i dużą ilość śmieci, także o znacznych gabarytach (318–319 km);
- c) przy ujściu rzeki Czerwonej, gdzie rozmyte niskie wydmy zostały pokryte przez śmieci i osad gruboziarnisty (317,2 km);
- d) na odcinku Unieście – kanał jeziora Jamno, gdzie przez rozmyte niskie wybrzeże wydymowe (erodowane od co najmniej 20 lat), woda wdarła się do 60 m od nowo zbudowanych apartamentów; pozostały śmieci i osad gruboziarnisty, w tym warstwa minerałów ciężkich (295–296 km);
- e) przy kanale jeziora Bukowo, gdzie w odległości do 100 m od plaży pozostały na lądzie liczne śmieci i stojąca miesiąc po sztormie zamarznięta woda (282,5 km);
- f) w ujściu rzeki Leniwiec, gdzie rozmyte ujście zmieniło kierunek i znacznie się poszerzyło (ok. 274,5 km);
- g) we wschodniej części Darłówka, gdzie woda zalewając nadmorski bulwar wdzierała się w głąb lądu zagrażając zabudowie; pozostawiła ogromne ilości materii organicznej oraz artefaktów antropogenicznych; tam, wzdłuż kanału ujściowego Wieprzy, ulokowano worki z paskiem;
- h) na większej części mierzei Kopań, do 80–100 m w głąb lądu, aż do podnóża wału przeciwsztormowego z 2004 r. (262–267 km) oraz w licznych wejściach na plażę;
- i) na niskim wybrzeżu na zachód od klifu w Jarosławcu, do 15 m w głąb lądu (257–259 km).

Ponadto, dzięki rozpoznanim artefaktom w stożkach spiętrzeń sztormowych, określono kierunki przepływu prądów wzdłuż brzegu. Niektóre z artefaktów przebyły odległość 40 km wzdłuż brzegu. Do 6 km na wschód od Darłowa woda wyrzuciła na ląd kosze na śmieci pochodzące z tego miasta. Na 281 km rozpoznano szczątki umocnień technicznych z 265 km mierzei jeziora Kopań. Takie same szczątki rozpoznano na 294 km na mierzei jeziora Jamno. Okazuje się zatem, że w drugiej fazie spiętrzenia, przy zmianie kierunku wiatru i falowania z WNW na NNE, osad oraz artefakty wyflukane z lądu przenoszone były na zachód. Dostarcza to nowych informacji na temat cyrkulacji wody i prądów podczas zmiennych kierunków falowania podczas spiętrzeń sztormowych. W pierwszej fazie spiętrzenia u wybrzeża Zatoki Koszalińskiej woda przemieszczana przez wiatry NW przenosiła osad i artefakty w kierunku wschodnim. Następnie w wyniku zmiany falowania na kierunek NE, część osadu przenoszona była na zachód.

W kolejnej części artykułu omówiono zmiany morfologiczne nadbrzeży wydmowych na wydodrębnionych geograficznie odcinkach omawianego obszaru.

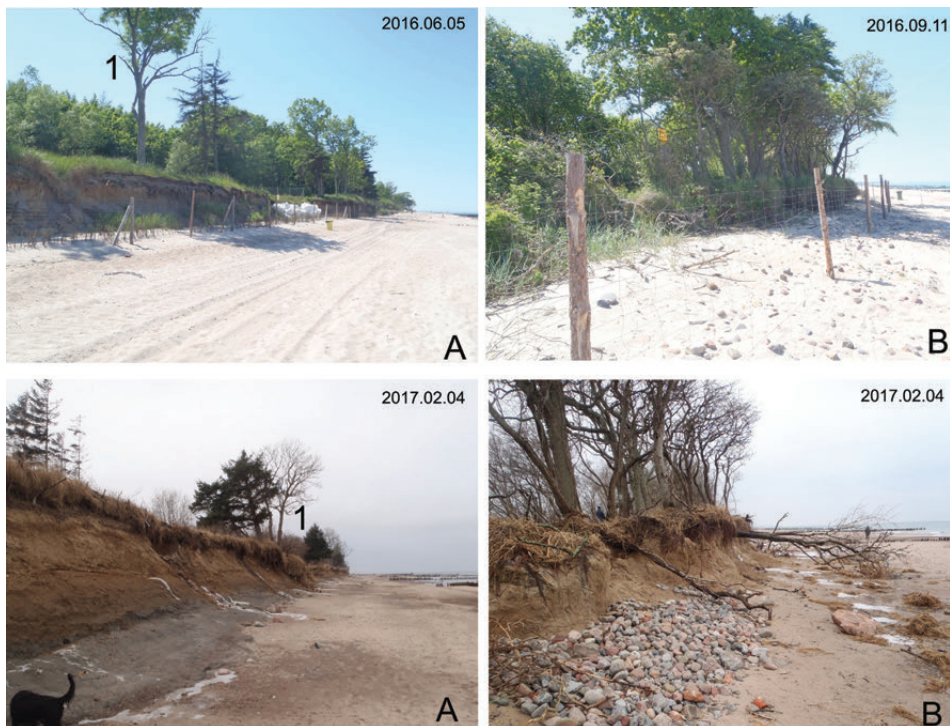
Wydmowo-morenowy odcinek Kołobrzeg – Mielenka

Od Kołobrzegu do Bagicza podczas spiętrzenia sztormowego Axel napływ wody sięgał do wysokości 3,8 m n.p.m. Odcinek osłonięty narzutem z głazów (z 2012 r.) powstrzymał erozję i przelanie się wody na teren zaplecza brzegu nisko położony nad poziom morza, w tym do zbiornika w Ekoparku. Na odcinku nieosłoniętym głazami wielkość cofnięcia nadbrzeża zależała od budowy geologicznej (fot. 1, ryc. 5a). Niskie klify cofnęły się o około 1 m, a wydmy o 3–5 m. Na wysokości Ekoparku wały wydmore zostały rozmyte w 2/3 szerokości, co może spowodować przerwanie łądu i tak już miejscami chronionego opaską z kamienia łamanego (od 2012 r.). Rozmyte zostały wąskie plaże w Ustroniu Morskim oraz na wysokości opaski brzegowej w rejonie Ekoparku na wschód od Kołobrzegu. Częściowo zostały zniszczone refulowane plaże we wschodniej części Kołobrzegu, Sianożętach i Ustroniu Morskim. W górnej części plaż odsłoniło się podłoże z glin, a w ich dolnej części powstał rozległy wał brzegowy. Rozmyte zostały wszystkie formy embrionalne wydm (*We*) na plażach. Plaże ($\Delta H P g$) na całym odcinku obniżone zostały do 0,5–1 m n.p.m. W Ustroniu Morskim woda u podnóża opaski sięgała do głębokości 0,5 m (skutek odbicia falowania). Napływ na opaskę sięgał wysokości 3,5 m n.p.m. Na stoki wydm i opasek trafiły duże ilości materii organicznej w postaci konarów i pni drzew. Liczne stożki spiętrzeń sztormowych powstały w głębi łądu, na nisko położonych odcinkach nadbrzeża.

W rejonie odcinków klifowych i klifowo-wydmowych nagromadzenia osadu piaszczystego z wydm częściowo przykryły nowo powstałe jęczory spływowe gliny. Klifowe nadbrzeża uległy mniejszemu cofnięciu niż wydmore (maksymalnie do 1 m). Powstały nowe nisze abrazyjne, a w wielu miejscach stabilny od kilku lat klif uaktywnił się (np. w Gąskach i Sianożętach). Największe zmiany morfologiczne tego zróżnicowanego w budowie odcinka brzegu wystąpiły przy ujściu rzeki Czerwonej. W tym rejonie rozmyciu uległ pas niskich wydm przednich o szerokości 10 m, a woda wdarła się na niskie zaplecze, gdzie wzdłuż koryta ciekłu powstały stożki sztormowe.

Pomiędzy 317,0 a 313,5 km wybrzeża występuje wydma nad krawędzią podłoża morenowego o wysokości 3–5 m n.p.m. Na tym odcinku zostały rozmyte wszystkie wydmy embrionalne i formy przyklifowe, a nadbrzeże cofnęło się o 3–6 m. Nieznacznie zmniejszyła się szerokość plaż, a ich obniżenie wyniosło od 1 do 1,5 m.

Nadbrzeże klifowe w Gąskach zmieniło się nieznacznie, rozmyte zostały wydmy przed klifem (fot. 2, ryc. 5a, profil 314 km). Na wschód od tego miejsca niskie nadbrzeża wydmore zostały cofnięte o 2–3 m. U podnóża opaski w Sarbinowie (przebudowanej w 2012 r., wraz z dodanymi słuzami przeciwsztormowymi) odbicia fal od przeszkody spowodowały obniżenie plaży o 1,4 m.



Fot. 1. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych w rejonie Ekoparku Kołobrzeg – Bagicz – znacznie obniżona plaża (fot. T. Łabuz, podobnie pozostałe zdjęcia)

A – 327,5 km (1 – kępa drzew), B – 329 km

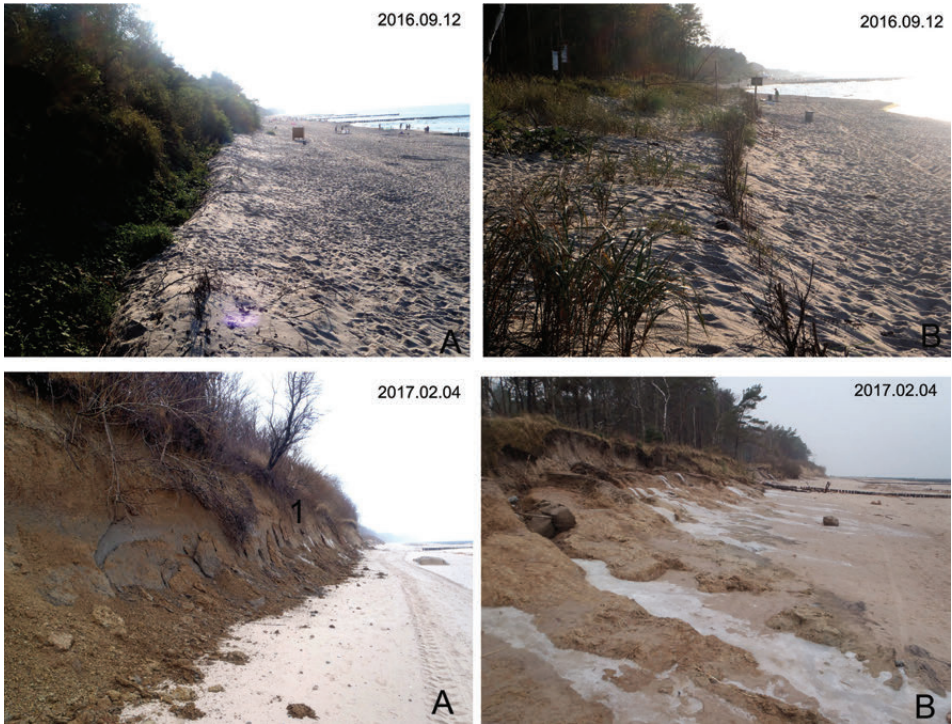
Photographic documentation of morphological changes in the Ekopark Kołobrzeg – Bagicz area – lowered beach (phot. T. Łabuz, like remaining photos)

A – 327,5 km (1 – clump of trees), B – 329 km

Na odcinku Sarbinowo – Chłopy, gdzie występuje krótka ośona wydmy z worków z piaskiem, erozja wydmy wyniosła 2–4 m. Na odcinku niezabudowanego nadbrzeża wydmorego od Chłopów do Mielna występował w ostatnich latach wał wydmy embrionalnej, który został zupełnie rozmyty. Plaże obniżyły się o około 1 m, a nadbrzeże cofnęło o 4–6 m.

Mierzeja jeziora Jamno

Na odcinku brzegu z opaską w Mielnie obniżenie plaży było znaczne (do 2 m) w wyniku odbicia fal od umocnień (ryc. 5b, profil 303,3 km). Po sztormie Axel przez cały styczeń u podnóża opasek nie było plaży, a woda miała głębokość 10–15 cm. W czerwcu 2017 r. plaża miała niewielką wysokość nad poziom morza – do 1,2 m. Cofnięcie się wydmy pomiędzy Mielnem i Unieściem wyniosło około 5 m (fot. 3, 4; ryc. 5b). Nadbrzeże pomiędzy Mielnem a Unieściem cofnęło się do położenia z lat 80. XX w. Na wschód za Unieściem nisko położone zaplecze brzegu pozbawione jest wydmy wałowej. Takie



Fot. 2. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych na odcinku Sianożęty – Ustronie Morskie

A – zniszczona wydma embrionalna i erodowany klif (1), rejon 322, 5 km, B – rozmyte niskie wydmy embrionalne, wychodnia glin, rejon 319 km

Photographic documentation of morphological changes in the Sianożęty – Ustronie Morskie area
 A – eroded embryo dune and eroded cliff (1), at 322.5 km, B – washed-off low dunes, clay layers, the 319 km area

ukształtowanie nadbrzeża podczas znacznego spiętrzenia wody zagraża obecnie budowanym od 2012 r. obiektom turystycznym. Mierzeja ma tam tylko do 100 m szerokości i wysokość 3 m n.p.m. W tej części mierzei powstały katastrofalne zniszczenia wydm. Woda przelała się w kilku miejscach na ich zaplecze tworząc stożki sztormowe. Niskie wybrzeże wydmowe (297–294,6 km) uległo cofnięciu o około 5–7 m (ΔPW). Rozmyte zostały wszystkie dotychczas powstające formy akumulacyjne (fot. 4). Woda wdarła się tam przez niskie wydmy do lasu, sięgając do 60–70 m w głąb lądu i do 60 m od drogi oraz budynków (rejon 295–296 km). Powstały tam pierwsze stożki spiętrzeń sztormowych, a liczne drzewa zostały powalone na plażę. Plaże, które od lat mają maksymalnie 15–22 m szerokości, po spiętrzeniach były szersze o około 8–10 m niż we wrześniu 2016 r. Na zmianę szerokości wpływ miało odłożenie, w postaci rozległego wału brzegowego, dużych ilości osadu z rozmytych wydm. Największa erozja wydm wystąpiła po obu stronach kanału łączącego jezioro Jamno z morzem na zakończeniach opasek z kamienia łamanego (erozja *link side effect*).



Fot. 3. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych na odcinku Mielno – Unieście
 A – zniszczona niska wydma przednia, 299 km (1 – kępa sosen, 2 – schody), B – zupełnie rozmyty niski wał wydmy, 296 km (3 – kępa drzew przy kanale)
Photographic documentation of morphological changes in the Mielno – Unieście area
 A – eroded low foredune, at 299 km (1 – clump of pine trees, 2 – stairs), B – totally washed-off low dune, at 296 km (3 – clump of trees near channel)

Na wschód od ujścia kanału z jeziora Jamno, w kierunku Łazów, wydmy cofnęły się o ok. 6 m (ΔPW). Na całym odcinku, gdzie wydmy były wysokie, powstały podcięcia klifowe (fot. 4, ryc. 5b). W późniejszym czasie powstały tam osuwiska jako efekt odrywania luźnego osadu z przesuszonych klifowych ścian wału wydowego (*tension cracks*). Rozmyte zostały wydmy embrionalne w okolicy osady Czajcze (profil 291, 293 km). Plaże obniżyły się tam maksymalnie o 1,5 m (ΔHPG). To jedne z wyższych wartości na badanym odcinku wybrzeża. W kilku miejscach powstały rozległe nagromadzenia materii organicznej i śmieci na plaży (na jednym z testowanych odcinków – 300 m długości plaży – zebrałem 780 korków od plastikowych butelek). Plaże na tym odcinku miejscami były szersze niż przed spiętrzzeniami, co wynika z odłożenia osadu z rozmytych wydym. Na nich powstał wysoki do 1 m n.p.m. wał brzegowy, zbudowany z piasku wymytego z wydym. W Łazach uszkodzone zostały zejścia na plażę. Po raz kolejny woda odkryła pnie drzew oraz utwory gytii i torfów położonych na glinach, zalegających do 1 m n.p.m. (profil 288,6 km).



Fot. 4. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych wschodniej części mierzei jeziora Jamno

A – erozja wydmy za kanałem Jamno, 294 km (1 – kępa wierzby), B – erozja wydmy w łąkach, około 290,5 km (2 – radar)

Photographic documentation of morphological changes in the eastern part of the Lake Jamno sandbar

A – eroded dune near the Jamno channel, at 294 km (1 – willow clump), B – eroded dune in łąki, at 290.5 km (2 – radar)

Mierzeja jeziora Bukowo

Na tej wąskiej mierzei cofnięcie się wydm osiągało 6–10 m (fot. 5). Rozmiciu uległy powstające od kilku lat wydmy przednie (265–266 km). Wszystkie formy embrionalne na plaży zostały zniszczone. Odślonięte zostały szczątki opaski brzegowej, pochodzącej z umocnienia po sztormie ze stycznia 1914 r. (264 km). W wysokich wydmach powstały sześciometrowej wysokości skarpy, a na niskich odcinkach przy ujściu z jeziora woda wdzierwała się w głąb mierzei. Wszędzie powstały podcięcia wydm do wysokości 4–6 m z licznymi osuwiskami (profil 285, 282,2 km). Wysokość plaż obniżyła się o około 1 m ($\Delta H P_g$). Na plaży powstał rozległy wał brzegowy, zbudowany z osadu pochodzącego ze zniszczonych wydm. Liczne nanosy materii organicznej w górnej części plaży, w tym całe sosny wyrwane z podłoża, świadczyły o skali erozji miejsc sąsiednich. Ujście kanału z jeziora



Fot. 5. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych na mierzei jeziora Bukowo
 A – rozmyta wydma przednia, 286–285 km (1 – kępa wierzby), B – rozmyta wydma przednia, 282 km (2 – kępa sosen)
Photographic documentation of the morphology of the Lake Bukowo sandbar
 A – eroded foredune, at 285–286 km (1 – willow clump), B – eroded foredune in Łazy, at 282 km (2 – clump of pine trees)

do morza uległo przebudowie, a woda cofająca się do jeziora podtopiła przyległe obszary lądu.

Brzeg wydmowy doliny Wieprzy

Na tym wydmowym odcinku brzegu, pomiędzy Dąbkami a Darłówkiem, nadbrzeże budują dwa wały wydmowe. Jego ekspozycja, sprzyjająca bezpośrednim atakom fal z kierunku NW, spowodowała cofnięcie krawędzi wydm o 3–4 m (ΔKW). Ich podstawa miejscami cofnęła się do 10 m (ΔPW). Plaże po sztormach, w lutym 2017 r. były szersze niż we wrześniu 2016 r., odłożony został na nich osad z rozmytych wydm. Ich wysokość obniżyła się o 1–1,3 m (ΔHPg). W środkowej części plaży powstało znaczne obniżenie, a od strony morza rozwinął się szeroki i wysoki na 0,6 m wał brzegowy. Formy te, przy wysokim stanie wody podczas sztormu, były okresową rewą i rynną odpływową u podnóża rozmywanych wydm. Największe zmiany w morfologii wystąpiły przy ujściu niewielkiej rzeki Leniwiec –



Fot. 6. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych zachodniej części mierzei jeziora Kopań
 A – erozja stoku niskiej wydmy i zniszczenia faszyny 268 km (1 – wysoka sosna), B – zniszczone umocnienie z faszyny przy kanale Kopań, rejon 264,5 km (2 – kępa sosen)

*Photographic documentation of morphology in the western part of the Lake Kopań sandbar
 A – eroded slope of low dune and destroyed fascine, at 268 km (1 – tall pine), B – destroyed fascine protection near channel, at 264.5 km (2 – pine clump)*

znaczna erozja skarp wydmowych nad kanałem oraz po obu stronach ujścia cieku. Embrionalne formy wydm, obecne na plaży przed sztormami, uległy erozji (za wyjątkiem krótkiego odcinka w rejonie 276,6 km). Dzięki nim erozja właściwego wału wydmowego (ΔPW) była mniejsza i wynosiła 2–3 m. Są to najmniejsze wartości cofnięcia nadbrzeży w całej Zatoce Koszalińskiej. Na odcinku 271–272 km erozja wystąpiła tylko w dolnej części stoku wysokiego wału wydmowego (profil 271,6 km).

Mierzeja jeziora Kopań

W części zachodniej mierzeja przechodzi w niskie wybrzeże wydmowe przy ujściu Wieprzy w Darłówwku. Tam, poprzez rzekę, woda wlała się w głąb lądu i sięgała do fundamentów zabudowy nadmorskiej. Wdzierające się przez rzekę morze grożące podtopieniami, skutecznie powstrzymano układając 40 cm wysokości zapory z worków wypełnionych piaskiem (podtopienia miały jednak miejsce).



Fot. 7. Dokumentacja fotograficzna zmian morfologicznych wschodniej części mierzei jeziora Kopań

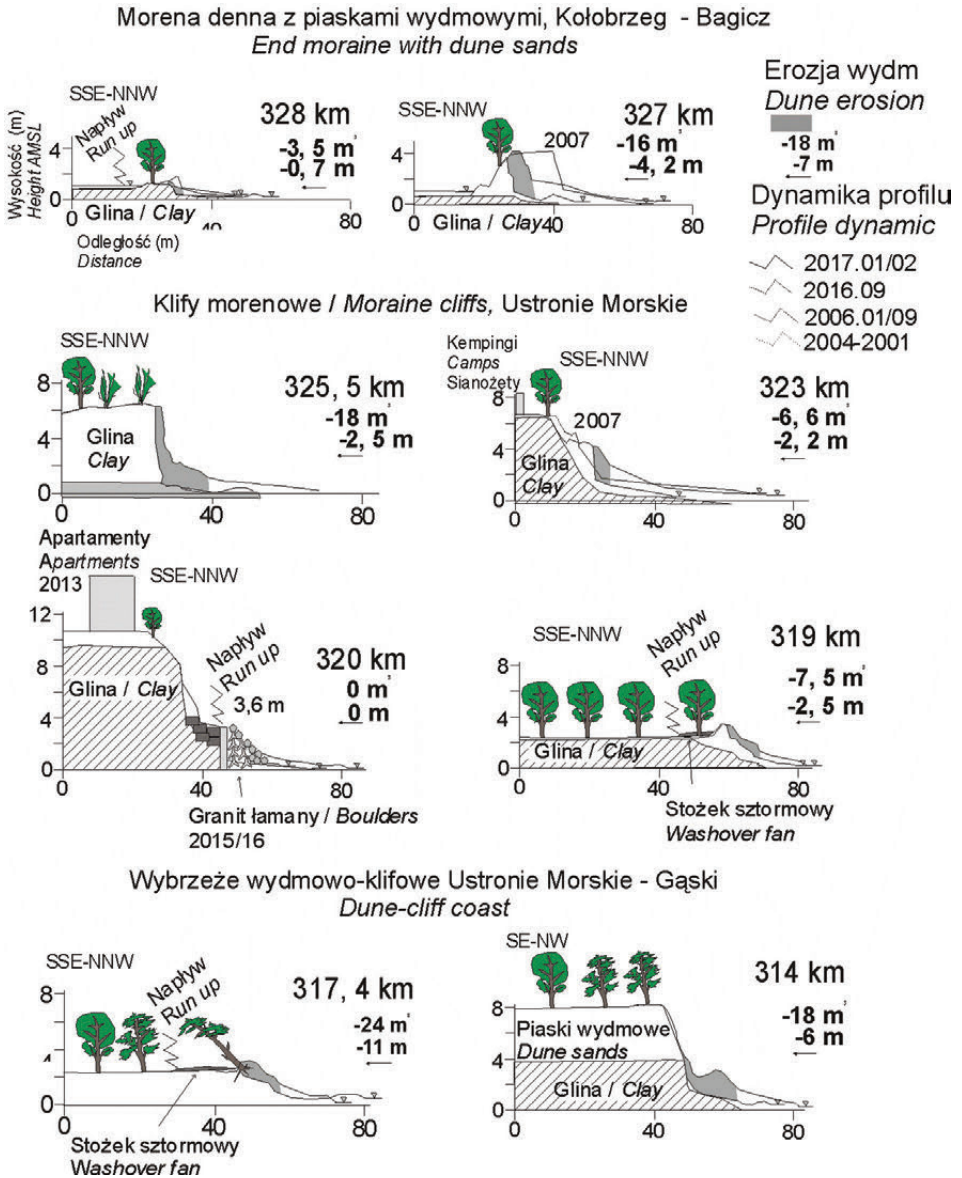
A – erozja stoku niskiej wydmy i zniszczenia faszyny, 263 km (1 – topole), B – erozja niskich wydm na morenie, 262 km (2 – wysoczyzna morenowa, 3 – kępa brzoź)

Photographic documentation of morphology in the eastern part of the Lake Kopań sandbar

A – eroded slope of low dune, destroyed fascine, at 263 km (1 – tall pines), B – eroded low dunes on moraine bottom, at 262 km (2 – moraine hill, 3 – birch clump)

Na bulwarze nadmorskim woda pozostawiła ogromne ilości materii organicznej oraz śmieci, które zalegały na nabrzeżu: na promenadzie i w okolicach portu oraz ponad opaską brzegową. Ponownie, jak w 2012 r. i 2013 r., została uszkodzona infrastruktura przy wejściu do portu. Należy podkreślić, że gdyby nie zastosowano refulatu, wąska wydma we wschodniej części Darłówka mogła zostać przerwana przez falę sztormową, sięgającą do 4 m n.p.m. W tym rejonie cofnięcie podstawy wydmy wyniosło tylko 2–4 m (ΔPW). Refulat na plaży został rozmyty w 2/3 objętości. Podbrzeże pomiędzy sztuczną plażą a wzdłużbrzegowymi falochronami wyspowymi, zostało wypłyczone osadem z rozmycia refulatu. Konstrukcja ta również zniwelowała skalę erozji – pomiędzy segmentami falochronów plaża była węższa i niższa niż na odcinkach znajdujących się w ich cieniu.

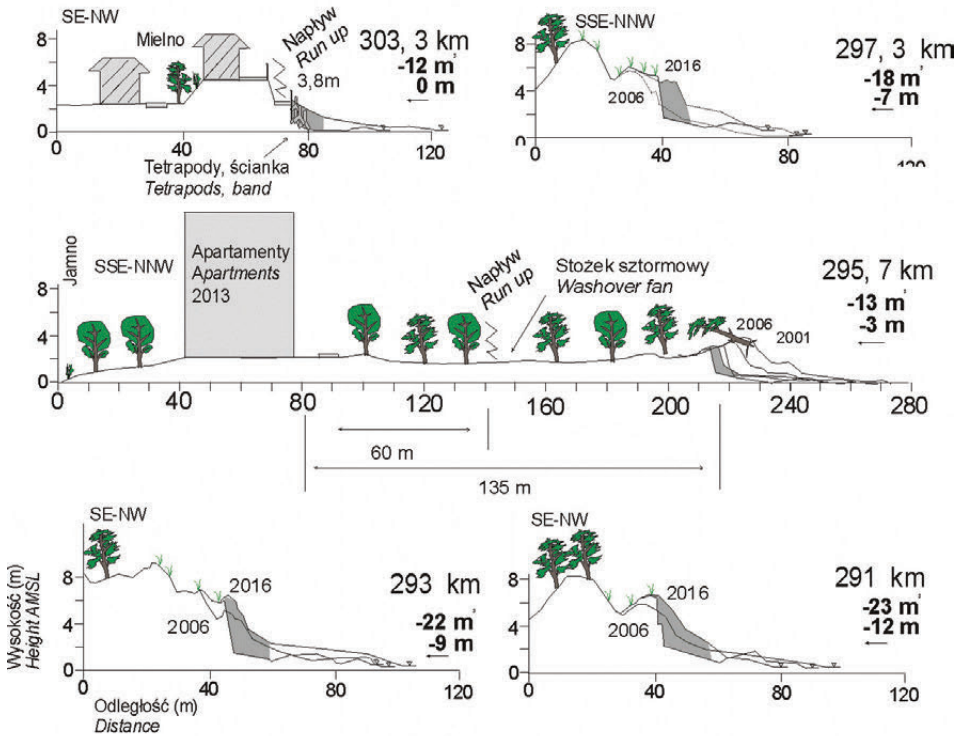
Na wschód od Darłówka liczne pnie drzew w górnej części plaży, pochodzące z pobliskiej mierzei jeziora Kopań, świadczyły o przemieszczaniu artefaktów i osadu wzdłuż brzegu z kierunku NE do SW. Pomimo zastosowania nowej i komplek-



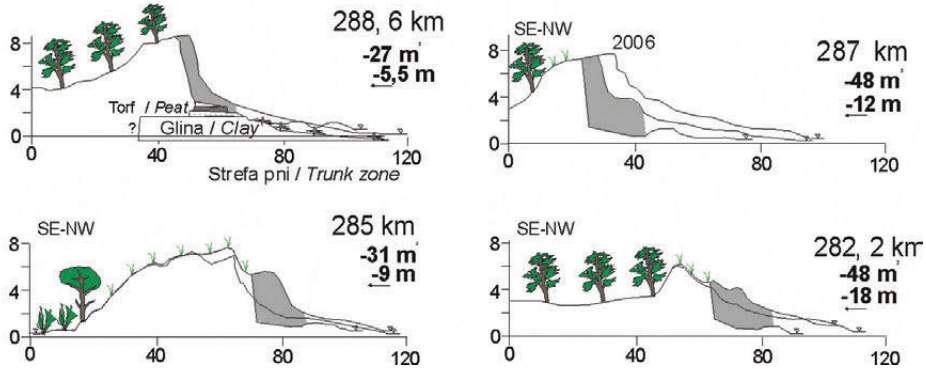
Ryc. 5a. Morfologia i erozja nadbrzeży na wydmo-klifowym odcinku Kołobrzeg – Gąski
Morphology and coastal erosion along the Kołobrzeg–Gąski moraine-dune section

sowej ochrony brzegu, ten wąski odcinek mierzejowo-wydmy był niszczone z dużym impetem podczas spiętrzenia sztormowego Axel. Wąskie i niskie plaże nie były w stanie wygasić falowania i osłonić niewysokich wydm przed erozją. Na całym odcinku cofnięcie lądu (ΔPW) wyniosło 4–8 m (fot. 6, ryc. 5b). Plaże zwężyły się o 10–15 m (ΔSzP), i obniżyły się do 0,8 m n.p.m. (ΔHPG). Wały wydmy i ich

Mierzeja Jeziora Jamno / Lake Jamno Sandbar



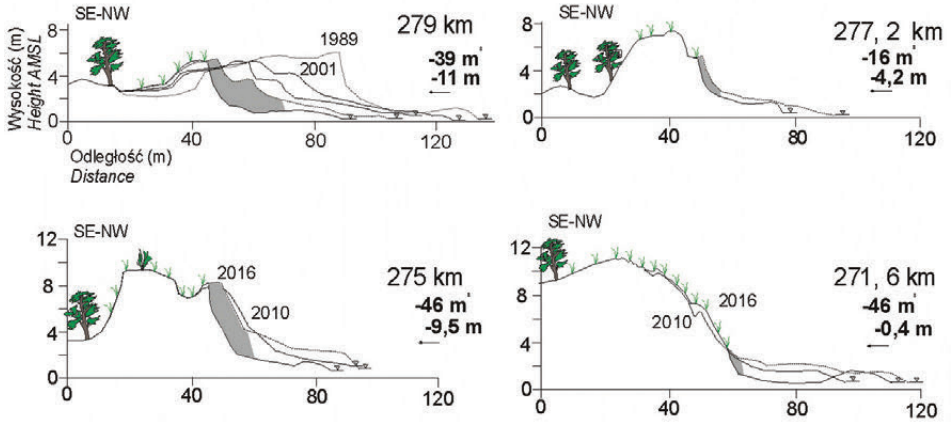
Mierzeja Jeziora Bukowo / Lake Bukowo Sandbar



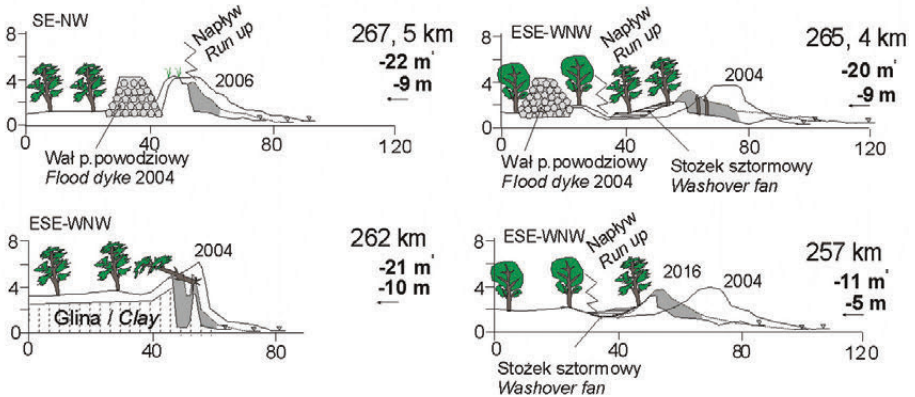
Ryc. 5b. Morfologia i erozja nadbrzeży na mierzei jezior Jamno i Bukowo
Morphology and coastal erosion along the section of the lakes Jamno and Bukowo sandbars

szczątkowe formy w wielu miejscach zostały zupełnie rozmyte. Na zapleczu rozmytego nadbrzeża powstały rozległe stożki spiętrzeń sztormowych, wypełnione osadem, gałęziami, pniami drzew i śmieciem (zniszczenia w przyrodzie były bardzo duże, pierwszy raz obserwowałem po sztormie świeże kretowiska powstałe

Pas mierzejowy / Dune belt Dębki - Darłówko



Mierzeja Jeziora Kopań / Kopań Lake Sanbar



Ryc. 5c. Morfologia i erozja nadbrzeży na mierzei Dębki – Darłówko i mierzei jeziora Kopań
Morphology and coastal erosion along the section of sandbar between Dębki and Darłówko and on the Lake Kopań sandbar

na plaży górnej, w strefie, która dotychczas była lądem). W pasie do 5 m w głąb wąskiego pasa lądu powalone zostały wysokie drzewa. Zupełnemu zniszczeniu uległy faszynowe płoty z wiązek prasowanej wierzby (fot. 6, 7). W wielu miejscach nowo wbite w dno palisady ostróg zostały znacznie uszkodzone, a wyptukane i przenoszone przez fale łamały drzewa i krzewy, porastające niski wał nadbrzeżny. Maksymalna erozja nadbrzeża (ΔPW) wyniosła 10–12 m.

Na wschód od kanału Kopań do miejscowości Wicie niskie wydmy uległy znacznemu rozmyciu (profil 262 km). Sąsiednie nadbrzeże zbudowane z glin mo-

Tabela 3a. Parametry morfologiczne erozji spowodowanej przez sztormy Barbara i Axel na wybrzeżu morenowo-wydnowym Kołobrzeg – Mielno*Morphological parameters of erosion along the moraine-dune coast between Kołobrzeg and Mielno, as caused by Storms Barbara and Axel*

Km brzegu <i>Km of coast</i>	Wys. wydmy (HW) <i>Dune height (m)</i>	Szer. plaży (SzP) <i>Beach width (m)</i>	Zmiana szer. plaży (Δ SzP) <i>Beach width change (m)</i>	Zmiana wys. plaży (Δ HP) <i>Beach height change (m)</i>	Cofnięcie krawędzi wydmy (Δ SzKW) <i>Dune toe retreat (m)</i>	Cofnięcie podstawy wydmy (Δ SPW) <i>Dune foot retreat (m)</i>	Średnia erozja osadu przekroju wydmy (Δ Q) <i>Mean sand erosion (m³/m²)</i>	Suma erozji osadu na przekroju wydmy (Δ SQ) <i>Sum of sand erosion (m³/mb)</i>
Odcinek/Section: Kołobrzeg/Bagicz – Ustronie Morskie								
330,7	4/a/w/k	20	-21	-1,0	-1,0	-3,0	-3,0	-9,0
330	4/a/w/k	5	-15	-0,8	n/d	n/d	n/d	n/d
329	5a/w/k	2	-18	-0,8	n/d	n/d	n/d	n/d
328	1/w_3/k	28	+4	-0,7	-0,2	-0,7	-0,3	-3,5
327	4,5	21	-22	-1,5	-3,5	-4,2	-3,0	-16,0
325	5	26	-18	-1,4	-2,0	-2,5	-6,5	-18,0
324	4	28	-15	-1,1	-1,6	-2,5	-5,5	-15,0
323	5/w_7/k	23	-20	-0,6	-1,0	-2,2	-2,3	-6,6
321,4	5/a/w/k	24	-11	-1,3	-1,5	n/d	-2,0	-2,5
Odcinek/Section: Ustronie Morskie – Gąski								
320	11/a/k	4	-8	-0,9	n/d	n/d	n/d	n/d
319,4	12/w/k	32	-3	-0,8	-4,0	-6,0	-2,5	-13,0
319	4	12	-5	-0,5	1,6	-2,0	-1,1	-7,5
318	10	21	-7	-0,9	-0,6	-4,0	-7,5	-26,0
317,3	3	42	+9	-1,1	-9,0	-11,0	-2,8	-24,0
317	5	38	+5	-1	-0,3	-4,0	-0,6	-11,0
316,3	6/w/k	32	+3	-1,2	-2,0	-4,0	-3,0	-12,0
316	6/w/k	30	+4	-1,3	-1,0	-3,0	-2,5	-16,0
314	4/w_8w/k	33	+8	-1,2	-1,0	-6,0	-2,8	-18,0
Odcinek/Section: Gąski – Sarbinowo – Mielenko								
312	9/k	22	-5	-0,7	-0,2	-0,5	-5,0	-5,0
311	7 w/k	25	-10	-0,9	-0,4	-0,5	-5,0	-8,0
309,1	4	22	-11	-0,8	-2,0	-3,0	-2,0	-11,0
308	8	28	-8	-1,4	-4,0	-5,0	-3,5	-21,0
307	6/a	18	-12	-0,9	n/d	n/d	n/d	n/d
305	7	25	-15	-1,2	-2,0	-4,0	-5,0	-24,0
303,5	7	30	-12	-1,4	-2,5	-5,0	-3,0	-15,0
303	5	31	-10	-1,5	-3,0	-6,0	-2,5	-19,0
301	6	35	-5	-1,2	-2,0	-4,0	-3,5	-15,0

a – brzeg antropogeniczny, opaski, ścianki itd., k – klif morenowy, w/k – wydma na klifie, w_k – wydma przed klifem, n/d – nie dotyczy

a – anthropogenic coast, k – moraine cliff, w/k – dune on cliff, w_k – dune at front of cliff, n/d – not applicable

Opracowanie własne, podobnie pozostałe table / Author's own elaboration, like remaining tables.

Tabela 3b. Parametry morfologiczne erozji spowodowanej przez sztormy Barbara i Axel na mierzei jeziora Jamno i Bukowo
Morphological parameters of erosion along the lakes Jamno and Bukowo sandbars as caused by Storms Barbara and Axel

Km brzegu <i>Km of coast</i>	Wys. wydmy (HW) <i>Dune height (m)</i>	Szer. plaży (SzP) <i>Beach width (m)</i>	Zmiana szer. plaży ($\Delta\SzP$) <i>Beach width change (m)</i>	Zmiana wys. plaży ($\Delta\SzHP$) <i>Beach height change (m)</i>	Cofnięcie krawędzi wydmy ($\Delta\SzKW$) <i>Dune toe retreat (m)</i>	Cofnięcie podstawy wydmy (ΔPPW) <i>Dune foot retreat (m)</i>	Średnia erozja osadu przekroju wydmy (ΔQ) <i>Mean sand erosion (m³/m²)</i>	Suma erozji osadu na przekroju wydmy ($\Delta\Sigma Q$) <i>Sum of sand erosion (m³/mb)</i>
Odcinek/Section: Mielno – Unieście – Łazy								
300	6/a	28	-12	-1,3	n/d	n/d	n/d	n/d
298,6	5	32	-11	-1,1	-3,0	-5,0	-3,0	-11,0
297,3	5	30	-10	-1,2	-5,0	-7,0	-3,0	-18,0
297	6	31	+8	-1,0	-0,5	-2,0	-2,6	-12,0
296,3	3,5	34	+9	-1,0	-1,2	-4,0	-3,5	-14,0
295,7	3,5	33	+10	-1,0	-1,0	-3,0	-3,0	-13,0
294,6	7/a	120	+100	-1,2	n/d	n/d	n/d	n/d
294	7	24	-15	-1,4	-4,0	-7,5	-6,0	-33,0
293	6	35	+5	-1,4	-2,5	-9,0	-5,0	-22,0
292	7	27	-5	-1,5	-2,5	-5,0	-2,0	-16,0
291	7	45	+15	-1,8	-3,0	-12,0	-4,5	-23,0
290	7	40	+10	-1,5	-1,5	-5,0	-5,0	-21,0
Odcinek/Section: Łazy – Dąbkowice – Dąbki – Bobolin								
289	7	60	-10	-0,7	-1,0	-3,0	-5,0	-21,0
288,6	8	48	-12	-0,9	-2,0	-5,5	-7,0	-27,0
287	7	34	-15	-1,0	-3,0	-12,0	-6,0	-48,0
286	6	30	-14	-0,7	-2,0	-11,0	-2,7	-29,0
285	6	28	-12	-0,8	-1,5	-9,0	-2,8	-31,0
282,2	6	22	-15	-1,4	-10,0	-18,0	-3,0	-48,0
279	7	43	-3	-1,1	-7,0	-11,0	-5,5	-39,0
278	6	31	-5	-0,6	-2,5	-3,5	-2,1	-11,0
277,8	6	33	-6	-0,7	-3,0	-6,0	-2,5	-15,0
277,2	6	25	-10	-0,8	-2,5	-4,2	-3,2	-16,0
277	7	26	-8	-1,0	-2,0	-7,0	-4,0	-25,0
276,5	6	25	-10	-1,0	-2,5	-4,2	-3,2	-16,0

renowych cofnęło się o około 0,5 m, a ośnaniające klif wydmy embrionalne zostały rozmyte. Na wschód za Wiciem siedmiometrowej wysokości wydma cofnęła się o 2–3 m. Szerokość plaż zmniejszyła się o 15–19 m, a wysokość (ΔHPg) – o 1 m. Na odcinku Wicie – Jarosławiec (do początku wysokiego nadbrzeża klifowego z nowymi rozległymi falochronami) niskie nadbrzeże nie powstrzymało wody przed waniem się do lasu. Powstały stożki spiętrzeń wypełnione śmieciami i materia

organiczną. Nadbrzeża wyższe uległy znacznej erozji wynoszącej 3–6 m (ΔPW). Plaże na tym odcinku obniżyły się o 0,8 m (ΔHPg), a ich szerokość zmniejszyła się o 15–18 m (ΔSzp).

Tabela 3c. Parametry morfologiczne erozji spowodowanej przez sztormy Barbara i Axel w pasie mierzejowym rejonu ujścia rzeki Leniwiec i Wieprzy oraz na mierzei jeziora Kopań
Morphological parameters of erosion on the barrier belt of the Leniwiec and Wiepra mouths and the Lake Kopań sandbar, as induced by Storms Barbara and Axel

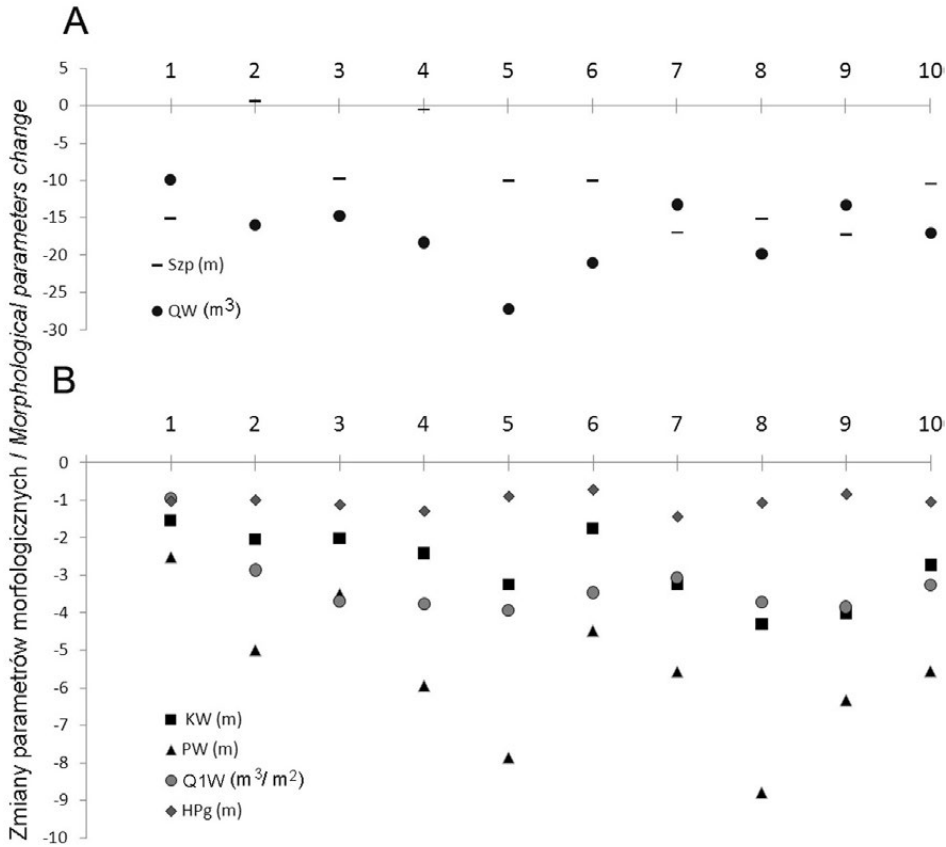
Km brzegu <i>Km of coast</i>	Wys. wydmy (HW) <i>Dune height (m)</i>	Szer. plaży (SzP) <i>Beach width (m)</i>	Zmiana szer. plaży (ΔSzP) <i>Beach width change (m)</i>	Zmiana wys. plaży (ΔHP) <i>Beach height change (m)</i>	Cofnięcie krawędzi wydmy. (ΔSKW) <i>Dune toe retreat (m)</i>	Cofnięcie podstawy wydmy (ΔPW) <i>Dune foot retreat (m)</i>	Średnia erozja osadu przekroju wydmy (ΔQ) <i>Mean sand erosion (m³/m²)</i>	Suma erozji osadu na przekroju wydmy ($\Delta \Sigma$) <i>Sum of sand erosion m³/mb</i>
Odcinek/Section: Bobolin – Darłówko Zachodnie								
275,6	6	22	-10	-0,8	-1,0	-6,0	-4,0	-28,0
275	7	30	-6	-0,9	-3,7	-9,5	-6,5	-46,0
274	6	28	-11	-0,7	-2,0	-5,0	-3,4	-25,0
273	4	31	-15	-0,6	-1,8	-4,0	-2,8	-12,0
272	8	50	-10	-0,7	-2,0	-2,0	-3,0	-9,0
271.5	8	55	-8	-0,6	0,0	-0,4	-1,0	-6,0
Odcinek/Section: Darłówko Wschodnie								
270	6	24	-15	-1,7	0,0	-3,8	-2,2	-9,0
269.5	7	27	-20	-1,5	-2,0	-4,0	-3,0	-11,0
269	5	29	-15	-1,2	-3,0	-5,5	-3,0	-15,0
268	5	34	-18	-1,3	-8,0	-9,0	-4,0	-18,0
Odcinek/Section: mierzeja jeziora Kopań								
266	4	18	-10	-1,0	-2,0	-6,0	-4,0	-17,0
265,4	4	22	-15	-1,1	-6,0	-9,0	-4,0	-20,0
263	4	18	-16	-0,9	-3,0	-8,0	-3,5	-18,0
262.5	4	19	-15	-1,1	-3,5	-11,0	-2,0	-21,0
262	5/w/k	10	-20	-1,2	-7,0	-10,0	-5,0	-23,0
Odcinek/Section: Wicie – Jarosławiec								
260	5	30	-18	-0,9	-5,0	-8,0	-4,5	-17,0
259	4	23	-15	-0,8	-3,0	-6,0	-3,8	-12,0
257	4	25	-19	-0,8	-4,0	-5,0	-3,2	-11,0

Dyskusja

Ekstremalne poziomy morza związane ze spiętrzeniami są pochodną kilku czynników, w tym przeważających kierunków wiatru i napełnienia akwenu Morza Bałtyckiego (Wolski, 2017). Zjawiska sztormowe nie powtarzają się co roku, co wynika z dużej zmienności warunków atmosferycznych. Kilka następujących po sobie spiętrzeń powoduje większe zmiany morfologiczne jako efekt sumowania erozji. W wyniku oddziaływania kilku spiętrzeń sztormowych z sezonu jesienno-zimowego 2016/2017, na całym odcinku 75 kilometrów wybrzeża od Kołobrzegu do Jarosławca, pierwszy raz od wielu lat zarejestrowano ekstremalną erozję wydm i plaż. Plaże średnio cofnęły się o 12 m (ΔSzP) i obniżyły o 1,2 m (ΔHPG) (ryc. 6). Najmniejsze zmiany szerokości plaż, a nawet ich przyrost, wystąpiły pomiędzy Ustroniem Morskim a Gąskami oraz w rejonie Unieścia. Na odcinkach o dużym ubytku osadu z wysokich do 7–9 m n.p.m. wydm, plaże po sztormach były nawet szersze niż przed sztormami z powodu cofnięcia wydm i nadbudowy plaży przez również posztormową, rynną i wał brzegowy. Utworzone przy wysokim poziomie morza obniżenia na plaży u podnóża opasek i ścianek szczelnych, wyglądały jak typowa rynna międzyrewowa. Z kolei przy linii wody z osadu pochodzącego z erozji rozbudowały się wysokie do 1,2 m n.p.m., rozległe wały brzegowe. Ponadto płytkie podbrzeże zostało również wypłyczone przez odłożony osad pochodzący z rozmycia nadbrzeży.

W literaturze podaje się dwa rodzaje erozji nadbrzeża (Van de Graaff, 1986): jednostkową, przy cofaniu wydmy o 2 m i zmianie objętości osadu do $-50 \text{ m}^3/\text{m}^2$ i gwałtowną, która w ciągu 5 do 10 godzin powoduje cofnięcie o 15–20 m i 4 razy większy ubytek osadu. Największe zmiany erozyjne podstawy wydmy (ΔPW) i jej krawędzi (ΔKW) zarejestrowano na mierzejach jezior Jamno, Bukowo i Kopań; średnio -3 m (KW) i -5 do -7 m (PW). Największy ubytek osadu sięgał do -3 m^3 na 1 m^2 powierzchni formy (ΔQW). Sumarycznie największa średnia zmiana objętości nadbrzeży wydmowych dochodziła od -15 do -20 m^3 osadu ($\Delta \Sigma QW$). Ekstremalne ubytki wynosiły około -30 do -40 m^3 osadu w wydmach o wysokości 7–8 m na mierzejach jezior Jamno i Bukowo.

Badania empiryczne wskazują, że głównym czynnikiem wielkości erozji wydmy jest wysokość poziomu morza podczas spiętrzenia sztormowego, a w mniejszym stopniu – czas trwania spiętrzenia i wyjściowy profil nachylenia brzegu (Basiński, 1995; Van de Graaff, 1986; Davidson-Arnott, 2005; Van Rijn, 2009). Badania eksperymentalne potwierdzają tę tezę, podkreślając wagę wysokości napływu wody na stok nachylonej plaży, która kształtuje strefę zmywu, czyli erozji wydmy (Van Rijn, 2009). Kąt podejścia fali oraz jej okres nie mają wpływu na wielkość erozji (Basiński, 1995). Zależność ta nie jest jeszcze ustalona, co ma znaczenie zwłaszcza w przypadku zmiany kąta podejścia falowania, które ma często miejsce. Z obserwacji wynika, że tzw. ekspozycja brzegu na falowanie ma wpływ na wielkość erozji. Przy zmianie kierunku falowania w relacji do ekspozycji brzegu, zmie-



Ryc. 6. Zmiany średnich parametrów morfologicznych nadbrzeży

A: SzP – szerokość plaży, QW – sumaryczna objętość nadbrzeża – wydm

B: KW – krawędź wydmy, PW – podstawa wydmy, Q1W – objętość osadu na 1m², HPg – wysokość plaży

1 – Kołobrzeg – Sianożęty, 2 – Ustronie Morskie – Gąski, 3 – Gąski – Mielenka, 4 – mierzeja jeziora Jamno, 5 – mierzeja jeziora Bukowo, 6 – Dąbki – Darłówek, 7 – Darłówek Wschodnie, 8 – mierzeja jeziora Kopań, 9 – Wicie – Jarosławiec, 10 – sumaryczna średnia

Mean changes in morphological parameters

A: SzP – beach width, QW – total sand volume in dune

B: KW – dune edge, PW – dune foot, Q1W – sand volume per 1m², HPg – beach height

1 – Kołobrzeg – Sianożęty, 2 – Ustronie Morskie – Gąski, 3 – Gąski – Mielenka, 4 – Lake Jamno sandbar, 5 – Lake Bukowo sandbar, 6 – Dąbki – Darłówek, 7 – East Darłówek, 8 – Lake Kopań sandbar, 9 – Wicie Jarosławiec, 10 – the total average

nia się wielkość erozji. Na wielkość erozji wydmy ma również wpływ uziarnienie podłoża (Van de Graaff, 1986; Basiński, 1995; Van Rijn, 2009), czyli również budowa geologiczna. Po spiętrzeniu sztormowym Barbara i Axel na nadbrzeżach wysokich sumaryczna zmiana objętości osadu była zawsze znacznie większa niż na nadbrzeżach niższych. Z kolei spiętrzenie Angus rozwijające się z przeciwnej strony niż orientacja brzegu zatoki nie powodowało erozji wydm. Na odcinkach

w części zbudowanych z glin morenowych zmiany objętości oraz erozja były najmniejsze. Na niskich nadbrzeżach podczas spiętrzenia sztormowego Axel, woda przelewała się ponad niskim do 4 m n.p.m. nadbrzeżem, tworząc stożki spiętrzeń sztormowych na zapleczu brzegu. Wlewy wody w głąb lądu sięgały 50–100 m, na odcinkach zbudowanych z niskich, znacznie już zniszczonych wydm. Budowa geologiczna oraz odporność podłoża wpływa na wielkość erozji. Ukształtowanie nadbrzeża jest najbardziej istotnym uwarunkowaniem obserwowanych zasięgów napływu sztormowego na ląd. Nadbrzeże zbudowane tylko z piasków wydmy cofa się z podobną prędkością. Wychodnie glin i torfów hamują abrazję, co zmniejsza sumaryczną wartość erozji.

Do analiz statystycznych parametrów morfologicznych brzegu i nadbrzeża przed i po spiętrzeniach sztormowych wykonano macierz korelacji (tab. 4). Próbowano określić związek pomierzonych wskaźników zmian morfologii z maksymalnymi wartościami poziomu morza. Uzyskane wysokie wyniki korelacji pomiędzy prędkością wiatru, poziomem morza (Hm) a zmianami parametrów plaży i nadbrzeża wydmy na Półwyspie Helskim (Boniecka, 2000) oraz wysokie zależności pomiędzy wysokością poziomu morza (Hm) i wysokością plaży przed spiętrzeniem ($HPg B$) oraz wielkością cofnięcia się wydmy: podstawy (ΔPW), krawędzi (ΔKW), zmiany objętości (ΔQW), uzyskane na eksperymentalnym profilu brzegu na Mierzei Bramy Świny (Łabuz, 2011), nie znalazły bezpośredniego potwierdzenia w analizowanych danych po spiętrzeniach sztormowych z okresu 2016/2017. Nie uzyskano czytelnych zależności pomierzonych wskaźników morfologicznych i hydrologicznych na analizowanych profilach nadbrzeża. Nie doszukanano się również silnego związku pomiędzy parametrami morfologicznymi plaż i nadbrzeży wydmy. Jedynie dla wybranych profili pomiarowych potwierdziły się uprzednio stwierdzone zależności: wielkości erozji wydmy od wysokości plaży przed sztormem i od maksymalnego poziomu morza (Łabuz, 2014). Wynika to ze zróżnicowanej szerokości oraz wysokości plaży na każdym pomierzonym profilu, prawdopodobnie dużej zmienności falowania, podczas wszystkich analizowanych spiętrzeń sztormowych. Na wielkość erozji wydmy miało również wpływ odsłonięcie w podłożu plaż torfów i glin hamujących napływ falowania. Nie należy więc uśredniać jednej lub dwóch pomierzonych wartości erozji z danego miejsca, jako zmiany typowej dla całego, większego odcinka brzegu. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wysokość poziomu morza podczas spiętrzenia i ekspozycja brzegu na działanie fal odgrywa istotną rolę w erozji wydmy, przejawiającej się zmianą jej objętości i wielkością cofnięcia jej krawędzi lub podstawy. Jednak nie osiągnięto pomiędzy tymi parametrami pełnej korelacji. Należy podkreślić, że tuż po ustaniu spiętrzenia inicjowane jest dalsze odrywanie osadu z naruszonego stoku wydmy w wyniku siły ciężenia. Osuwiska na stoku przyczyniają się do zwiększania ujemnego bilansu osadu wydmy i są powszechne na stromych stokach po sztormach. Ponadto na odsłoniętym pionowym stoku wydmy zachodzą po sztormie procesy deflacji. Wywiewany osad gromadzi się między innymi

Tabela 4. Macierz korelacji wskaźników morfologicznych nadbrzeża i brzegu
Correlation grid for shoreline and coastal morphological parameters

Zmienne Variables	Hm	HPg B	SzP B	HW B	Δ HPg	Δ SzP	Δ QP-	Δ SzW	Δ PW	Δ KW	Δ Q1W	Δ QW
Hm	1,00	-	-	-	-0,63	-0,37	-0,49	-0,47	-0,65	-0,54	-0,48	-0,44
HPg B	-	1,00	-	-	0,27	0,19	-0,57	0,29	-0,61	-0,33	-0,61	-0,53
SzP B	-	-	1,00	-	-0,03	-0,23	0,36	0,25	-0,34	0,22	0,24	-0,50
HW B	-	-	-	1,00	-0,60	-0,01	0,05	0,24	-0,78	-0,45	-0,56	-0,83
Δ HPg	-0,63	0,27	-0,03	-0,60	1,00	0,10	0,26	-	-	-	-	-
Δ SzP	-0,37	0,19	-0,23	-0,01	0,10	1,00	-0,28	-	-	-	-	-0,32
Δ QP	-0,49	-0,57	0,36	0,05	0,26	-0,28	1,00	-	0,25	0,33	0,24	0,02
Δ SzW	-0,47	0,29	0,25	0,24	-	-	-	1,00	-	-	-	-
Δ PW	-0,65	-0,61	-0,34	-0,78	-	-	0,25	-	1,00	0,08	-0,21	0,39
Δ KW	-0,54	-0,33	0,22	-0,45	-	-	0,33	-	0,08	1,00	-0,08	0,06
Δ Q1W	-0,48	-0,61	0,24	-0,56	-	-	0,24	-	-0,21	-0,08	1,00	0,39
Δ QW	-0,44	-0,53	-0,50	-0,83	-	-0,32	0,02	-	0,39	0,06	0,39	1,00

Hm – poziom morza, HPg B – wysokość i SzP B – szerokość plaży górnej przed spiętrzeniem, HW B – wysokość wydmy przed spiętrzeniem, Δ HPg – zmiana wysokości plaży górnej, Δ SzP – zmiana szerokości plaży, Δ Qp – zmiana objętości plaży, Δ SzW – zmiana szerokości wydmy, Δ PW – zmiana podstawy wydmy, Δ KW – zmiana krawędzi wydmy, Δ Q1W – zmiana objętości osadu wydmy na 1 m², Δ QW – zmiana objętości osadu wydmy

Hm – sea level, HPg B – upper beach height and SzP B – width before surge, HW B – foredune height before surge, Δ HPg – upper beach height change, Δ SzP – beach width change, Δ Qp – beach sand volume change, Δ SzW – dune width change, Δ PW – foredune foot change, Δ KW – foredune top edge change, Δ Q1W – foredune sand volume change per 1 m², Δ QW – foredune sand volume change

na krawędzi grzbietu, gdzie powstają formy podobne do zasp o wysokościach do 0,2 m (opisywane przez Cartera i innych, 1990). Osuwiska, jak i zasy na krawędzi wydmy, obserwowano m.in. na wysokich podciętych wydmach na mierzei jeziora Jamno i Bukowo.

Uzyskane wyniki potwierdzają regułę, że plaża o większej wysokości chroni nadbrzeże przed erozją. W miejscach, gdzie plaże miały wysokość większą niż 2,5 m n.p.m., cofnięcie podstawy wydmy było do dwóch razy mniejsze niż na odcinkach o niższej plaży. Wysokości plaż odgrywają istotną rolę w tłumieniu falowania na brzegu, co zmniejsza siłę erozji. Obecność wydm embrionalnych na plaży również wpływa na zmniejszenie erozji właściwego wału lub nadbrzeża. Według polskich opracowań najbardziej zagrożone erozją są te odcinki brzegu, gdzie plaża ma do 30 m szerokości i wysokości do 1,5 m n.p.m., a bezpieczne są odcinki, gdzie plaża ma ponad 2 m wysokości n.p.m. (Dubrawski i Zawadzka-Kahlau, 2006). Z przeprowadzonych badań zależności wielkości erozji wydmy objętości (Δ QW) od wysokości plaży przed spiętrzeniem sztormowym (HPg B) wynika, że jedynie plaże o wysokości ponad 3 m n.p.m. osłaniają wydmę przed erozją.

W wyniku oddziaływania spiętrzeń sztormowych z sezonu jesienno-zimowego 2016/2017, cofnięcie nadbrzeży wydymowych i klifowych nastąpiło na całym badanym odcinku, a także na całym wybrzeżu południowego Bałtyku. Tylko w nielicznych miejscach tworzące się powoli od kilku lat wydmy embrionalne nie uległy całkowitej erozji. Są to krótkie odcinki w rejonie Dąbkowic (284 km), w Dąbkach (278 km), Bobolinie (276 km) i Darłównu Zachodnim (271 km). W tych miejscach plaża z wydumą embrionalną miała wysokość ponad 3 m n.p.m., co uchroniło właściwy wał wydymowy przed erozją.

Do okresu maj-lipiec 2017 r., po przeprowadzonych obserwacjach, stwierdzono przebudowę plaż – obniżenia rynnowe zostały zasypane, a wały brzegowe rozmyte. Natomiast w podbrzeżu pozostał osad pochodzący z erozji. Jest to materiał, który może służyć obecnie do odbudowy plaż. Wały wydym nadmorskich z klifowymi podcięciami uległy dalszej erozji w wyniku rozwoju osuwisk. Ich odbudowa potrwa wiele lat. Jednak w wielu miejscach, gdzie plaże nie są zasobne w osad, wydmy mogą nie być odbudowane. Na odcinkach klifowych platformy abrazyjne wycięte w glinie i torfach, a odsłonięte przez wodę, są obecnie częściowo przykryte osadem nowej plaży. Jego miąższość nie przekracza 0,5 m, a wysokość takiej plaży jest rzędu 1,6–1,8 m n.p.m. W tych miejscach zagrożenie erozją przez kolejne spiętrzenia sztormowe jest duże. Wiosną, plaże na punktowo monitorowanych odcinkach ponownie były szersze o około 10–15 m, lecz nie zostały odbudowane do poprzedniej wysokości. U podnóża podciętych wydym powstały typowe nasypy eoliczne o miąższości do 0,4 m. Wzrastająca od nowa roślinność może ustabilizować ten osad i wpłynąć na odbudowę wydym embrionalnych. Warunkiem jest dostateczny wzrost wysokości plaż, tak aby kolejne spiętrzenie sztormowe nie spowodowało ponownej erozji.

Od lata do jesieni 2017 r. plaże nie zostały jednak odbudowane. W dniach 29–31.10.2017 r. wystąpiło spiętrzenie sztormowe o nazwie Grzegorz. W Kołobrzegu poziom morza sięgał 1,08 m, a w Darłowie 1,16 m ponad średni. Spiętrzenie to zupełnie rozmyło plaże m.in. w Kołobrzegu, Mielnie i Darłowie, a woda bardzo szybko zaczęła podcinać erodowane pół roku wcześniej wydmy. Pierwsze obserwacje terenowe z tego spiętrzenia wskazują, że erozja wydym rzędu 0,2–0,4 m nastąpiła ponownie. Zjawisko to pogłębia proces erozji omawianego odcinka, rozumiany jako cofanie nadbrzeża, co jest następstwem cyklicznych spiętrzeń sztormowych. Te dane wskazują, że erozja nadbrzeży w Zatoce Koszalińskiej postępuje co roku, a bardzo rzadko zdarza się możliwość okresowej odbudowy wydym.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań terenowych określono zmiany parametrów morfologicznych form budujących nadbrzeża i brzeg morski w Zatoce Koszalińskiej, będących efektem oddziaływania na brzeg kilku spiętrzeń sztormowych z sezonu jesienno-zimowego 2016/2017. Brak czasu na odbudowę nadbrzeży, po cyklu spiętrzeń z jesieni 2016 r., umożliwił kolejnemu sztormowi Axel, o znacznym poziomie wody do 1,65 m ponad średni, dokonanie erozji większej niż jakimkolwiek przez ostatnie 22 lata. W zasadzie cały odcinek brzegu o długości 75 km uległ erozji. Plaże obniżyły się o 0,9–1,8 m i zwężyły o około 12 m. Wielokrotne, poprzedzające spiętrzenia sztormowe w sumie spowodowały cofnięcie podnóża nadbrzeży średnio o 4–7 m. Średnia wartość erozji podstawy wydmy wyniosła 6 m, a jej krawędzi 3 m. Ubytek osadu w wydmach wyniósł średnio 17 m³ na metr szerokości brzegu. Największa erozja wystąpiła pomiędzy Mielnem a Jarosławcem, eksponowanym na NW kierunek oddziaływania sztormów i wiatrów. W wielu miejscach zniszczeniu uległy wydmy przednie powstające przez ostatnie 15–20 lat. Przy wzroście wydm rzędu 1–3 m³ na rok, tak duża erozja będzie wymagała odbudowy przez 5–10 lat przy założeniu, że nie będzie kolejnych, tak znacznych spiętrzeń sztormowych. W niektórych miejscach nadbrzeża wydmy cofnęły się do stanu z lat 80. XX w., a na ich miejscu powstały nisko położone nad poziom morza plaże. Plaże po sztormach nie były radykalnie węższe, ponieważ ich zwężenie od strony morza równoważyło jednoczesne poszerzenie w kierunku zniszczonych wydm. Wybrzeże Zatoki Koszalińskiej w przewadze jest erozyjne, a wydmy nadmorskie nie są odbudowywane, jeśli spiętrzenia sztormowe występują co roku.

Ponadto ustalono, że realnie zwiększająca się długość odcinków brzegu poddawanych tzw. „ochronie brzegu”, a raczej zabezpieczeniu infrastruktury przed zniszczeniem, skutkuje intensyfikacją erozji u podnóża opasek i ścianek szczelnych oraz na odcinkach sąsiadujących z zastosowanymi umocnieniami. Z kolei stosowana refulacja plaż jest ostateczną ochroną wąskich i niskich nadbrzeży wydmy, które bez tej odbudowy uległyby zupełnej erozji.

Badania potwierdziły, że głównym parametrem spiętrzenia podczas falowania, odpowiedzialnym za wielkość erozji (cofania nadbrzeżnego lądu), jest maksymalny poziom morza oraz wyjściowa wysokość plaż. Sekwencja następujących po sobie spiętrzeń sztormowych zwiększa skalę erozji, co wynika ze stopniowego obniżania plaż. Wybrane do pomiarów parametry morfologiczne nadbrzeża i brzegu dobrze oddają skalę erozyjnych zmian ukształtowania i okresową morfodynamikę nadbrzeży.

Piśmiennictwo

- Basiński T., 1995, *Przebieg i wielkość sztormowej erozji wydmy*, [w:] W. Florek (red.), *Geologia i Geomorfologia Pobrzeża i Południowego Bałtyku*, 2, Pomorska Akademia Pedagogiczna, Słupsk, s. 187–199.
- Bohdziewicz L., 1963, *Przegląd budowy geologicznej i typów polskich wybrzeży*, [w:] A. Mielczarski (red.), *Materiały do monografii polskiego brzegu morskiego*, 5, Geologia i zagadnienia pokrewne, IBW PAN, Gdańsk – Poznań, s. 10–41.
- Bohdziewicz L., Piątkowski L., 1963, *Budowa geologiczna i zagadnienia geologiczno-inżynierskie jeziora Jamno i okolicy*, [w:] A. Mielczarski (red.), *Materiały do monografii polskiego brzegu morskiego*, 5, Geologia i zagadnienia pokrewne, IBW PAN, Gdańsk – Poznań, s. 42–66.
- Boniecka H., 2000, *Hydrometeorologiczne uwarunkowania niszczenia nadbrzeży polskich brzegów morskich*, [w:] *Materiały konferencji naukowo-technicznej z okazji 50-lecia Instytutu Morskiego*, Materiały IM w Gdańsku, Gdańsk, s. 46–58.
- Borówka R.K., 1999, *Zmiany intensywności potencjalnego transportu eolicznego na plażach wybrzeża kołobrzeskiego w latach 1961–1993 a morfologia i współczesny rozwój wałów wydm przednich*, [w:] R.K. Borówka, Z. Młynarczyk, A. Wojciechowski (red.), *Ewolucja geosystemów nadmorskich południowego Bałtyku*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań-Szczecin, s. 31–35.
- Carter R.W.G., Hesp P.A., Nordstrom K.F., 1990, *Erosional landforms in coastal dunes*, [w:] K.F. Nordstrom, N.P. Psuty, B. Carter (red.), *Coastal dunes. Form and processes*, John Wiley & Sons, Chichester, s. 218–250.
- Davidson-Arnott R.G.D., 2005, *Conceptual model of the effect of sea level rise on sandy coasts*, *Journal of Coastal Research*, 21, 6, s. 1166–1172.
- Dubrawski R., Zawadzka-Kahlau E., 2006, *Przyszłość ochrony polskich brzegów morskich*, Instytut Morski w Gdańsku, Gdańsk.
- Dubrawski R., Zawadzka-Kahlau E., 2015, *Litodynamika strefy brzegowej Półwyspu Helskiego w warunkach sztucznego zasilania w latach 1989–1995 (6)*, Druk NN, Gdańsk – Gdynia.
- Dziedziszko Z., Jednorąb T., 1987, *Wahania poziomów morza na polskim wybrzeżu Bałtyku*, *Studia i Materiały Oceanologiczne*, 52, *Dynamika Morza*, 6, Ossolineum, s. 215–238.
- Furmańczyk K.K., Dudzińska-Nowak, J. Furmańczyk K.A., Paplińska-Swempel B., Brzezowska N., 2012, *Critical storm thresholds for the generation of significant dune erosion at Dziwnów Spit*, *Poland, Geomorphology, Special Issue*, 143–144, s. 62–68.
- Hünicke B., 2010, *Contribution of regional climate drivers to future winter sea-level changes in the Baltic Sea estimated by statistical methods and simulations of climate models*. *International Journal of Earth Sciences*, 99, s. 1721–1730.
- Johansson M., Boman H., Kahma K.K., Launiainen J., 2001, *Trends in sea level variability in the Baltic Sea*. *Boreal Environment Research*, 6, s. 159–179.
- Kowalewska-Kalkowska H., Kowalewski, M., 2005, *Operational hydrodynamic model for forecasting extreme hydrographic events in the Oder Estuary*, *Nordic Hydrology*, 36, 4–5, s. 411–422.

- Kowalewski M., Kowalewska-Kalkowska H., 2011, *Performance of operationally calculated hydrodynamic forecasts during storm surges in the Pomeranian Bay and the Szczecin Lagoon*. Boreal Environment Research 16, Supplement A, s. 27–41.
- Koźmiński C., Michalska B., Czarnecka M., 2007, *Klimat województwa zachodniopomorskiego*. Akademia Rolnicza w Szczecinie, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin.
- Łabuz T.A., 2003a, *Szata roślinna wskaźnikiem procesów eolicznych na nadmorskich wydmach mierzei Jeziora Jamno*, [w:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia pobrzeża i południowego Bałtyku*, 5, Pomorska Akademia Pedagogiczna, Słupsk, s. 97–109.
- Łabuz T.A., 2003b, *Udział czynników antropogenicznych w kształtowaniu nadmorskich wydm w rejonie Mielna na mierzei Jeziora Jamno*, [w:] R.K. Borówka, A. Witkowski (red.), *Człowiek i środowisko przyrodnicze Pomorza Zachodniego*, II Środowisko abiotyczne, Wydawnictwo In Plus Oficyna, Szczecin, s. 66–74.
- Łabuz T.A., 2005, *Brzegi wydmore polskiego wybrzeża Bałtyku*, *Czasopismo Geograficzne*, 76, 1–2, s. 19–47.
- Łabuz T.A., 2009, *The West Pomerania coastal dunes – alert state of their development*, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160, 2, s. 113–122.
- Łabuz T.A., Kowalewska-Kalkowska H., 2011, *Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea*, *Climate Research, Special Issue*, 48, s. 93–101.
- Łabuz T.A., 2011, *Wpływ spiętrzeń sztormowych na przebudowę profilu wybrzeża wydmorego Mierzei Bramy Świny*, *Czasopismo Geograficzne*, 82, 4, s. 351–371.
- Łabuz T.A., 2012, *Zmienność morfologii brzegu wydmorego mierzei jeziora Jamno w latach 1998–2010*, [w:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia pobrzeża i południowego Bałtyku*, 9, Pomorska Akademia Pedagogiczna, Słupsk, s. 125–144.
- Łabuz T.A., 2013, *Polish coastal dunes – affecting factors and morphology*, *Landform Analysis*, 22, s. 33–59.
- Łabuz T.A., 2014, *Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge*, *Oceanologia*, 56, 2, s. 307–326.
- Miętus M., Filipiak J., Owczarek M., 2004, *Klimat wybrzeża południowego Bałtyku. Stan obecny i perspektywy zmian*, [w:] J. Cyberski (red.), *Środowisko polskiej strefy południowego Bałtyku – stan obecny i przewidywane zmiany w przededniu integracji europejskiej*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe Wydział Nauk o Ziemi, Gdańsk, s. 11–44.
- Pruszek Z., Zawadzka E., 2005, *Vulnerability of Poland's to sea-level rise*, *Coastal Engineering*, 47, 2–3, s. 131–155.
- Racinowski R., Dobrzyński S., Seul C., 1995, *Cechy morfodynamiczne słupskich i szczecińskich wybrzeży mierzejowo-wydmorewych*, [w:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia pobrzeża i południowego Bałtyku*, 2, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, Słupsk, s. 247–255.
- Rosa B., 1984, *Rozwój brzegu i jego odcinki akumulacyjne*, [w:] B. Augustowski (red.), *Pobrzeże Pomorskie*, Ossolineum, Wrocław – Warszawa – Gdańsk, s. 67–119.
- Rotnicki K., Borówka R.K., Devine N., 1995, *Accelerated sea level rise as a threat to the Polish coastal zone – quantification of risk*, [w:] K. Rotnicki (red.), *Polish coast: past, present, future*, *Journal of Coastal Research. Special Issue*, 22, s. 111–134.

- Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J., 2009, *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*, Coastal Engineering, 56, 11–12, s. 1133–1152.
- Sztobryn M., Stigge H.J., 2005, *Wezbrania sztormowe wzdłuż południowego Bałtyku (zachodnia i środkowa część)*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Tarnowska K., 2011, *Wiatry silne na polskim wybrzeżu Morza Bałtyckiego*, Prace i Studia Geograficzne, 47, s. 197–204.
- Tomczak A., 1995, *Geological structure and Holocene evolution of the Polish coastal zone*, [w:] K. Rotnicki (red.), *Polish coast: Past, present, future*, Journal of Coastal Research, Special Issue, 22, s. 15–31.
- Tõnisson H., Orviku K., Jaagus J., Suursaar Ü., Kont A., Ravis R., 2008, *Coastal damages on Saaremaa Island, Estonia, caused by the extreme storm and flooding on January 9, 2005*, Journal of Coastal Research, 24, 3, s. 602–614.
- Van de Graaff J., 1977, *Dune erosion during a storm surge*, Coastal Engineering, 1, s. 99–134.
- Van de Graaff J., 1986, *Probabilistic design of dunes, an example from Netherlands*, Coastal Engineering, 9, s. 479–500.
- Van Rijn L.C., 2009, *Prediction of dune erosion due to storms*, Coastal Engineering, 56, s. 441–457.
- Van Thiel de Vries J.S.M., 2009, *Dune erosion during storm surges*, Amsterdam, Netherlands, IOS Press.
- Wolski T., Wiśniewski B., Giza A., Kowalewska-Kalkowska H., Boman H., Grabbi K., Hammarklint T., Holfort J., Lydeikaite Z., 2014, *Extreme sea levels at selected stations on the Baltic sea coast*, Oceanologia, 56, 2, s. 259–290.
- Wolski T., 2017, *Czasowa i przestrzenna charakterystyka ekstremalnych poziomów wód Morza Bałtyckiego*, Uniwersytet Szczeciński Rozprawy i Studia, 1026, 952, Szczecin, Zawadzka-Kahlau E., 1999, *Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku Południowego*, GTN Gdańsk.
- Zawadzka-Kahlau E., 2012, *Morfodynamika brzegów wydmowych południowego Bałtyku*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Zeidler R.B., Wróblewski A., Miętus M., Dziadziuszko Z., Cyberski J., 1995, *Wind, wave and storm surge regime at the Polish Baltic coast*, [w:] K. Rotnicki (red.), *Polish coast: past, present*, Journal of Coastal Research, Special Issue, 22, s. 267–269.

Summary

The South Baltic coast is mainly developed on sandy barriers filling postglacial moraine valleys (Tomczak, 1995). The Polish coast is an aligned one and formed of loose sediments only. This type of coast is covered with different dune types and has recently shown variable, often unpredictable tendencies where development is concerned, *i.a.* as a result of human impacts (harbour construction and

coastal protection). This is mainly affected by autumn or winter storm surges. Over the last 15 years there has been almost one surge per season in which the water level goes beyond 1 m AMSL (above mean), selected in Table 1. The previous year also proved a rich one in this respect, with several surges following on one from another, with resultant erosion more severe than with any surge at any time in the last 22 years (since the surge of November 1995).

The work detailed here assessed the impact of the storm surges of the autumn-winter season 2016/2017 in changing the central Polish coast between Kołobrzeg and Jarosławiec, and thus belonging to Koszalin Bay (Fig. 1). This is therefore the western and central part of the seashore named Pobrzeże Koszalin-skie, which is 75 km long. The analysis presented here extends to several storm cycles, including the significant ones named Barbara and Axel that affected the coast at the turn of the years 2016 and 2017 (Table 2, Fig. 3). Field research was the main method, and this was dependent on the making of measurements of coastal forms using levelling techniques. Data describing the situation prior to the surges were obtained in the September and November of 2016. Following the surge season, investigations were conducted in the January and February of 2017 (with some observations also made in May and June).

Statistical analyses were carried out for selected quantitative morphometric measurements for each named form (x). Present, seasonal and annual values were used in morphodynamic examinations as follows (see Tables 3a–c):

- a) coastal dune (W): height, width, sand volume, toe height, width or accretion/recession,
- b) embryo dune on upper beach (We): height, volume changes,
- c) beach (P): height, width and relief changes.

Parameters were calculated by reference to the profiles, using professional programs such as Surfer or Grapher Golden Software, as well as on the basis of our own formulae (Microsoft Office Excel). The form height changes were calculated as being before (b) or after (a) measurement.

The western part of the coast under consideration is mostly exposed to W and NW winds, and to NW to NE storm surges, between Kołobrzeg and Mielno. From Mielno along to Jarosławiec the coast is exposed to W winds and NW storm surges, due to the totally changed coastline direction (to SSW-NNE). Winds of high velocity, above 10 ms^{-1} , are mostly to be observed during the colder parts of the year, most frequently assuming NW, N or NE directions. The most severe storms, registering between 10 and 12 on the Beaufort Scale, are produced by NW and NE winds, with a small (1%) annual probability of occurrence, mostly associated with autumn and winter. Average retreat velocity has been 0.1 m/year over the last 100 years, but 0.5 m/year in the 1960–1983 sub-period (Pruszek and Zawadzka, 2008). Today, however, average coastal land withdrawal on the western Polish coast is occurring at 0.9 m/year, while after a single storm event it may even be of as much as 5–8 m. The described morphological changes of shore and coast

suggest that surges related to Storms Barbara (12.2016) and Axel (01.2017) caused a reduction of 1–1.2m in beach height and 10–15 m in width. The sediment from the washed-off dunes formed an extensive coastal embankment and was deposited in shallow waters. Dunes retreated on average by 2–6 m (Figs. 5 and 6). High cliffed dunes were formed, and in the spring months numerous landslides appeared. Maximum erosion caused the loss of up to 20–30 m³ of sediment from coastal dunes. Infrastructural facilities were damaged, and beach stairs and exits broken completely. In many places, water spilled over on to low-lying land, leaving so-called storm surge fans or washover fans. The specific parameter for shoreline and shoreline changes suggest that this was coastal erosion comparable to extreme 100-year storm gusts. The sequence of strong storms from autumn/winter 2016/2017 caused many places to retreat to the 1980s.

