

# Erozja polskiego wybrzeża wydmorego przez spiętrzenia sztormowe w sezonie 2018/19, w tym spiętrzenie Zeetje

Erosion of the Polish dune coast by storm surges in the 2018/19 season, including the Zeetje surge

Tomasz Arkadiusz Łabuz 

Instytut Nauk o Morzu i Środowisku, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin, [tomasz.labuz@usz.edu.pl](mailto:tomasz.labuz@usz.edu.pl)

**Zarys treści:** W pracy przedstawiono wielkość erozji wydmorego polskiego wybrzeża Bałtyku po spiętrzeniu sztormowym Zeetje ze stycznia 2019 r. Wyniki powstały na podstawie pomiarów terenowych na profilach poprzecznych, rozmieszczonych na wydmorego odcinkach polskiego wybrzeża. Przedstawiono charakterystykę tego spiętrzenia i mniejszych, które go poprzedziły jesienią 2018 r. Analizowano parametry hydro-meteorologiczne spiętrzeń sztormowych, które powstały w tym okresie. Obliczono wielkość cofania wydmorego po wybranych spiętrzeniach. Po mniejszych spiętrzeniach sztormowych z jesieni 2018 r. erozję wydmorego obserwowano na odcinkach erozyjnych, gdzie plaże są węższe i niższe. Największą erozję wydmorego obserwowano po sztormie Zeetje, średnio do 3 m i maksymalnie 10–12 m. Na poszczególnych mierzejach erozja średnia i maksymalna wydmorego była zróżnicowana. Średnia erozja wydmorego zależała od wysokości napływu wody na brzeg podczas sztormu i wysokości plaży. Większa erozja wystąpiła na odcinkach z plażą o wysokości mniejszej niż napływ wody podczas sztormu. Średnia erozja wydmorego przy poziomie morza powyżej 1,3 m ponad poziom średni wyniosła 2,5–4,0 m. Maksymalne wartości erozji obserwowano na zachodnich brzegach cypli położonych na wybrzeżu środkowym i wschodnim. Erozji wydmorego nie obserwowano w miejscach, gdzie wysokość plaży przekraczała 2,5 m n.p.m. i była wyższa niż maksymalny napływ wody podczas sztormu Zeetje.

**Słowa kluczowe:** erozja wydmorego nadmorskich, wysokość plaży, wysokość napływu fali, sztorm Zeetje, Bałtyk

**Abstract:** This paper presents the rate of dune erosion on the Polish Baltic coast by storm surge Zeetje in January 2019. The results were based on field measurements on coast profiles located on dune sections of the Polish coast. Presented are the hydro-meteorological parameters of all storm surges that formed before Zeetje since Autumn 2018. The hydro-meteorological parameters of storm surges that occurred during this period were analysed. The amount of dune retreat after selected surges was calculated. Following smaller storm surges in the fall of 2018, dune erosion was observed in erosional sections, where beaches are usually narrower and lower. The greatest erosion of the dunes was observed after the Zeetje storm, on average up to 3 m and a maximum of 10–12 m. The average and maximum erosion of the dunes varied on individual sandbars. The average dune erosion depended on the height of water inflow onto the shore during a storm and the height of the beach. Greater erosion occurred in sections with beach heights lower than the inflow of water during the storm. The average erosion of dunes at sea level above 1.3 m was 2.5–4.0 m. The maximum erosion values were observed on the western shores of the headlands located on the central and eastern coast. Dune erosion was not observed in places where the beach height exceeded 2.5 m above sea level and was higher than the maximum water inflow during storm Zeetje.

**Keywords:** coastal dune erosion, beach height, wave run-up height, storm Zeetje, Baltic

## Wstęp

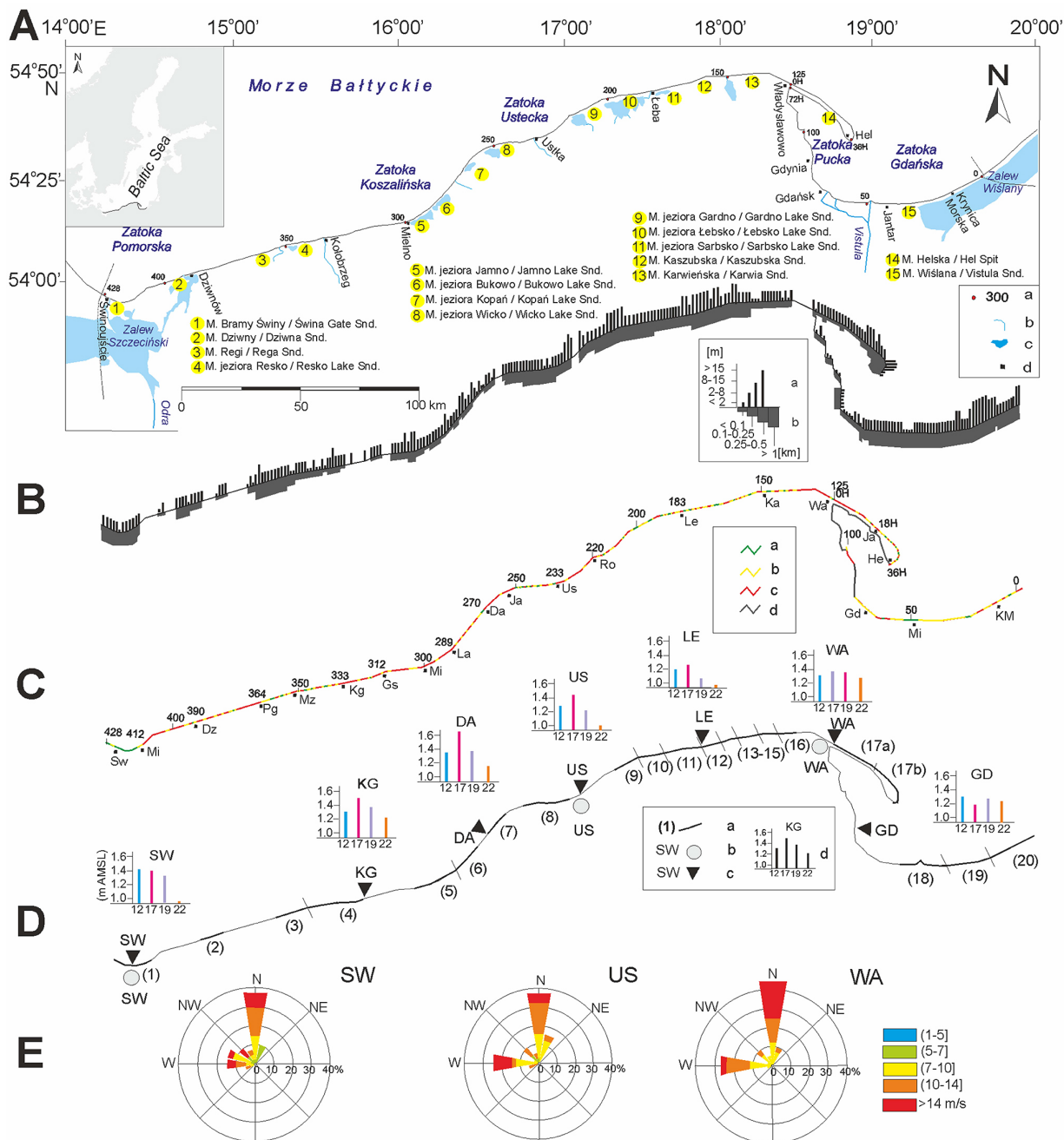
Zmiany klimatyczne na wybrzeżach Morza Bałtyckiego widoczne są w postaci wzrostu częstości występowania mniejszych spiętrzeń sztormowych (HSL  $\leq 0,6$  m n.p.m.) i nieregularnością tych większych

(Gräwe, Burchard 2012, Jaagus, Suursaar 2013, Weisse, Weidemann 2017, Wolski 2017, Kowalewska-Kalkowska 2018). Ich efektem jest erozja wybrzeży, w tym mniej odporne na niszczenie, wybrzeża mierzejowo-wydmorego (Eberhards i in. 2006, Tõnisson i in. 2008, Koltsova, Belakova 2009, Fur-

mańczyk i in. 2011, Bobykina, Stont 2015, Łabuz 2015, Jarmalavicius i in. 2016).

Cofanie się wybrzeża, w tym zbudowanego przez wydmy nadmorskie widoczne jest na większości polskiego wybrzeża (Zawadzka-Kahlau 1999, 2012, Ła-

buz 2013). Od lat przyjmuje się, że średnio polskie wybrzeże cofa się około  $0,9 \text{ ma}^{-1}$  (Zawadzka-Kahlau 1999, Dubrawski i Zawadzka-Kahlau 2006). Współcześnie nie jest znane tempo zmian brzegu, w tym akumulacji i erozji na wybrzeżu wydmy. Duże



Ryc. 1. Polskie wybrzeże Bałtyku. A – lokalizacja mierzei: a – kilometraż brzegu 0–428 km, b – rzeki, c – jeziora i zalewy, d – główne miejscowości. B – morfologia wydmy: a – wysokość, b – szerokość. C – dynamika brzegu (Łabuz 2013): a – przyrost, b – stabilizacja, c – cofanie, d – brak danych. D – podział mierzei na badane odcinki (tab. 1): wodowskazy z maksymalnym poziomem morza podczas największych sztormów w latach 2012, 2017, 2019, 2022, a – badane odcinki mierzei, b – stacje pomiaru wiatru, c – stacje pomiaru poziomu morza. E – kierunek i prędkości wiatru podczas sztormu Zeejete

Fig. 1. Polish Baltic coast. A – sandbars location: a – coast kilometrage 0–428 km, b – rivers, c – lakes and lagoons, d – main towns. B – dunes morphology: a – height, b – width. C – coast dynamics (Łabuz 2013): a – accretion (accumulative), b – stabilisation, c – retreat (erosive), d – no data. D – sandbar division for investigated sections (tab. 1): gauge stations with highest sea level during surges in years 2012, 2017, 2019, 2022, a – investigated sections, b – wind stations, c – gauge stations. E – velocity and direction of wind during surge Zeejete

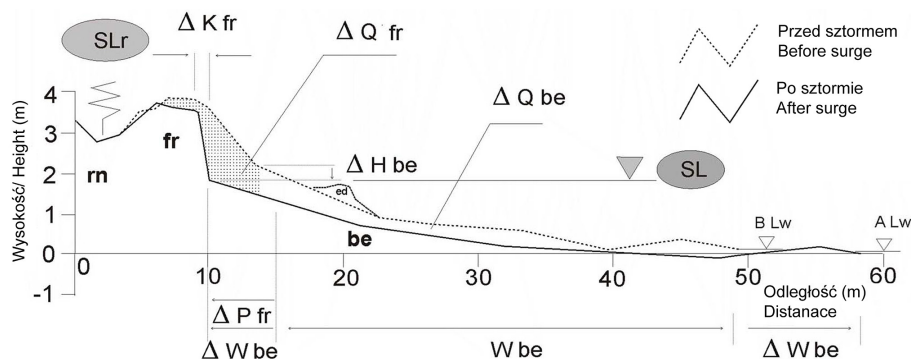
zmiany erozyjne polskiego wybrzeża mierzejowo-wydmorego, zostały wykazane na wielu odcinkach w okresie 1961–1983 (Zawadzka-Kahlau 1999, Pruszek, Zawadzka 2005). Miejsca te nazwano zatokami erozyjnymi, gdzie średnie tempo cofania podstawy wydmy sięgało 2–3  $\text{m a}^{-1}$  (Zawadzka-Kahlau 1999, 2012). Ich przyczyną była obserwowana duża liczba wysokich spiętrzeń sztormowych ( $\text{HSL} > 1 \text{ m n.p.m.}$ ) w tamtym okresie (Majewski i in. 1983). W tym największe, następujące po sobie w styczniu i lutym 1962, 1983 r. oraz styczniu 1968 i 1976 r. z poziomem morza przekraczającym 1,2 m ponad poziom średni (za Majewskim i in. 1983). Dużą erozję na wybrzeżu wydmorem środkowym i wschodnim obserwowano także po sztormie z 1988 r. i kilku z 1992 i 1993 r. (Basiński 1995). Cofanie nadbrzeży wydmorewych nie zachodzi co roku, erozja jest powodowana przez największe spiętrzenia sztormowe (Łabuz 2013, 2021, 2023). Cofanie podstawy wydmy po dużych sztormach sięga średnio 3–6 m i maksymalnie do 6–11 m (Basiński 1995, Łabuz 2009, 2014, 2018, 2022). W XXI w. duże sztormy powstawały w okresie jesienno-zimowym w latach 2001/02, 2004, 2006/07, 2009, 2011/12, 2013, 2015, 2016/17 (Łabuz 2009, 2021, 2022, Cieśliński, Chromiak 2010, Kowalewska-Kalkowska 2018). Ich skutkiem była obserwowana znaczna erozja na wielu odcinkach polskiego wybrzeża mierzejowo-wydmorego (Zawadzka-Kahlau 2008, 2012, Łabuz 2009, 2014, 2018, 2023, Łabuz, Kowalewska-Kalkowska 2011, Furmańczyk i in. 2011).

Na południowym wybrzeżu Bałtyku spiętrzenie sztormowe powstaje przy wietrze z kierunku NW do NE o prędkości ponad 15  $\text{ms}^{-1}$  (Trzeciak 2001) i charakteryzuje się szybkim wzrostem poziomu morza, od wartości minimalnej oraz przekraczającym poziom średni o około 0,8 m (Majewski i in. 1983, Majewski 1998, Sztorbryn i in. 2005, Wiśniewski, Wolski 2009). W polskich portach, gdzie prowadzone są pomiary poziomu morza, stan alarmowy wynosi od 0,7 do 1,1 m (to jest 570–610 cm). Spiętrzenia sztormowe na południowym brzegu Morza Bałtyckiego wywoływane są przez układy niskiego ciśnienia, przechodzące z zachodu na wschód, które powodują rozwój wiatru o dużej prędkości z sektora odmorskiego (WNW–N–NE) w kierunku brzegu morskiego (Zeidler i in. 1995, Majewski 1998, Trzeciak 2001, Sztorbryn i in. 2005). Zjawiska te są najczęściej obserwowane w sezonie jesienno-zimowym, od listopada do lutego i są skutkiem rozwoju sztormów na południowym wybrzeżu Bałtyku (Johansson i in. 2001, Miętus i in. 2004, Sztorbryn i in. 2005, Wolski i in. 2014, Wolski, Wiśniewski 2020). Wiatry sztormowe przekraczają prędkość 10–12  $\text{ms}^{-1}$  (Trzeciak 2001, Tarnowska 2011) i wywołują znaczne spiętrzenie wody i wysokie falowanie na polskim wybrzeżu (Majewski i in. 1983, Sztorbryn i in. 2005).

Celem pracy jest przedstawienie wielkości cofania wydym nadmorskich na polskim wybrzeżu w okresie jesienno-zimowym 2018–2019, po sekwencji mniejszych spiętrzeniach sztormowych z jesieni 2018 r. oraz dużym spiętrzeniu sztormowym Zeetje w styczniu 2019 r. W pracy porównano parametry hydrologiczne tych spiętrzeń z obserwowaną wielkością erozji wydym na analizowanych odcinkach wybrzeża.

## Obszar badań

Polskie wybrzeże Morza Bałtyckiego ma długość prawie 500 km, w tym 440 km brzegu otwartego morza i 60 km wewnątrz Zatoki Puckiej (ryc. 2A). W tych 440 km wybrzeża, otwartego na kierunek północny, 345 km zajmuje wybrzeże mierzejowo-wydmore (około 80% jego długości). Wybrzeże klifowe otwartego morza obejmuje około 60 km długości, w tym 10 km jego długości poprzedzają wały wydmore. Najdłuższy pas mierzejowo-wydmore występuje na wschodnim wybrzeżu od Jastrzębiej Góry do Rowów. Obejmuje mierzeje: Karwieńską, Kaszubską, Sarbską, Łebską i Gardnieńską (135–220 km według kilometrażu brzegu). Jest to odcinek 85 km długości pokryty wydymami nadmorskimi o różnej morfologii i genezie (Łabuz 2013). Rozdzielony jest ujściami cieków i kanałów, łączących nadmorskie jeziora i podmokłe niziny z morzem. Na Mierzei Wiślanej wybrzeże wydmore obejmuje 80 km od granicy z Rosją do Sopotu, a mierzeja rozciąga się na wschód do cieśniny Pilawskiej w Kaliningradzie o kolejne 25 km, łącznie ma 105 km długości. Półwysep Helski, będący kosą mierzejową obejmuje 36 km. Na środkowym wybrzeżu od Ustki do Sarbinowa, mierzeje są rozdzielone krótkimi odcinkami klifowymi i mają około 72 km długości (Łabuz 2021). Uformowane są na nisko położonych obszarach nizinnych z jeziorami Wicko, Bukowo i Jamno. Rozdzielają je ujścia kanałów i rzek, w tym dużej Wieprzy i Słupi. Pozostałe 65 km wybrzeża mierzejowego występuje na zachodnim wybrzeżu. Ten odcinek obejmuje mierzeję: Reską (ujście rzeki Regi), jeziora Resko Przymorskie, Dziwny (ujście kanału Dziwny) i Mierzeję Bramy Świny (uformowaną w ujściu kanału Świny, pomiędzy wysoczyznami klifowymi na Wyspach Wolin i Uznam). Na zachodnim wybrzeżu odcinki mierzejowo-wydmore są krótsze i rozdzielone dłuższymi odcinkami wybrzeża klifowego. Szerokość i wysokość wydym oraz plaż jest zróżnicowana. Około 15% wybrzeża wydmorego wykazuje tendencje do akumulacji, a ponad 35% jest stale erodowane, w wyniku czego postępuje tam cofanie wybrzeża (Łabuz 2013). Długość poszczególnych odcinków ulega zmianom z powodu procesów przyrostu lub cofania wybrzeża (ryc. 2B, C). Głównymi czynnikami erozji brzegu są spiętrzenia sztormo-



Ryc. 2. Formy mierzone wzdłuż profilu poprzecznego wybrzeża i wskaźniki jego dynamiki (Łabuz 2023).  $\Delta H_{be}$  – zmiana wysokości plaży,  $W_{be}$  – szerokość plaży,  $\Delta W_{be}$  – zmiana szerokości plaży,  $\Delta Q_{be}$  – zmiana objętości plaży,  $\Delta P_{fr}$  – zmiana podstawy wydmy (przedniej i innych),  $\Delta K_{fr}$  – zmiana krawędzi wydmy,  $\Delta Q_{fr}$  – zmiana objętości wydmy,  $BLw$  – linia wody przed sztormem,  $ALw$  – linia wody po sztormie,  $SL$  – maksymalny poziom morza,  $SLr$  – maksymalny napływ fali

Fig. 2. Forms measured along the transverse profile of the coast and indicators of its dynamics (Łabuz 2023):  $\Delta H_{be}$  – change in beach height,  $W_{be}$  – beach width,  $\Delta W_{be}$  – change in beach width,  $\Delta Q_{be}$  – change in beach volume,  $\Delta P_{fr}$  – change in foredune foot,  $\Delta K_{fr}$  – change in foredune edge,  $\Delta Q_{fr}$  – change in dune volume,  $BLw$  – pre-storm water line,  $ALw$  – post-storm water line,  $SL$  – maximum sea level,  $SLr$  – maximum wave run-up

we i uwarunkowania geologiczno-geomorfologiczne (Zwadzka-Kahlau 1999, 2012, Pruszek, Zawadzka 2005). Z analiz wynika, że na wybrzeżu otwartego morza, występują układy erozyjno-akumulacyjne, charakteryzujące się różnym kierunkiem rozwoju brzegu (Zawadzka-Kahlau 1999, 2012). Wpływ na dynamikę wybrzeża mają także umocnienia brzegu (Dubrawski, Zawadzka-Kahlau 2006).

## Metody i materiał badań

Badania polegały na analizie danych hydrologicznych i meteorologicznych związanych z rozwojem omawianych spiętrzeń sztormowych oraz terenowych, pochodzących z pomiarów wielkości erozji wydmy. Badań terenowych nie prowadzono na odcinkach klifowych, brzegach miejscowości z refulowaną plażą (pomierzone, lecz nie ujęte w pracy) oraz na brzegu Zatoki Puckiej (tam warunki hydrologiczne podczas spiętrzenia sztormowego są odmienne od warunków otwartego morza). W pracy wykorzystano pomiary ukształtowania wydmy na profilach poprzecznych, wykonanych w czerwcu i wrześniu 2018 r. Pomiary wykonano w listopadzie i grudniu, po małych spiętrzeniach sztormowych z jesieni 2018 r. oraz w styczniu po sztormie Zeetje ze stycznia 2019 r. Prace powtórzono w czerwcu 2019 r. Pomiary erozji brzegu powodowane przez mniejsze sztormy, prowadzono na wybranych odcinkach całego polskiego wybrzeża, na ustalonych profilach brzegu w stałych miejscach od kilku lat (tab. 1). Na tej podstawie ustalono wysokość napływu wody na plażę i wielkość erozji oraz jej związek z wysokością plaży.

Badania terenowe obejmowały pomiar ukształtowania nadbrzeża wydmy i plaży wzdłuż profilu

poprzecznych. Są one siecią własnych punktów pomiarowych, zlokalizowanych przy słupkach kilometrażu lub innych charakterystycznych punktach wybrzeża mierzejowo-wydmowego i wykorzystywanych w badaniach od kilku lat. Profile prowadzono od stabilnego podłoża do linii wody, co 1–2 km wzdłuż brzegu. Pomiary na profilach wykonywano z wykorzystaniem niwelatora, urządzenia GPS RTK lub dalmierza laserowego i łąty topograficznej wraz z taśmą mierniczą. Pomiędzy punktami pomiarowymi prowadzono kartowanie całego brzegu, połączone z zapisem zmian szerokości plaży i lokalizacją form erozyjnych, w tym stożków powstałych z napływu wody na ląd. W terenie, na profilach oznaczono obserwowaną wysokość napływu wody na brzeg, co porównano do wysokości poziomu morza w najbliższej stacji pomiarowej. Maksymalne napływy wody na brzeg mogą określać wielkość erozji (Nielsen, Hanslow 1991). Uzupełnieniem prac była wykonana szczegółowa dokumentacja fotograficzna. W kartowaniu brzegu pomiędzy profilami wykorzystywano m.in. GPS z możliwością śledzenia trasy, taśmę mierniczą i poziomice laserową. Urządzenia te były przydatne zwłaszcza do pomiaru wysokości skarp, powstałych w wyniku erozji stoku. W oznaczeniach lokalizacji profili posłużono się podziałem kilometrażu wybrzeża utworzonym przez urzędy morskie oraz położeniem geograficznym z odbiornika GPS.

Do analizy morfometrycznej zmian brzegu i nadbrzeża wybrano następujące parametry morfologii wybrzeża, przedstawione na rycinie 2:

- wydma nadmorska/wał wydmy  $fr$ , wysokość  $H_{fr}$ , zmiana szerokości  $\Delta S_{zfr}$ , zmiana położenia podstawy  $\Delta P_{fr}$ , zmiana położenia krawędzi  $\Delta K_{fr}$ , zmiana objętości na  $m^2$   $\Delta Q_{1fr}$ , sumaryczna zmiana objętości  $\Delta \Sigma Q_{fr}$ ,
- wydma embrionalna na plaży  $ed$ , suma zmian ob-



- jętości  $\Delta\Sigma Q_{ed}$ ,
- plaża be, zmiana objętości osadu plaży  $\Delta\Sigma Q_{be}$ , zmiana szerokości  $\Delta W_{be}$ , zmiana wysokości  $\Delta H_{be}$ .

Parametry powyższe zostały obliczone na podstawie zestawionych profili poprzecznych przed sztormami (b) oraz po sztormach (a). Obliczenia dokonano w programach Grapher Golden Software oraz dodatkowej aplikacji w programie Microsoft Excel. Wysokości  $H_i$  obliczone co 1 m wzdłuż profili dla poszczególnych form przed i po sztormie, przeliczono na zmiany objętości osadu przypadające na powierzchnię 1 m<sup>2</sup>. Suma zmian objętości osadu wydmy wskazuje na wielkość jej erozji. Obliczona objętość erodowane-

go osadu zależy nie tylko od cofnięcia podstawy wydmy, ale i od jej wysokości. W pracy nie analizowano zmian objętości osadu wydmy i plaży po spiętrzeniach sztormowych. W celu uproszczenia analiz posłużono się wskaźnikiem cofnięcia podstawy wydmy. Wskazuje on na wartość erozji, niezależną od wysokości niszczonego nadbrzeża. Ponadto obliczono zmiany wysokości i szerokości plaży w oparciu o pomiary morfologiczne brzegu przed i po sztormie. Zmiana szerokości plaży lub zmiana położenia linii brzegowej przez sztorm nie są wskaźnikami istotnymi z punktu widzenia oceny erozji, ponieważ plaża może być szersza w związku z cofnięciem wydmy. Z kolei często używane położenie linii wody (np. Zawadzka-Kahlau

Tabela 1. Odcinki badanych mierzei i okresy pomiarów w okresie jesienno-zimowym 2018/19

Table 1. Sections of investigated sandbars and periods of measurement in Autumn-winter period 2018/19

No	Odcinki mierzei	Długość odcinka [km]	Kilometraż brzegu [km]	Pomiary zmian wydym [miesiące]				Lokalizacja wodowskazu
				Przed sztormami w 2018	Po małych sztormach w 2018	Po sztormie Zeetje w 2019	Po wszystkich sztormach w 2019	
1	Brama Świny	16	412–428	6, 9	10–12	1, 3	5	Świnoujście (SW) 53°55N, 14°16E
2	Brama Dziwny	11	386–397	7	10	1, 3	4, 6	j.w.
3	J. Liwia-Regi	16	351–367	7, 9	10	1	6	j.w.
4	J. Resko-Parzęta	17	335–352	7, 9	10	1, 3	6	Kołobrzeg (KG) 54°11N, 15°33E
5	j. Jamno	15	289–304	6	10	3	6	j.w.
6	j. Bukowo-Wieprza	17	272–289	6	10	3	6	Darłowo (DA) 54°26N, 16°22E
7	J. Kopań	14	256–270	6	–	3	6	j.w.
8	J. Wicko	20	234–254	6	–	3	6	Ustka (US) 54°45N, 16°51E
9	J. Gardno	10	207–217	6	10–12	1	6	j.w.
10	J. Łebsko 1 / Wydma Czołpińska	10	198–207	6	10–12	1	6	Łeba (LE) 54°46N, 17°33E
11	J. Łebsko Lake 2 / Wydma Łącka	14	184–198	6	10–12	1	6	j.w.
12	J. Sarbsko	9	175–182	6	10–12	1	6	j.w.
13	Kaszubska 1 / wydmy Stilo	10	165–175	6	10–12	1	6	j.w.
14	Kaszubska 2 / Wydma Lubiatowska	7	158–165	6	10–12	1	6	Władysławowo (WA) 54°47N, 18°25E
15	Kaszubska 3 /Wydma Biała Góra	9	149–158	6	10–12	1	6	j.w.
16	Karwia	13	136–149	6	–	2	6	j.w.
17a	Kosa Helska / część NW	20	1–20	6, 9	–	2	6	j.w.
17b	Kosa Helska / część SE	16	20–36	6, 9	10–12	1	6	j.w.
18	Wiślana 1 / zachodnia	15	41–56	6, 9	10–12	1	6	Gdańsk (GD) 54°21N, 18°39E
19	Wiślana 2 / środkowa	16	25–41	6, 9	10–12	1	6	j.w.
20	Wiślana 3 / wschodnia	22	1–23	6	10–12	1	6	j.w.

Tabela 2. Charakterystyka spiętrzeń sztormowych w okresie 2018/19 (na podstawie danych z Kapitanatów portów, IMGW-PIB (2019) oraz IMFUB (2022))

Table 2. Characteristics of storm surges in period 2018/19 (based on data from Harbor Master's Offices, IMGW-PIB (2019) and IMFUB (2022))

Lp.	Data	Nazwa sztormu	Prędkość wiatru [ $\text{ms}^{-1}$ ]	Kierunek wiatru i falowania	Maksymalny poziom morza w portach ponad średni [m]								
					SW	KG	DA	US	LE	WA	GD	Średni poziom	
Wodowskazy (lokalizacja ryc. 2)													
					Alarmowy poziom morza ponad poziom średni								
1	2–4.10.2018	Kerstin	10–14	W–WNW	0,75	0,87	0,82	0,78	0,69	0,76	0,78	0,78	
2	23–24.10.2018	Siglinde	12–16	W–NW	0,80	0,85	0,88	0,84	0,78	0,90	0,85	0,84	
3	25–26.10.2018	Tina	9–11	W–WNW	0,45	0,56	0,59	0,52	0,51	0,61	0,58	0,55	
4	27–28.10.2018	Uta	10–12	NNW–NE	0,79	0,86	0,86	0,85	0,79	0,80	0,76	0,80	
5	1–3.01.2019	Zeetje	13–18	W–NNE	1,33	1,37	1,34	1,21	1,07	1,35	1,25	1,25	
6	8–9.01.2019	NN	11–13	N–NNE	0,88	0,72	0,60	0,60	0,50	0,52	0,45	0,59	
7	14–15.01.2019	NN	10–14	NW	0,74	0,68	0,64	0,56	0,57	0,52	0,56	0,64	

1999) jest w krótkim czasie względne i uzależnione np. od poziomu morza (HSL). Wielkość szerokości plaży nie wpływa bezpośrednio na wartość erozji wydmy. Zazwyczaj szerokość plaży ma związek z jej wysokością (patrz ryc. 13D). Dla porównania wielkości erozji nadbrzeża wydmowego ważniejsza jest wysokość plaży przed sztormem Hbe względem maksymalnego napływu wody na brzeg HSLr (Nielsen, Hanslow 1991, Stockton i in. 2006, Łabuz 2022).

Głównym parametrem przedstawionym w pracy jest wartość cofania podstawy wydmy  $\Delta Pfr$  (ryc. 2). Parametr ten najlepiej pokazuje wielkość cofania wybrzeża wydmowego. Pomierzone wartości zmian rzeźby na każdym profilu poprzecznym na poszczególnych mierzejach, zestawiono z określonymi wartościami spiętrzeń sztormowych w najbliższych portach. Na tej podstawie możliwe było określenie wpływu wysokości wody HSL i jej napływu na brzeg HSLr czy na morfologię wydmy i plaży. Wyniki obliczonych zmian morfologicznych zawarto w tabelach. Zmiany morfologiczne przedstawiono na wybranych profilach poprzecznych i oznaczono w postaci histogramów dla mierzei i całego badanego wybrzeża. Ponadto porównano wielkość erozji wydmy do poziomu morza na całym wybrzeżu podczas sztormu Zeetje. Określono związek poziomu morza z maksymalnym napływem wody na brzeg. W analizie zebranych danych nie uwzględniono pomiarów z odcinka klifowo-wydmowego rejonu Gąsek i Pobierowa oraz odcinka północno zachodniego Półwyspu Helskiego (wąska część półwyspu). Przystawiono je na mapie zbiorczej pokazującej wielkość erozji wydmy na całym wybrzeżu.

W analizach uwzględniono czynniki hydro-meteorologiczne: maksymalny poziom morza HSL, napływ wody na ląd HSLr – suma poziomu morza i wysokości fali, czas trwania spiętrzenia HT, prędkość wiatru  $V_w$ , kierunek wypadkowy wiatru  $AV_w$ . Dane meteorologiczne dotyczące kierunku i prę-

kości wiatru pochodziły z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB 2019). Dane dotyczące wiatru, dla miejsc bez stacji meteo, to jest dla Kołobrzegu pochodziły z pobliskiego Dźwirzyna, a dla Władysławowa z Rozewia. Dane hydrologiczne dotyczące poziomu morza uzyskano z Kapitanatów Portów oraz publikacji IMGW-PIB (2019). Nazwy spiętrzeń sztormowych pochodzą od nazw niżów, obserwowanych i rejestrowanych na stronie Instytutu Meteorologii Otwartego Uniwersytetu w Berlinie (IMFUB 2022). Charakterystykę układów niżowych i towarzyszącego im wiatru analizowano na podstawie niemieckiej (IMFUB 2022) i polskiej służby meteorologicznej (IMGW-PIB 2019). Zjawiska określone jako spiętrzenia sztormowe ustalono na podstawie trzech parametrów: maksymalnego poziomu morza  $HSL > 0,7$  m (za Majewskim i in. 1983, Wiśniewski, Wolski 2009), bezwzględnego wzrostu od wartości minimalnej (za Sztorbryn i in. 2005, Kowalewska-Kalkowska 2018), prędkości wiatru  $V > 12 \text{ ms}^{-1}$  (Trzeciak 2001, Kowalewska-Kalkowska 2012). Duże spiętrzenia sztormowe określono na podstawie poziomu morza  $HSL > 1,2$  m ponad poziom średni. Małe spiętrzenia określono do wysokości 0,6 m, a średnie do  $HSL = 1$  m ponad poziom średni.

Na podstawie tych materiałów, podczas spiętrzeń sztormowych określono, prędkość i kierunek wiatru oraz przebieg zmian poziomu morza, w tym wartości charakterystyczne (wypadkowe lub maksymalne). W poniższych analizach uwzględniono zmiany poziomu morza na zachodnim wybrzeżu z danych wodowskazu ze Świnoujścia (kod SW), a na wschodnim z Władysławowa (kod WA). Dla środkowego wybrzeża analizowano poziom morza z Kołobrzegu (kod KG) i Ustki (kod US). W pracy analizowano parametry tych spiętrzeń z okresu jesienno-zimowego 2018/19, które miały wpływ na obserwowaną erozję brzegu. Zestawiono je w tabeli 2 i szczegółowo dla sztormu Zeetje w tabeli 4.

## Wyniki

### Charakterystyka mniejszych spiętrzeń sztormowych w sezonie 2018/19

W okresie jesienno-zimowym 2018/19 łącznie wystąpiło 8 spiętrzeń sztormowych z poziomem morza przekraczającym na polskim wybrzeżu 550 cm. Pierwsze spiętrzenie powstało 25 września z maksymalnym poziomem morza do 558 cm na wybrzeżu zachodnim. Sztorm przy tym poziomie morza należy uznać za mały. Woda sięgała dolnej części plaży do wysokości około 0,8–1,0 m n.p.m. Trzy kolejne, mniejsze spiętrzenia sztormowe z jesieni i zimy 2018 r., które poprzedzały sztorm Zeetje spowodowały średnie spiętrzenie wody w portach do 557–585 cm (0,57–0,85 m ponad poziom średni). Ich charakterystyka jest istotna, ponieważ przy takim poziomie morza powodowały erozję plaż, na kilku odcinkach polskiego wybrzeża o trwałych tendencjach erozyjnych. Jest to efektem zazwyczaj niskiej nad poziom morza i wąskiej plaży; są to odcinki, tak zwanych zatok erozyjnych (Zawadzka-Kahlau 1999). Podczas mniejszych spiętrzeń z jesieni i zimy 2018 r., maksymalny napływ wody pokrywał całą plażę do wysokości 1,6–1,8 m n.p.m. na odcinkach erozyjnych. W miejscach, gdzie plaża była niższa, obserwowano niewielką erozję wydm. Cofanie podstawy wydmy dochodziło do 2 m i było obserwowane przede wszystkim na mierzejach środkowego wybrzeża. Spiętrzenia te spowodowały jednak znaczne obniżenie plaż w stosunku do września 2018 r., co prawdopodobnie skutkowało większą erozją wydm podczas dużego sztormu Zeetje w styczniu 2019 r.

Na początku października 2018 r. powstało spiętrzenie związane z układem niżowym o nazwie Kerstin. Niż uformowany nad Północnym Atlantykiem (2.10.2018) przechodził nad północną Skandynawią w kierunku Finlandii i Estonii (6.10.2018). Na polskim wybrzeżu wywołał rozwój wiatru od morza, a następnie wzdłuż brzegu. W trakcie spiętrzenia wiatr wiał z kierunku W–SW do WNW (2–4.10.2018). Początkowo przy wietrze z kierunku W powstało spiętrzenie o wysokości 0,4 m n.p.m. Następnie przy wietrze z kierunku SW poziom morza spadł o 10–20 cm na wschodnim wybrzeżu i do

40 cm na zachodnim (Świnoujście). Ponowna zmiana kierunku wiatru na W i WNW oraz znaczny wzrost jego prędkości skutkowałam wzrostem poziomu morza do wartości maksymalnych. Trwało to około 12 godzin w dniu 3.10. 2018 r. Na zachodnim i środkowym wybrzeżu prędkość wiatru dochodziła do 16 ms<sup>-1</sup>, a na zachodnim w Świnoujściu i wschodnim we Władysławowie do 13 ms<sup>-1</sup>. Z powodu różnic prędkości wiatru z kierunku W-WNW, poziom morza był wyższy o kilka centymetrów na wybrzeżu środkowym (tab. 2). Maksymalny poziom 587 cm obserwowano w Kołobrzegu. Średni poziom dla portów polskiego wybrzeża wyniósł 578 cm, czyli 0,78 m powyżej poziomu średniego. Poziom morza nie był wysoki, a wraz z falą napływ sięgał wysokości 1–1,2 m n.p.m. Na plażach wysokich, akumulacyjnych, maksymalny napływ wody przekraczał wał brzegowy i powodował jego rozmywanie. Do środka plaży napływ dochodził na odcinkach z niższą plażą. Na wybrzeżu środkowym, na Mierzei Jeziora Jamno i Bukowo, plaże są zazwyczaj wysokie, tam ich erozja nie była widoczna (rozmyty wał brzegowy). Powstały tylko skarpy w postaci mikroklifów plażowych. Erozji wydm nie obserwowano. Wysokie plaże na tym odcinku wybrzeża są wynikiem przebiegu brzegu na częsty wiatr z kierunku SW, który transportuje duże ilości osadu wzdłuż plaży i powoduje ich wysoką nadbudowę.

Kolejne dwa spiętrzenia, które nastąpiły po sobie pod koniec października, charakteryzował nieznacznie wyższy poziom morza. Sztorm Siglinde nazwano od układu niskiego ciśnienia rozpoznanego 22.10.2018 w rejonie Islandii. W dniu 23.10.2018 niż znajdował się nad środkową Skandynawią, a 24.10.2018 nad Estonią. W czasie, gdy niż znajdował się nad Skandynawią, nad polskim wybrzeżem obserwowano wiatr z kierunku W i WSW o prędkości 10–14 ms<sup>-1</sup> na wschodnim i 10–16 ms<sup>-1</sup> na zachodnim wybrzeżu. Przy kierunku wiatru od lądu, podobnie, jak podczas sztormu Kerstin, obserwowano obniżanie poziomu morza o około 10–30 cm. W połowie 23 października 2018, kierunek wiatru zmieniał się na WNW, a następnie NW, co skutkowało szybkim wzrostem poziomu morza o około 80 cm. Większy wzrost wystąpił w Zatoce Pomorskiej, ale od niższego poziomu wypadkowego. Efektem zmian kierunku wiatru i jego prędkości, było maksymalne spiętrzenie wody w portach polskiego wybrze-

Tabela 3. Wielkość erozji wydm przy poziomie morza HSL < 0,9 m podczas jesieni 2018 r.

Table 3. Quantity of dune erosion during sea level HSL < 0.9 m during autumn 2018

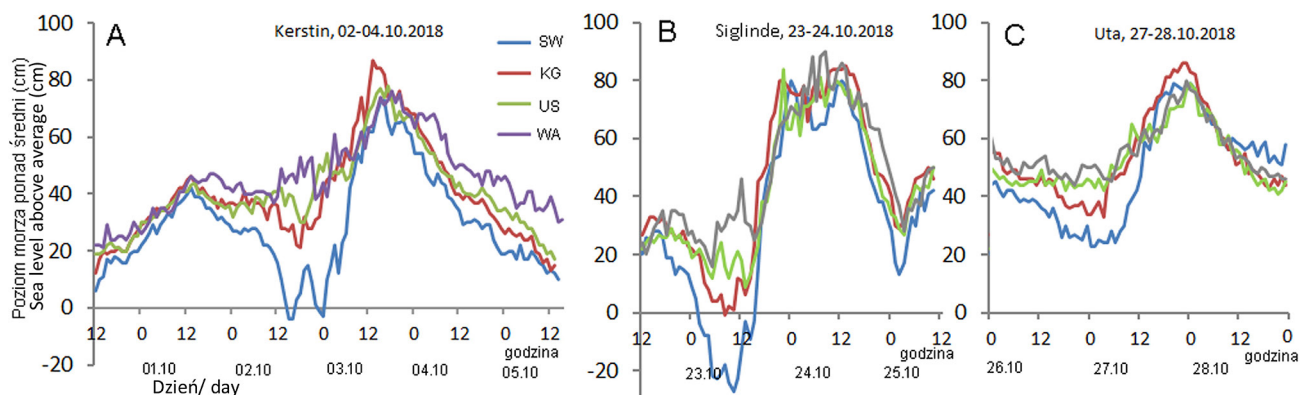
Poziom morza ponad poziom średni	[m]	0,79	0,79	0,79	0,87	0,90	0,87	0,85	0,90	do 0,9
Najbliższy port (lokalizacja ryc. 1)	[-]	LE	LE	LE	KG	WA	KG	US	WA	inne
Kilometraż brzegu	[km]	186	172	192	341	30 <sup>H</sup>	327	211	25 <sup>H</sup>	inne
Wysokość plaży	[m n.p.m.]	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,4	>1,5
Erozja wydm	[m]	-2,5	-4,3	-1,5	-0,6	-1,6	-0,4	-1,5	-8,0	0

<sup>H</sup> – w obrębie Półwyspu Helskiego.



ża do około 584 cm. Wysoki poziom morza utrzymywał się długo, do 16 godzin na wybrzeżu wschodnim i 20 godzin na wybrzeżu zachodnim. Pod koniec 24 października 2018, po spadku prędkości wiatru do  $8\text{--}10\text{ ms}^{-1}$  poziom wody opadał. Długotrwały sztorm powodował erozję plaż i miejscami wydmy. Przy tym poziomie morza napływ wody na plażę sięgał do podstawy wydmy na większości wybrzeża. Osiągał wysokość 1,5–1,7 m n.p.m. Na odcinkach akumulacyjnych z szerszą i wyższą plażą, woda sięgała do plaży górnej i strefy wydmy embrionalnych. Na odcinkach z plażą niższą, uprzednio obniżoną przez sztorm Kerstin, zachodziła erozja podstawy wydmy. Wielkość erozji zależna była od wysokości plaży. Na odcinkach z plażą o wysokości do 1 m, cofanie podstawy wydmy wynosiło 2 do 4,5 m (tab. 3). Na brzegu z plażą o wysokości 1–1,5 m, cofanie wydmy wynosiło 1–2 m. Na brzegu z plażą o wysokości powyżej 1,5 m erozji wydmy nie obserwowano (tab. 3). Przedstawione zmiany zachodziły na odcinkach erozyjnych, zazwyczaj na zachodnich brzegach przylądków uformowanych na wybrzeżu wschodnim, na mierzejach: Gardnieńskiej, Łebskiej, Sarbskiej, Kaszubskiej i Karwieńskiej. Na wybrzeżu zachodnim, podobne przylądki występują na mierzejach rzeki

Regi i jeziora Resko Przymorskie. Na tym odcinku mierzejowym obserwowano również erozję wydmy, dochodzącą do 1,5 m. Na Mierzei Helskiej, w kilku miejscach obserwowano cofanie podstawy wydmy tam, gdzie plaża była węższa i niższa. Na tej mierzei, zazwyczaj w miejscach zmiany przebiegu kierunku linii brzegowej, plaże mają małą szerokość i wysokość. W jednym z takich miejsc erozja była znacząca, wynosiła 8 m (km 25). Erozji wydmy nie obserwowano na mierzejach Bramy Świny i Wiślanej, gdzie miejscami maksymalny napływ sięgał do podstawy wydmy. Na mierzejach wybrzeża środkowego, Jamno i Bukowo, ze względu na wysokie plaże po okresie letnim, erozji wydmy nie było. Tylko na Mierzei jeziora Kopań, woda dochodziła do podstawy wydmy. Tam plaże mają zazwyczaj małą wysokość nad średni poziom morza. Badań po małych sztormach nie prowadzono na Mierzei jeziora Wicko, gdzie dostęp jest trudniejszy, ze względu na poligon wojskowy. Tuż po tym sztormie, 25 października 2018, nad środkowym Bałtykiem przechodził niewielki układ niżowy Tina. Na krótko wzrosła prędkość wiatru z kierunku W, lecz nie obserwowano wzrostu poziomu morza, maksymalnie o 0,6 m do wysokości 559 cm ponad poziom średni.



Ryc. 3. Poziom morza podczas spiętrzeń sztormowych jesienią 2018 r. Sztormy: A – Kerstin, B – Siglinde, C – Uta (tab. 2) (na podstawie danych z Kapitanatów portów)

Fig. 3. Sea level during storm surges in Autumn 2018. Surges: A – Kerstin, B – Siglinde, C – Uta (Table 2) (based on data from Harbor Master's Offices)



Ryc. 4. Skutki erozji po sztormach w 2018 r. na cyplach odcinków erozyjnych: A – Mierzeja Helska (11 km H), B – Mierzeja Łebska (203 km), C – Mierzeja Resko (342 km)

Fig. 4. Erosion effects after surges in 2018 on promontories of retreat (erosive) sections: A – Hel Spit (11 km H), B – Łebsko Sandbar (203 km), C – Resko Sandbar (342 km)



Dnia 26.10.2018 niż o nazwie Uta przechodził nad Danią i południową Skandynawią. Na polskim wybrzeżu spowodowało to wzrost prędkości wiatru do  $9\text{--}10\text{ ms}^{-1}$  z kierunku SW. Wiatr od południa ponownie powodował obniżenie poziomu morza o 20–30 cm. W kolejnych dniach niż przemieścił się nad Łotwą (27.10.2018) i Estonię (28.10.2018). Kierunek wiatru i jego prędkość zmieniły się 27.10.2018. Prędkość wzrosła do  $10\text{--}12\text{ ms}^{-1}$ . Przy kierunku od W do NW, poziom morza wzrósł o 40–60 cm, do około 580 cm, w ciągu około 15 godzin. Krótko trwający wiatr z kierunku NW, spowodował, że sztorm był bardzo krótki. Poziom morza obniżał się już po 6 godzinach. Krótkotrwałe spiętrzenie, przy średniej wysokości poziomu morza spowodowało napływ wody od 10–25 cm niżej niż sztorm poprzedni. Na szerokich plażach oba spiętrzenia pozostawiły nanosy w postaci materii organicznej i śmieci, które wyznaczały wysokość napływu. Na tej podstawie rozróżniano wysokość napływu podczas obu spiętrzeń. Po spiętrzeniu Uta nie obserwowano erozji wydym ani plaż.

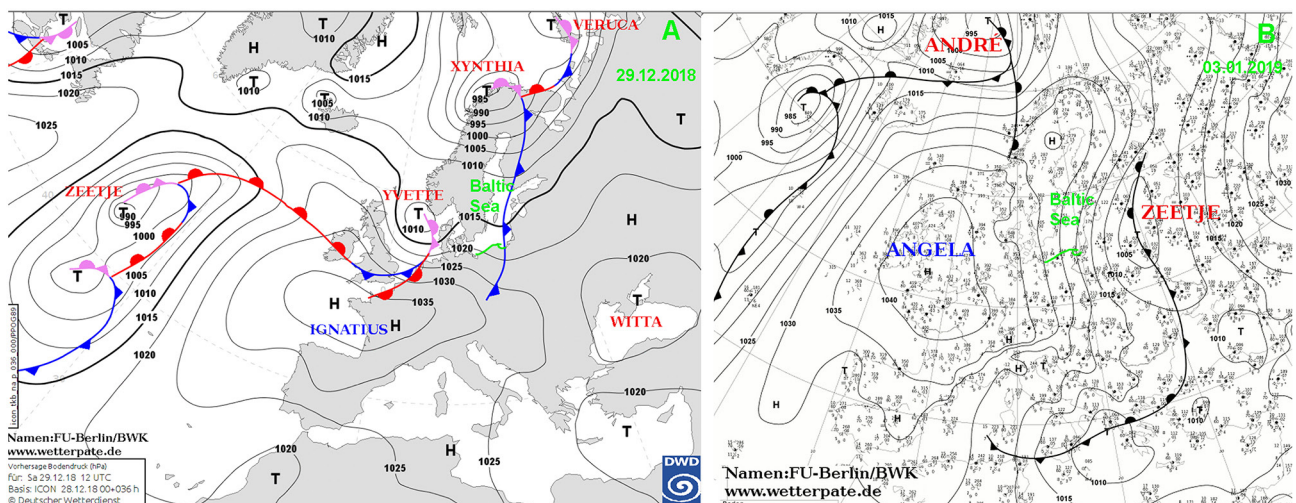
Po największym spiętrzeniu Zeetje z początku stycznia 2019 r., powstały kolejne dwa małe spiętrzenia sztormowe spowodowane wiatrem z sektora NW z maksymalnym poziomem morza do 560 cm (tab. 2). Spiętrzenia te ze względu na niższy poziom morza nie powodowały erozji wydym.

### Charakterystyka spiętrzenia Zeetje ze stycznia 2019

Niż o nazwie Zeetje (j. niderlandzki – małe morze lub mały sztorm) formował się nad Północnym Atlantykiem 29 grudnia 2018 r. W dniu 31 grudnia 2018 nad Islandią w układzie niżowym Zeetje ciśnienie wynosiło 985 hPa. Wraz z przemieszczaniem niżu na

wschód, nad Europą Zachodnią od Norwegii po Szwajcarię przechodził ciepły front, powodujący wzrost temperatury powietrza i rozwój silnego wiatru z kierunku SW do W. Nad północno-zachodnią Europą wiatr powodował uszkodzenia infrastruktury, w tym śmierć kilku osób w pociągu na moście w Danii. Na południowym Bałtyku układ niżowy Zeetje spowodował rozwój wiatru od brzegu w kierunku centrum niżu i obniżenie poziomu morza o 20–50 cm poniżej poziomu średniego, na zachodnim i środkowym wybrzeżu oraz 10–15 cm na wybrzeżu wschodnim.

W dniu 1 stycznia 2019 r. niż znajdował się nad Norwedią, ciśnienie wynosiło 980 hPa. Silny wiatr z kierunku SW przemieścił się znad Niemiec nad Polskę. Następnie wiatr zmienił kierunek na W i przekraczał  $14\text{ ms}^{-1}$  na wschodnim i  $16\text{ ms}^{-1}$  na zachodnim wybrzeżu (tab. 4). Wraz ze zmianą kierunku i prędkości wiatru poziom morza w portach podnosił się o 2–4 cm na godzinę. Pod koniec 1 stycznia 2019 wiatr o prędkości  $15\text{--}17\text{ ms}^{-1}$  zmienił kierunek na NW, a następnie na N. Porywy wiatru sięgały  $19\text{--}20\text{ ms}^{-1}$ . Alarmowy poziom morza w polskich portach został przekroczony rano 2 stycznia 2019. Długotrwały wiatr spowodował maksymalne spiętrzenie wody do 1,2–1,3 m ponad poziom średni. Poziom taki występował 2 stycznia 2019, pomiędzy godziną 10:00 a 14:00. Wysoki poziom morza utrzymywał się przez około 16 godzin. Przez około 12 godzin poziom morza przekraczał średni poziom o 1 m. Średni poziom wody ze wszystkich wodowskazów wyniósł 1,25 m (tab. 4). W dniu 3 stycznia 2019 nadal utrzymywał się wiatr z kierunku N. Jego prędkość powoli spadała do  $12\text{ ms}^{-1}$ . Poziom morza opadał powoli, 3 stycznia 2019 wynosił nadal ponad 80 cm ponad poziom średni. Wolniejsze obniżanie poziomu morza wystąpiło w Zatoce Pomorskiej i Gdańskiej, powo-

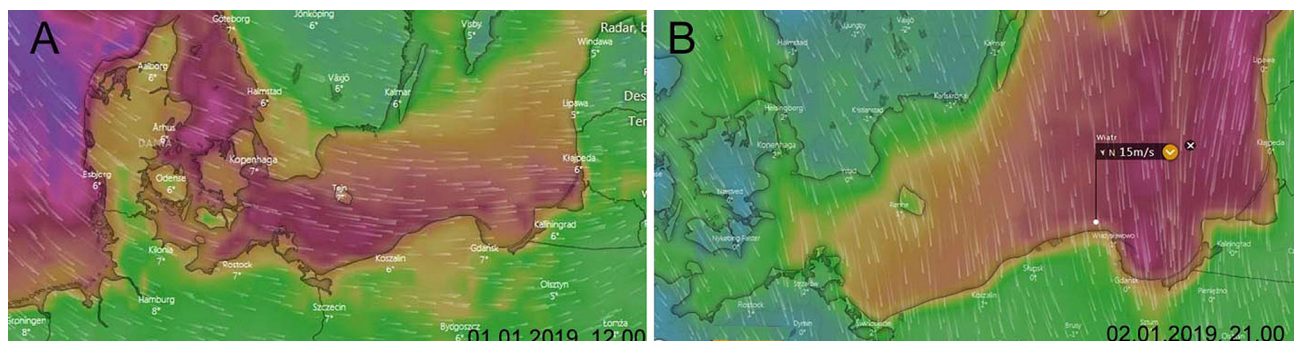


Ryc. 5. Mapy synoptyczne przemieszania się niżu Zeetje (IMFUB 2022): A – rozwój niżu Zeetje nad północnym Atlantykiem, 29.12.2018. B – Niż Zeetje nad wschodnim Bałtykiem, 01.2019 r. (zielona linia – polskie wybrzeże)

Fig. 5. Synoptic maps of the passage of the Zeetje low (IMFUB 2022): A – development of the Zeetje low over the North Atlantic, 29.12.2018. B – Zeetje low over the eastern Baltic, 01.2019 (green line – Polish coast)

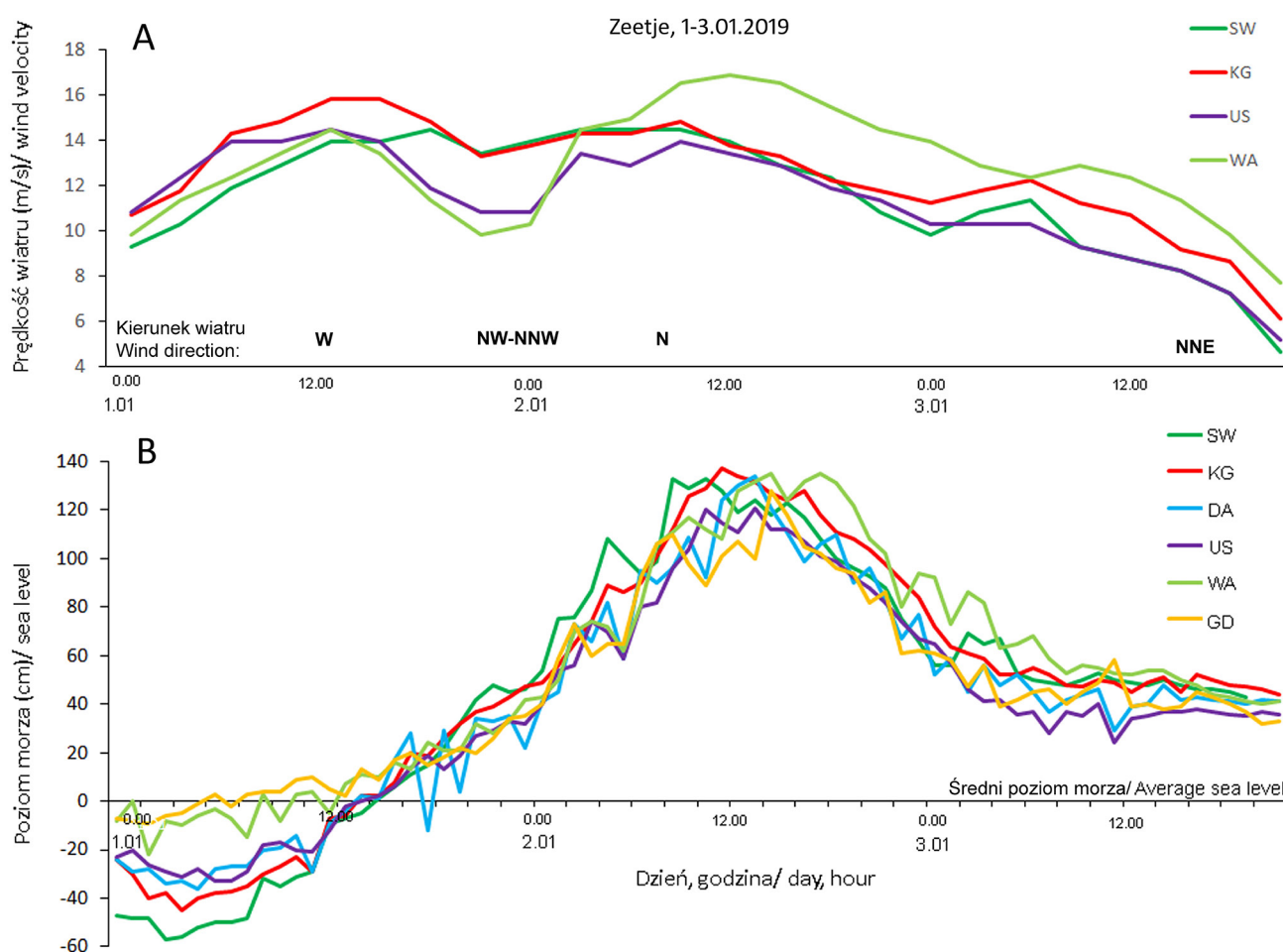
dem był wiatr i napływ wody z kierunku NNE. Pod koniec 3 stycznia 2019 wiatr zmienił kierunek na NNE przy prędkości 5–7 ms<sup>-1</sup>. Poziom morza obniżył się do 0,4 m ponad poziom średni.

Maksymalny poziom morza obserwowano na zachodnim wybrzeżu, 633 cm w Świnoujściu i 637 cm w Kołobrzegu oraz na wschodnim wybrzeżu do 633 cm we Władysławowie. Wysoki poziom morza ob-



Ryc. 6. Zmiany wiatru nad Bałtykiem Południowym w trakcie przejścia niżu Zeetje: A – początek sztormu przy wietrze WNW, 1.01.2019, B – główna faza sztormu przy wietrze N-NNE, 2.01.2019; zrzuty ekranu z windy.com

Fig. 6. Wind changes over the South Baltic Sea during the passage of the Zeetje low: A – beginning of the surge with WNW winds, 1.01.2019, B – main phase of the surge with N-NNE winds, 2.01.2019; screenshots from windy.com



Ryc. 7. Warunki anemometryczne i hydrograficzne podczas sztormu Zeetje w wybranych portach polskiego wybrzeża (akronimy patrz ryc. 1D, tab. 2, 4) (na podstawie danych z Kapitanatów portów): A – zmiany prędkości i kierunku wiatru, B – zmiany poziomu morza

Fig. 7. Anemometric and hydrographic conditions during surge Zeetje in selected harbors of Polish coast (for acronyms see fig. 1D, tab 2 i 4) (based on data from Harbor Master’s Offices). A – changes in wind velocity and direction. B – changes in the sea level

Tabela 4. Charakterystyka hydro-meteorologiczna sztormu Zeetje w styczniu 2019 wzdłuż polskiego wybrzeża (lokalizacja portów na ryc. 2D) (na podstawie danych z Kapitanatów portów, IMGW-PIB (2019) oraz IMFUB (2022))

Table 4. Hydro-meteorological characteristics of the Zeetje surge in January 2019 along Polish coast (stations location on fig. 2D) (based on data from Harbor Master's Offices, IMGW-PIB (2019) and IMFUB (2022))

Parametr	Jednostka	Port, mareograf						
		Świnoujście (SW)	Kołobrzeg (KG)	Darłowo (DA)	Ustka (US)	Łeba (LE)	Władysławowo (WA)	Gdańsk (GD)
Alarmowy poziom morza ponad poziom średni	[m]	0,8	1,1	1,1	1,0	1,1	0,7	0,7
Średnia prędkość wiatru	[ms <sup>-1</sup> ]	11,8	12,7	12,2	11,6	12,1	13,0	11,6
Maksymalna prędkość wiatru	[ms <sup>-1</sup> ]	14,5	16,0	14,8	14,5	15,5	17,2	16,0
Czas wiatru wzdłuż brzegu WSW-W	[%]	20	23	23	25	25	30	30
Czas wiatru do brzegu WNW-NNW	[%]	32	30	19	20	20	17	15
Czas wiatru do brzegu N-NNE	[%]	48	47	53	55	55	53	55
Czas wiatru V > 10 m s <sup>-1</sup>	[h]	52	59	57	57	59	66	55
Poziom morza, H > 0,6 m	[h]	28	25	22	22	25	30	24
Poziom morza, H > 0,8 m	[h]	19	20	16	16	16	21	15
Poziom morza, H > 1,0 m	[h]	14	14	8	10	11	15	9
Poziom morza, H > 1,2 m	[h]	6	8	8	10	11	15	9
Maksymalny poziom morza ponad poziom średni	[m]	1,33	1,37	1,34	1,11	1,07	1,35	1,28
Godzina maksymalnego poziomu morza, 02.01.2019	[-]	10:00	11:00	13:00	13:00	13:00	14:00	14:00

serwowano także na Zatoce Gdańskiej, do 628 cm w Gdańsku. Na wybrzeżu środkowym, ze względu na krótszy czas działania silnego wiatru do lądu, poziom morza był niższy w Ustce i Łebie (tab. 4).

Efektom przejścia niżu Zeetje był wysoki poziom morza. Spowodował obniżenie plaż o 1–1,5 m w stosunku do grudnia 2018 r. W wielu miejscach wysokość plaży nie przekraczała 0,6 m, dlatego podczas pierwszych pomiarów, pomiędzy 3 a 6 stycznia 2019 obserwowano nadal wysoki poziom wody i bardzo wąskie, podtopione plaże. Nabrzeża portowe w Świnoujściu, Gdańsku i mniejszych miejscowościach były podtopione. Sztucznie uformowane plaże po dużym sztormie z 2017 r. (Łabuz 2021), były w wielu miejscach rozmyte, w części lub nawet zupełnie. W wyniku obniżenia plaży z użytku wyłączono szereg zejść na plażę, m.in. schody w Międzyzdrojach z Kawczej Góry (do 07.2023, nie otworzone do użytku). Podmyte były też nowe zejścia na plaże, wykonane po zniszczeniu przednich przez sztorm Axel ze stycznia 2017 r. (ryc. 9D). W porcie Mrzeżyno i Darłowo nabrzeża podwyższano workami z piaskiem. W Darłowie sztorm spowodował jednak przelanie wody na teren skweru za falochronem portowym. Uszkodzona została promenada i podest drewniany na falochronie. Na promenadzie o wysokości około 2 m n.p.m., sztorm odłożył dużą ilość piasku, materii organicznej oraz śmieci. Na Mierzei Kopań woda wyrzuciła na brzeg pale z odbudowy ostróg, wykonywanej po

uprzednich zniszczeniach przez sztorm Axel w styczniu 2017 r. Niektóre ze skutków erozji sztormu Zeetje były opisywane w prasie lokalnej:

- *Nadciągą Zeetje. IMGW ostrzega przed wichurami*, 01.01.2019 (wp.pl),
- *Sztorm w Świnoujściu. Bałtyk zatopił plażę oraz nabrzeża wysp. Takiej sytuacji nie było tu już dawno*, 02.01.2019 (gp24.pl),
- *Dramatyczna sytuacja na Półwyspie Helskim. Bałtyk sponiewierał plażę*, 03.01.2019 (wiadomosci.radiozet.pl),
- *Sztorm na Bałtyku, zamknięte molo i nadbrzeże w Gdańsku. Rzeki przekroczyły stan alarmowy*, 02.01.2019 (trojmiasto.wyborcza.pl).

### Wielkość erozji wydmorego nadmorskich po sztormie Zeetje

Wielkość erozji wydmorego po sztormie Zeetje była różnicowana na pomierzonych profilach. Wartość średnia erozji dla badanych odcinków mierzejowo-wydmorego również wykazywała różnice (ryc. 8). Różnice te wynikały zarówno z maksymalnego poziomu morza podczas sztormu Zeetje oraz ekspozycji danego odcinka na falowanie sztormowe. Przeciętna erozja wydmorego (cofanie podstawy ich stoku) podczas sztormu Zeetje wynosiła od 1,8 do 3,0 m na odcinkach mierzejowo-wydmorego z poziomem morza do 1,2 m ponad poziom średni. Na odcinkach z poziomem



morza ponad 1,3 m, erozja średnia dochodziła od 2,5 do 4,0 m. Na 25% przypadków pomierzonych profili, erozja wynosiła 1–2 m. Do 75% pomierzonych profili wykazywało erozję do 3 m na zachodnim wybrzeżu, 2 m na środkowym i ponad 4 m na wschodnim. Co wprost ma związek z maksymalnym poziomem morza podczas spiętrzenia sztormowego Zeetje. Na wybrzeżu środkowym poziom morza wynosił do 1,2 m, a na zachodnim i wschodnim ponad 1,3 m ponad poziom średni. Dokumentację fotograficzną erozji wydm przedstawia rycina 9.

Większe cofanie podstawy wydm, wartości średnie i maksymalne, nastąpiło na wybrzeżu wschodnim, pomiędzy Rowami i Władysławowem. Średnio wynosiło około 3,5 m. Na tym długim odcinku mierzejowo-wydmowym, mediana wielkości cofania wydm (erozji) była większa niż wartość średnia, czyli większa część badanych profili przekraczała średnią wartość pomierzonej erozji (ryc. 8). Maksymalna erozja wydm na tym odcinku dochodziła do 9–12 m. Było to efektem różnego położenia brzegu względem głównego kierunku falowania (NW-N). Większa erozja wydm powstała na brzegach przylądków ekspozowanych na NW-NNW (ryc. 9C, 10A–C). W tych miejscach powstała duża erozja wydm, wałowych oraz lądowych o różnej wysokości, co jest dowodem na okresowe zmiany przebiegu kierunku procesów brzegowych, obserwowanych i również wykazanych w pracy Zawadzkiej-Kahlau (1999). Erozja brzegu postępuje w miejscach o charakterystycznych parametrach morfologicznych, czyli m.in. niskiej i wąskiej plaży. Na wybrzeżu pomiędzy miejscowością Rowy i Karwia widoczne jest zróżnicowanie erozji

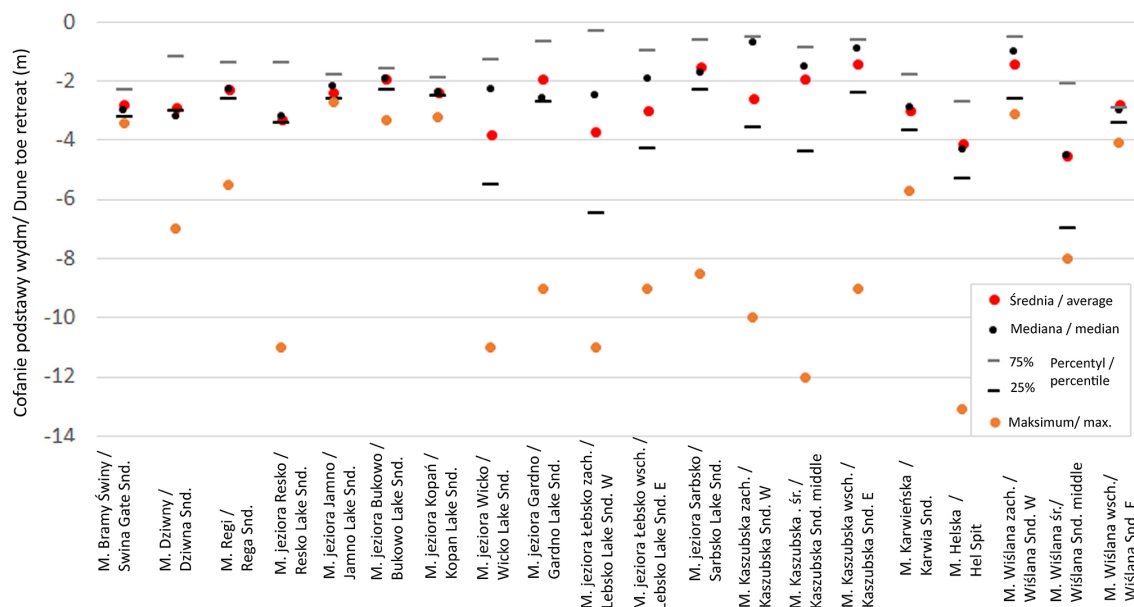
wydm wynikające z ekspozycji i morfologii brzegu, przy podobnym, niższym poziomie morza podczas spiętrzenia sztormowego Zeetje (Ustka-Łeba, HSL=1,07–1,1 m ponad poziom średni).

Na Mierzei Wiślanej większa erozja wydm wystąpiła w części wschodniej o przebiegu brzegu na kierunek NW (ryc. 9A, 10D), a mniejsza w części zachodniej o brzegu zorientowanym na NNE (ryc. 10E) i częściowo osłoniętym Półwyspem Helskim.

Na Mierzei Helskiej wielkość erozji była zróżnicowana. W części północnej rozmyciu uległy refulaty plaż. Duża erozja sztucznych plaż i nasypanych wydm wystąpiła w rejonie Kuźnicy i Jastarni. W części południowej mierzei, wielkość erozji zależna była od położenia brzegu względem falowania z kierunku NW-N (ryc. 9B, 10E). W miejscach zmiany jego przebiegu erozja sięgała 3–6 m (średnia 4 m). Erozji nie obserwowano na cyplach z szerokością do 60–80 m plażą.

Na mierzejach Jamno i Bukowo, położonych w Zatoce Koszalińskiej, średnia erozja wydm była najmniejsza. Wynikało to z obecności wysokich nad poziom morza plaż, które były budowane osadem eolicznym, nawiewanym przez całą jesień i zimę przez częsty wiatr o dużej prędkości z kierunku SW do W. Na mierzejach jezior Jamno, Bukowo i Kopań, wartości maksymalne cofania wydm nie przekraczały 4 m (ryc. 8).

Na zachodnim wybrzeżu średnie cofanie podstawy wydm wynosiło 2–3 m, a maksymalne 7 m. Większa erozja wystąpiła na odcinkach ze zmianą przebiegu linii brzegowej, gdzie występują również niewielkie przylądki, tak jak na wybrzeżu wschodnim (ryc. 9D, 10F). Na wklęsłym brzegu Mierzei Bra-



Ryc. 8. Wartości średnie, mediany i maksymalne cofania wydm na polskich mierzejach po sztormie Zeetje, 1–3.01.2019 (ryc. 1A, tab. 1)

Fig. 8. Average, median and maximum values of dune retreat on Polish sandbars after the Zeetje storm surge, 1–3.01.2019 (Fig. 1A, Table 1)





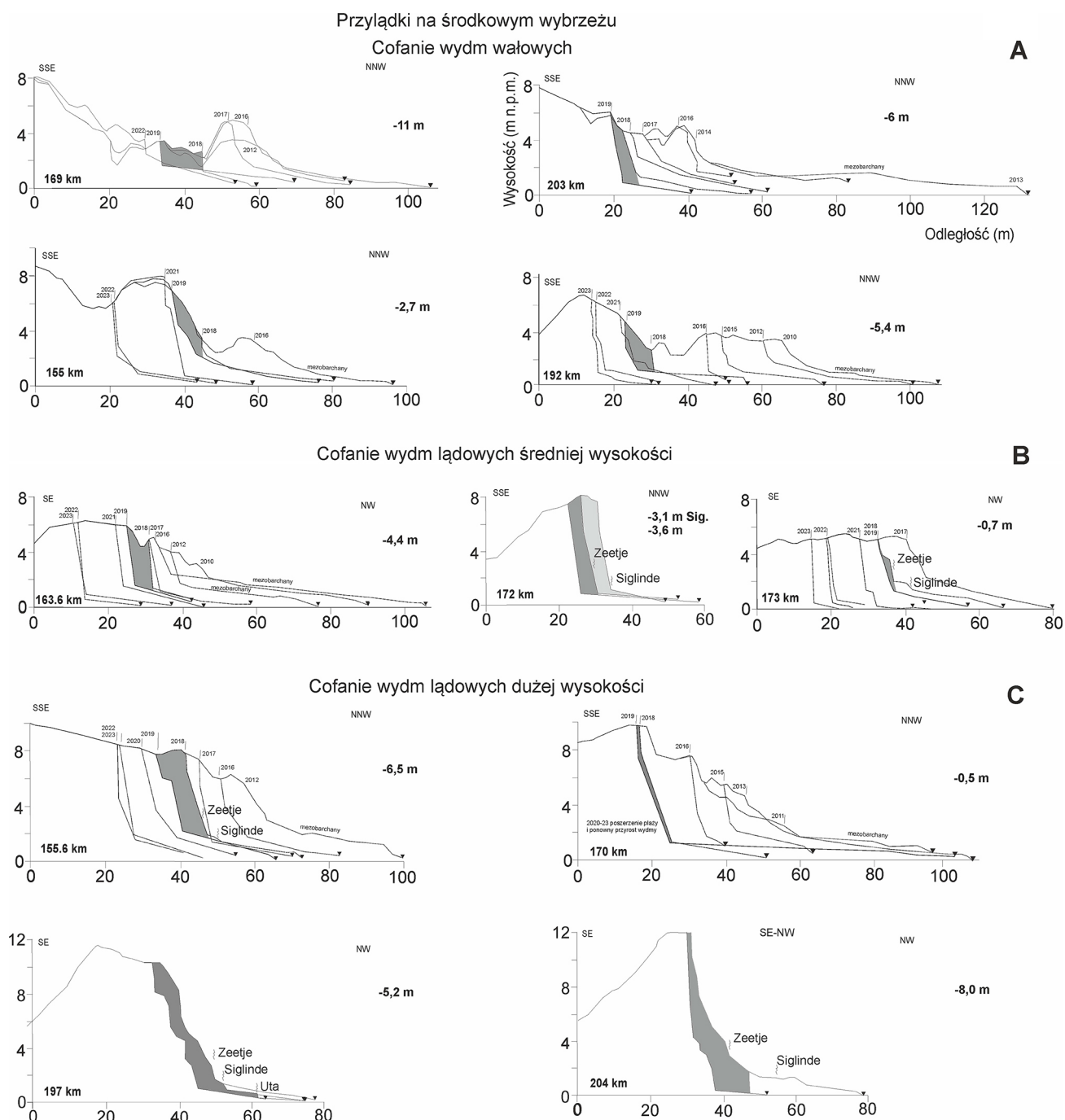
Ryc. 9. Przykłady erozji wydym przez sztormy w okresie 2018/2019: A – erozja niskiego wału wydmy przedniej przez sztorm Zeetje, Mierzeja Wiślana, km 3 (kilometraż brzegu patrz ryc. 1 A, tab. 1), B – erozja wydym na przylądku po podcięciu i zwężeniu plaży w 2018 r., Mierzeja Helska, km 33 H, C – erozja wydym lądowych w wyniku abradowania przylądka od zachodu po sztormach w 2018 i po sztormie Zeetje, Mierzeja Sarbska, km 174, D – erozja przy odbudowanych schodach na plażę (zniszczonych w 2017 r.), Mierzeja Reska, km 342, E – erozja w trakcie sztormu Zeetje, Mierzeja Bramy Świny, km 419

Fig. 9. Examples of dune erosion by storms in 2018/2019: A – erosion of the low foredune by surge storm Zeetje, Vistula Sandbar, km 3 (for shore kilometer see Fig. 1A, Table 1), B – erosion of dunes on the promontory after beach narrowing and cutoff in 2018, Hel Spit, km 33 H, C – erosion of inland dunes due to promontory cutoff from the west after storms in 2018 and after storm Zeetje, Sarbsko Sandbar, km 174, D – erosion at the rebuilt steps to the beach (destroyed in 2017), Reska Spit, km 342, E – erosion during Zeetje surge storm, Świna Gate Sandbar, km 419

my Świny, położonej w Zatoce Pomorskiej, cofanie wydym było większe tam, gdzie plaża miała mniejszą wysokość niż napływ wody i przebieg brzegu na kierunku NW (ryc. 9E, 10G). Erozja wydym na brzegu eksponowanym na północ i na północny zachód była podobna i mniejsza lub nie wystąpiła ze względu na obecną wysoką i szeroką plażę akumulacyjną.

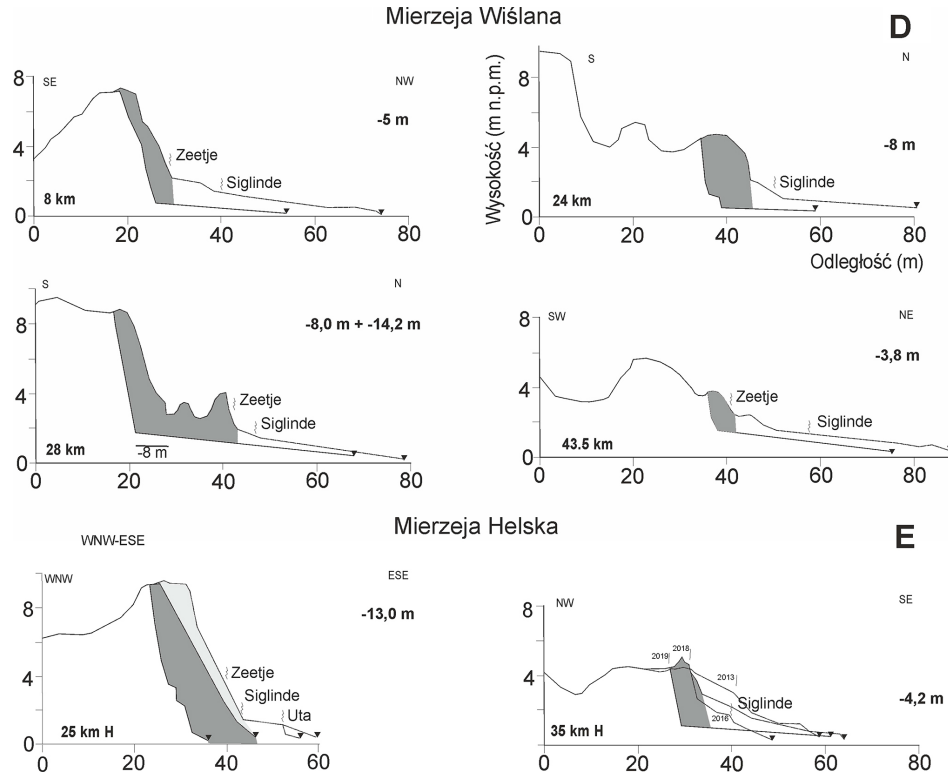
Wielkość erozji wydym podczas sztormu Zeetje zależała od warunków:

- hydrologicznych: poziomu wody i maksymalnej wysokości jej napływu na brzeg,
- morfologicznych: wysokości plaży i przebiegu brzegu względem falowania sztormowego.



Ryc. 10A–C. Erozja wydym na zachodnim brzegu przylądków wybrzeża środkowego po sztormie Zeetje na tle ich stałego cofania: A – erozja wydym wałowych, B – erozja wydym lądowych średniej wysokości, C – erozja wydym lądowych dużej wysokości

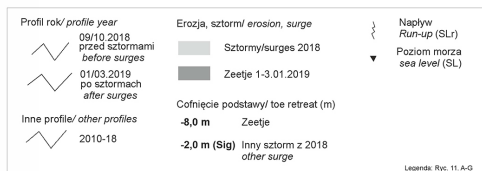
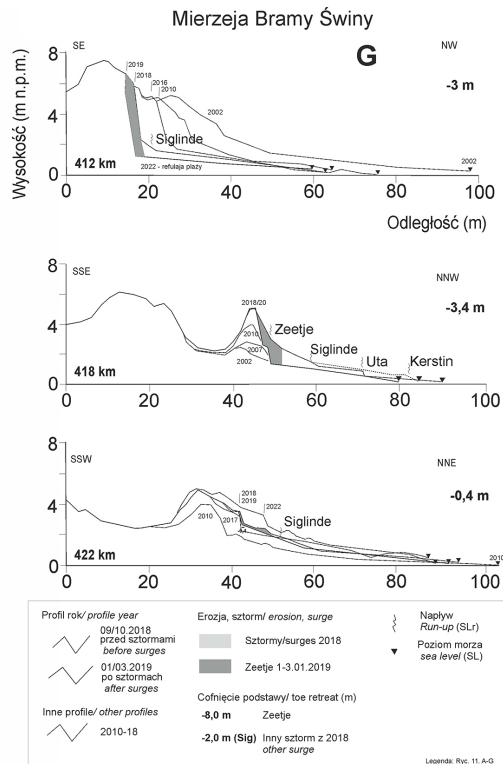
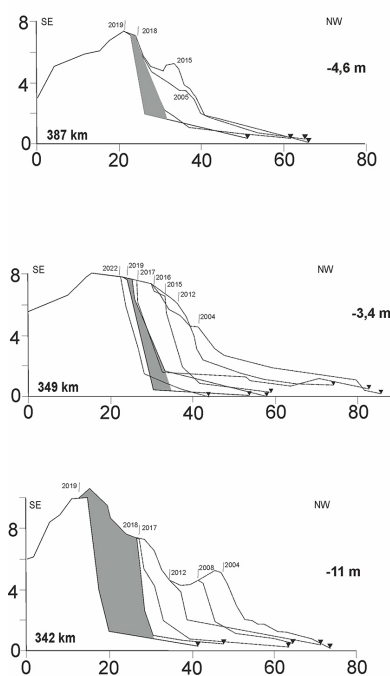
Fig. 10A–C. Dune erosion on the west side of promontories on the middle coast after surge Zeetje in relation to their permanent retreat: A – the erosion of foredune dikes, B – the erosion of inland dunes of medium height, C – the erosion of inland dunes of high height



Ryc. 10D-E. Erozja wydm na wschodnim wybrzeżu po sztormie Zeetje. D – erozja wałowych i wysokich wydm lądowych na Mierzei Wiślanej. E – erozja wałowych i wysokich wydm lądowych na Mierzei Helskiej

Fig. 10D-E. Erosion of dunes on the east coast after Zeetje surge. D – erosion of foredunes and high inland dunes on Vistula Sandbar. E – erosion of foredunes and high inland dunes on Hel Spit

Przylądki na mierzejach wybrzeża zachodniego



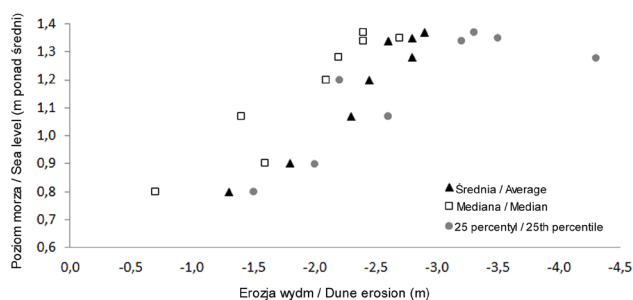
Ryc. 10F-G. Erozja wydm na wybrzeżu zachodnim po sztormie Zeetje, E – cofanie wydm na przylądkach, F – erozja na brzegu o innym przebiegu, Mierzeja Bramy Świny

Fig. 10F-G. Erosion of dunes on the west coast after surge Zeetje: E – retreat of dunes on the promontories, F – erosion on the coast with a different course, Świna Gate Barrier



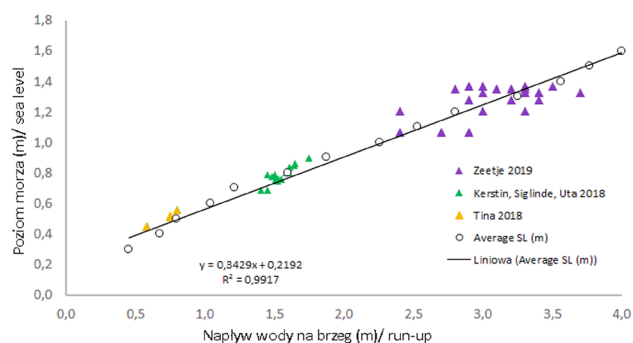
## Wpływ poziomu wody i wysokości jego napływu na erozję wydym

Erozja wydym rozumiana jako cofanie podstawy wydym i zmniejszanie ich objętości wynika z wysokości poziomu morza podczas sztormu, czasu jego działania (liczby godzin z poziomem  $H > 1$  m ponad poziom średni). Czas trwania sztormu ma największy wpływ na wielkość erozji, to jest cofania jej podstawy ( $\Delta Kfr$ ) zmian objętości wydmy ( $\Delta Qfr$ ). Im dłużej trwa sztorm z poziomem morza powyżej 1 m ponad poziom średni, tym erozja wydym jest większa. Im dłużej trwa sztorm z bardzo wysokim poziomem morza, powyżej 1,4 m ponad poziom średni, tym większy jest ubytek osadu w wydymie przedniej i większe cofnięcie wału (do jego zniszczenia włącznie). Średnią wielkość cofania wydym w okresie jesieni i zimy 2018/19, po mniejszych sztormach oraz największym Zeetje przedstawiono na rycinie 11. Przy poziomie morza  $HSL < 1,2$  m erozja średnia wynosiła 1,2 do 2,2 m. Przy poziomie morza  $HSL > 1,2$  m ponad poziom średni, erozja średnia była większa niż 2,5 m. Przy tym poziomie morza, do 25% pomierzo-



Ryc. 11. Zależność cofania wydmy od poziomu morza w okresie 2018/19

Fig. 11. Dependence of dune retreat on sea level in period 2018/19



Ryc. 12. Związek poziomu morza (HSL) do pomierzonej wysokości napływu fali (HSLr) podczas wybranych spiętrzeń z okresu jesienno-zimowego 2018/19 na tle średniej wieloletniej

Fig. 12. Relationship of sea level (HSL) to the measured wave run-up height (HSLr) during selected surges in the Autumn-Winter period 2018/19 against the background of the long-term average

nych przypadków, przekraczało 3 m cofania wydym, co wynikało z dużej liczby miejsc z plażą niższą niż maksymalny napływ wody na brzeg. Przy poziomie morza  $HSL > 1,3$  m ponad poziom średni, średnia erozja wydym dochodziła do 3–4 m (ryc. 8, 11).

Próby zestawienia zależności wielkości erozji wydmy od poziomu morza obarczone są błędem. Wynika to z tego, że poziom morza jest określony w porcie, osłoniętym od falowania i często oddalonym od miejsca pomiarów brzegowych. W trakcie trwania spiętrzenia sztormowego, rzeczywisty zasięg wody na brzeg jest wyższy niż pomierzony poziom morza w porcie. Zasięg wody na brzeg można określić na podstawie m.in. nanosów materii organicznej i śmieci na brzeg, wyznaczających maksymalną wysokość napływu podczas falowania.

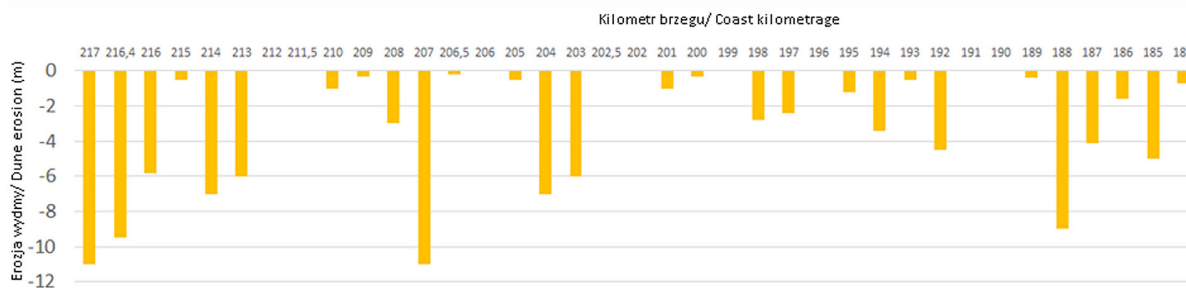
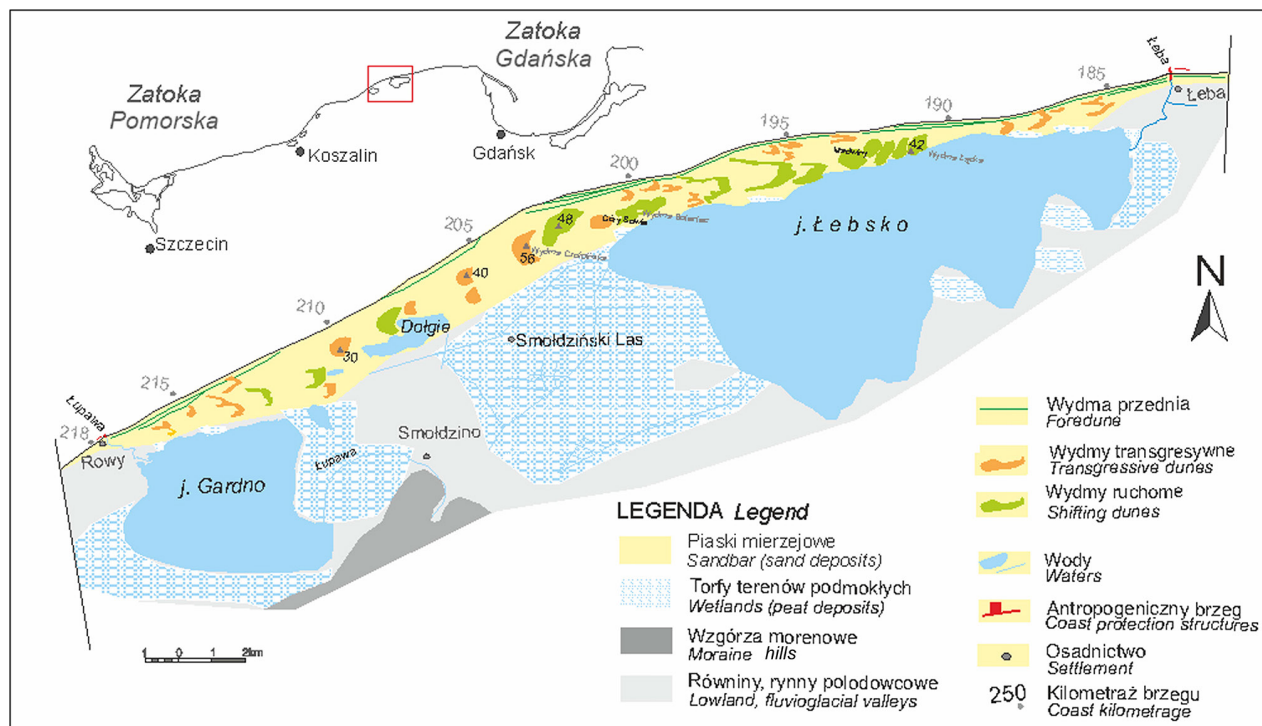
Efektom falowania powodowanym przez wiatr o dużej prędkości jest maksymalny napływ wody na brzeg (plażę, niskie wydmy). Wysokość napływu wody na brzeg, jest istotnym wskaźnikiem możliwej wielkości cofania wydym podczas spiętrzenia sztormowego (Nielsen, Hanslow, 1991, Stockton i in. 2006). Pomiaru terenowe wykazały zależność wysokości napływu względem poziomu morza w trakcie spiętrzeń sztormowych (Łabuz 2021). Związek zmian poziomu morza i wzrostu wysokości napływu przedstawia rycina 12. Oznaczono na niej wartości średnie z wielu lat pomiarów (od 2002 r.) oraz wyróżniono napływ wody, pomierzony na profilach podczas spiętrzeń w okresie 2018/19. Wysokość napływu określa przy jakiej wysokości plaży (brzegu), będzie erodowane lub nie nadbrzeże wydymowe (lub klifowe).

Podczas spiętrzeń sztormowych z jesieni 2018 r., z poziomem morza do wysokości 0,8 m ponad poziom średni, woda napływała na brzeg do wysokości 1,8 m n.p.m. (ryc. 12, spiętrzenia mniejsze). Przy takim poziomie morza, woda pokrywała plażę o średniej wysokości do 1,8 m n.p.m. Na odcinkach erozyjnych, nawet w okresie letnim, wysokości plaży wynoszą 1–1,5 m n.p.m. W tych miejscach, mniejsze spiętrzenia sztormowe powodowały erozję wydym na krótkich odcinkach. Z powodu obniżenia plaż na wielu mierzejach do 1–1,5 m, przez mniejsze sztormy w 2018 r., erozja wydym mogła być większa po sztormie Zeetje. W jego trakcie poziom morza przekraczał 1,2 m, a napływ wody na brzeg sięgał do 2,4–3,6 m, (ryc. 12, Zeetje). Dłuższe odcinki wydym, od 100 do 600 m długości, były erodowane na badanych odcinkach, gdzie napływ sięgał 3,0–3,6 m n.p.m., znacznie powyżej maksymalnych wysokości plaż. W tych miejscach, średnia wartość cofania wydym dochodziła do 4 m, a maksymalna do 9–14 m.

## Wpływ położenia brzegu na erozję wydym

Spiętrzenie wody podczas sztormu Zeetje na polskim wybrzeżu spowodował wiatr o dużej prędkości z kie-





Ryc. 13. Wielkość erozji wydm na mierzejach jezior Gardno i Łebsko przez sztorm Zeetje (mapa za Łabuzem 2021)  
 Fig. 13. Magnitude of dune erosion on the sandbars of the Gardno and Łebsko lakes by storm Zeetje (map after Łabuz 2021)

runku NW–N (tab. 4, ryc. 6). Większą erozję wydm obserwowano na odcinkach wybrzeża o ekspozycji północnej i północno-zachodniej. Jednak tylko tam, gdzie plaża miała wysokość niższą niż napływ wody na brzeg, do 3,6 m n.p.m.

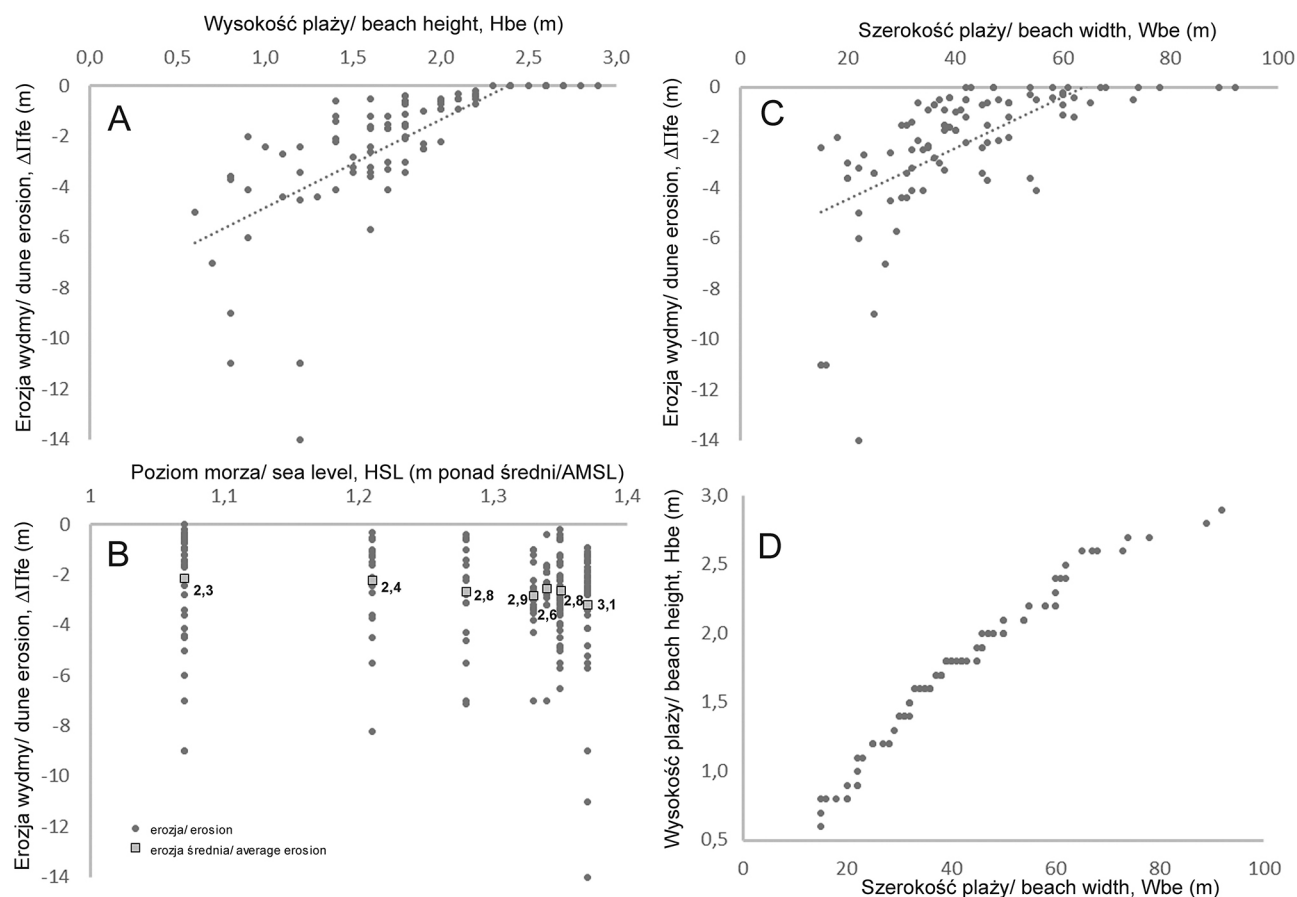
Położenie brzegu względem przeważającego kierunku falowania i wysokość plaży przed sztormem mają zasadniczy wpływ na wielkość erozji wydm, cofania jej podstawy i zmianę objętości osadu. Różnice w erozji wydm, wynikające z obu uwarunkowań, widoczne były na całej długości badanego wybrzeża. Przykładem morze być ponad 35-cio km długości odcinek Mierzei Gardnieńskiej i Łebskiej, gdzie z powodu braku działalności człowieka, procesy brzegowe zachodzą w warunkach naturalnych. Na tym odcinku największa erozja zachodziła na zachodnich brzegach przylądków, wysuniętych ku morzu oraz w aktualnie występujących zatokach erozyjnych z niską nad poziom morza plażą (ryc. 13). Mniejsze cofanie wydm powstało na odcinkach, gdzie występuje północna ekspozycja brzegu. Erozji wydm na Mierzei Gardnieńsko-Łebskiej nie obserwowano na

odcinkach akumulacyjnych z szeroką i wysoką plażą, w tym eksponowanych na kierunek północny. Wpływ położenia brzegu względem głównego kierunku falowania podczas sztormu był widoczny na brzegach Mierzei Bramy Świny i Mierzei Wiślanej. Większa erozja wystąpiła na ich brzegach o przebiegu NW niż N lub NE. Większa erozja wystąpiła również na północnych brzegach cypli formowanych przez szerokie plaże na Mierzei Helskiej.

### Wpływ morfologii plaży na erozję wydm

Średnie i maksymalne wartości cofania wydm na badanych odcinkach oraz wypadkowe na profilach (ryc. 8, 10A–G), zależały również od wysokości plaży (ryc. 14A). Plaże niższe niż wysokość napływu wody na brzeg, nie chroniły wydm przed erozją. Przy coraz wyższym poziomie morza, napływ był wyższy, a wartości erozji wydm były również większe (ryc. 14B).

Z obserwacji wynika, że szerokość plaży może mieć wpływ na wielkość erozji wydmy (ryc. 14C).



Ryc. 14. Zależności cofania podstawy wydmy od parametrów morfologii plaży i wysokości poziomu morza podczas sztormu Zetjetje: A – wysokość plaży (Hbe) a cofanie wydmy ( $\Delta P_{fe}$ ), B – poziom morza (HSL) a cofanie wydmy ( $\Delta P_{fe}$ ), C – szerokość plaży (Wbe) a cofanie wydmy ( $\Delta P_{fe}$ ), D – szerokość plaży (W be) a jej wysokość (Hbe) przed sztormem Zetjetje (pomiar 11/12.2018)

Fig. 14. Dependencies of dune base retreat on parameters of beach morphology and sea level height during storm Zetjetje: A – beach height (Hbe) vs. dune retreat ( $\Delta P_{fe}$ ), B – sea level (HSL) vs. dune retreat ( $\Delta P_{fe}$ ), C – beach width (Wbe) vs. dune retreat ( $\Delta P_{fe}$ ), D – beach width (W be) vs. beach height (Hbe) before storm Zetjetje (measured 11/12.2018)

Szerokość plaży jest jednak względnym parametrem oceny wielkości erozji, ponieważ przy różnej jej szerokości następowała podobna erozja wydmy. Zazwyczaj szerokość plaży ma związek z jej wysokością, co również obserwowano przed sztormem Zetjetje (ryc. 14D). Oznacza to, że brzegi erozyjne charakteryzuje plaża o niskiej wysokości i zazwyczaj małej szerokości. Takie odcinki są narażone na erozję, przy niższym poziomie morza podczas mniejszych spiętrzeń sztormowych. Z kolei plaża o dużej szerokości, ale małej wysokości nadal nie chroni nadbrzeża wydmy przed erozją.

Prawdopodobieństwo erozji wydmy wzrasta na odcinkach z niską plażą do 1,5 m n.p.m. (ryc. 14A). Są one zazwyczaj erodowane nawet przez mniejsze spiętrzenia sztormowe z poziomem morza HSL < 1 m ponad poziom średni. Obserwowano to po mniejszych sztormach z jesieni 2018 r. Zróżnicowanie erozji wzdłuż brzegu jest więc duże, ponieważ zmienia się wysokość plaż, nawet na sąsiadujących ze sobą

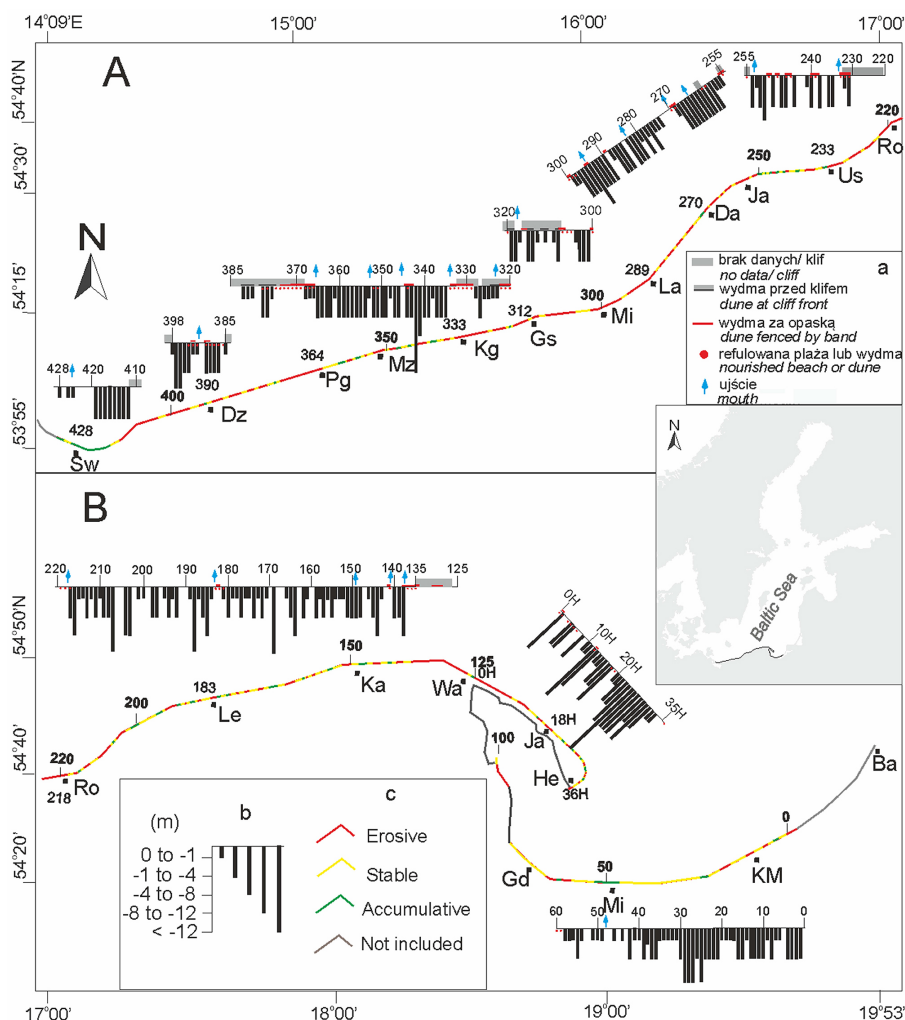
krótkich odcinkach. Podczas spiętrzenia sztormowego wyższego niż 1 m n.p.m. erodowane były wydmy na odcinkach z plażą do 2,2 m wysokości. Wysokość plaży jest dobrym parametrem oceny potencjalnej erozji nadbrzeża wydmy. Im niższa plaża niż prognozowany lub obserwowany poziom morza, tym możliwa większa erozja wydmy. Wybrzeże z plażą do około 2,5 m n.p.m. chroni wydmy przed średnimi spiętrzeniami sztormowymi, maksymalne HSL = 1 m ponad poziom średni (ryc. 14B). W związku z tym, że większość plaż na polskim wybrzeżu ma wysokości pomiędzy 1,5 a 2,5 m, przy napływie o wysokości 2,8–3,4 m n.p.m. erozja wydmy objęła dłuższe odcinki mierzejowo-wydmy. Większa erozja była tam, gdzie plaże były znacznie niższe niż napływ. Erozji nie obserwowano na odcinkach z plażą o wysokości ponad 3 m n.p.m. Były to bardzo krótkie odcinki wybrzeża z formami akumulacyjnymi u podstawy wydmy przedniej.

## Dyskusja

W wyniku rozwoju dużego spiętrzenia sztormowego wywołanego przez układ niżowy Zeetje z początku 2019 r. na polskim wybrzeżu Bałtyku obserwowano dużą erozję wydm, rozumianą jako cofanie ich podstawy (ryc. 15). Średnia wartość erozji dochodziła do 3 m, a maksymalna do 9–14 m. Największa erozja wydm wystąpiła w zachodniej części przylądków rozpoznanych na mierzejach wschodniego wybrzeża. Przylądki związane są z rozpoznanymi strefami układów zatok erozyjnych, które sąsiadują z odcinkami akumulacyjnymi (Zawadzka-Kahlau 1999, Pruszek, Zawadzka 2008). Plaże po zachodniej stronie przylądków są prostopadle ekspozowane na falowanie z kierunku NW i skośnie do NNW–NNE. Są zawsze niższe i węższe, ponieważ zazwyczaj podlegają erozji przez częste spiętrzenia sztormowe z kierunku NW.

Szerokość geograficzna przechodzącego niżu nad Morzem Bałtyckim, wpływa na rozkład ciśnienia i w ten sposób na kierunek i prędkość wiatru. Z tego

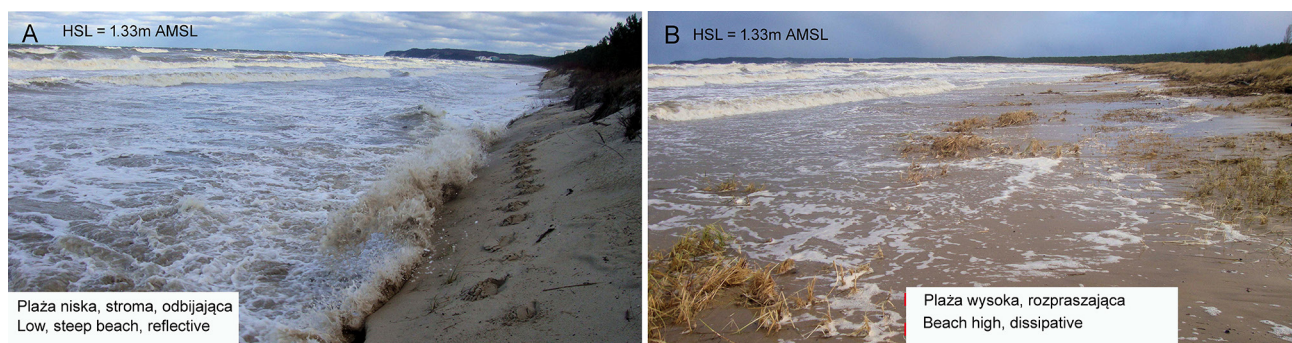
powodu podczas przejścia niżu nad Skandynawią, nad polskim wybrzeżem przeważa wiatr odmorski z kierunku SW i W. Z kolei niż nad południowym Bałtykiem wywołuje wiatr z kierunku W do NW. Głębsze i dłużej przechodzące układy niżowe, powodują rozwój dłuższego i większego spiętrzenia sztormowego (Majewski 1998, Sztobyn i in. 2005). Zmiana kierunku i prędkości wiatru podczas przejścia niżów jesienią i zimą 2018/19, skutkowałą zmieniającym się wzduż brzegu poziomem morza. Przy kierunku wiatru SW do W (WNW) maksymalny poziom morza sięgał 0,6–0,8 m ponad średni (jesień 2018 r.). W polskich portach, gdzie prowadzone są pomiary poziomu morza stan alarmowy wynosi od 0,7 do 1,1 m (to jest 570–610 cm). Z obserwacji wynika, że przy poziomie morza 0,7 m (570 cm), napływ wody na brzeg sięga do wysokości 1,2 m (ryc. 12). Przy spiętrzeniu sztormowym z poziomem morza do 0,8 m ponad poziom średni, niszczone były brzegi zazwyczaj erozyjne, z plażą o wysokości mniejszej od napływu  $H_{be} < H_{SLR} = 1,6$  m. Przy spiętrzeniu



Ryc. 15. Wielkość erozji wydm polskiego wybrzeża podczas sztormu Zeetje: A – zachodnie i środkowe wybrzeże, B – wschodnie wybrzeże

Fig. 15. Magnitude of erosion of dunes of the Polish coast during the Zeetje storm: A – west and central coast, B – east coast





Ryc. 16. Wysokość napływu wody w zależności od morfologii plaży, sztorm Zetjet, Mierzeja Brama Świny, 2.01.2019: A – niska plaża, odbijająca, skutkuje erozją wydmy, B – wysoka plaża, pochłaniająca, tylko erozja wydmy embrionalnych

Fig. 16. Height of water run-up depending on beach morphology, storm Zetjet, Świna Gate Barrier, 2.01.2019: A – low beach, reflective, results in dune erosion, B – high beach, dissipative, only erosion of embryonic dune

mniejszym od średniego HSL  $< 0,6$  m, dochodzi do niszczenia wybrzeża na typowych odcinkach erozyjnych z plażą o wysokości do 1 m n.p.m.

W trakcie ciepłych zim wiatr zazwyczaj wieje z kierunku SW, a zmiana jego kierunku na W i NW zależna jest od trasy i tempa przejścia układu niżowego nad Bałtykiem (Majewski 1998, Trzeciak 2001, Sztobryn i in. 2005). Największy wzrost poziomu morza obserwowany jest przy wietrze z kierunku NW i NE (Zeidler i in. 1995, Miętus i in. 2004, Sztobryn i in. 2005, Girjatowicz i in. 2016). Przy poziomie morza ponad 1 m, prędkość wiatru najczęściej wynosi do  $15 \text{ ms}^{-1}$ , według skali Beauforta generuje to fale do 3–4 m wysokości (Trzeciak 2001). Dlatego wraz ze wzrostem poziomu morza rośnie maksymalny napływ wody na brzeg, rozumiany jako suma poziomu morza i wysokości fali  $\text{HSLr} = \text{HSL} + \text{Hfali}$ . Wysokość napływu względem wysokości brzegu jest istotnym wskaźnikiem określenia miejsc erozji (Nielsen, Hanslow 1991, Stockdon i in. 2006). Przy poziomie morza  $\text{HSL} > 1,3$  m ponad poziom średni, podtapiane są prawie wszystkie plaże, w tym na odcinkach akumulacyjnych, gdzie wysokość plaż jest największa i przekracza 3 m n.p.m. To powoduje również podcinanie podstawy wydmy na odcinkach zazwyczaj akumulacyjnych. Przy dłuższym działaniu fal sztormowych oraz przy wyższym poziomie morza niż  $\text{HSL} > 1,3$  m, na odcinkach akumulacyjnych dochodzi również do dużej erozji stoków wydmy i tym samym ich cofania. Skutkiem jest nie tylko erozja wydmy, ale także podtapianie terenów nadmorskich położonych na wysokości do 3,5 m n.p.m. oraz zniszczenia infrastruktury użytkowej: zejść na plażę, promenad, mola, umocnień ochrony brzegu.

Czynnikiem istotnym, odpowiadającym za wielkość niszczenia wydmy nadmorskiej jest wysokość plaży nad poziom morza, co potwierdza uzyskana zależność (ryc. 14). Im niższa wysokość plaży przed sztormem, tym większe cofnięcie podstawy wydmy. Jest to plaża odbijająca falowanie (ryc. 16A). Większa wysokość i szerokość plaży chronią wydmy przed

niszczeniem (ryc. 16B). Wyższa plaża występuje na odcinkach akumulacyjnych. Jest to plaża pochłaniająca energię falowania. Plaże na polskim wybrzeżu o wysokości ponad 3 m n.p.m., należy uznać za pochłaniające energię falowania. Przy tej wysokości chronią wydmy przed większością spiętrzeń sztormowych do  $\text{HSL} < 1,3$  m. Plaże o takich parametrach występują na odcinkach akumulacyjnych. Tylko duży sztorm z poziomem morza  $\text{HSL} > 1,4$  m ponad poziom średni powoduje erozję wydmy na takim odcinku akumulacyjnym.

Częstość dużych spiętrzeń sztormowych nie wykazuje regularności, powstają co kilka lat (Kowalewska-Kalkowska 2012, 2018), obecnie jednak częściej niż w XX w., jak podają wcześniejsze publikacje (Wróblewski 1992, Wiśniewski, Wolski 2009). Prawdopodobieństwo powstania dużego spiętrzenia, zwiększyło się znacznie w XXI w (tab. 5). Do pierwszej dekady XXI w. nie obserwowano wzrostu częstości spiętrzeń sztormowych (Wiśniewski, Wolski 2009) lub nawet wykazywano zmniejszającą się liczbę dni ze sztormem (Formela, Marsz 2011). Jednak średni poziom morza na polskim wybrzeżu nieustannie wzrasta (Cyberski, Wróblewski 1999), a częstość powstawania dużych spiętrzeń sztormowych jest większa w XXI w. niż w okresach poprzednich (Łabuz 2021). To prowadzi do częstszej erozji wybrzeża i podejmowania coraz większej liczby kosztownych form jego ochrony w miejscowościach nadmorskich (Łabuz 2013, 2021).

Podczas największych spiętrzeń sztormowych w XXI w. poziom morza przekraczał poziom średni o 1,2 do 1,5 m (Cieśliński, Chromiak 2010, Łabuz, Kowalewska-Kalkowska 2011, Łabuz 2014, 2021, Kowalewska-Kalkowska 2018). Jednym z największych spiętrzeń był sztorm Axel ze stycznia 2017 r., podczas którego średni poziom morza we wszystkich stacjach pomiarowych był najwyższy w XX i XXI w. (Łabuz 2023). Średnia erozja obserwowana na całym polskim wybrzeżu wynosiła 5,1 m. Spowodował on wzrost długości odcinków erozyjnych, zatrzyma-



Tabela 5. Częstość powstania spiętrzenia sztormowego w latach z poziomem morza HSL  $\geq 1$  m i HSL  $\geq 1,3$  m w różnych przedziałach czasowych (na podstawie Wróblewskiego 1992, Wiśniewskiego, Wolskiego 2009 i danych własnych)Table 5. Storm surge frequency in years with sea level HSL  $\geq 1$  m and HSL  $\geq 1.3$  m in different time intervals (based on Wróblewski 1992, Wiśniewski, Wolski 2009 and own data)

Porty	1951–1985 (Wróblewski 1992)		1947–2007 (Wiśniewski i Wolski 2009)		2001–2020 (Łabuz 2021)	
	HSL $\geq 1,0$ m	HSL $\geq 1,3$ m	HSL $\geq 1,0$ m	HSL $\geq 1,3$ m	HSL $\geq 1,0$ m	HSL $\geq 1,3$ m
Świnoujście	1,8	15,0	1,2	4,0	0,6	2,3
Kołobrzeg	1,3	8,5	1,1	5,0	0,8	3,8
Ustka	bd	bd	2	20,0	1,0	5,0
Łeba	bd	bd	bd	bd	1,0	5,0
Władysławowo	2,1	20,0	2,2	20,0	1,0	3,0
Gdańsk	2,0	20,0	1,5	4,5	1,3	6,0

bd – brak danych.

nie odbudowy wydym na ponad 2 lata (Łabuz 2018). W styczniu 2019 r. powstało, omawiane duże spiętrzenie sztormowe Zeetje, a w styczniu 2022 r. kolejne o nazwie Nadine.

Przy pojedynczym spiętrzeniu, nawet bardzo wysokim, np. w 2004, 2009 (Cieśliński, Chromiak 2010, Łabuz, Kowalewska-Kalkowska 2011) erozja brzegu i nadbrzeża była duża. Jednak, jeśli duży sztorm poprzedza sekwencja mniejszych sztormów, to efektem jest jeszcze większa erozja nadbrzeża. Tak jak w okresie 2011/12, 2016/17 (Łabuz 2014, 2018, 2021, Kowalewska-Kalkowska 2018) oraz w omawianym okresie 2018/19. Z powodu wzrostu częstości mniejszych spiętrzeń sztormowych z HSL = 0,8 m ponad poziom średni, na polskim wybrzeżu zaczynają przeważać brzegi o tendencjach erozyjnych nad tymi, które ulegały odbudowie (nazywane też stabilnymi). To skutkuje brakiem możliwości odbudowy podstawy wydym w okresie letnim. Plaże przez cały rok mają małą wysokość i szerokość i tym samym są podatne na erozję przez mniejsze spiętrzenia sztormowe.

## Wnioski

Pomiary zmian nadbrzeży wydymowych wykonane po niższych spiętrzeniach sztormowych do HSL = 0,8 m ponad poziom średni oraz po wyższych HSL  $> 1,2$  m pozwoliły określić związek erozji wybrzeża wydymowego z poziomem morza podczas tych spiętrzeń. Badania potwierdziły, że głównym parametrem spiętrzenia odpowiedzialnym za wielkość erozji wydym (cofania nadbrzeżnego łądu) jest poziom wody wyrażony jako maksymalna wysokość napływu wody na brzeg oraz wyjściowa wysokość plaż. Sekwencja następujących po sobie spiętrzeń sztormowych zwiększa skalę erozji, co wynika ze stopniowego obniżania plaż, po każdym z nich.

Z powodu mniejszych spiętrzeń sztormowych, gdy napływ wody jest wyższy niż plaża również obserwuje się erozję. Wielkość erozji wydym zależy od wysokości plaży, od poziomu morza i napływu wody

na brzeg przy falowaniu do brzegu, generowanym przez wiatr o dużej prędkości. Największa erozja wydym nadmorskich powstaje w okresie, gdy duży sztorm poprzedzają mniejsze, które powodują obniżenie plaż. To z kolei powoduje, że podczas dużego sztormu erozja wydym jest większa.

Obserwowane skutki spiętrzenia sztormowego Zeetje ze stycznia 2019 r. z poziomem morza 1–1,37 ponad poziom średni, to kolejne potwierdzenie, że powtarzające się co 2–3 lata duże sztormy powodują postępującą erozję nadbrzeży, której nie jest w stanie równoważyć okresowa stabilizacja brzegu. Tylko duże spiętrzenia z poziomem morza HSL  $> 1,2$  m ponad poziom średni skutkują erozją na większości polskiego wybrzeża, zwłaszcza przy zmianie kierunku wiatru i falowania od kierunku W przez NW do NE.

## Literatura

- Andersson H.C., 2002. Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic sea level. *Tellus A, Dynamic Meteorology and Oceanography* 54(1): 76–88. DOI: [10.3402/tellusa.v54i1.12125](https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12125).
- Basiński T., 1995. Dune erosion during storm surges. *Journal of Coastal Research*. In: K. Rotnicki (ed.), Polish coast past, present and future. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 22: 267–270.
- Bobykina V.P., Stont Z.I., 2015. Winter storm activity in 2011–2012 and its consequences for the Southeastern Baltic coast. *Water Resource* 42: 371–377. DOI: [10.1134/S0097807815030021](https://doi.org/10.1134/S0097807815030021).
- Cieśliński R., Chromiak Ł., 2010. Hydrologiczne i hydrochemiczne efekty sztormu na polskim wybrzeżu i w delcie Wisły w dniach 14–15 października 2009 roku. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.), Woda w badaniach geograficznych. Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce: 81–90.
- Cyberski J., Wróblewski A., 1999. Recent and forecast changes in sea level along the Polish coast during the period 1900–2011. *Quaternary Studies in Poland, Special Issue*: 77–83.
- Dubrawski R., Zawadzka-Kahlau E., 2006. Przyszłość ochrony polskich brzegów morskich. Instytut Morski w Gdańsku, Gdańsk.
- Eberhards G., Lapinskis J., Saltupe B., 2006. Hurricane Erwin 2005 coastal erosion in Latvia. *Baltica* 19: 10–19.
- Formeła K., Marsz A.A., 2011. Zmiennosc liczby dni ze sztormem nad Bałtykiem (1971–2009), *Prace i Studia Geograficzne* 47: 189–19.
- Furmańczyk K.K., Dudzińska-Nowak J., Furmańczyk K.A., Paplińska-Swepel B., Brzezowska N., 2011. Dune erosion as a result

- of the significant storms at the western Polish coast (Dziwnow Spit example). *Journal of Coastal Research, Special Issue* 64: 756–759.
- Girjatowicz J.P., Świątek M., Wolski T., 2016. The influence of atmospheric circulation on the water level on the southern coast of the Baltic Sea. *Journal of Climatology* 36(14): 4534–4547. DOI: [10.1002/joc.4650](https://doi.org/10.1002/joc.4650).
- Gråwe U., Burchard H., 2012. Storm surges in the Western Baltic Sea: The present and a possible future. *Climate Dynamics*, 39(1–2): 165–183. DOI: [10.1007/s00382-011-1185-z](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1185-z).
- IMFUB [Institute of Meteorology of the Free University of Berlin], 2022. Online: [www.met.fu-berlin.de/wetterpate/](http://www.met.fu-berlin.de/wetterpate/) – 30.06.2022.
- IMGW-PIB [Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy], 2019. Online: [www.imgw.pl/](http://www.imgw.pl/) – 29.06.2019.
- Jaagus J., Suursaar Ü., 2013. Long-term storminess and sea level variations on the Estonian coast of the Baltic Sea in relation to large-scale atmospheric circulation. *Estonian Journal of Earth Sciences* 62(2): 73–92. DOI: [10.3176/earth.2013.07](https://doi.org/10.3176/earth.2013.07).
- Jarmalavicius D., Šmatas V., Stankunavicius G., Pupienis D., Žilinskas G., 2016. Factors controlling coastal erosion during storm events. *Journal of Coastal Research* 75: 1112–1116. DOI: [10.2112/SI75-223.1](https://doi.org/10.2112/SI75-223.1).
- Johansson M., Boman H., Kahma K.K., Launiainen J., 2001. Trends in sea level variability in the Baltic Sea. *Boreal Environment Research* 6: 159–179.
- Koltsova T., Belakova J., 2009. Storm surges on the southern coast of Gulf of Riga: Case study of the Lielupe River. *Threats to Global Water Security, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security II*: 91–97.
- Kowalewska-Kalkowska H., 2012. Rola wezbrań sztormowych w kształtowaniu ustroju wodnego układu Dolnej Odry i Zalewu Szczecińskiego. *Rozprawy i Studia T. (CMVIII) 834*, Wydawnictwo Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin
- Kowalewska-Kalkowska H., 2018. Frequency and strength of storm surges in the Oder river mouth area. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus* 17(3): 55–65. DOI: [10.15576/ASPFC/2018.17.3.55](https://doi.org/10.15576/ASPFC/2018.17.3.55).
- Łabuz T. A., 2005. Brzegi wydymowe polskiego wybrzeża Bałtyku. *Czasopismo Geograficzne* 76(1–2): 19–47.
- Łabuz T.A., 2009. The West Pomerania coastal dunes – alert state of their development. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 160(2): 113–122.
- Łabuz T.A., 2013. Polish coastal dunes – affecting factors and morphology. *Landform Analysis* 22: 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): 307–326.
- Łabuz T.A., 2015. Environmental Impacts – Coastal Erosion and Coastline Changes. Chapter 20. In: BACC II Team (eds), *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer: 381–396.
- Łabuz T.A., 2018. Erozja wydym na mierzejach Zatoki Koszalińskiej jako efekt ponadprzeciętnych zdarzeń sztormowych Barbara i Axel z przetomu 2016/2017. *Przegląd Geograficzny* 90(3): 435–477.
- Łabuz T.A., 2021. Erozja wydym pod wpływem spiętrzenia sztormowego Axel z 2017 roku na tle rozwoju polskiego wybrzeża. *Rozprawy i Studia T. (MCCLXIV) 1190*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin.
- Łabuz T.A., 2022. Storm surges versus shore erosion: 21 years (2000–2020) of observations on the Świna Gate Sandbar (southern Baltic coast). *Quaestiones Geographicae* 41(3): 5–31. DOI: [10.2478/quageo-2022-0023](https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0023).
- Łabuz T.A., 2023. Causes and effects of coastal dunes erosion during storm surge Axel in January 2017 on the southern Baltic Polish coast. *Quaestiones Geographicae* 42(3), 67–87. DOI: [10.14746/quageo-2023-0024](https://doi.org/10.14746/quageo-2023-0024).
- 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: 93–101.
- Majewski A., 1998. Katastrofalne sztormy i powódzie u południowych brzegów Morza Bałtyckiego. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 2: 67–69.
- Majewski A., Dziadziuszko Z., Wiśniewska A., 1983. *Monografia powodzi sztormowych 1951–1975*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- 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, Gdańsk, 11–44.
- Nielsen P., Hanslow D., 1991. Wave run-up distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research* 7: 1139–1153.
- Pruszek Z., Zawadzka E., 2005. Vulnerability of Poland's to sea-level rise. *Coastal Engineering* 47(2–3): 131–155.
- Stockton H., Holman R., Howd P., Sallenger A., 2006. Empirical parametrization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering* 53: 573–588.
- Sztobryn M., Stigge H. J., Wielbińska D., Weidig B., Stanisławczyk I., Kańska A., Krzysztofik K., Kowalska B., Letkiewicz B., Mykita M., 2005. Storm surges in the southern Baltic (western and central parts). *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Report* 39, Rostock/Hamburg, 1–73.
- Tarnowska K., 2011. Wiatry silne na polskim wybrzeżu Morza Bałtyckiego. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 197–204.
- Tõnisson H., Orviku K., Jaagus J., Suursaar Ü., Kont A., Rivas 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): 602–614.
- Trzeciak S., 2001. Wiatry sztormowe na polskim wybrzeżu Bałtyku. *Wydawnictwa Wyższej Szkoły Morskiej nr 36*, Szczecin.
- Weisse R., Weidemann H., 2017. Baltic Sea extreme sea levels 1948–2011: Contributions from atmospheric forcing. *Procedia IUTAM* 25: 65–69. DOI: [10.1016/j.piutam.2017.09.010](https://doi.org/10.1016/j.piutam.2017.09.010).
- Wiśniewski B., Wolski T., 2009. Katalogi wezbrań i obniżenia sztormowych poziomów morza oraz ekstremalne poziomy wód na polskim wybrzeżu. *Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie*.
- Wolski T., 2017. Czasowa i przestrzenna charakterystyka ekstremalnych poziomów wód Morza Bałtyckiego. *Rozprawy i Studia T. (MXXVI) 952*, Uniwersytet Szczeciński.
- Wolski T., Wisniewski B., 2020. Geographical diversity in the occurrence of extreme sea levels on the coasts of the Baltic Sea. *Journal of Sea Research* 159: 101890. DOI: [10.1016/j.seares.2020.101890](https://doi.org/10.1016/j.seares.2020.101890).
- 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): 259–290. DOI: [10.5697/oc.56-2.259](https://doi.org/10.5697/oc.56-2.259).
- Wróblewski A., 1992. Analysis and long-term sea level forecast at the Polish Baltic Sea coast. Part I. *Annual sea level maxima*. *Oceanologia* 53: 65–85.
- Zawadzka-Kahlau E., 1999. Tendencje rozwojowe polskich brzegów Bałtyku Południowego. *Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk*.
- Zawadzka-Kahlau E., 2008. Morfologiczne efekty oddziaływania czynników hydrometeorologicznych na Mierzei Karwieńskiej. *Landform Analysis* 8: 88–93.
- Zawadzka-Kahlau E., 2012. Morfodynamika brzegów wydymowych 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. In: K. Rotnicki (ed.), *Polish coast past, present and future*. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 22: 33–54.