

## Wpływ dynamiki falowania na zmiany w strefie plaży zewnętrznej, na przykładzie wybrzeża Bałtyku między Mrzeżynem i Dźwirzynem

Leszek Kurowski\*

**Influence of waving dynamics on the foreshore transformation — example from the Baltic coast between Mrzeżyno and Dźwirzyno (northern Poland).** *Prz. Geol.*, 50: 1115–1120.

*Summary.* Changes of wave dynamics along the Baltic shore have a great influence on its shape and ongoing processes of erosion and sedimentation. It must be however noted that the morphology of a shore and foreshore bottom, due to its character, also affects wave action in this part of the sea. Author's purpose is to trace the cause-and-effect logic of the waves' activity within the foreshore between Mrzeżyno and Dźwirzyno. It is not straightforward as the sea follows its own rhythm, which depends on various factors. Long-term stability of the sea rhythm can be hardly expected over more or less limited time of observation. Thus the discussion and conclusions presented in the work concern only specific conditions, i.e., the changes of the sea state ranging from 0–1 to 2–3 in the Beaufort wind scale.

When the sea is calm (0–1 in the Beaufort wind scale) the foreshore forms 2.5–3.0 meter wide zone sloping seawards at an angle of 10–12 degrees. The surface of the sea looks flat. Small waves with the height from 0.15 to 0.25 m are visible only in the shallowest part of the foreshore and break at the edge of the beach face. Under such conditions the foreshore abounds in small, undurable erosional and sedimentological forms, which have been described in details by Rudowski (1962) (compare also Kurowski, 2002).

At 1–2 of the Beaufort wind scale wave height reaches 0.5–0.6 m in the surf zone. This results in the broadening of the beach face to 3.0–4.0 m and the decrease of its inclination to 8–10°. Such conditions favour the formation of beach cusps, morphologic steps and erosional cavities. Micro-scale sand falls are often observed. Longer stability periods of the conditions lead to further increase of the beach face width (up to 4.0–6.0 m) and the drop of its slope angle (down to 6–8°). Gravel bars and often algal swash marks are formed along the swash zone maximum range. Beach lagoons linked with the system of flow channels are drained by return channels. Microdeltas occur within the lagoons.

Increase of the sea dynamics (to 2–3 in the Beaufort wind scale) results in the wave height exceeding 1.0 m. in the investigated part of the shore. The width of the foreshore reaches 8.0–10.0 m and its inclination decreases to 2–4°. Beach lagoons disappear replaced by channels, through which water and debris are transported under the conditions of upper flow regime in typical riverbeds. Further increase (>3 in the Beaufort wind scale) and a subsequent drop of the sea dynamics enables the formation of sandy shore terraces. Sedimentary forms and structures presented in the work are characteristic for sea shore environments and may have diagnostic importance in sedimentological studies of both present and fossil forms.

**Key words:** Baltic, foreshore, swash zone, morphologic step, erosional cavity, micro-scale sand fall, beach cusp, gravel bar, algal swash mark, beach lagoon, flow channel, return channel, microdelta, sandy shore terrace

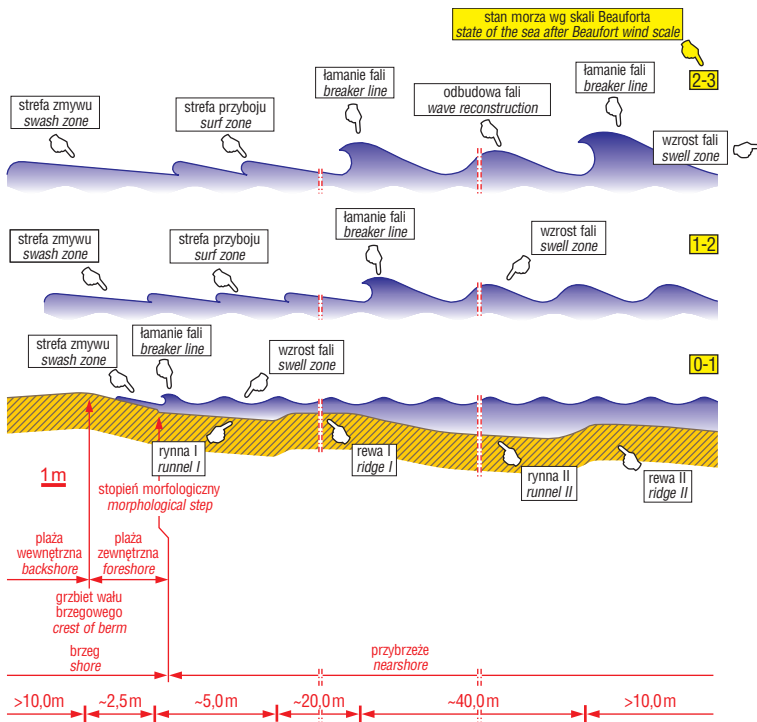
Prezentowana praca stanowi kolejną z serii poświęconej środowisku plażowemu południowego wybrzeża Morza Bałtyckiego. Podobnie jak poprzednie z tego tematu (por. Kurowski, 2000, 2002), nawiązuje ona do opracowań Rudowskiego (1962, 1970) i jest w pewnym stopniu ich kontynuacją. O ile jednak we wcześniejszych publikacjach autor zajmował się formami eolicznymi w utworach plażowych (Kurowski, 2000) oraz formami osadu w strefie zmywu i najpłytszego przybrzeża (Kurowski, 2002), to wiodącym tematem tego artykułu jest wpływ wzrostu dynamiki falowania na zasięg i zmiany w morfologii zewnętrznej części plaży. Podobnie jak w pracach poprzednich obserwacje i rozważania zostały ograniczone do niewielkiego, 7-kilometrowego, odcinka wybrzeża między Mrzeżynem na zachodzie i Dźwirzynem na wschodzie (por. Kurowski, 2000, ryc. 1). Okres prowadzenia obserwacji terenowych (druga połowa lipca 1999) we wszystkich pracach jest również podobny. W związku z tym zagadnienia wstępne, dotyczące lokalizacji oraz warunków naturalnych panujących w obszarze badań pozostają także bez zmian. W okresie tym, jak sygnalizowano to już wielokrotnie (por. Kurowski, 2000, 2002), stan morza według skali Beauforta zmieniał się od 0–1 do 2–3, co oznacza że fale na Bałtyku przy długości do 50,00 m mogły osiągać nawet 2,00 m wysokości (tab. 1). W strefie brzegowej zmiany dynamiki falowania mają wielkie znaczenie w jej ukształtowaniu oraz zachodzących procesach erozji i sedymentacji. Nale-

ży jednak pamiętać, że także ukształtowanie brzegu i dna przybrzeża, głównie ze względu na jego reflowy charakter (por. ryc. 1), wpływa w sposób istotny na proces falowania w tej części zbiornika morskiego.

Celem tej pracy jest próba systematycznej charakterystyki środowiska plaży zewnętrznej w zależności od siły i wielkości falowania. Autor podejmuje próbę polegającą na utworzeniu logicznego ciągu przyczyn i skutków działania fal w strefie brzegu. Jest to dość trudne z tego względu, że morze „żyje” własnym rytmem uzależnionym od szeregu różnych czynników i trudno oczekiwać jest długotrwałej stabilizacji, w zawsze mniej lub bardziej ograniczonym czasie prowadzenia obserwacji. Rozważania i wnioski prezentowane poniżej, siłą rzeczy, są ograniczone więc do konkretnych warunków, tzn. zmian stanu morza od 0–1 do 2–3 wg Beauforta (tab. 1).

W warunkach spokojnego morza (0–1 w skali Beauforta) zewnętrzna część plaży, obejmująca hydrodynamiczną strefę zmywu ma niewielką szerokość (2,5–3,0 m) i nachylenia jest pod kątem 10–12° w kierunku morza (ryc. 4A). Od strony lądu granicę jej wyznacza linia grzbietowa wału brzegowego (granica między plażą zewnętrzną i wewnętrzną), natomiast od strony morza krawędź stopnia morfologicznego (Kurowski, 2002) utworzonego w strefie mieszania wód zmywu powrotnego i nacierającego na brzeg grzywacza (granica między plażą zewnętrzną a przybrzeżem). W takich warunkach (0–1 w skali Beauforta) energia falujących wód jest bardzo niska. Powierzchnia morza stanowi praktycznie taflę lustrzaną. Jedyne w strefie najpłytszego przybrzeża występują małe fale, które

\*Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; lkur@ing.uni.wroc.pl.



**Ryc. 1.** Wpływ morfologii dna przybrzeża na proces falowania w strefie brzegowej Bałtyku. Pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 1.** Influence of the morphology of the nearshore bottom on waving process in the shore zone of the Baltic Sea; further explanations in the text

załamują się bezpośrednio na krawędzi czoła plaży. Tworzy się niewielki, o wysokości 0,15–0,25 m, grzywacz a na powierzchnię tej strefy wkracza warstwa wody zmywu wstępującego, która częściowo wsiąka w piasek a częściowo powraca do zbiornika jako zmyw powrotny. Zdolność erozyjno-transportowa wód strefy zmywu powoduje, że stok plaży jest miejscem występowania szeregu drobnych, nietrwałych form nagromadzenia osadu, które w polskiej literaturze szczegółowo opisał Rudowski (1962) (por. także Kurowski, 2002).

Sytuacja na omawianym obszarze zaczyna zmieniać się radykalnie w warunkach wzrostu dynamiki falowania. Przy stanie morza 1–2 wysokość fal w strefie przybrzeża wzrasta do 0,5–0,6 m. Łamanie fali zachodzi około 20–30 m od brzegu, na pierwszej rewie (ryc. 1). Dalej w kierunku łądu rozwija się strefa przyboju o 8–10 m szerokości. Przybój wypycha na stok plaży, charakteryzującą się zdecydo-

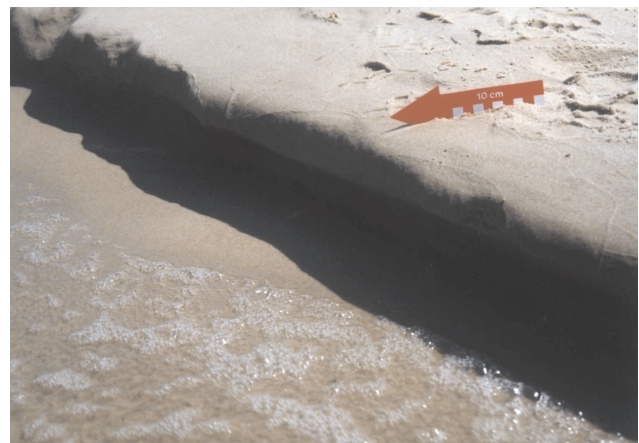


**Ryc. 2.** Sierpy plażowe w strefie plaży zewnętrznej  
**Fig. 2.** Beach cusps in the foreshore

wanie wyższą energią, warstwę wody strefy zmywu. Następstwem takiego stanu jest wzrost szerokości do 3–4 m i spadek kąta nachylenia czoła plaży do 8–10° (ryc. 4B). Konsekwencją zmiany warunków jest także intensywne przebudowanie tej części brzegu, która w terenie może przejawiać się w różny sposób. W przypadku gdy wody zmywu wstępującego rozlewają się na stoku plaży w formie wachlarzowo rozwiniętej warstwy ich działalność erozyjno-akumulacyjna prowadzi do utworzenia sierpów plażowych. Na odcinku wybrzeża między Dźwirzynem i Mrzeżynem występują tylko sierpy piaszczyste — paraboliczne, otwarte w kierunku morza formy, w których długość promienia wynosi przeciętnie 1,5 do 2,5 m (ryc. 2).

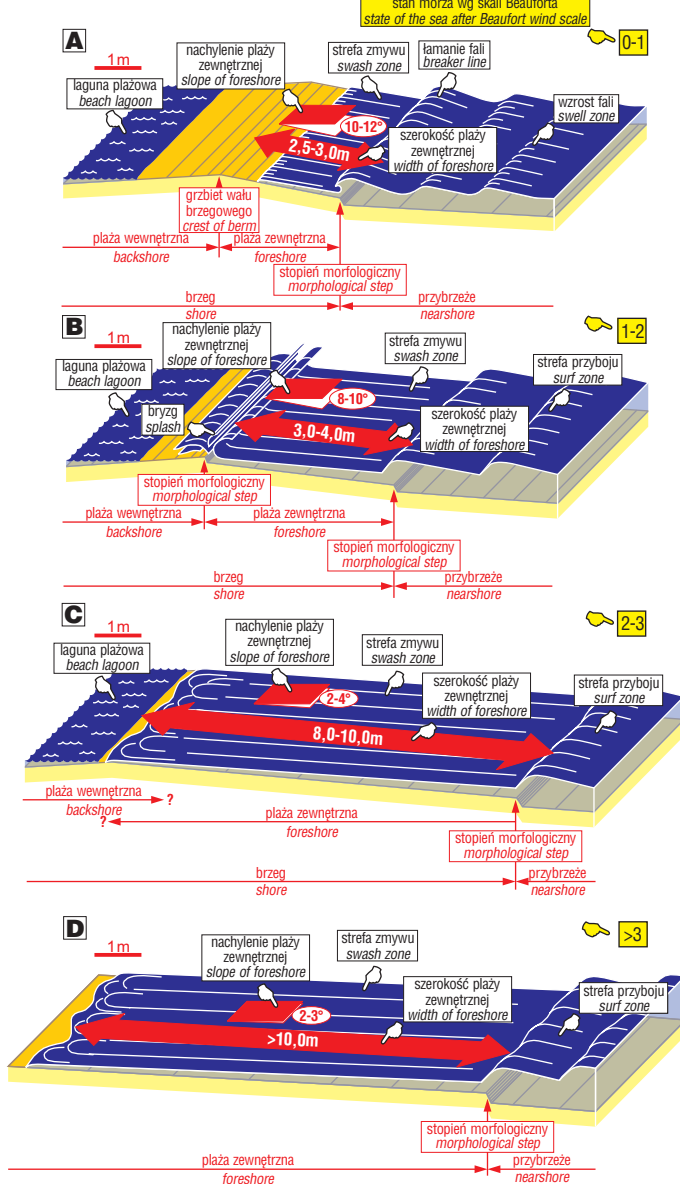
W podobnych warunkach energetycznych, na niektórych odcinkach brzegu dochodzi do podmywania wyższej części czoła plaży i powstania wyraźnego stopnia morfologicznego, któremu towarzyszy przeważnie niewielka nisza erozyjna (ryc. 3). Wysokość progu, w obserwowanych przypadkach, zmienia się w przedziale od kilkunastu do ponad trzydziestu centymetrów. Rozmiary rozwijającej się u podstawy progu niszy, na skutek oddziaływania zmywu wstępującego ulegają ciągłym zmianom, jednak nie przekraczają z reguły kilku-, kilkunastu centymetrów głębokości. Na skutek zachwiania równowagi podcinanego w ten sposób progu często dochodzi do mikroobrywów materiału piaszczystego (ryc. 5, ryc. 5–16 na III i IV str. okładki). Oberwany materiał bardzo szybko ulega jednak rozmyciu. Aktywności wód zmywu wstępującego w opisanych powyżej okolicznościach często towarzyszy efekt bryzgu (ryc. 4B)

Dalszą konsekwencją takiego przemodelowania tego fragmentu plaży jest częściowe rozmywanie wału brzegowego. Wiąże się to z jeszcze większym spadkiem kąta nachylenia czoła plaży do 6–8° oraz ze wzrostem jego szerokości, miejscami do 4–6 m. Przy stanie 1–2 morze wyrzuca zdecydowanie więcej materiału frakcji grubszej niż piaszczysta. Na granicy zasięgu zmywu wstępującego dochodzi zatem do wzbogacenia osadu w drobne otoczaki,

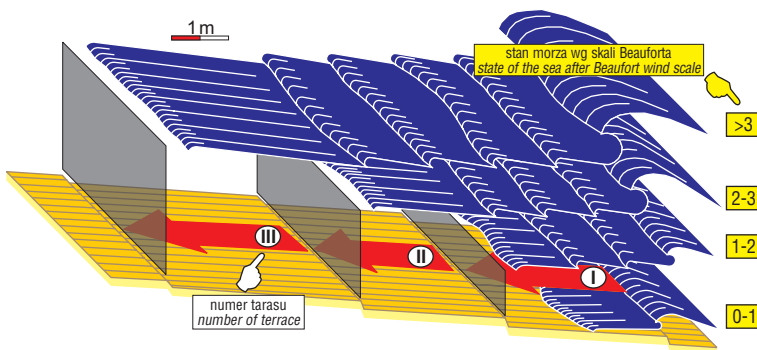


**Ryc. 3.** Rozwój progu morfologicznego i niszy erozyjnej na granicy zasięgu strefy zmywu. Strzałka wskazuje kierunek północny  
**Fig. 3.** Morphological step and erosion cavity at the maximum range of the swash zone; arrow points northward

klasty torfowe, fragmenty drewna, całe bądź pokruszone muszle mięczaków. Utwory te tworzą niewielkie nasypy o szerokości 20 do 40 cm, zorientowane równoległe do linii



**Ryc. 4.** Zależność szerokości i nachylenia plaży zewnętrznej od intensywności falowania. Pozostałe objaśnienia w tekście  
**Fig. 4.** Dependence of the foreshore width and slope on the state of the sea; further explanations in the text



**Ryc. 17.** Schemat ilustrujący rozwój piaszczystych tarasów brzegowych w zależności od stanu morza. Pozostałe objaśnienia w tekście  
**Fig. 17.** Schematic sketch of the development of sandy shore terraces in relation to the state of the sea; further explanations in the text

brzegu (ryc. 6). W miejscach gdzie morze wyrzuca duże ilości glonów (głównie trawy morskiej) może dojść do uformowania specyficznych „wałków glonowych” (por. Rudowski, 1962). Długie „liście”, głównie trawy morskiej, w warunkach podwyższonej dynamiki środowiska ulegają splątaniu, co umożliwia utworzenie wspomnianej wyżej formy (ryc. 7). Przez częściowo rozmyty wał brzegowy przy stanie morza 1–2 bardzo często przelewają się kolejne zmywy wstępujące (ryc. 8). Na zboczu wału brzegowego, nachylonym w kierunku plaży wewnętrznej, pochylonym pod niewielkim kątem ( $2-3^\circ$ ) w stronę lądu, tworzy się szereg drobnych, nietrwałych struktur, podobnych do znanych ze strefy zmywu, głównie różnego typu śladów opływania (ryc. 9, 10). Intensywne zasilanie w wodę tej części brzegu powoduje także utworzenie lagun plażowych. Powierzchnia największych, okresowo wzrasta do ponad  $100 \text{ m}^2$ , a głębokość waha się od 10–20 cm do 0,5 m. Po ich zaniknięciu na dnie można obserwować kilkumilimetrowej miąższości warstewki osadu frakcji pyłowo-ilastej, a także duże ilości głównie roślinnej substancji organicznej (ryc. 10). Szybkie zasypywanie lagun plażowych stwarza dobre warunki do zachowania tych form w stanie kopalnym. Przepływ wody między lagunami odbywa się systemem kanałów nazwanych w tej pracy kanałami przepływowymi. Kanały przepływowe to stosunkowo niewielkie formy erozyjne, o głęb. do 10–15 cm, szerokości 60–80 cm i maksymalnej długości nie przekraczającej 10–12 m, zorientowane równoległe do brzegu. Dno kanałów przepływowych pokryte jest przeważnie riplemarkami typu językowego, których wysokość wynosi 1,5 do 2,5 cm, a rozstęp 12–15 cm. Geometria riplemarków, wskazuje generalnie na wschodni bądź zachodni zwrot kierunku przepływu i transport materiału piaszczystego (ryc. 11). Podobne riplemarki, spotykane są miejscami, także na dnie samych lagun. W strefie ujściowej kanałów do zbiorników lagun często rozwijają się mikrodelt. Są to formy o stosunkowo dużej powierzchni, nawet do kilku metrów kwadratowych, natomiast ich miąższość jest niewielka i z reguły nie przekracza 6–8 cm. Nasypy te charakteryzują się wachlarzowym kształtem i przeważnie płaską powierzchnią stropową. Często ich zarys od strony laguny podkreślony jest podwyższoną koncentracją organoklastów, głównie fragmentów muszli mięczaków (ryc. 12). W innych przypadkach na powierzchni nasypów rozwijają się małe, asymetryczne riplemarki o prostych lub lekko krętych grzbietach, których wysokość nie przekracza 0,5–1,0 cm, a rozstęp 6–8 cm. W każdym takim przypadku ich geometria wskazuje na transport do laguny. Czasami na powierzchni nasypów widoczne są ślady wtórnego rozmywania (ryc. 13), oraz kolejne etapy narastania mikrodelt (por. ryc. 12 i 13). Odpływ wody z systemu efemerycznych lagun do morza umożliwiają kanały nazwane w tej pracy kanałami powrotnymi. Ich parametry, głównie szerokość i głębokość, są podobne jak w kanałach przepływowych. Długość natomiast jest nieco mniejsza i w obserwowanych przy-

**Tab. 1. Stan powierzchni morza w zależności od prędkości wiatru — skala Beauforta (na podstawie Demela, 1974), nieco uproszczona**

Table 1. Sea stand in relation to the wind velocity — Beaufort wind scale (after Demel, 1974), simplified

Stan morza wg skali Beauforta	Prędkość wiatru [m/s]	Oznaczenie	Długość fal w [m]	Wysokość fal w [m]
0	0–0,5	cisza	–	–
1	0,6–1,7	powiew	do 5	0–0,25
2	1,8–3,3	słaby wiatr	do 15	0,25–1,0
	3,4–5,2	łagodny wiatr	do 25	
3	5,3–7,4	umiarkowany wiatr	do 50	0,4–2,0
4	7,5–9,8	dość silny wiatr	do 75	2–4
5	9,9–12,4	silny wiatr	do 100	3–6
6	12,5–15,2	bardzo silny wiatr	do 135	5–7
7	15,3–18,2	gwałtowny wiatr	150–200	7–10
	18,3–21,5	wiatr sztormowy		
8	21,6–25,1	sztorm	do 250	ponad 10
9	25,2–29,0	silny sztorm	do 300	
	29,1 i więcej	huragan	ponad 300	do 15

padkach nie przekracza 5 do 8 m. Kanały te mają łukowaty przebieg od laguny w kierunku zbiornika morskiego. Charakteryzują się one ponadto wyraźną asymetrią brzegów. Brzeg zewnętrzny kanału (wkłęsły) jest mocno erozyjnie wcięty (ryc. 14), wewnętrzny (wypukły) natomiast łagodny, nawiązujący do powierzchni terenu. Nie obserwowano żadnych przejawów akumulacji osadu u wylotu kanałów powrotnych. Spowodowane to jest wysoką aktywnością wód w strefie zmywu i prawie natychmiastowym przeniesieniem materiału okrucowego ze strefy przyujściowej kanału w głębsze obszary przybrzeża.

Przy dalszym wzroście dynamiki morza (2 do 3 wg Beauforta), wysokość fal na opisywanym odcinku wybrzeża przekracza 1 m. W związku z rewowym charakterem tej części przybrzeża (występowanie płycizn i przegłębień) fala po raz pierwszy łamie się około 60–80 m od brzegu (przy drugiej rewii), po czym ulega odtworzeniu i łamie się powtórnie przy pierwszej rewii (ok. 30–40 m od brzegu). Następnie rozwija się ok. 20-metrowej szerokości strefa przyboju, przechodząca ku brzegowi w kilkumetrowej (8–10 m) szerokości strefę zmywu (ryc. 1). W takich warunkach w dalszym ciągu rozmywany jest wał brzegowy. W konsekwencji dalej wzrasta szerokość plaży zewnętrznej (do 8–10 m) i spada kąt nachylenia (ryc. 4C) jej powierzchni (do 2–4°). Zaplecze mocno zredukowanego wału brzegowego intensywnie zasilane jest wodami zmywu wstępującego. W miejsce systemu efemerycznych lagun rozwijają się kanały o szerokości 1,5–2,0 m i głębokości 10–20 cm. Całym czynnym przekrojem takich kanałów odbywa się intensywny transport wody i materiału okrucowego, odpowiadający warunkom górnego reżimu przepływu w typowych korytach rzecznych. Długość takich odcinków „rzek” na omawianym fragmen-

cie wybrzeża nie przekracza kilkudziesięciu metrów (ryc. 15).

Na niektórych odcinkach plaży omawianej części wybrzeża można obserwować budowę tarasową. Zaznacza się ona przeważnie bardzo słabo (ryc. 16). Najczęściej jest to zespół dwóch–trzech niewyraźnych stopni o wysokości 10–15 cm i szerokości nie przekraczającej przeważnie 3–4 m. Powierzchnia tarasów pod niewielkim kątem (2–3°) pochylona jest w kierunku morza. Budowa tarasowa jest związana prawdopodobnie ze zmianą dynamiki falujących wód zbiornika, a konkretnie ze spadkiem siły falowania. W okresie, w którym były prowadzone obserwacje, stan morza nie przekraczał wartości 2–3 wg Beauforta. Nie jest powiedziane, że wcześniej wartości te nie mogły być wyższe. Wzrost siły falowania prowadził do poszerzenia plaży zewnętrznej (ryc. 4D) do kilku, kilkunastu metrów oraz wyrównania i przemodelowania jej powierzchni (pochylenie pod kątem 2–3° w kierunku morza). W warunkach stagnacji dynamiki falowania (uspokajania powierzchni morza) zasięg strefy zmywu zmniejszał się, co sprzyjało utworzeniu trzeciego (najwyższego) tarasu, a następnie kolejnych do stanu morza 0–1 (ryc. 17).

Plaża zewnętrzna stanowi część brzegu narażoną w największym stopniu na działanie czynników erozji i akumulacji morskiej, w przypadku Bałtyku głównie falowania. Już niewielki wzrost dynamiki tego zjawiska w istotny sposób wpływa na zmiany w obrębie czoła plaży, związane głównie z poszerzeniem i spadkiem kąta nachylenia jego powierzchni. Jednocześnie w strefie tej w określonych warunkach może tworzyć się szereg różnych struktur i form nagromadzenia osadu. Przedstawione w pracy formy nagromadzenia osadu i struktury są bardzo charakterystyczne dla środowisk wybrzeży morskich i mogą mieć znaczenie diagnostyczne w szeroko pojętych badaniach sedimentologicznych zarówno utworów kopalnych, jak i współczesnych.

Przedstawione wyniki badań finansowane były z projektu 2022/W/ING/02-18.

## Literatura

- DEMEL K. 1974 — Życie morza. Wyd. Morskie. Gdańsk.  
 KUROWSKI L. 2000 — Formy eoliczne w utworach plażowych na przykładzie wybrzeża Bałtyku między Mrzeżynem a Dźwirzynem. *Prz. Geol.*, 48: 917–923.  
 KUROWSKI L. 2002 — Formy osadu w strefie zmywu i najpłytszego przybrzeża na przykładzie wybrzeża Bałtyku między Mrzeżynem i Dźwirzynem. *Prz. Geol.*, 50: 458–464.  
 RUDOWSKI S. 1962 — Mikroformy strefy brzegowej Bałtyku w Polsce. *Acta Geol. Pol.*, 12: 541–572.  
 RUDOWSKI S. 1970 — Zmarszczki w strefie przybrzeża południowego Bałtyku. *Acta Geol. Pol.*, 20: 451–483.

## Wpływ dynamiki falowania na zmiany w strefie plaży zewnętrznej, na przykładzie wybrzeża Bałtyku między Mrzeżynem i Dźwirzynem ( patrz str. 1115)



**Ryc. 5.** Mikroobryw materialu piaszczystego na granicy zasięgu strefy zmywu. Strzałka wskazuje kierunek północny  
**Fig. 5.** Micro-scale sand fall at the maximum range of the swash zone. Arrow points northward



**Ryc. 8.** Początkowy etap rozwoju systemu lagun plażowych; pozostałe objaśnienia w tekście.  
**Fig. 8.** Initial stage of the development of beach lagoons in the shore zone; further explanations in the text



**Ryc. 6.** Nagromadzenie żwiru i organoklastów na granicy zasięgu strefy zmywu. Strzałka wskazuje kierunek wschodni  
**Fig. 6.** Concentration of gravel and organoclasts at the maximum range of the swash zone. Arrow points eastward



**Ryc. 9.** Ślad opływania utworzony przez glony na zapleczu wału brzegowego. Strzałka wskazuje kierunek południowy  
**Fig. 9.** Crescent mark formed by algae on the backside of a berm. Arrow points southward



**Ryc. 7.** Wałki glonowe w strefie zmywu. Strzałka wskazuje kierunek zachodni  
**Fig. 7.** Algal swash mark in the swash zone. Arrow points westward



**Ryc. 10.** Dno laguny plażowej. Strzałka wskazuje kierunek południowy  
**Fig. 10.** Dry bottom of a beach lagoon. Arrow points southward

## Wpływ dynamiki falowania na zmiany w strefie plaży zewnętrznej, na przykładzie wybrzeża Bałtyku między Mrzeżynem i Dźwirzynem (patrz str. 1115)



**Ryc. 11.** Dno kanału przepływowego pokryte riplemarkami typu językowego. Strzałka wskazuje kierunek zachodni; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 11.** Bottom of a flow channel with lingnoidal type ripples; arrow points westward; further explanations in the text



**Ryc. 14.** Erozyjnie wcięty brzeg kanału powrotnego. Strzałka wskazuje kierunek północny; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 14.** Erosional bank of a return channel; arrow points northward; further explanations in the text



**Ryc. 12.** Nasyp mikrodeltowy w obrębie laguny plażowej. Strzałka wskazuje kierunek wschodni; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 12.** Microdelta in a beach lagoon; further explanations in the text; arrow points eastward; further explanations in the text



**Ryc. 13.** Nasyp mikrodeltowy w obrębie laguny plażowej. Strzałka wskazuje kierunek wschodni; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 13.** Microdelta in a beach lagoon; arrow points eastward; further explanations in the text



**Ryc. 15.** Intensywny przepływ wody na zapleczu wału brzegowego w warunkach wzrostu dynamiki falowania; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 15.** Intensive water flow behind a berm at increasing waving; further explanations in the text



**Ryc. 16.** Piaszczysty taras brzegowy; pozostałe objaśnienia w tekście

**Fig. 16.** Sandy shore terrace; further explanations in the text