

Wpływ zmiennego klimatu falowego na różnookresową zmienność nadwodnej części brzegu (plaży)

Mgr Natalia Chrzastowska, prof. dr hab. inż. Zbigniew Pruszk
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Brzeg morski południowego Bałtyku w większości jest brzegiem piaszczystym charakteryzującym się tym, że od strony morza występują rewy, a od strony lądu system wydmy. Polski odcinek brzegu morskiego to prawie w całości brzeg piaszczysty, gdzie na podwodnym jego skłonie występuje nawet kilka rew, a nadwodną część tworzy plaża oraz naturalna wydma o różnych rozmiarach. Na znacznych odcinkach brzeg ten podlega procesom erozyjnym i jest w różny sposób chroniony.

Zakres i tempo zmian brzegu naturalnego zależy od wielu czynników. Główne naturalne czynniki to lokalne zasoby osadów tworzących brzeg, kierunki, wielkości i zaburzenia ruchu osadów oraz intensywność oddziaływania na brzeg pól falowo-prądowych. W tym kontekście każda analiza stabilności brzegu oraz jego wrażliwości na erozję związana jest z oceną aktualnej objętości osadów tworzących dany brzeg oraz fizycznych oddziaływań zewnętrznych destabilizujących jego stan. Analizę zmienności w czasie objętości osadów tworzących brzeg przy użyciu różnych przybliżeń, bez powiązania ich jednak z wymuszeniami zewnętrznymi rodzaju falowo-prądowych, przedstawiono w pracy [11]. Jednym z wyników przedstawionych tam, na podstawie danych pochodzących z pomiarów dokonanych systemem JARKUS w różnych miejscach brzegu holenderskiego, jest pokazanie dużej zmienności objętości osadów brzegowych w cyklu rocznym, z niewielkimi trendami długookresowymi.

Generalnie, w uproszczeniu, brzeg morski podzielić można na część podwodną oraz nadwodną. Najistotniejszą podwodną częścią brzegu - z punktu widzenia procesów brzegowych - jest strefa płytkowodna obejmująca rewy, jeśli istnieją, która rozciąga się od tzw. głębokości zamknięcia profilu poprzecznego (strona odmorska) do linii brzegowej od strony lądu. Morfodynamicznie obejmuje ona aktywną część podwodnego obszaru brzegowego.

Podstawowe elementy nadwodnej części brzegu to plaża oraz wydmy wraz z całą różnorodnością występujących tam form morfologicznych o różnej skali i trwałości. Analizy zmienności samej linii brzegowej były i są w dalszym ciągu tematem wielu prac. W zależności od celu analizy przykładowo można

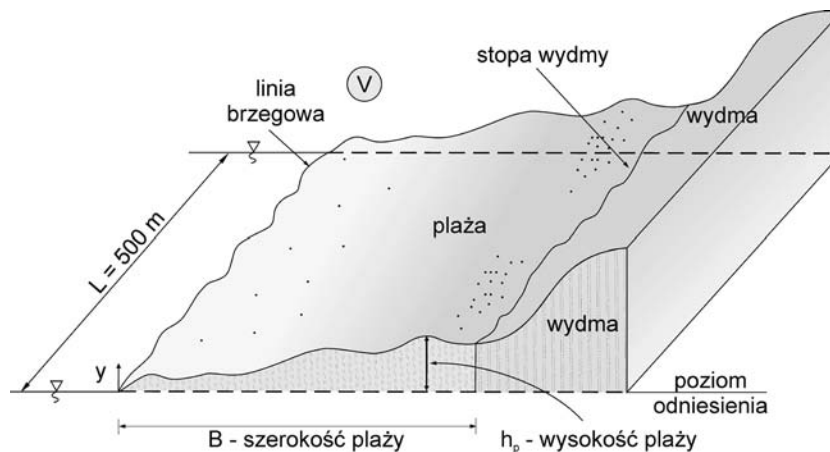
wymienić tutaj prace [5, 6, 4], w których analizowano zmienności linii brzegowej rozumianej jako globalna linia rozdziału morze – ląd, bądź też prace [1, 2, 8], w których z kolei skupiano się na szczegółowych badaniach różnych form morfologicznych rodzaju rytmicznych zafalowań i festonów tworzących w całej złożoności linię brzegową.

Analizy skupiające się na różnych aspektach zmienności wydmy jako odlądowej nadwodnej części brzegu są także tematem wielu badań czy teoretycznego modelowania. Przykładowo można wymienić tutaj prace [3, 7, 12, 13].

W niniejszej pracy skupiono się na analizie nadwodnej części brzegu, która obejmuje obszar w tym przypadku samej plaży i rozciąga się pomiędzy linią brzegową, rozumianą jako geometryczna linia rozdziału woda – ląd, a stopą wydmy. Jest to morfologicznie kluczowy, najbardziej dynamiczny obszar nadwodnej części brzegu. Odmorską granicę tego obszaru, charakteryzowaną przez średnie położenie linii brzegowej, przyjęto jako linię obejmującą również różne jej zafalowania i nieregularności, natomiast za odlądową granicę przyjęto stopę głównej wydmy, także z uwzględnieniem jej nieregularności.

Przyjętą do analizy nadwodną część brzegu charakteryzuje objętość osadów plażowych V opisana trzema geometrycznymi wymiarami. W płaszczyźnie poziomej, oprócz podanej wielkości w kierunku poprzecznym do brzegu (parametr B), drugim parametrem jest wymiar wzdłużbrzegowy L , którym jest prostoliniowy odcinek brzegu równy 500 m. Trzecim wymiarem jest pionowy odcinek h_p zawarty pomiędzy poziomem referencyjnym każdorazowo odnoszonym do średniego bądź chwilowego poziomu morza a lokalną rzędną plaży (rys 1).

Przyjmując fakt, że ciągłe dostosowywanie się brzegu morskiego do stanu równowagi jest funkcją zmiennych zewnętrznych sił pochodzenia falowego, w ramach podstawowego celu pracy, podjęto próbę empirycznej analizy i opisu, w różnych skalach czasowych, zmienności nadwodnej części brzegu w funkcji dostarczanej do brzegu energii pochodzenia falowego. Analizę przeprowadzono przyjmując skale przestrzenne rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset metrów, a czasowe zmieniające się od kilku tygodni do kilkunastu lat.

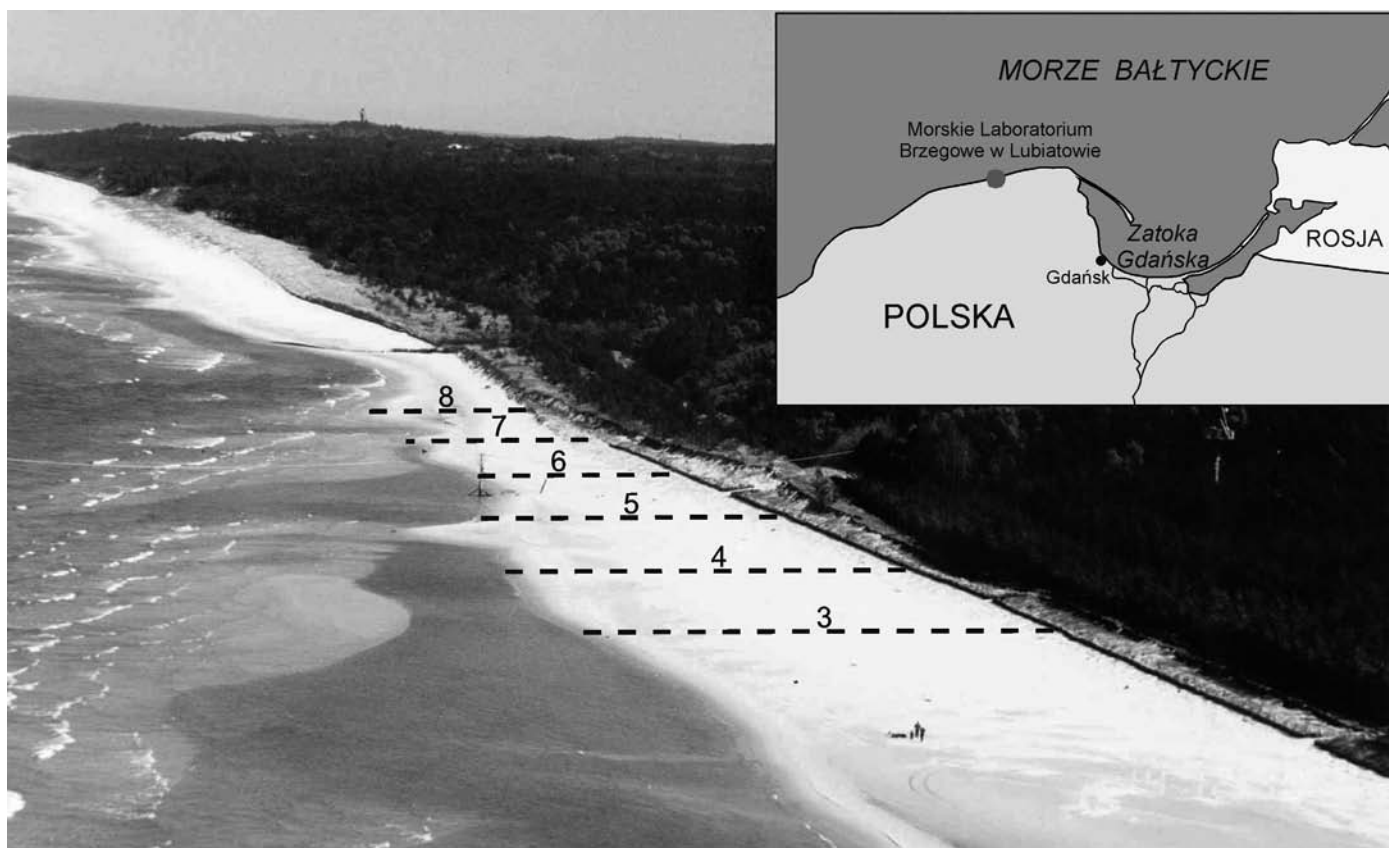


Rys. 1. Schemat brzegu z przyjętymi geometrycznymi parametrami jego opisu

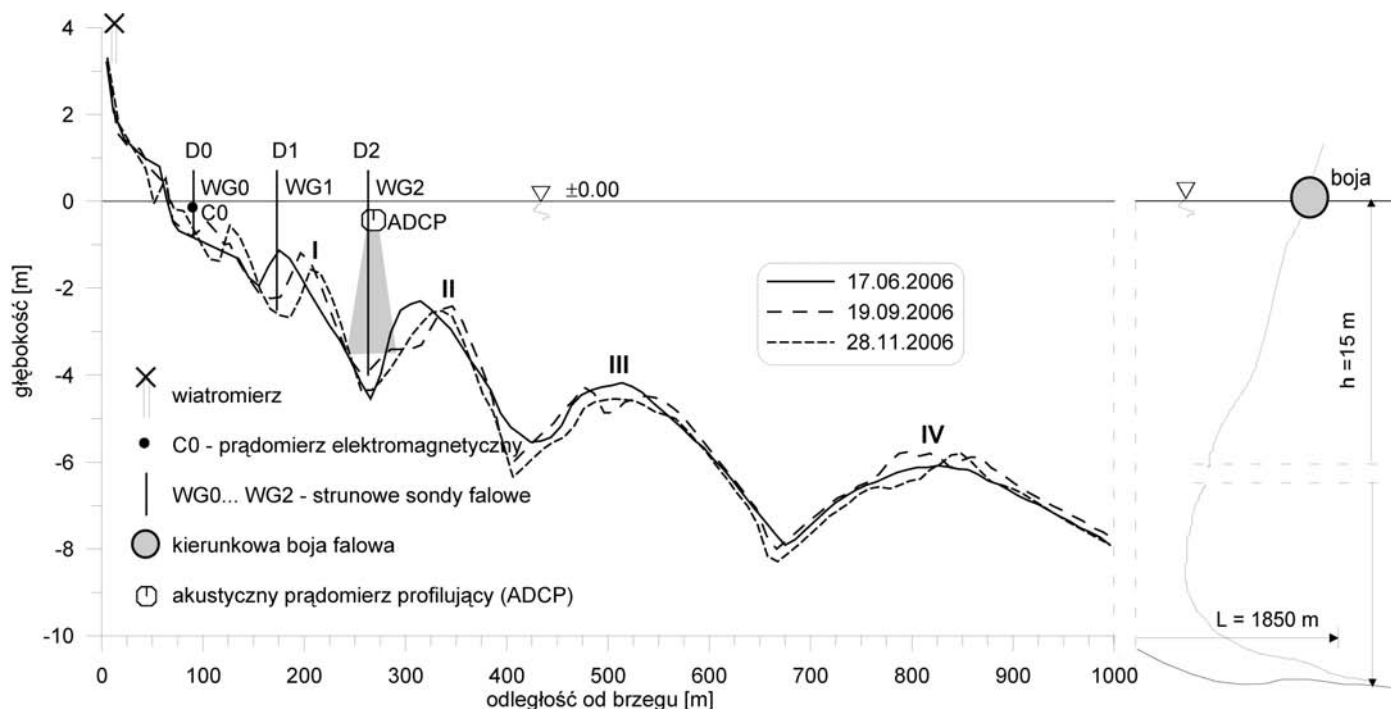
WARUNKI, OBSZAR I ZAKRES BADAŃ

Do analizy wykorzystano wyniki badań, które prowadzone były w rejonie Morskiego Laboratorium Brzegowego w Lubiawie w okresie 1998-2012, gdzie geometryczne wymiary brzegu (plaży) przestrzennie wykazują dużą zmienność (rys. 2). Z okresu tego wybrano przedziały czasowe, kiedy równocześnie z regularnymi długookresowymi pomiarami morfologicznymi plaży prowadzone były pomiary falowania głębokowodnego za pomocą boi falowej. W analizie dokonano pewnych uproszczeń, pomijając efekty eoliczne oraz czynniki związane z wahaniami poziomu morza, skupiając się wyłącznie na oddziaływaniu energii falowej na brzeg.

Podwodna część brzegu charakteryzuje się łagodnym pochylem ($\beta \approx 0,015$) i jest zbudowana z drobnoziarnistego piasku kwarcowego o średnicy równej około $d_{50} \approx 0,22$ mm. Oprócz 3-4 stabilnych rew, w obszarze tym obserwuje się często występowanie jednej dodatkowej rewy ulegającej okresowemu zanikowi. Charakterystyczny profil brzegowy (profil nr 6) oraz jego okresowa zmienność w trakcie ekspedycji „Lubiawo2006” wraz z zainstalowaną w trakcie jej trwania aparaturą przedstawiono na rys 3. Rewa przybrzegowa w stosunku do systemu stabilnych rew jest mało trwała i ma często charakter płaskiego podwodnego wypłyenia. W zależności od warunków hydrodynamicznych, w okresach spokoju forma ta przesuwa się w sąsiedztwo linii brzegowej, często łączy się z nią i tworzy nowy (akumulacyjny) układ plaży. Natomiast w czasie silnego



Rys. 2. Ogólny widok badanego brzegu



Rys. 3. Charakterystyczny poprzeczny profil brzegowy (profil 6) w czasie badań (2006 rok)

falowania (sztormu) ulega ona całkowitemu lub częściowemu rozmyciu i uczestniczy w procesie erozji brzegu.

Ze względu na brak pływów oraz znaczną izolację Morza Bałtyckiego od innych akwenów morskich podstawowym czynnikiem sprawczym ruchu osadów i zmian dennych, przy zmiennych poziomach morza, jest falowanie wiatrowe. Przy średnim poziomie morza równym 500 cm (zero wodowskazu w układzie Amsterdam) w dłuższych okresach zakres czasowych średniomiesięcznych oscylacji poziomu wody w morzu jest nieduży i zmienia się od około 515 cm – miesiące zimowe do 485 cm – miesiące letnie. Należy jednak zauważyć, że wahania ekstremalne są dość znaczne i mogą zmieniać się w zakresie od około 600 cm do około 450 cm.

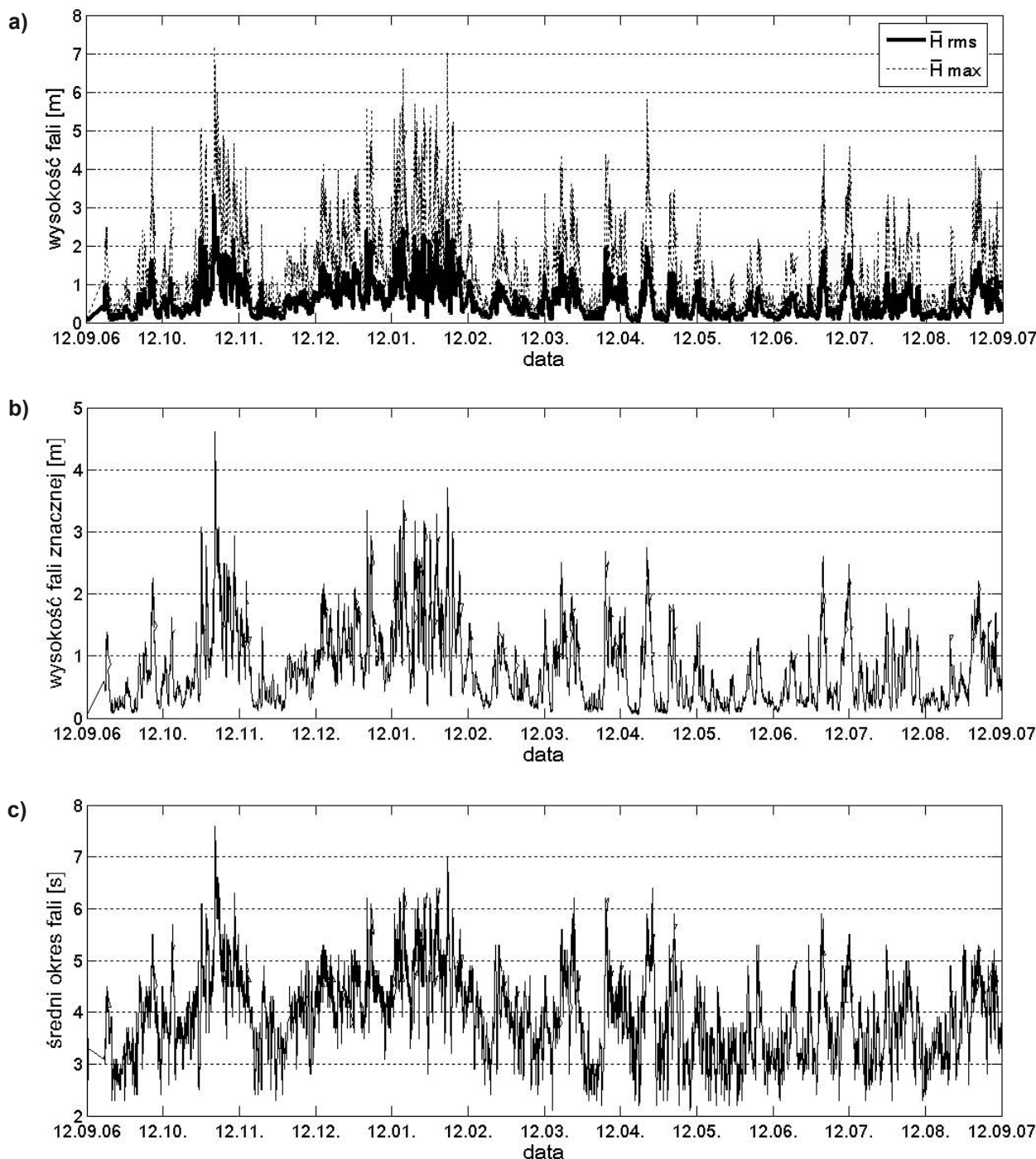
W zależności od wielkości falowania podchodząca do brzegu fala z różną intensywnością i sposobem ulega załamywaniu i dyssypacji. Ciągłe pomiary falowania głębokowodnego wykonane przez szereg lat za pomocą kierunkowej boi falowej na głębokości $h = 15 \div 20$ m wykazywały, że wysokość fali znacznej (H_s) w badanych okresach rocznych wielokrotnie przekraczała 1 m. Maksymalna zanotowana w badanym okresie (1998-2012) wysokość fali znacznej ($H_{s\max}$) wynosiła 4,68 m (rys. 4b), a wysokość fali maksymalnej $H_{\max} = 7,18$ m (rys. 4a). Średnie wysokości fal (H_{rms} lub H_{sr}) były znacznie mniejsze i maksymalnie dochodziły do około 3 m. Przykładowy roczny cykl pomiarów falowania obejmujący okres od pierwszej połowy września 2006 do początku września 2007 roku przedstawiono na rys. 4.

Okresy fali średniej $\bar{T}$ wahają się w dość dużym zakresie, tj. od około 2,5 do 7,5 s, przy czym w przypadku czystych fal wiatrowych przeważa falowanie o średnich okresach $3,5 \div 4,5$ s. Okres fali znacznej T_s w trakcie silnego sztormu może przekraczać nawet 9 s (rys 4c).

Z wielomiesięcznej analizy falowania głębokowodnego (głębokość $h = 15$ m), opisanego wysokością H_s wynika,

że średnioroczna energia E_t generowana na głębokiej wodzie w skali całego roku wynosi około $0,88 \cdot 10^5$ [J/m], przy okresowych maksymalnych wartościach równych około $3,4 \cdot 10^5$ [J/m], a minimalnych około $0,1 \cdot 10^5$ [J/m] [9]. Rozdzielając tę energię na sezon jesienno-zimowy oraz wiosenno-letni, otrzymuje się odpowiednio około $1,33 \cdot 10^5$ [J/m] oraz $0,46 \cdot 10^5$ [J/m]. Są to wartości wynikające z danych dla jednego w sumie przeciętnego roku i mogą różnić się w przypadkach warunków (lat) ekstremalnych.

Nadwodną analizowaną część brzegu tworzy plaża o zmieniającej się szerokości, ograniczona od strony lądu systemem wydmy z wydmy przednią o wysokości rzędu kilku, kilkunastu metrów, natomiast od strony morza zarówno czasowo, jak i przestrzennie dynamicznie zmieniającą się linią brzegową. W trakcie silnych sztormów układ wydmy jest podmywany i podlega procesowi erozji, natomiast w okresach spokoju, wskutek wyraźnych procesów eolicznych i wypadkowemu do-brzegowemu ruchowi osadów, następuje akumulacja i rozbudowa. Linia brzegowa w porównaniu do linii stopy wydmy jest bardziej dynamiczna i ma przy tym silniej zróżnicowany kształt z wieloma formami brzegowymi rodzaju mniej lub bardziej regularnych zafalowań. Średnia szerokość plaży na około trzykilometrowym odcinku brzegu, gdzie mieści się badany fragment, waha się w granicach od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, przyjmując średnie wartości około 40 m [10]. Współczynnik korelacji pomiędzy równoczesną zmiennością linii brzegowej oraz stopy wydmy wykazuje na tym odcinku dość dużą zmienność. [10]. Generalnie odcinki brzegu, gdzie występuje w miarę zgodny ruch linii brzegowej i stopy wydmy, charakteryzują się węższą plażą, natomiast w warunkach szerokiej plaży korelacje stają się przypadkowe. Przykładowe długookresowe (1983-2007) zmienności dla dwóch profilów (rys. 1) oraz towarzyszące im korelacje przedstawiono na rys 5.



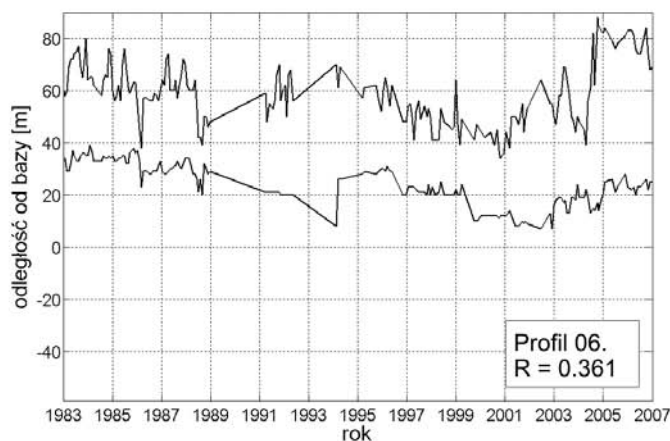
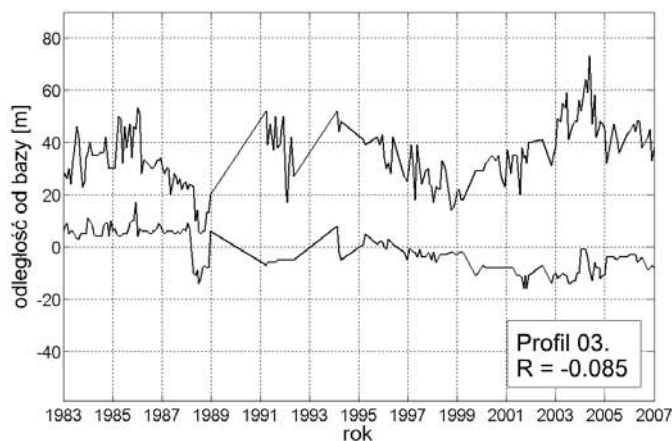
Rys. 4. Parametry fali głębokowodnej w przykładowym okresie 09.2006 – 09.2007

DANE POMIAROWE

Rejestrację nadwodnej części brzegu wraz z dużymi formami brzegowymi, w tym położenia linii brzegowej oraz odmorskiej strony wydmy, od 1984 roku są w MLB Lubiatowo pomiarami rutynowymi. Pomiary te odbywają się z wzdłużbrzegowym krokiem przestrzennym równym 100 m w przybliżeniu miesięcznych odstępach czasowych. W niniejszej pracy do analiz przyjęto 500 metrowy odcinek brzegu obejmujący profile 3, 4, 5, 6, 7, 8 (rys. 2) oraz okresy czasowe z przerwami wynikającymi z braku ciągłości pomiaru falowania boją falową od 1998 do 2012 roku. Schemat przyjętego do badań nadwodnego odcinka

brzegu przedstawiono na rys. 1. W przyjętym okresie pomiary były wykonywane za pomocą GPS-u i dalmierza optycznego. Przyjęty okres czasowy wynikał z dostępności w tym okresie czasowym równoczesnych pomiarów falowania głębokowodnego tworzących tło sił sprawczych.

Falowanie w przyjętym do analizy okresie czasowym 1998-2012 było rejestrowane za pomocą kierunkowej boji falowej. Pomiar nie był ciągły i odbywał się w ramach kilku-, kilkunastomiesięcznych ekspedycji terenowych, mających miejsce w latach 1998, 2003, 2006, 2007, 2011/2012, podczas których boja falowa była ustawiana na głębokościach około 15 ÷ 18 m.



Rys. 5. Długookresowe zmienności linii brzegowej oraz linii stopy wydmy wraz ze współczynnikiem korelacji

ANALIZA OBLICZENIOWA

Siła sprawcza (falowanie)

Jako siłę sprawczą, powodującą odpowiednie zmiany plaży, przyjęto falowanie wiatrowe. Ruch falowy generowany wiatrem, w tym wysokość fali, opisuje się, stosując różne statystyczne charakterystyki. W przypadku oceny właściwości energetycznych falowania wysokość nieregularnej fali wiatrowej najczęściej opisuje się, przyjmując falę znaczną H_s lub średniokwadratową H_{rms} (z ang. *root-mean square*). Czasami przyjmuje się także wysokość fali określaną jako fala średnia H_{sr} , którą opisuje się zwykłą średnią wysokość fali. Pierwszą charakterystykę wysokości fali H_s stosuje się przy opisie energii, które w ramach całego spektrum, niosą wyższe fale (średnia wysokość ze zbioru 1/3 fal najwyższych w zapisie fali losowej), natomiast drugie H_{rms} lub H_{sr} definiują średnie wartości wysokości fal nieregularnych.

Przyjmijmy w ramach kolejnych okresów Δt_k pomiędzy pomiarami geometrii plaży opis rozkładów wysokości fali poprzez charakterystyki H_s oraz H_{sr} . Takiemu przyjęciu towarzyszyć będzie, wynikająca z tych wysokości, znaczna różnica w wartości energii fali. Oznacza to, że, analizując siły sprawcze oddziałujące na brzeg, które wyrażamy poprzez energię falowania, istotnym elementem będzie przyjęcie sposobu/charakterystyki opisu wysokości falowania wiatrowego. Dokonywane dotąd różne obserwacje i analizy sugerują, że zasadnicze zmiany brzegowe, w tym głównie erozyjne, lepiej są odwzorowywane i opisywane w przypadku zastosowania charakterystyk falowania, które związane są z falami wyższymi. Dlatego też w celu zdefiniowania energetycznych właściwości falowania wiatrowego oddziałującego na brzeg, jako podstawową charakterystykę opisu wysokości fali, zastosowano przede wszystkim falę znaczną, tj. H_s . Średnie pomiędzy kolejnymi (przedziały czasowe Δt_k) pomiarami nadwodnej części brzegu wartości wysokości fali H_s zdefiniowano jako:

$$\bar{H}_s = \sum_{i=1}^N (H_s)_i / N \quad (1)$$

Wartość N jest liczbą pomierzonych fal w okresie Δt_k , tj. czasie pomiędzy kolejnymi pomiarami położenia linii brzegowej (obmiarem plaży). W celu pokazania różnic pomiędzy wielko-

ścią energii fali w przypadku przyjęcia do jej opisu wysokości fal wyższych (znaczných) lub niższych (średnich) obok wysokości fali znacznej H_s przyjmijmy także H_{sr} .

Wykorzystując charakterystyczny parametr wysokości falowania $H_i = H_s$ lub $H_i = H_{sr}$ i odpowiadającą długość fali L_{fi} , energię każdej pojedynczej fali można opisać zgodnie z ogólną zależnością:

$$E_i = \frac{1}{8} (\rho g H_i^2 L_{fi}) \quad (2)$$

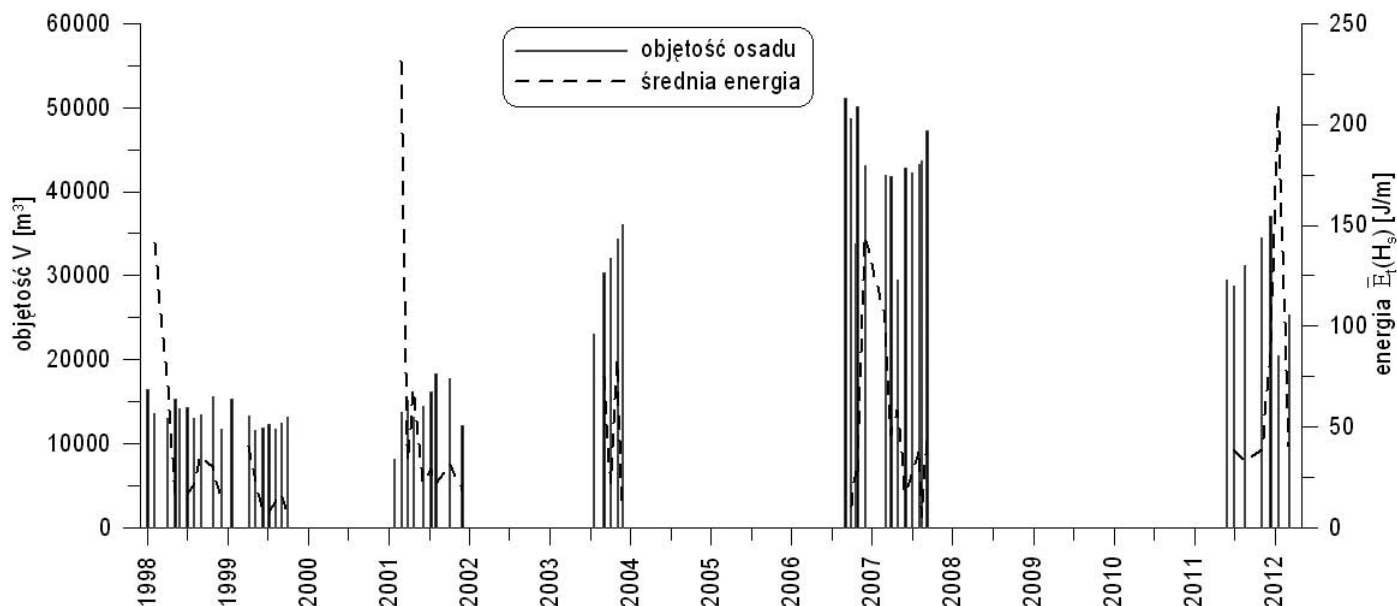
Sumując, a następnie uśredniając wszystkie pojedyncze wartości energii opisane wzorem (2) występujące w ramach okresu Δt_k , otrzymuje się średnią energię falowania, która „energetycznie” charakteryzuje okres pomiędzy kolejnymi pomiarami brzegu/plaży:

$$\bar{E}_t = \sum_{i=1}^N E_i / N \quad (3)$$

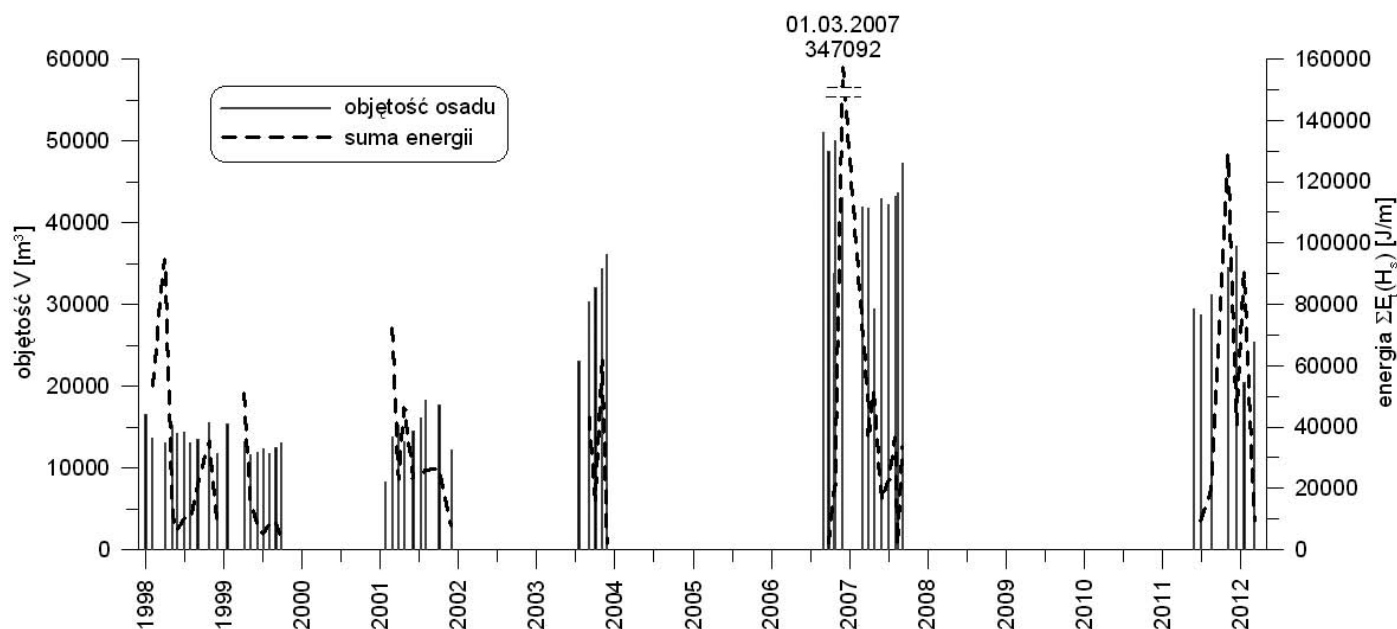
Wielkość N jest liczbą pojedynczych wartości energii E_i związanych z odpowiadającymi jej falami o wysokości H_i , które wystąpiły w okresie Δt_k . W ramach niniejszej analizy terminem energii całkowitej $\bar{E}_t$ określa się energię przenieszoną wzdłuż promienia fali. Uwzględnijmy także, obok energii średniej $\bar{E}_t$, która występuje w każdym okresie Δt_k (3), także energię sumaryczną $\Sigma(E_t)$ będącą sumą energii cząstkowych definiowanych wzorem (2) w ramach całego okresu Δt_k .

Z porównania całkowitej głębokowodnej energii fali E_t z jej składową prostopadłą do brzegu E_c otrzymujemy, że teoretycznie około 50 ÷ 60% (maksymalnie 70%) całkowitej energii falowania głębokowodnego będzie przenoszona w kierunku prostopadłym do brzegu. Wynika to z sytuacji, że wzdłuż polskiego wybrzeża występuje przewaga wiatrów zachodnich generujących skierowane ukośnie do brzegu falowanie głębokowodne, które z kolei definiuje wypadkową energię fali o tym samym kierunku. W rzeczywistości jednak nieco większa ilość całkowitej energii głębokowodnej, niż wynika to z prostej relacji E_t/E_c , będzie dochodziła do brzegu ze względu na proces refrakcji fal, tj. w miarę zmniejszania się głębokości malenie kąta pomiędzy promieniem fali a kierunkiem prostopadłym do brzegu.

Całkowitą energię $\Sigma(E_t)$ (zsumowaną z całego okresu Δt_k) oraz średnią ilość energii fali $\bar{E}_t$ pomiędzy kolejnymi pomiara-



Rys. 6. Średnia energia fali znaczej w okresie Δt_k oraz występujące w tym okresie objętości osadów plaży



Rys. 7. Suma energii fali znaczej z okresu Δt_k oraz występujące w tym okresie objętości osadów plaży

mi linii brzegowej/plaży Δt_k , która generowana jest na głębokiej wodzie i w dalszej części będzie oddziaływała na brzeg, w przypadku fali znaczej H_s przedstawiono odpowiednio na rys. 6 i 7, natomiast w przypadku przyjęcia wysokości fali średniej H_{sr} – na rys 8 i 9. Zmienności energii fali są przedstawione na tych rysunkach na tle zmian objętości osadów tworzących plażę na długości 500 m.

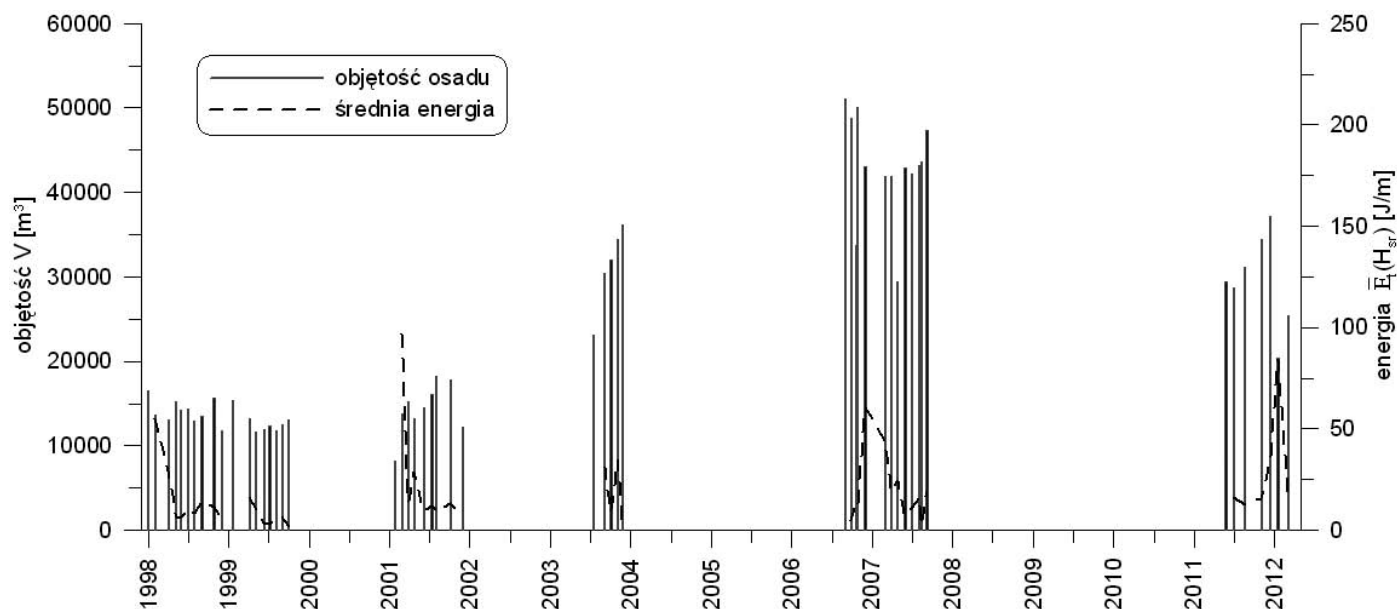
Wykresy 6, 7, 8, 9 wyraźnie potwierdzają, że znacznie lepszą charakterystyką opisu wysokości fali, która odwzorowuje rzeczywisty dynamizm sił sprawczych/energii jest wysokość fali znaczej w porównaniu do fali średniej. Rozkłady energii fali średniej, spłaszczając rozkład energii, nie są w stanie odwzorowywać krótkotrwałych silnych (sztormowych) oddziaływań na brzeg, które to powodują największe erozyjne zmiany brzegowe. Stosunek pomiędzy średnią $\bar{E}_s$ i sumaryczną energią fali

$\Sigma(E_s)$ związaną zarówno z H_s , jak H_{sr} jest podobny i przy średniej energii wynosi $E(H_s)/E(H_{sr}) \approx 2,5$, natomiast przy sumarycznej waha się pomiędzy 2 a 3. Wielkości energii fali głębokowodnej uśrednianej w ramach przedziału czasowego Δt_k w czasie pomiaru fali boją falową przedstawiono w tabl. 1.

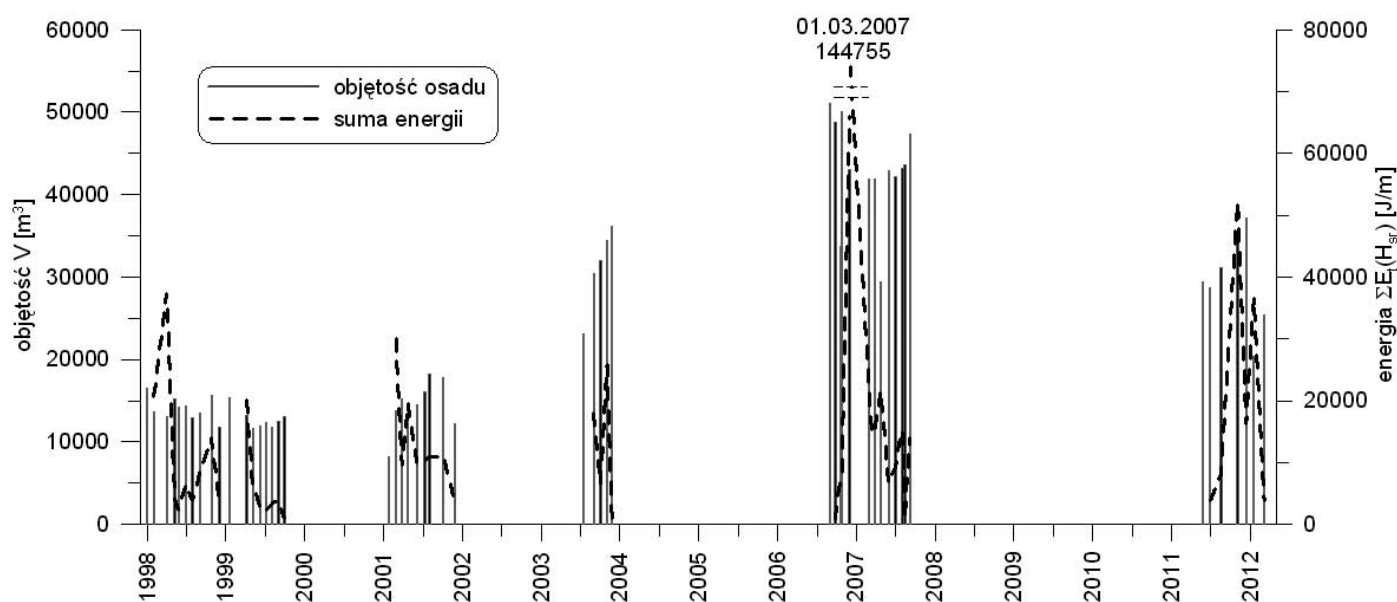
Z analizy wykresów wyłania się zaskakujący brak wyraźnych korelacji pomiędzy energią fali (zarówno średnią, jak i zsumowaną z okresu Δt_k) ze zmianami objętości osadów tworzących plażę.

Zmiany brzegowe (plaży)

Ocenę objętości osadów odpowiadającą każdemu trójwymiarowemu pomiarowi plaży wykonano, obliczając objętości



Rys. 8. Średnia energia fali średniej w okresie Δt_k oraz występujące w tym okresie objętości osadów plaży



Rys. 9. Suma energii fali średniej z okresu Δt_k oraz występujące w tym okresie objętości osadów plaży

sprowadzone do poziomu zera Amsterdam (V). Zestawienie wyliczonych objętości osadów tworzących plażę przy sprawdzeniu rozdziału łąd – morze (położenia linii brzegowej) do poziomu zera Amsterdam (poziom 0, kolumna 2), różnicy objętości ΔV pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami objętości plaży (kolumna 3) oraz energii fali $\Sigma(E_t)$ zsumowanej z czasu Δt_k odpowiadającej fali znacznej H_s (kolumna 4) oraz fali średniej H_{sr} (kolumna 6), tabl. 1. Dodatkowo zestawiono wartości średniej energii $\bar{E}_t$ występujące w czasie Δt_k (kolumny 5 oraz 7).

Zmiany objętości osadów tworzących plażę we wszystkich (5) przedziałach czasowych, z okresu 1998-2012, kiedy równocześnie była mierzona geometria plaży oraz falowanie głębokowodne, przedstawiono na rys. 10. Na podstawie tych średniookresowych rozkładów wkomponowano krzywą przy-

mującą charakter sinusoidy, z której ostrożnie wnioskować można o pewnej długookresowości zmian plaży. Wynika z niej, że minimalne objętości plaży $V \sim 10000 \div 20000 \text{ m}^3 / 500 \text{ m}$ występują w skali około 14 ÷ 16 letniej, a maksymalne o wartości $V \sim 50000 \text{ m}^3 / 500 \text{ m}$ pojawiają się w połowie tego cyklu.

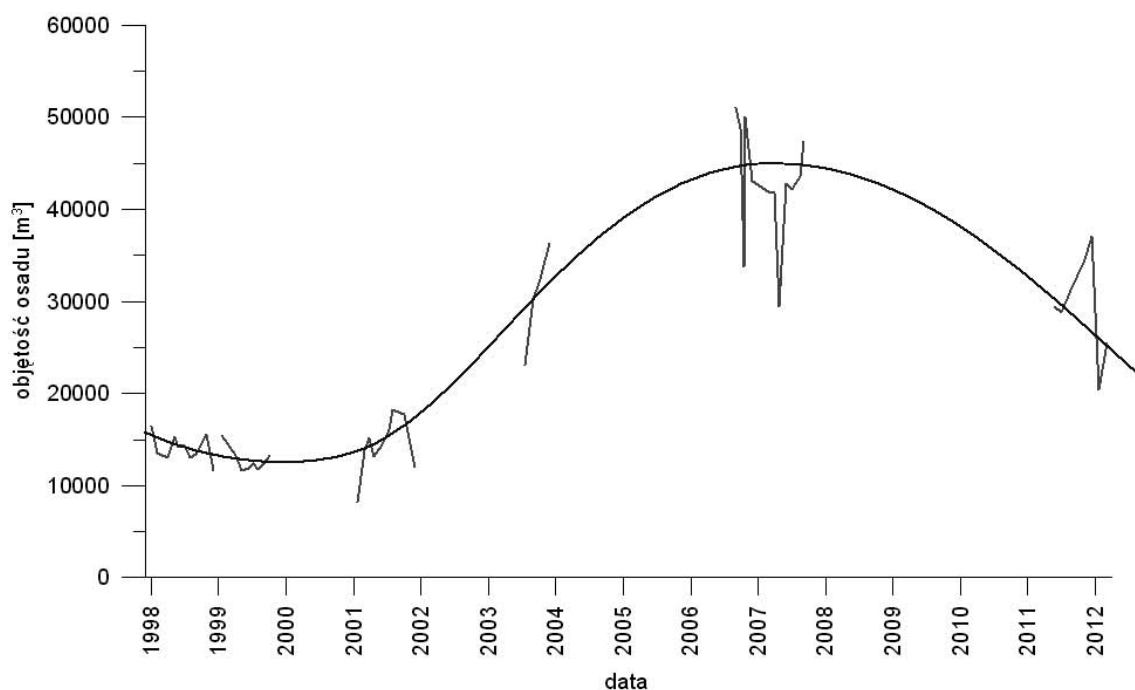
Bardziej szczegółowy obraz zmian plaży dla trzech przykładowych wielomiesięcznych (co najmniej rocznych) przedziałów czasowych obrazują krzywe na rys. 11. Wykresy te wskazują, że zarówno okresy występowania minimalnych, jak i maksymalnych wartości objętości plaży w skali kilku- kilkunastomiesięcznych są dość wolno zmienne. Świadczyć o tym mogą ich spłaszczone rozkłady w funkcji czasu.

Dodatkowo stwierdzić można brak wyraźnej tendencji sezonowości zmiany objętości plaży.

Tabl. 1. Zestawienie objętości plaży V i jej zmiany ΔV w czasie Δt_k oraz energii fali oraz różne wartości energii fali

Data	V [m ³] przy rzędnej zwierciadła wody 0	ΔV [m ³]	$\Sigma E_s(H_s)$ [J/m]	$\bar{E}_s(H_s)$ [J/m]	$\Sigma E_{sr}(H_{sr})$ [J/m]	$\bar{E}_{sr}(H_{sr})$ [J/m]	$\Sigma E_s(H_s)/\Sigma E_{sr}(H_{sr})$ [J/m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1998-01-02	16 478						
1998-02-02	13 569	-2909	53 258	142	20707	55	2,57
1998-04-02	12 996	-573	94 885	75	37241	29	2,55
1998-05-08	15 261	2265	11 644	17	4558	7	2,55
1998-05-27	14 189	-1073	6 227	16	2422	6	2,57
1998-07-01	14 397	208	10 316	17	6469	11	1,59
1998-07-29	12 995	-1402	9 991	22	3909	9	2,56
1998-09-02	13 480	485	20 967	36	8187	14	2,56
1998-10-27	15 582	2102	35 765	30	13958	12	2,56
1998-12-02	11 746	-3837	8 173	14	3206	6	2,55
1999-01-19	15 390						
1999-04-07	13 250	-2140	51 204	41	20070	16	2,55
1999-05-06	11 627	-1623	16 201	23	6367	9	2,54
1999-06-10	11 932	305	7 439	9	2904	3	2,56
1999-07-06	12 353	421	4 957	8	1938	3	2,56
1999-08-04	11 773	-580	8 991	14	3539	5	2,54
1999-09-02	12 425	652	9 287	17	3678	7	2,53
1999-09-29	13 118	693	2 773	6	1087	2	2,55
2001-01-24	8 225						
2001-02-27	13 803	5578	72 198	231	30135	97	2,40
2001-03-27	15 177	1374	22 999	33	9624	14	2,39
2001-04-23	13 169	-2008	46 593	69	19565	29	2,38
2001-06-05	14 469	1300	23 276	22	9768	9	2,38
2001-07-11	16 137	1668	24 419	29	10199	12	2,39
2001-08-01	18 292	2155	25 968	22	10885	9	2,39
2001-10-04	17 744	-548	26 682	32	11060	13	2,41
2001-11-29	12 201	-5544	7 965	19	3311	8	2,41
2003-07-17	23 089						
2003-09-03	30 352	7263	43 239	75	18026	31	2,40
2003-10-03	32 001	1650	15 809	22	6553	9	2,41
2003-11-03	34 388	2387	61 748	84	25787	35	2,39
2003-11-26	36 129	1741	2 517	8	1043	3	2,41
2006-09-02	51 086						
2006-09-26	48 734	-2352	2 108	11	872	5	2,42

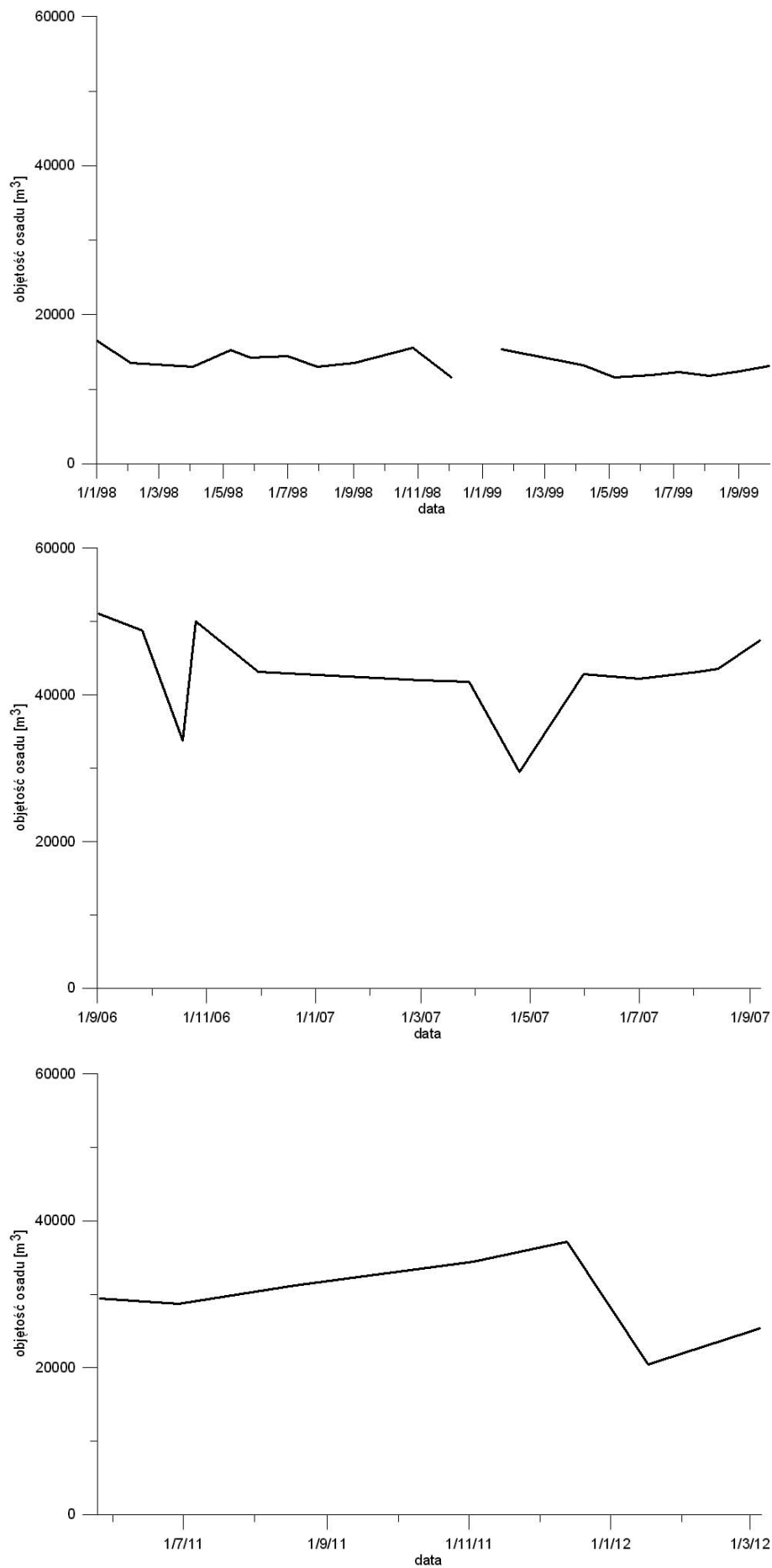
2006-10-19	33 735	-15000	17 865	28	7463	12	2,39
2006-10-26	50 069	16335	19 778	25	8263	10	2,39
2006-11-30	43 095	-6974	157 129	145	65826	61	2,39
2007-03-01	41 946	-1149	347 092	105	144755	44	2,40
2007-03-28	41 827	-119	37 025	46	15442	19	2,40
2007-04-25	29 466	-12360	51 951	58	21662	24	2,40
2007-05-31	42 854	13387	16 054	17	6681	7	2,40
2007-07-01	42 158	-696	22 186	27	9285	11	2,39
2007-08-03	43 169	1012	36 675	39	15297	16	2,40
2007-08-14	43 597	428	1 486	6	618	2	2,40
2007-09-06	47 302	3705	33 209	45	13871	19	2,39
2011-05-26	29 461						
2011-06-29	28 749	-711	9 379	39	3827	16	2,45
2011-08-18	31 192	2443	19 755	33	8024	13	2,46
2011-11-03	34 465	3272	129195	39	52341	16	2,47
2011-12-13	37 138	2674	40 640	85	16326	34	2,49
2012-01-17	20 414	-16724	90 994	210	36645	84	2,48
2012-03-05	25 407	4993	9 757	41	3965	17	2,46



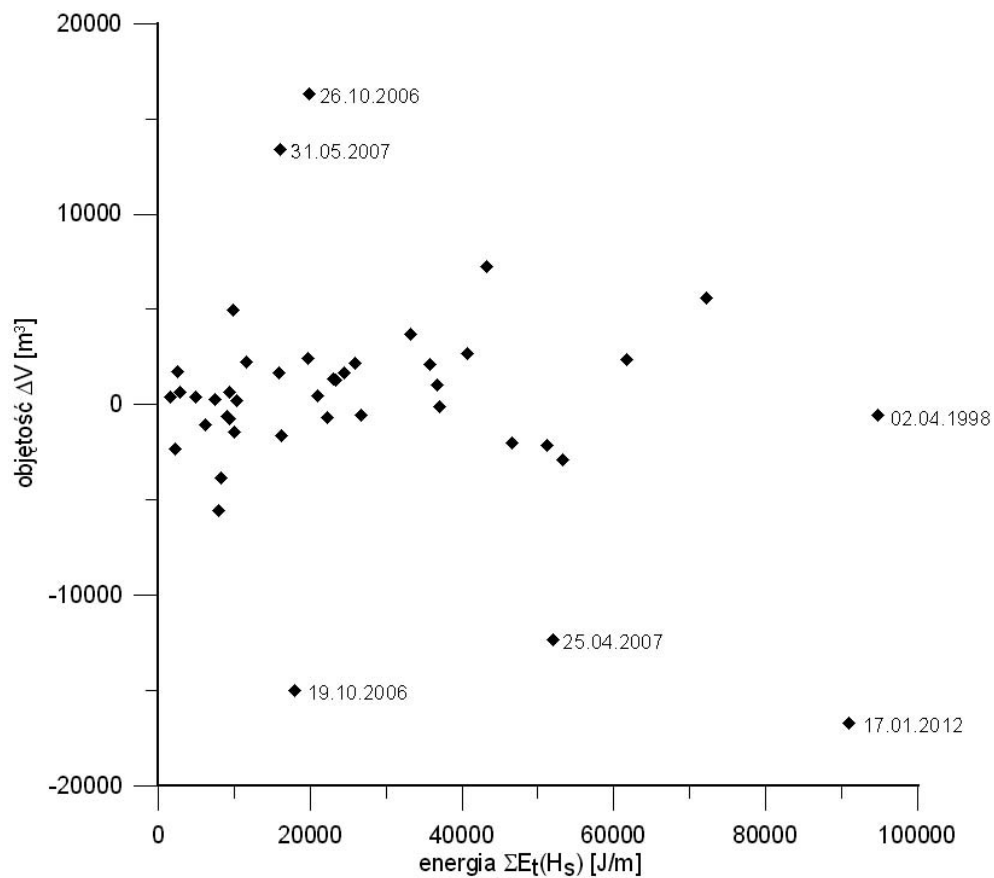
Rys. 10. Zmiana w czasie objętości osadu analizowanej nadwodnej części brzozy (plaży)

Na podstawie analizy zmienności objętości plaży V mierzonych poprzez wskaźnik ΔV zauważyć należy występowanie zarówno okresów małych, jak i dużych zmian pomiędzy kolejnymi miesięcznymi pomiarami/obliczeniami objętości osadów plażowych (rys. 12 i 13). Ekstremalnie objętościowe zmiany plaży w okresie miesięcznym mogą dochodzić do kilkunastu tysięcy $m^3/m-c$ osadów (maksymalnie do $\sim 16\,000\, m^3/m-c$).

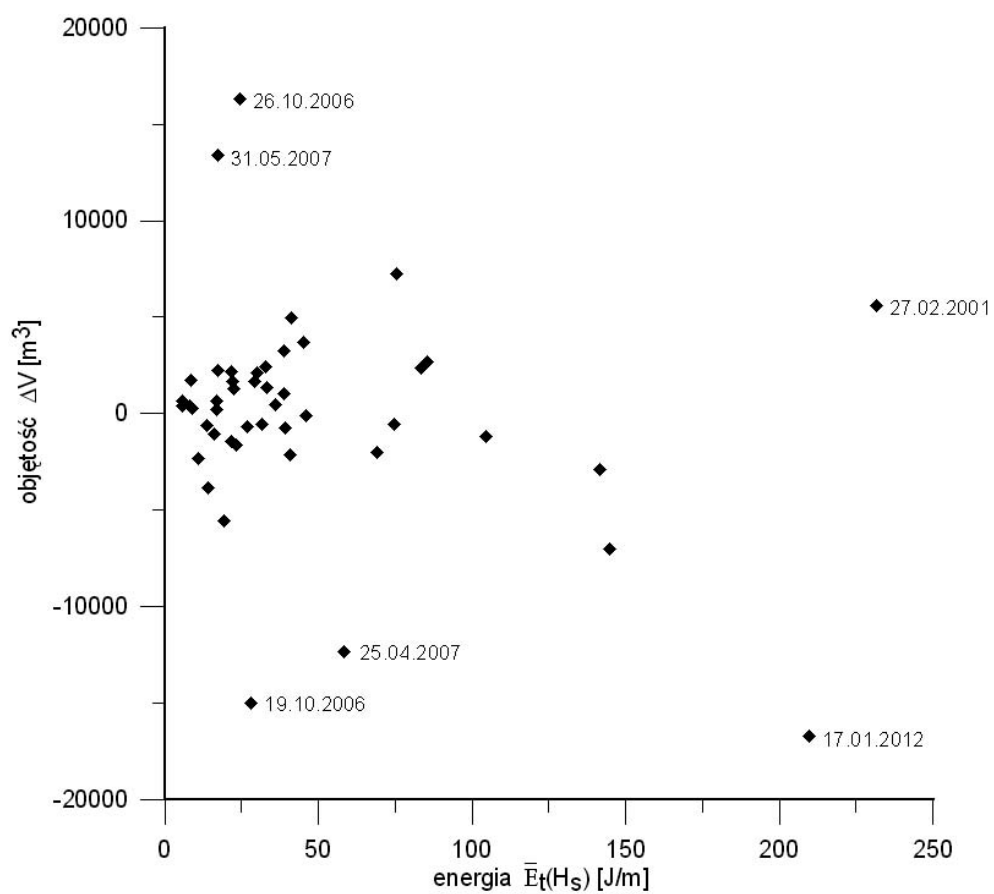
Najczęściej jednak są to wartości rzędu kilkuset do kilku tysięcy $m^3/m-c$, głównie w okresach jesienno-wiosennych, kiedy pojawiają się silne sztormy. Ekstremalne zmiany ΔV występują, z wyjątkiem jednego przypadku (17.01.2012), kiedy plaża i brzoza jest nie zmrożona, i tym samym mniej odporna na abrazję niż w okresie zimowym.



Rys. 11. Roczne zmienności objętości osadów analizowanego odcinka plaży



Rys 12. Zmiana objętości osadów tworzących plażę ΔV w funkcji ΣE_t przy fali H_s



Rys. 13. Zmiana objętości osadów tworzących plażę ΔV w funkcji przy fali H_s

Podstawowym, dość nieoczekiwanym wnioskiem jest otrzymanie braku wyraźnej korelacji pomiędzy zmiennością energii fali E a równoczesną zmianą objętości osadów ΔV tworzących badany fragment plaży.

Stosunek pomiędzy średnią $\bar{E}_t$ i sumaryczną energią fali $\Sigma(E_t)$ związaną zarówno z H_{s^*} , jak H_{sr} jest podobny i dla średniej energii wynosi $E(H_{s^*})/E(H_{sr}) \approx 2,5$, natomiast dla sumarycznej waha się pomiędzy 2 a 3.

Z krzywej mającej charakter sinusoidalny, aproksymującej rozkłady zmiany objętości osadów tworzących plażę w pięciu przedziałach czasowych, z okresu 1998-2012, kiedy równocześnie mierzona była geometria plaży oraz falowanie głębokowodne, ostrożnie można wnioskować o pewnej długookresowości zmian plaży. Krzywa ta wskazuje, że minimalne objętości plaży $V \sim 10000 \div 20000 \text{ m}^3/500 \text{ m}$ występują w skali około 14 $\div$ 16 letniej, a maksymalne o wartości $V \sim 50000 \text{ m}^3/500 \text{ m}$ pojawiają się w połowie tego cyklu.

Bardziej szczegółowe obrazy zmian plaży dla trzech przykładowych wielomiesięcznych (co najmniej rocznych) przedziałów czasowych wskazują na to, że zarówno okresy występowania minimalnych, jak i maksymalnych wartości objętości plaży w skali kilku- kilkunastomiesięcznych są dość wolno zmienne. Świadczyć o tym mogą ich spłaszczone rozkłady w funkcji czasu. Dodatkowo stwierdzić można brak wyraźnej sezonowości zmiany objętości plaży.

Analiza zmienności objętości plaży V mierzona poprzez wskaźnik ΔV wskazuje na występowanie krótkookresowych (miesięcznych) zmian objętości osadów plażowych, które jednak nie są wyraźnie skorelowane z ilością dostarczanej do brzegu energii pochodzenia falowego. Ekstremalnie objętościowe zmiany plaży w okresie miesięcznym mogą dochodzić do kilkunastu tysięcy $\text{m}^3/\text{m-c}$ osadów (maksymalnie do $\sim 16000 \text{ m}^3/\text{m-c}$). Najczęściej jednak są to wartości rzędu kilkuset do kilku tysięcy $\text{m}^3/\text{m-c}$. Ekstremalne zmiany ΔV występują głównie z wyjątkiem jednego przypadku (17.01.2012) w okresach jesienno-wiosennych, kiedy pojawiają się silne sztormy niszczące plaże i brzeg. Natomiast w okresie zimowym plaża często pokryta jest zmarzliną, która naturalnie chroni ją przed abrazją.

1. Coco, G., Huntley, D., O'Hare, T. J.: Beach cusp formation: analysis of a self-organization model. Coastal Sediment'99, Hauppauge, ASCE, 1999, 2190-2205.
2. Coco, G., Huntley, D., O'Hare, T. J.: Regularity and randomness in the formation of beach cusps. Marine Geology 178, 2001, 1-9.
3. Dette H., Uliczka K.: Prototype investigation on the time – dependent dune recession and beach erosion. Coastal sediments, New Orleans, 1987, 1430-1444.
4. Hanson H., Larson M.: Comparison of analytic and numerical solution of the one-line model of shoreline changes. Coastal sediment'87, New Orleans, 1987, 500-514.
5. Hobbs C., Milligan D., Hardaway C.: Long-term trends and short-term variability in shoreline changes rates: South Virginia. Proceedings of Coastal Sediment'99, Vol. 2., Hauppauge, Long Island, June 21-23, 1999, 1268-1283.
6. Miller J., Dean R.: Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions. Coastal Engineering, 54, 2007, 133-150.
7. Komar, P.: Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, New Jersey 1988.
8. Pruszek, Z., Różyński, G., Szmytkiewicz, M., Skaja, M.: Field observation of edge waves and beach cusps on the Baltic Sea coast. Journal of Coastal Research, 23, 4, 2007, 846-860.
9. Pruszek Z., Szmytkiewicz P., Ostrowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M.: Shallow water wave energy dissipation in a multi-bar coastal zone. Oceanologia, 50, (1), 2008, 43-58.
10. Pruszek Z., Ostrowski R., Schoenhofer J.: Variability and correlation of shoreline and dunes on the southern baltic coast (CRS Lubiatowo, Poland). Oceanologia, 53 (1), 2011, 97-120
11. Southgate H.: Data-based yearly forecasting of beach volumes along the Dutch North Sea coast. Coastal Engineering, 58, 2011, 749-760.
12. Van Rijn L.: Prediction of dune erosion due to storms. Coastal Engineering, 56, 2009, 441-457.
13. Vellinga P.: Beach and dune erosion during storm surges, Delft Hydraulics Communication, No 372, 1986.