

SŁAWOMIR KRÓLEWICZ, LECH KACZMAREK

ZMIENNOŚĆ RZEŻBY TERENU W STREFIE BRZEGOWEJ NA WYBRANYM ODCINKU MIERZEI ŁĘBSKIEJ W LATACH 2001–2007

ZARYS TREŚCI

Niniejsza praca zawiera charakterystykę ilościową zmienności rzeźby terenu w strefie brzegowej. W latach 2001–2007 na odcinku 250 m strefy brzegowej Mierzei Łębskiej, obejmującym obszar plaży i wału wydymowego, prowadzono pomiary wysokościowe metodą tachimetrii, wykorzystując urządzenia firmy TOPCON GTS 229. Na podstawie danych z pomiarów geodezyjnych stworzono cyfrowe modele terenu. Opierając się na nich, wykonano obliczenia ubytku, dostawy, bilansu i transportu piasku poprzez porównanie wartości rzędnych dla wszystkich możliwych okresów – jednorocznych i wieloletnich (01–04, 01–04, 01–05, 01–06, 01–07, 04–05, 04–06, 04–07, 05–06, 05–07 i 06–07). Średnio w okresach jednorocznych transport objął około 13,3% kubatury powierzchni badawczej, czyli trzy razy więcej niż wynika to z pracy MISZAŁSKIEGO (1973), analizującego przede wszystkim duże formy wydymowe. Maksymalnie w okresie jednorocznym, 2004–2005, przemieszczeniu uległo ponad 14,5 tys. m piasku na obszarze 2,38 ha, co stanowiło około 20% kubatury powierzchni badawczej. Średnia wartość transportu dla powierzchni 1 m zmieniła się od 0,31 m w okresie 06–07 do 0,67 m w okresie 04–06. Średni bilans ubytku i dostawy dla powierzchni 1m zmieniły się odpowiednio od –0,38 m w okresie 04–06 do +0,05 m w okresie 06–07.

WPROWADZENIE

Zmiany rzeźby terenu w strefie brzegowej zależą przede wszystkim od budującej i niszczącej działalności morza i wiatru. W zależności od natężenia i kierunku ich działalności linia brzegowa pozostaje niezmienną, cofa się w kierunku lądu lub przesuwa ku morzu. Prowadzenie badań dynamiki zmian strefy brzegowej pozwala lepiej zrozumieć zachodzące w niej procesy oraz przewidywać efekty działalności morza i wiatru. Wiedzę tę wykorzystuje się przy podejmowaniu działań zabezpieczających skupiska ludności w strefie nadmorskiej na przykład przed skutkami zasypywania przez wędrujące wydmy, zapadania domów zlokalizowanych bezpośrednio

nad niszczonego klifem (PENNIGHTON, HOBBS 2008).

W monitoringu dynamiki przemian strefy brzegowej wykorzystuje się geodezyjne i teledetekcyjne metody pomiarowe. W tradycyjnych pomiarach geodezyjnych używa się coraz nowocześniejszego sprzętu, na przykład tachymetrów elektronicznych wyposażonych w kamery cyfrowe, potrafiących prowadzić pomiar niemal całkowicie automatycznie, czy bardzo precyzyjnych GPS-ów, z którymi można pracować w dowolnym miejscu, bez konieczności nawiązywania się do naziemnych podstawowych sieci niwelacyjnych. Metody teledetekcyjne są tańsze od klasycznych geodezyjnych metod pomiarowych. Do najbardziej powszechnie używanych zaliczyć można

fotogrametryczny pomiar ze zdjęć lotniczych, powietrzny lub naziemny skaning laserowy oraz pomiary interferometryczne (KURCZYŃSKI 2006; BURDZIEJ, KUNZ 2006).

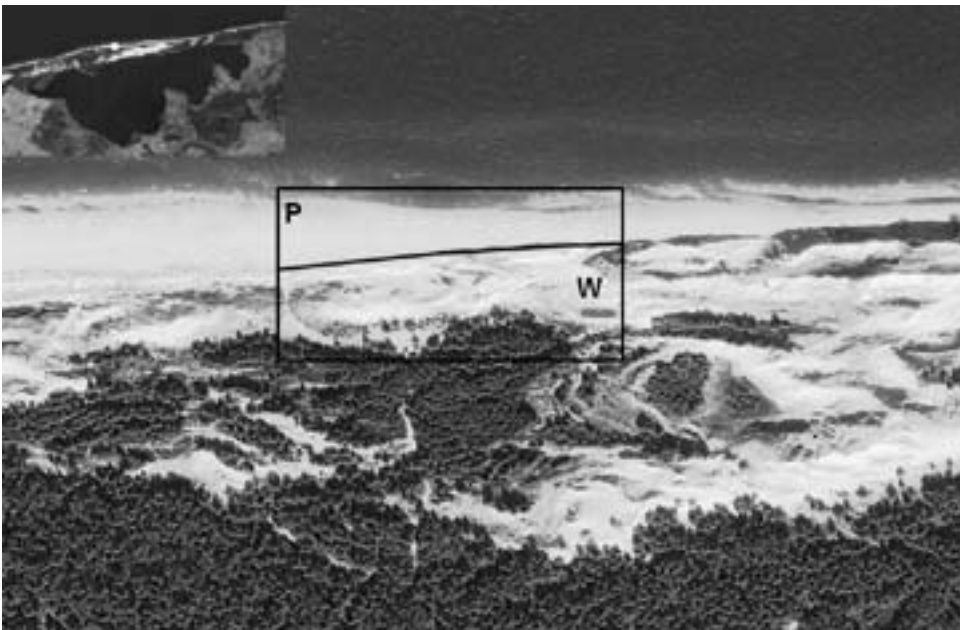
Wynikiem zastosowania jednej z wymienionych metod zawsze jest zbiór punktów o trzech współrzędnych. Na podstawie tych punktów jest generowany numeryczny model terenu, będący współcześnie najbardziej powszechnym sposobem zapisu informacji o rzeźbie terenu. Dysponując kilkoma modelami tej samej powierzchni, można dokonać analizy zmian ukształtowania powierzchni terenu w czasie.

OBSZAR BADAŃ

Obszar badań był położony pomiędzy 193 a 194 km linii brzegowej polskiego wybrzeża, w sąsiedztwie Stacji Tereno-

wej Zakładu Klimatologii UAM na Mierzei Łebskiej, w obrębie Słowińskiego Parku Narodowego. Stanowił go odcinek plaży i położony za nią wał wydmowy. Na ryc. 1 przedstawiono ortofotomapę obszaru badań, dostępną poprzez serwis.

Według fizycznogeograficznej regionalizacji Pomorza Mierzeja Łebska jest położona w pasie Pobrzeży Południowobałtyckich, w mezoregionie określanym jako Pobrzeże Słowińskie (KONDRACKI 1981). Pod względem geobotanicznym obszar badań należy do Krainy Brzegu Bałtyku (SZAFER 1972). Dominującą roślinność, porastającą i utrwalającą wydmy, stanowią wydmuchrzyca piaskowa i piaskownica zwyczajna. Klimat na omawianym obszarze jest chłodny i wilgotny oraz wietrzny. Zaliczany jest do Regionu III – Wschodnionadmorskiego (WOŚ 1995). Głównym czynnikiem klimatycznym jest położenie nad brze-



Ryc. 1. Obszar badawczy na zdjęciu satelitarnym z satelity IKONOS (źródło: zumi.pl)

Fig. 1. Research area on satellite image from the IKONOS sensor (zumi.pl source)

giem Morza Bałtyckiego. Roczna amplituda średnich miesięcznych temperatur wynosi tu $17,9^{\circ}\text{C}$ i jest najniższa w Polsce. Najcieplejszy okres przypada na lipiec, kiedy średnia temperatura wynosi ponad 16°C . Najniższa średnia miesięczna temperatura, $-1,6^{\circ}\text{C}$, występuje w lutym (BORÓWKA 1990). Opady atmosferyczne na tym terenie osiągają około 700 mm na rok (RABSKI 1992). Nad obszarem Mierzei Łebskiej wieją wiatry ze średnią roczną prędkością $4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Średnio w roku jest zaledwie pięć dni z ciszą (RABSKI 1992). Najczęściej wiatry wieją z kierunków południowo-zachodnich i zachodnich, rzadko natomiast z kierunków północnych i wschodnich.

Charakter współczesnego krajobrazu Mierzei Łebskiej jest wynikiem nałożenia się na siebie kilku czynników naturalnych, a mianowicie deglacjacji ostatniego lądolodu, zmian makroklimatycznych i intensywnych procesów akumulacji biogenicznej z działalnością człowieka, która szczególnie nasilała się w ciągu ostatnich wieków. Obecny zarys mierzei ukształtował się w okresie subborealnym. Dominującym elementem krajobrazu są wydmy. Z badań BORÓWKI (1990) wynika, że w ciągu ostatnich czterech tysięcy lat na tym obszarze wystąpiły cztery okresy wzmożonej aktywności eolicznej. Ostatni okres rozpoczął się w XV w., za sprawą niemal całkowitego zniszczenia lasów. Wśród form eolicznych akumulacyjnych występujących na Mierzei Łebskiej dominującą rolę odrywają barchany nadmorskie, wydmy barchanowo-łukowe oraz wydmy wałowe.

Badania nad dynamiką rzeźby na Mierzei Łebskiej w największym zakresie przeprowadził MISZAŁSKI (1973). Autor ten na podstawie zdjęć lotniczych, materiałów kartograficznych i bezpośrednich pomiarów geodezyjnych analizował dynamikę około 150 form wydmych w okresie ponad 70 lat. Pewną

kontynuacją badań Miszałskiego pod względem zastosowanej metody fotogrametrycznej i porównania zdjęć lotniczych z różnych okresów jest praca MICHAŁOWSKIEJ (2007). Precyzyjne pomiary geodezyjne Góry Łackiej są prowadzone przez studentów AGH w ramach praktyk geodezyjnych. Od roku 2002 Zakład Geodezji Inżynieriynjo-Przemysłowej Instytutu Geodezji Gospodarczej Politechniki Warszawskiej prowadzi pomiary zmian kształtu wydmy metodą GPS RTK (ZACZEK-PEPLIŃSKA 2005).

CEL PRACY

Celem badań, których wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy, było śledzenie zmian zachodzących w rzeźbie terenu plaży i wału wydmy na podstawie wieloletnich szczegółowych pomiarów wysokościowych oraz ilościowe scharakteryzowanie tych zmian poprzez obliczenie ubytku, dostawy, bilansu i transportu piasku na powierzchni badawczej. Analizę zmian rzeźby terenu przeprowadzono opierając się na numerycznych modelach terenu wygenerowanych na podstawie pomiarów terenowych. W odróżnieniu od prowadzonych dotychczas na Mierzei Łebskiej badań wybrano mały obszar położony bezpośrednio w strefie brzegowej oraz nie analizowano ruchu poszczególnych form (wydm), tylko samą powierzchnię badawczą.

METODYKA

Pomiary wysokościowe wykonano tachimetrem elektronicznym z dalmierzem laserowym firmy TOPCON GTS-229 wraz z lustrami dalmierzczymi zamontowanymi na tyczkach teleskopowych o maksymalnej wysokości do 3,6 m. W podstawach tyczek standardowe ostre za-

kończenie zastąpiono specjalnie uformowaną z silikonu płaską grubą podkładką, która umożliwiała pionowe ustawienie tyczki bez zapadania się w piasek, nawet na stromym stoku. Nawiązania przestrzenne przeprowadzono do dwóch stałych punktów o numerach porządkowych 59 i 60, o znanych współrzędnych X i Y , które wchodziły w skład poligonizacji technicznej III stopnia. Punkty te w terenie są wyznaczone przez głęboko posadowione kamienie granitowe. Pomiary i obliczenia wykonano we współrzędnych trzeciej strefy państwowego układu współrzędnych płaskich „1965”. Nawiązania przestrzenne i wysokościowe prowadzono z każdego stanowiska pomiarowego do punktów 59 lub 60 oraz wzajemnie pomiędzy stanowiskami. Dokładność pomiarów odległościowych ustawiono w instrumencie na 1 cm. Odniesienie wysokościowe dla każdego pomiaru stanowiła wysokość bezwzględna punktu nr 60, pomierzona względem poziomu morza określonego w 2007 roku, przy bezwietrznej pogodzie i braku falowania. Takie postępowanie było lokalnym ustaleniem poziomu odniesienia dla pomiarów wysokości i było uzasadnione odległością kilku kilometrów do najbliższego reperu o ustalonej rzędnej.

Pomiary geodezyjne zawsze wykonywano według takiego samego schematu, zachowując co roku podobne rozmieszczenie stanowisk pomiarowych. Każde stanowisko to kołek drewniany o średnicy 5 cm wbijany na głębokość około 30 cm, z wykonanymi na górze dwoma głębokimi nacięciami przecinającymi się pod kątem prostym. W trakcie nawiązań w punkcie przecięcia ustawiano pionowo tyczkę z lustrem dalmierzczym oraz tachimetr w taki sposób, aby oś pionowa instrumentu przechodziła właśnie przez ten punkt. Podczas prac terenowych sporządzano również dokumen-

tację fotograficzną. Badania prowadzono w lipcu, w warunkach pogodowych umożliwiających poprawne wykonanie pomiarów geodezyjnych, tj. przy braku silnego wiatru, który nie pozwoliłby na pionowe utrzymanie tyczki, i niewielkim falowaniu.

Obliczenia geodezyjne wykonano w programie WinKalk. Otrzymano współrzędne X , Y i Z wszystkich punktów pomiarowych. Opierając się na tych danych, we wspólnej siatce o wymiarze $0,2\text{ m} \times 0,2\text{ m}$ wygenerowano cyfrowe modele terenu, stosując interpolację metodą minimalnej krzywizny i zapis w formacie rastrowym. Dane o wysokości kodowano za pomocą liczb rzeczywistych. Obliczenia bilansu piasku wykonano pomiędzy poszczególnymi pomiarami na podstawie cyfrowych modeli terenu. Okresy porównawcze oznaczono w skróconej formie w następujący sposób: 01–04, 01–04, 01–05, 01–06, 01–07, 04–05, 04–06, 04–07, 05–06, 05–07 i 06–07. Analiza dotyczyła wspólnych obszarów objętych pomiarami (ryc. 3). Wygenerowanie cyfrowego modelu terenu, obliczenia bilansu piasku, wizualizację dwuwymiarowe i trójwymiarowe wykonano w systemie TNTMIPS. Kubaturę obszaru badawczego liczono pomiędzy powierzchnią terenu a ustalonym lokalnym poziomem odniesienia. Jako ubytek piasku na powierzchni badawczej traktowano ujemny wynik różnicy pomiędzy kubaturą terenu na początku i końcu analizowanego okresu, za dostawę – odpowiednio dodatni wynik tej różnicy. Bilans stanowił sumę ubytków i dostawy piasku. Natomiast za transport przyjęto wartość bezwzględną sumy ubytków i dostaw. Dla pojedynczego piksela cyfrowego modelu terenu ubytek piasku to obniżenie rzędnej pomiędzy początkiem a końcem analizowanego okresu, a dostawa to przyrost rzędnej.

OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Zestawienie danych charakteryzujących pomiary geodezyjne zawarto w tab. 1. Poziomą dokładność pomiarów geodezyjnych można określić na podstawie nawiązań wykonywanych wzajemnie pomiędzy kolejnymi stanowiskami. Każdorazowo w trakcie pomiarów zakładano osiem stanowisk pomiarowych, wykonując pomiędzy nimi kilkadziesiąt nawiązań. Każde nawiązanie wykonywano dwukrotnie, co pozwoliło obliczyć średni błąd poziomy i pionowy pomiarów. Wartość błędu poziomego była zawsze mniejsza od 5 cm i była również mniejsza od przyjętej wielkości pikselu cyfrowego modelu rzeźby (20 cm). Średnia dokładność pionowa nawiązań osiągnęła wartości mniejsze od 1,5 cm. Są to wartości zgodne z założeniami precyzji pomiarów zawartymi w dokumentacji technicznej instrumentu (TOPCON – instrukcja obsługi, 2004).

W tab. 1 przedstawiono również dane dotyczące areálu objętego pomiarami – topograficznego, obliczanego na płaszczyźnie kartograficznej, oraz rzeczywistego, wynikającego z rzeczywistego kształtu form terenu. Areál obszaru ba-

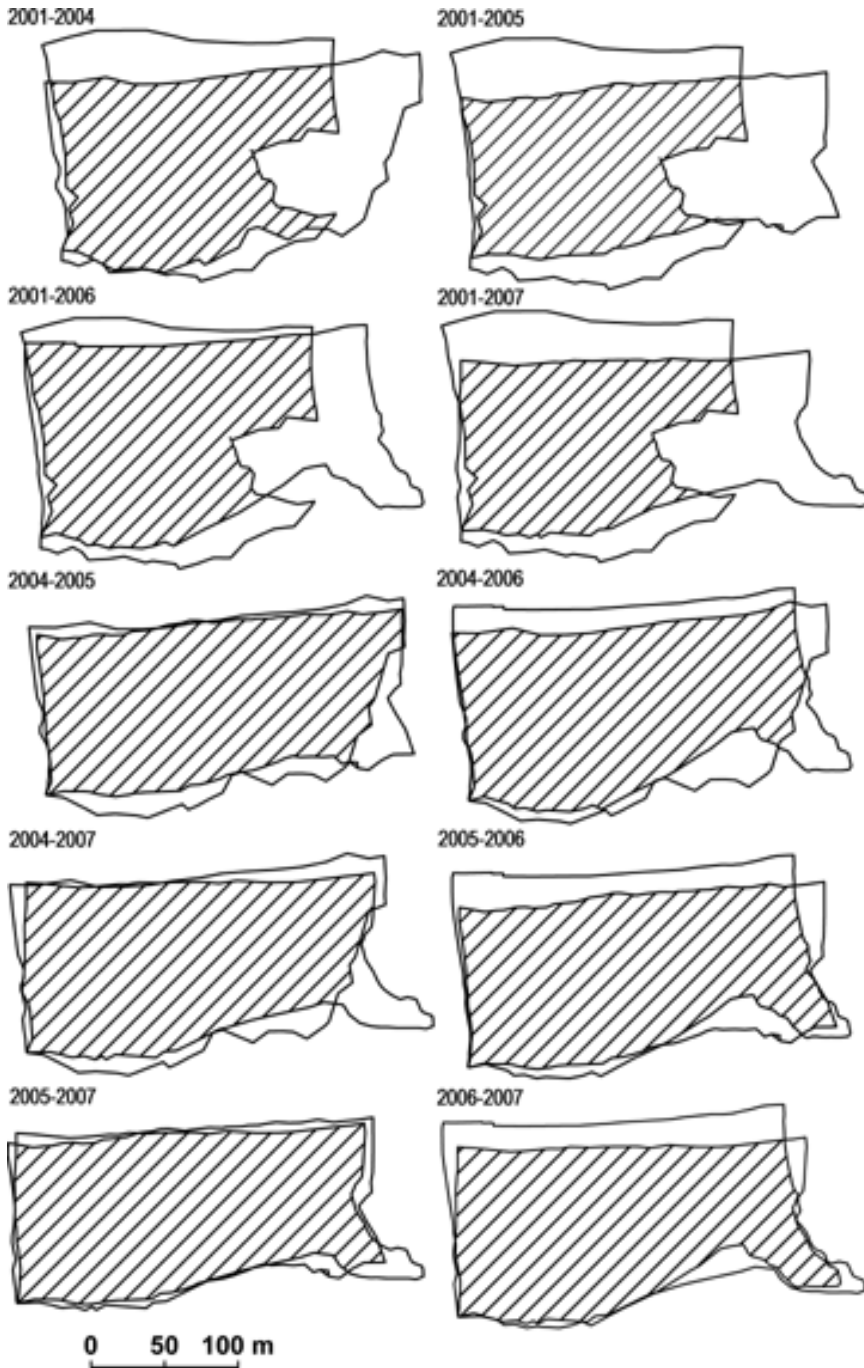
dań objęty pomiarami, rzutowany na płaszczyznę, zmieniał się od 2,54 ha w latach 2005 i 2007 do 2,87 ha w 2006 r. Różnice te wynikają z szerokości plaży w danym roku i przemian form wydmowych podlegających obserwacji. Poprzez podzielenie areálu rzeczywistego przez topograficzny otrzymano wskaźnik mówiący o rozwinięciu pionowym rzeźby terenu. Wskaźnik ten wzrastał od roku 2001 do 2007 od 1,008 do 1,055. Taka tendencja związana jest z odbudowywaniem się wału wydmorego na analizowanym odcinku linii brzegowej, bardzo mocno zniszczonego na przełomie XX i XXI w.

Na ryc. 2 przedstawiono rozmieszczenie pikiet pomiarowych w czasie pomiarów prowadzonych latach: 2001, 2004, 2005, 2006 i 2007. Zagęszczenie pikiet zależało od lokalnej zmienności rzeźby terenu i zwiększało się w miejscach o dużym nachyleniu stoków. Zasadniczo pikiety ustawiano w profilach prostopadłych do linii brzegowej. Najmniejsze ich zagęszczenie wystąpiło na plaży, a największe na wale wydmorem. Średnio najmniejszy areál przypadający na pojedynczą pikietę – 26,6 m² osiągnięto w roku 2007, natomiast największy – 61,1 m², w roku 2001 (patrz tab. 1).

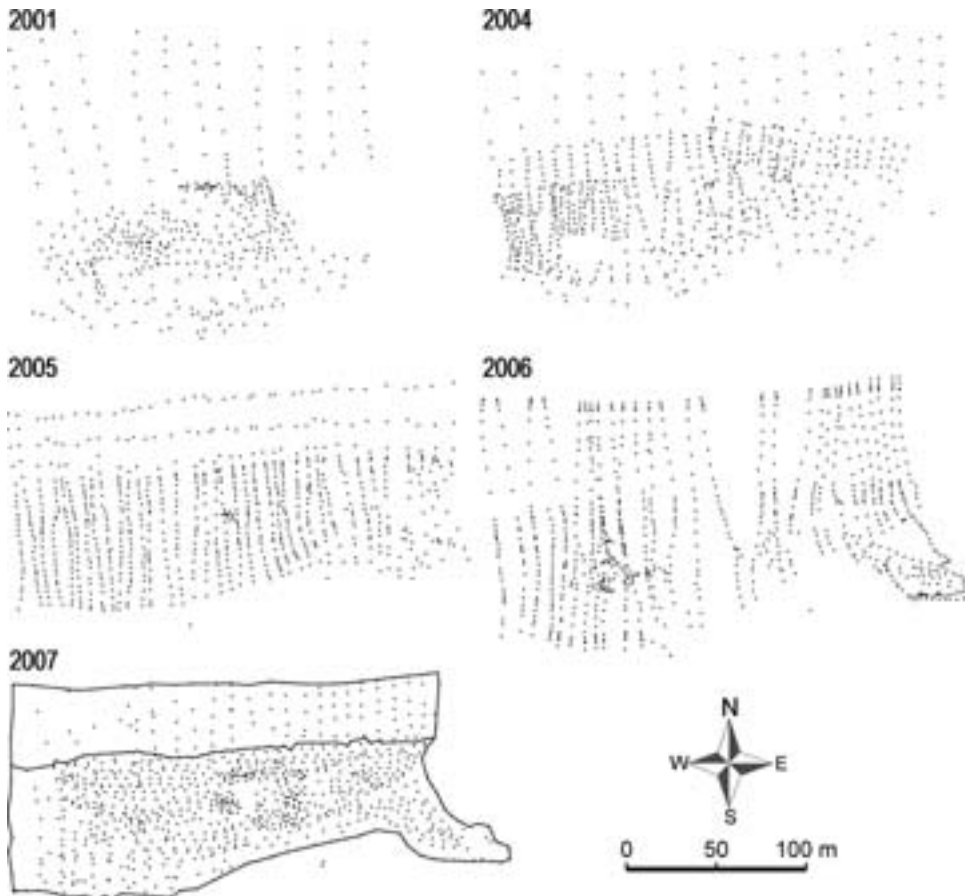
Tabela 1. Charakterystyka pomiarów geodezyjnych i areálu obszaru badań w latach 2001–2007

Table 1. Characteristic of geodetic measurements and size of research area in 2001–2007

Rok	Liczba pikiet	Średnia dokładność pozioma nawiązań [cm]	Średnia dokładność pionowa nawiązań [cm]	Areál topograficzny [ha]	Areál rzeczywisty [ha]	Areál [m ²] na 1 pikietę	Rozwinięcie powierzchni trójwymiarowej	Kubatura terenu [m ³]
2001	427	3,2	1,2	2,61	2,63	61,1	1,008	55165
2004	696	2,5	1,3	2,73	2,78	39,2	1,018	72452
2005	850	4,2	1,2	2,54	2,64	29,8	1,040	63750
2006	935	2,2	0,8	2,87	2,99	30,7	1,042	61138
2007	953	1,8	0,5	2,54	2,68	26,6	1,055	65651



Ryc. 2. Wspólne części obszarów objętych pomiarami wysokościowymi w latach 2001, 2004–2007
Fig. 2. Shared parts of areas provided with altitude measurements in years 2001, 2004–2007



Ryc. 3. Rozmieszczenie pikiet pomiarowych w trakcie pomiarów geodezyjnych w latach 2001, 2004–2007

Fig. 3. Arranging measuring pickets in the process of geodetic measurements in years 2001, 2004–2007

Na ryc. 3. przedstawiono obliczone na podstawie pomiarów terenowych cyfrowe modele terenu oraz krzywe hipsograficzne prezentujące procentowy udział poszczególnych rzędnych w areale powierzchni badawczej w danym roku. Na podstawie wizualnej analizy kolejnych modeli terenu można odnotować zmiany w kształcie powierzchni terenu, mianowicie: różnie kształtowanej rokrocznie plaży, odbudowującym się od strony plaży wale wydmyowym, rozwiewanym

starym wale wydmyowym. Na podstawie krzywych hipsograficznych można stwierdzić największe zmiany rzędnych terenu zachodzą w przedziale od 1,5 do 4 m n.p.m.

W tab. 2 zestawiono dane o maksymalnej i minimalnej wartości rzędnej oraz wartościach średnich i odchyleniu standardowym uzyskane z pomiarów geodezyjnych i wyliczone na podstawie histogramów cyfrowych modeli rzeźby zapisanych w postaci rastrowej. Na pod-

Tabela 2. Zestawienie danych o rzędnej [m lokalnym p.m.] z pomiarów wysokościowych i cyfrowych modeli terenu w latach 2001–2007

Table 2. Putting together details about the ordinate in [with local p.m m.] from measurements of high-altitude and digital models of the land in years 2001–2007

Rok	2001	2004	2005	2006	2007
Pomiary geodezyjne					
Minimum	0	0	0,01	0	0
Maksimum	10,32	10,49	9,91	9,81	9,93
Średnia	3,52	3,7	3,29	2,74	3,43
Odchylenie stand.	2,77	2,02	2,08	2,2	2,16
Cyfrowe modele terenu					
Minimum	0	0	0	-0,02	0
Maksimum	10,28	10,45	9,86	9,81	9,91
Średnia	1,04	1,35	1,19	1,14	1,22
Odchylenie stand.	1,61	1,88	1,83	1,83	1,88

stawie wartości minimalnych wysokości można stwierdzić, iż lokalny poziom odniesienia, jako poziom morza, został wyznaczony poprawnie. Niewielkie odchylenia od poziomu zerowego w roku 2005 przy pomiarach geodezyjnych i dla modelu rzeźby z roku 2006, wynoszące odpowiednio 0,01 m i -0,02 m, są tak niewielkie, że można je pominąć. Różnice pomiędzy wartościami wysokości maksymalnej zmierzonymi a modelowanymi można wytłumaczyć naturą zastosowanej przy interpolacji funkcji minimalnej krzywizny oraz dopuszczeniem możliwości odchyłki do 5 cm. Różnice pomiędzy średnią wysokością bezwzględną, uzyskaną z pomiarów bezpośrednich i obliczoną z modelu cyfrowego, wynikają z ilości danych i gęstości próbkowania. Wpływ wyboru funkcji interpolacji i ustawień jej parametrów na kształt cyfrowych modeli terenu będzie przedmiotem odrębnej pracy. Zdaniem autorów, w niniejszej pracy zastosowano funkcję (minimalnej krzywizny), która w sposób optymalny, tzn. wizualnie zgodny z rzeczywistym, pozwoliła wygenerować modele rzeźby terenu.

Obszar badawczy podzielono równoleżnikowo na dwie części i obliczono ich udział w bilansie. Pierwsza, północna, z nich obejmuje plażę (P), druga, południowa, nowy i stary wał wydmy wraz z niecką (W). Opisany podział zaznaczono na ryc. 1. Dla każdej z tych części obliczono ubytek i dostawę wraz z odpowiadającym tym procesom areałem oraz maksymalną zmianą wysokości topograficznej. Ostatecznie obliczono bilans piasku dla powierzchni badawczej w danym okresie porównawczym oraz objętość piasku poddanego przemieszczeniu. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 3. Zaznaczono dane dla okresów jednorocznych, tj. 04–05, 05–06, 06–07, i uznano je za zasadnicze przy omawianiu bilansu oraz transportu piasku. Pozostałe okresy, dłuższe niż rok, uznano za uzupełniające.

Największy transport w okresach jednorocznych zanotowano w latach 2004–2005 i wyniósł on 14 613 m³, co stanowiło około 20% całej kubatury terenu objętego pomiarami w 2004 r. Przy założeniu średniej gęstości objętościowej suchego piasku na poziomie 1,4 g · cm⁻³

Tabela 3. Wyniki obliczeń ubytku, dostawy, bilansu i transportu piasku dla poszczególnych kresów porównawczych
 Table 3. Results of calculations of loss, the delivery, balance and the transport of sand for individual comparative ends

Okres porównawczy	Ubytek				Dostawa				Bilans [m ³]	Transport [m ³]	Suma pow. [ha]		
	V [m ³]	P [%]	W [%]	pow. [ha]	dH [m]	V [m ³]	P	W				pow. [ha]	dH [m]
2001-2004	-2620	29,7	70,3	0,8	-3,22	4803	20,7	79,3	1,16	2,95	2183	7423	1,96
2001-2005	-6386	42,2	57,8	1,26	-4,14	2372	1,5	98,5	0,45	1,88	-4015	8758	1,71
2001-2006	-9581	58,3	41,7	1,66	-4,25	2436	0,2	99,8	0,45	2,26	-7145	12 017	2,11
2001-2007	-7666	35,8	64,2	1,20	-5,55	3536	3,2	96,8	0,54	2,31	-4129	11 202	1,74
2004-2005	-10 947	36,9	63,1	1,95	-3,84	3667	0,2	99,8	0,43	4,68	-7280	14 613	2,38
2004-2006	-11 953	45,5	54,5	2,01	-3,93	2793	0,0	100,0	0,39	4,59	-9159	14 746	2,40
2004-2007	-11 544	35,9	64,1	1,79	-4,09	4137	0,0	100,0	0,56	4,99	-7407	15 681	2,35
2005-2006	-4383	32,8	67,2	1,66	-2,35	2297	2,2	97,8	0,67	2,29	-2085	6680	2,33
2005-2007	-4750	15,9	84,1	1,25	-3,37	3843	10,1	89,9	1,13	2,36	-907	8593	2,38
2006-2007	-3045	7,0	93,0	0,85	-2,48	4198	32,6	67,4	1,52	1,83	1153	7243	2,37

V – objętość piasku, P – udział przypadający na obszar plaży, W – udział przypadający na obszar wiatu

dałoby to około 787 26-tonowych (9 m długości) wywrotek wypełnionych piaskiem, które stojąc jedna za drugą ustawiłyby się w ponad siedmiokilometrowej kolejce. W pozostałych okresach jednorocznych objętość transportowanego piasku była podobna i wynosiła około 7 tys. m³. Stanowiło to około 10% kubatury obszaru badań. Spośród dłuższych okresów, dwu-, trzy-, cztero-, pięcio- i sześciolletnich, maksymalna wartość transportu była jeszcze wyższa i osiągnęła 15 681 m³ w latach 2004–2007. Warto zauważyć, że średnia wartość transportu wyliczona z okresów dłuższych niż rok jest znacznie niższa od wartości zanotowanych dla okresów jednorocznych. Na przykład, w okresie 2001–2007 transport piasku wyniósł 11 202 m³, co daje średnio 1867 m³ na rok, czyli prawie osiem razy mniej niż maksymalna wartość transportu w okresie jednorocznym. W innym przypadku, w latach 2004–2007, transport wyniósł 15 681 m³, przy średniej 5227 m³ na rok. Było to niecałe trzy razy mniej od wartości maksymalnej w okresie jednorocznym i zaledwie o 1453 m³ mniej od wartości minimalnej transportu obliczonej dla okresów jednorocznych. Opisana zmienność wartości średnich transportu rocznego piasku w zależności od długości analizowanego okresu potwierdza dużą zmienność dynamiki procesów geomorfologicznych zachodzących w strefie brzegowej.

Bilans piasku na analizowanym obszarze strefy brzegowej dla większości okresów (jedno- i wieloletnich) niemal zawsze miał charakter ujemny. Tylko w dwóch przypadkach, w okresach 01–04 i 06–07, bilans był dodatni. W okresie jednorocznym najwięcej piasku ubyło w sezonie 04–05, nieco ponad 7 tys. m³ piasku. W okresie dwuletnim, 04–06 ubytek sięgnął ponad 9 tys. m³ piasku. Najbardziej zrównoważone ubytek i dostawa piasku były w okresie 05–07, kiedy

całkowity ubytek piasku osiągnął wartość tylko 907 m³. Dla ujemnych bilansów areal charakteryzujący się ubytkiem piasku był zawsze większy od arealu, na którym następował przyrost rzędnej. Dla bilansów dodatnich ta prawidłowość ulegała odwróceniu.

Analizując udział procentowy dwóch wydzielonych fragmentów strefy brzegowej, można stwierdzić, iż większą dynamiką przemian rzeźby charakteryzował się wał wydumowy. Zawsze ponad 65-procentowa dostawa piasku miała miejsce w obrębie wału wydumowego (W). Udział procentowy obszaru plaży w „dostawie piasku” tylko trzykrotnie przekroczył 10% (okresy 01–04, 05–07 i 06–07). W przypadku ubytku piasku udział procentowy obszaru plaży był bardziej zauważalny, jednak niemal zawsze niższy niż udział obszaru wału wydumowego (od 1,5 do 2,0 razy). Tylko w okresie 01–06 większy udział w ubytku piasku wystąpił na plaży. Warto również zauważyć, iż pomiędzy pomiarem w 2006 r. a pomiarem w 2007 r. ubytek piasku na plaży był bardzo niewielki w stosunku do wału wydumowego i wyniósł zaledwie 7%.

Porównywanie bilansów i wielkości transportu piasku z poszczególnych okresów, jednorocznych i wieloletnich, jest utrudnione przez zmiany zasięgu linii brzegowej i różny areal objęty pomiarami w danym roku. W tab. 4. zestawiono średnie wartości ubytku, dostawy, bilansu i transportu piasku dla powierzchni 1 m². Średnia wartość ubytku z powierzchni 1 m² zmieniała się od –0,26 m³ w okresie 05–06 do –0,64 m³ w okresie 01–07. Średnia wartość dostawy na powierzchni 1 m² zmieniała się od 0,34 m³ w okresie 05–06 do 0,85 m³ w latach 2004–2005. W okresach jednorocznych średnio najwyższy bilans ujemny zanotowano w okresie 04–05, tj. –0,31 m³ z 1 m². W przypadku pozostałych okresów jed-

Tabela 4. Średnie wielkości ubytku, dostawy, bilansu i transportu piasku dla okresów porównawczych

Table 4. Medium sizes of loss, the delivery, balance and the transport of sand for comparative periods

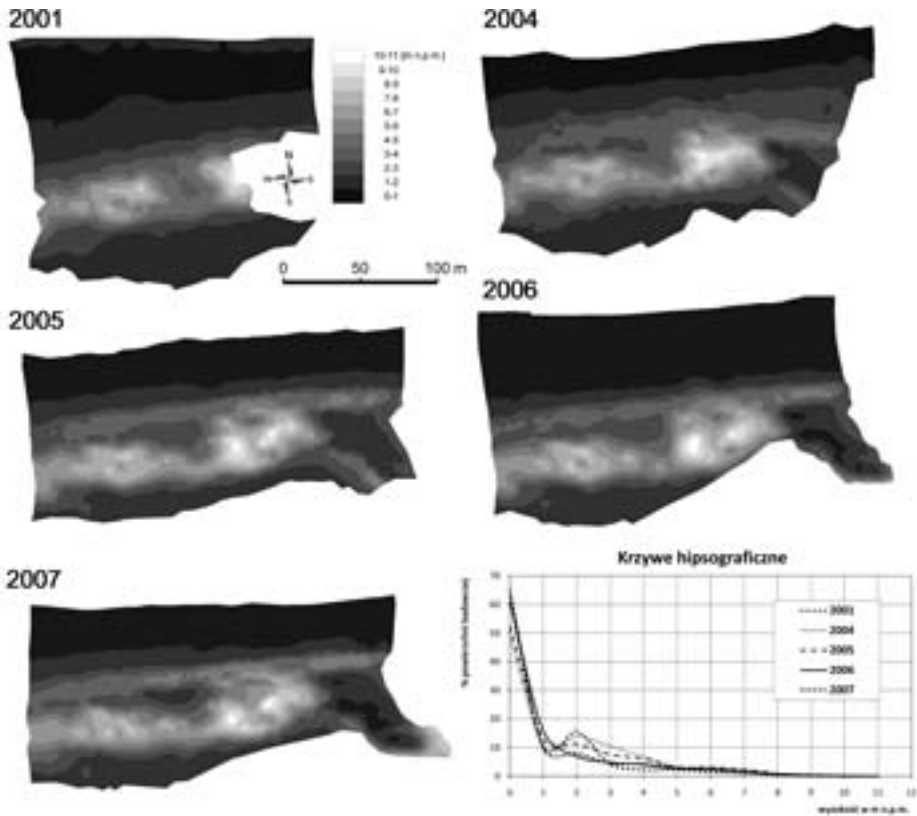
Okres porównawczy	01-04	01-05	01-06	01-07	04-05	04-06	04-07	05-06	05-07	06-07
Średni ubytek* w m ³ dla arealu 1 m ²	-0,33	-0,51	-0,58	-0,64	-0,56	-0,59	-0,64	-0,26	-0,38	-0,36
Średnia dostawa* w 1 m ³ dla arealu 1 m ²	0,41	0,53	0,54	0,65	0,85	0,72	0,74	0,34	0,34	0,28
Średni bilans w m ³ dla powierzchni 1 m ²	0,11	-0,23	-0,34	-0,24	-0,31	-0,38	-0,32	-0,09	-0,04	0,05
Średni transport w m ³ dla powierzchni 1 m ²	0,38	0,51	0,57	0,64	0,61	0,61	0,67	0,29	0,36	0,31

* Wielkość sumaryczna ubytku lub dostawy podzielona przez areal, dla którego faktycznie zarejestrowano dane zjawisko

norocznych, 05-06 i 06-07, średnia wartość bilansu była odpowiednio trzykrotnie i sześciokrotnie niższa. Maksymalny transport piasku, podobnie jak bilans, zanotowano dla okresu 04-05 i wyniósł on 0,61 m³ na 1 m² powierzchni terenu. Najmniejsza wartość średniego transportu z arealu 1 m² była tylko dwukrotnie mniejsza od wartości najwyższej. Dane przedstawione w tab. 4 o wiele przejrzystej pokazują również wpływ poszczególnych okresów jednorocznych na bilans i transport piasku analizowany w dłuższym czasie. Jeżeli w dwóch kolejnych latach bilans średni z jednostkowego arealu miał charakter ujemny, to jego wartość dla okresu dwuletniego jest sumą wartości z dwóch lat. Drobne nieścisłości wobec tej zasady, odnotowane w tab. 4, wynikają z różnic arealu objętego pomiarami w poszczególnych latach. Wpływ ekstremalnego okresu 04-05 na średni jednostkowy transport w dłuższych okresach jest o wiele dłużej widoczny (okresy 01-05, 01-06, 01-07).

W tab. 3 zawarto również dane o maksymalnej zmianie rzędnej w wyniku ubytku i dostawy piasku w poszczególnych okresach porównawczych. Największą zmianę rzędnej, związaną z ubytkiem piasku, zanotowano pomiędzy rokiem 2001 a 2007 i wyniosła ona -5,55 m. Natomiast w przypadku dostawy piasku maksymalny przyrost rzędnej wyniósł 4,99 m i dotyczył porównania danych z lat 2004 i 2007. Zatem, zmiana rzędnej w danym punkcie, nawet w okresie jednorocznym, może osiągnąć około 50% pełnego zakresu zmienności wysokości bezwzględnej. Tak duże punktowe zmiany rzędnej występują na stokach przemieszczających się form wydmowych.

Na ryc. 5 przedstawiono mapki obszaru badań, na których zaznaczono zasięg zmiany rzędnej w analizowanych okresach. Najlepiej ogólne tendencje zmian rzeźby terenu można zaobserwować na mapkach dotyczących najdłuższych przekrojów czasowych, czyli z okresów: 01-04,



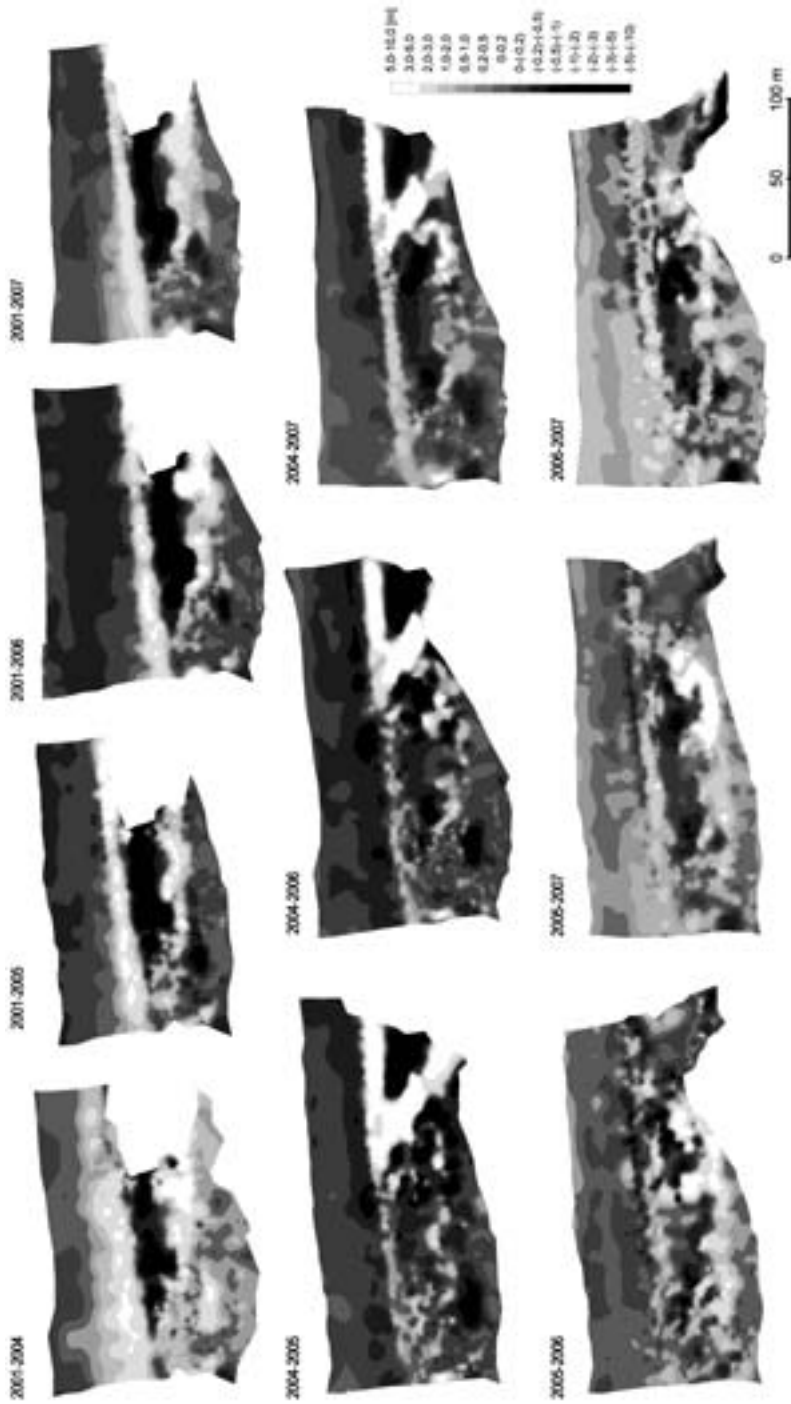
Ryc. 4. Cyfrowe modele terenu i krzywe hipsograficzne obliczone na podstawie pomiarów terenowych w latach 2001, 2004–2007

Fig. 4. Digital terrain models and hypsographic curves calculated on the basis of field measurements in years 2001, 2004–2007

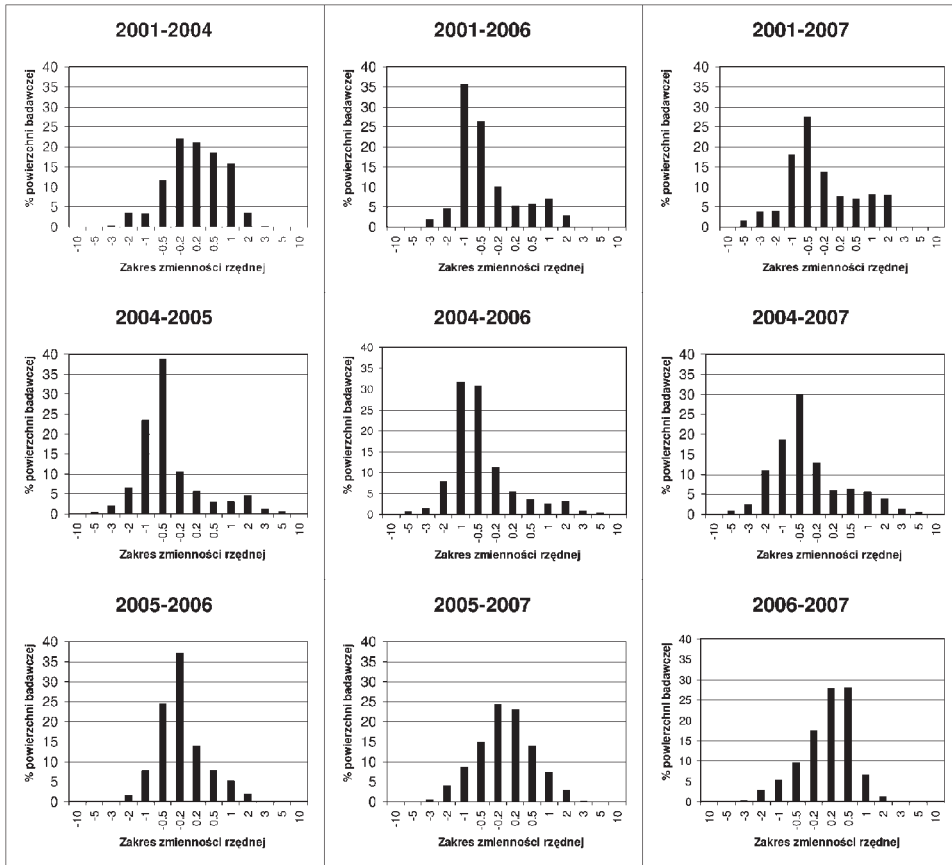
01–05, 01–06 i 01–07. Zmienność topografii plaży zależy głównie od występowania i siły fal sztormowych. W przypadku silnego sztormu rzeźba plaży może się zmienić zarówno pod względem wysokości, kształtu, a przede wszystkim przebiegu linii brzegowej. Stąd coroczny pomiar topografii plaży może nie uwzględniać zmian powstałych wskutek kilku sztormów. Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że w latach 2001–2004 linia brzegowa uległa cofnięciu około 20–30 m (patrz również ryc. 2), a poziom plaży podniósł się około 1–2

m w jej tylnej części, sąsiadującej się z odbudowującym się wałem wydmy. W latach 2004–2005 i 2005–2006 następowało stopniowe obniżanie poziomu plaży o około 0,5 m. W ostatnim okresie, 06–07, miało miejsce podniesienie powierzchni terenu, średnio o 1–2 m.

Na ryc. 6 przedstawiono wykresy prezentujące procentowy udział areálu zajętego przez poszczególne zakresy zmiany rzędnej w stosunku do całkowitego areálu obszaru badawczego w danym okresie porównawczym. Okres 2001–2004 był podobny do lat 2001–2005, dlatego



Ryc. 5. Mapy obszaru badawczego – ubytek i dostawa piasku w poszczególnych okresach porównawczych
 Fig. 5. Maps of research area demonstrating loss and the delivery of sand in individual comparative periods



Ryc. 6. Procentowy udział areálu powierzchni badawczej zależnie od zakresu zmiany rzędnej
 Fig. 6. Graphs presenting the interest-bearing share to the research surface depending on the range of the change of the ordinate

nie umieszczono go na ryc. 6. We wszystkich okresach największy udział miały zmiany rzędnej do 1 m. W okresie 05–07, przy najbardziej zrównoważonym bilansie, rozkład zmienności rzędnej był niemal symetryczny, zbliżony kształtem do rozkładu normalnego. W dłuższych okresach czasowych, 01–05, 01–06 i 01–07, widoczny jest zwiększający się udział zakresów o ujemnej i dodatniej zmianie rzędnej od 0,5 do 2 m, mimo ujemnych bilansów w tych okresach.

DYSKUSJA

Dane o zmianie kubatury form wydmych na Mierzei Łebskiej zostały opublikowane w pracy MISZAŁSKIEGO (1973). Odnoszą się one do dużych wydmy – barchanów i wydmy barchanowo-łukowych. Areal tych form był od 5 do 10 razy większy od areálu obszaru badań, którego dotyczy niniejsza praca (od 2,54 do 2,87 ha). Dla tych form Miszałski obliczył procent ilości transportowanego

materiału podczas jednego roku w stosunku do całkowitej objętości i uzyskał wartości od 0 do 4%. Z badań przedstawionych w niniejszej pracy wynika, że w strefie brzegowej zmiany kubatury rzeźby terenu są wielokrotnie wyższe i mogą przekraczać 20% w ciągu roku, przy średniej z trzech sezonów 13,3%.

W niniejszej pracy pokazano również, że długość i częstota pomiarów wpływają na średnie wartości bilansu i transportu piasku. Lata ekstremalne mają decydujący wpływ na wartości średnie. Z kolei brak roku (lat) ekstremalnych w okresie porównawczym wyraźnie obniża wartości średnie. Miszański obliczył te wielkości na podstawie porównania pomiarów fotogrametrycznych w okresie 1958–1968 i bezpośrednich pomiarów geodezyjnych powtórzonych dwukrotnie w ciągu roku. Duża rozbieżność pomiędzy wynikami Miszańskiego i prezentowanymi w tej pracy może być częściowo spowodowana właśnie brakiem lat ekstremalnych w okresie analizowanym przez Miszańskiego.

Jednakże wyniki uzyskane w tej pracy są zgodne z ogólnym poglądem KLIMASZEWSKIEGO (1978), że im większa masa wydmy, tym niższa jej prędkość przemieszczania i mniejsza wartość transportu w stosunku do ogólnej kubatury formy.

WNIOSKI

Opisane w niniejszej pracy badania zawierają charakterystykę ilościową zmian rzeźby terenu zachodzących w strefie brzegowej odcinka plaży i wału wydmowego na Mierzei Łebskiej. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż:

- średnio w okresach jednorocznych transport objął około 13,3% kubatury powierzchni badawczej, czyli trzy razy więcej niż wynika to z pracy MISZA-

SKIEGO (1973), analizującego przede wszystkim duże formy wydmowe,

- maksymalnie w okresie jednorocznym, 2004–2005, przemieszczeniu uległo ponad 14,5 tys. m³ piasku na obszarze 2,38 ha, co stanowiło około 20% kubatury powierzchni badawczej,

- średnia wartość transportu dla powierzchni 1 m² zmieniała się od 0,31 m³ w okresie 06–07 do 0,67 m³ w okresie 04–06,

- średni bilans ubytku i dostawy dla powierzchni 1 m² zmieniały się odpowiednio od –0,38 m³ w okresie 04–06 do +0,05 m³ w okresie 06–07,

- lata ekstremalne pod względem wielkości transportu mają decydujący wpływ na średnie wartości tego parametru w dłuższych okresach.

Autorzy pracy składają serdeczne podziękowania za ogromną pomoc w trakcie prac terenowych Panu Tomaszowi Wesołowskiemu, Panom Łukaszowi i Markowi Wesołowskiemu, Markowi Gruszczyńskiemu, Wojtkowi Rosikowi, Zbyszkowi Mellerowi. Szczególne podziękowania autorzy kierują do Pana prof. Leszka Kolendowicza za możliwość zakwaterowania w Stacji Terenowej Zakładu Klimatologii.

LITERATURA

- BORÓWKA R.K., 1990: Coastal dunes in Poland. *Catena Suppl.*, 18, 25–30.
- BURDZIEJ J., KUNZ M., 2006: Ocena wpływu rozdzielczości i metody pozyskiwania danych wysokościowych na dokładność numerycznych modeli terenu oraz modeli spadków i ekspozycji. *Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, 111–123.
- KLIMASZEWSKI M., 1978: *Geomorfologia ogólna*. PWN, Warszawa.

- KONDRACKI J., 1981: Geografia fizyczna Polski. PWN, Warszawa.
- KURCZYŃSKI Z., 2006: Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi, cz. 1 i 2. Polit. Warszawska.
- MICHAŁOWSKA K., 2007: Analizy przestrzenno-czasowe zmian środowiska na terenie Słowińskiego Parku Narodowego w latach 1951–2004. Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17.
- MISZAŁSKI J., 1973: Współczesne procesy eoliczne na Pobrzeżu Słowińskim. Studium fotointerpretacyjne. Dok. Geogr., nr 3.
- PENNIGHTON C., HOBBS P., 2008: Coastal Surveying Techniques. A Case Study at Happisburgh, Norfolk, UK. GEOinformatics, Vol. 11, No. 6, 16–19.
- RABSKI K., 1992: Mezoklimatyczne tło obszaru Słowińskiego Parku Narodowego. Parki Narodowe i Rezerwy Przyrody, 11.1, 37–54.
- SZAFER W., 1972: Szata roślinna Polski niżowej. [W:] W. Szafer, K. Zarzycki (red.), Szata roślinna Polski 2. PWN, Warszawa, 17–188.
- WOŚ A., 1995: Zarys klimatu Polski. Bogucki. Wyd. Nauk., Poznań.
- ZACZEK-PEPLIŃSKA J., 2005: Badanie zmian kształtu formy krajobrazowej – doświadczenia z projektów naukowo-dydaktycznych realizowanych w rezerwacie „wydmy ruchome”. Pr. Nauk. Inst. Górnictwa Polit. Wrocławskiej. Konf. 2005, Vol. 114, nr 45,365–372.

Recenzent: dr hab. Beata Medyńska-Gulij

Sławomir Królewicz
Zakład Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb
Instytut Geografii Fizycznej
i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Lech Kaczmarek
Stacja Ekologiczna UAM w Jeziorach

CHANGEABILITY OF THE LAND RELIEF IN THE BANK ZONE ON THE CHOSEN STRETCH OF THE ŁEBA SANDBAR IN THE YEARS 2001–2007

Summary

This work contains the quantitative characterization of the changeability of the land relief in the bank zone. In the years 2001–2007 on the 250 m stretch of the zone of the Łeba Sandbar, spreading through the area of the beach and the dune embankment, altitude measurements were conducted with the use of a geodetic method, using TOPCON GTS 229 instrument. The Łeba Sandbar is put in the central-east part of the Polish coast within the Slovincian National Park. On the basis of data from geodetic measurements, digital models of the land were created. Digital terrain models of the research area were made in the common ring with the diameter of about 0.2 m. The calculations of digital terrain models were carried out on the basis of the interpolation using the minimal curvature method. Basing on estimating loss, the delivery, balance and the transport of sand weren't made by comparing value

of ordinates of periods possible for everyone – one-year-old and long-term (01–04, 01–04, 01–05, 01–06, 01–07, 04–05, 04–06, 04–07, 05–06, 05–07 and 06–07). On average, in one-year periods, the transport included approximately 13.3% of the volume of the researched surface, i.e., 3 times more than it results from the work of Miszałski (1973), analyzing primarily the great dune forms. Maximally, in one-year period, 2004–2005, over 14.5 thousands cubic meters of sand underwent transfer within the area of 2,38 ha area which equals to about the 20% of the volume of the researched surface. A mean volume of transport from the surface of 1 square meter changed from 0.31 m in the period 06–07 to 0.67 m in the period 04–06. Average balance of loss and supplies for the surface of 1m changed appropriately from –0.38 m in the period 04–06 to +0.05 m in the period 06–07.