

IWONA HILDEBRANDT-RADKE

ROLA SZEROKOŚCI PLAŻY W NASYCENIU STRUMIENIA WIATROWO-PIASZCZYSTEGO NA PLAŻY MIERZEI GARDNIEŃSKO-ŁĘBSKIEJ

ZARYS TREŚCI

W artykule pokazano rolę szerokości plaży w redukcji transportu eolicznego na plaży Mierzei Gardnieńsko-Łębskiej, na stanowiskach o odmiennych zapleczach plaży: klifu wydmowego, niższego wału wydmowego i bramy deflacyjnej. Analiza zmian szerokości plaży przeprowadzona została w nawiązaniu do zróżnicowanego nasycenia strumienia wiatrowo-piaszczystego, wyrażonego natężeniem transportu eolicznego, uwarunkowanym kierunkami wiatru, pochodnymi cyrkulacji sztormowej na wybrzeżu południowego Bałtyku.

WSTĘP

Badania terenowe transportu eolicznego prowadzone w warunkach naturalnej plaży dowodzą, że często natężenie transportu eolicznego osiąga niższe wartości niż jest to przewidywane w istniejących modelach teoretycznych (DAVIDSON-ARNOTT i LAW 1990; GOLDSMITH i in. 1990; BAUER i in. 1990).

Do czynników ograniczających transport eoliczny na plaży można zaliczyć: zmienność czynników topograficznych, naturalną roślinność i sztuczne nasadzenia, które modyfikują kierunki strumienia wiatrowo-piaszczystego na plaży.

Z drugiej strony, na ograniczenie roli transportu eolicznego na plaży wpływa grupa czynników meteorologicznych warunkujących aerodynamikę strumienia wiatrowo-piaszczystego, tj. prędkość i kierunek wiatru, wilgotność względną i temperaturę powietrza. Pochodną tych czynników jest wilgotność powierzchni plaży czy też zmienność topografii i szerokości plaży jako powierzchni źródłowej transportu eolicznego. Nie moż-

na zapominać, że uziarnienie i skład petrograficzny materiału plażowego również wpływa na natężenie transportu eolicznego na plaży.

Zmienność parametrów plaży jako powierzchni źródłowej transportu eolicznego ma podstawowe znaczenie dla stopnia nasycenia strumienia wiatrowo-piaszczystego przemieszczającego się po plaży. Z tego też względu uzasadnione wydaje się przeanalizowanie roli zmian szerokości plaży na natężenie transportu eolicznego w warunkach plaży mierzejowej, podlegającej w ciągu roku falowaniu i procesom sztormowym, odpowiedzialnym za największe zmiany szerokości plaży.

Badania BAUERA i in. (1990), DAVIDSON-ARNOTTA i LAW (1990) oraz SHERMANA (1990) pokazują, że redukcja transportu eolicznego na plaży w stosunku do estymowanego w modelach jest wyraźna, szczególnie na wąskiej plaży, gdzie nie może się w pełni uformować saltacyjny strumień piaszczysty. Autorzy ci wskazują, że wąska plaża jest szczególnym ograniczeniem, gdyż najczęściej skore-

lowana jest ze wzrostem wilgotności plaży oraz jej większym nachyleniem.

NORDSTROMA i JACKSON (1992, 1993) w swoich badaniach na plaży estuariorowej podlegającej procesom pływom dowodzą, że istnieje statystyczny związek pomiędzy zmianami szerokości plaży a redukcją transportu. Zaobserwowali oni, że wykładniczej redukcji natężenia transportu eolicznego towarzyszy arytmetyczne tempo redukcji szerokości plaży.

Problem przedstawiony w artykule wchodzi w ramy wieloletniego projektu badawczego pt. „Ewolucja wybrzeża środkowego Bałtyku południowego – przeszłość, teraźniejszość i przyszłość” kierowanego przez prof. dr. hab. K. Rotnickiego, a którego celem jest rozpoznanie złożonej problematyki paleogeografii tego obszaru. Badania były finansowane z funduszu działalności statutowej i badań własnych Zakładu Geologii i Paleogeografii Czwartorzędu Instytutu Badań Czwartorzędu Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu oraz grantu KBN nr PB 6PO4E00213.

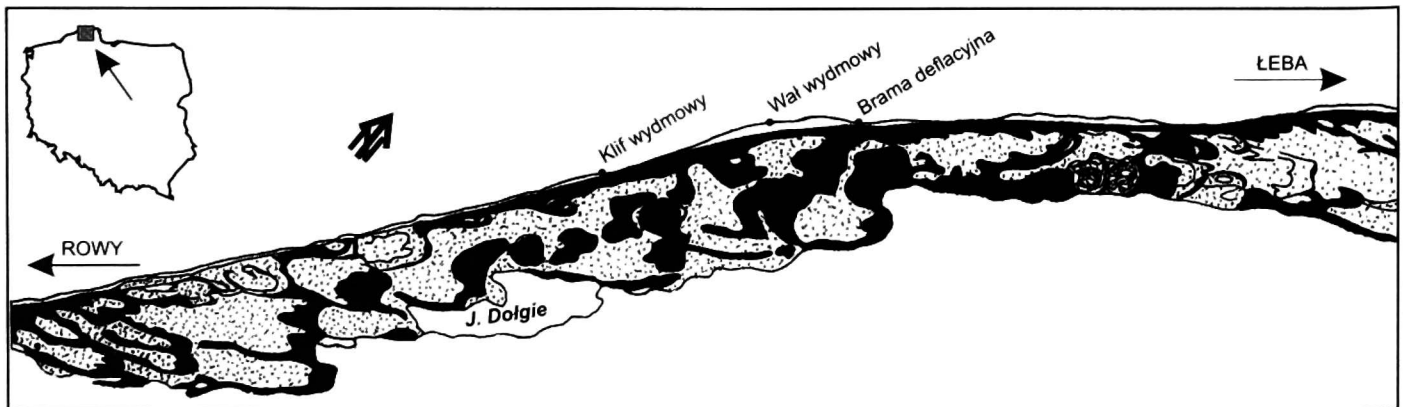
WARUNKI TOPOGRAFICZNE OBSZARU BADAŃ

Plaża Mierzei Gardnieńsko-Łebskiej zbudowana jest z piasków akumulacji morskiej. Pod warstwą piasków miejscami

zalegają postglacjalne osady organiczne (torfy, gytie). Szerokość plaży odznacza się znaczną rozpiętością, od kilku do kilkunastu metrów na odcinkach abradowanych – z zapleczem klifu wydmowego, do kilkudziesięciu lub nawet powyżej 100 m na odcinkach akumulacyjnych linii brzegowej – z rozwiniętym mezoreliefem górnej strefy plaży. Zróżnicowana szerokość plaży mierzejowej podlega dodatkowo znacznym wahaniom w ciągu roku, związanym z wzbudzeniami sztormowymi. Przyczyniają się one w okresie jesienno-zimowym do całkowitej lub znacznej redukcji szerokości plaży i wymiany jej materiału powierzchniowego. Wysokość form wałowych ciągnących się wzdłuż plaży nadmorskiej, w liczbie od dwóch do czterech szeregów, wynosi 10–12 m wysokości względnej.

Badania przeprowadzono na plaży Mierzei Gardnieńsko-Łebskiej, na przekrojach charakteryzujących się odmiennym typem zaplecza plaży wykształconym w postaci klifu wydmowego, niższego wału wydmy przedniej i bramy deflacyjnej (rys. 1).

Przekrój z klifem wydmowym na zapleczu jest zlokalizowany na 205. km wybrzeża. Linia przekrojowa założona jest na wąskiej plaży. Maksymalna szerokość zanotowana w trakcie badań terenowych to 12 m. Przy wysokich stanach morza plaża ulega zalaniu, a klif



Rys. 1. Obszar badań

Fig. 1 Study area

wydmowy atakowany jest przez fale sztormowe. Zarówno plaża, jak i skłon klifu pozbawione są roślinności. Porośnięta jest natomiast korona klifu, głównie przez *Ammophila arenaria* i częściowo sosnę. Podczas silniejszych wezbrań sztormowych fale przyczyniają się do powstania licznych obrywów, osuwisk i systematycznego cofania się badanego fragmentu klifu o ok. 40 cm/rok dla lat 1995–1996, w ciągu których prowadzono obserwacje abrazji korony klifu. Wąska plaża charakteryzuje się największym spośród badanych stanowisk nachyleniem (1:10). W ciągu roku na tym stanowisku najczęściej obserwuje się występowanie bruku plażowego. Na stanowisku nie występują żadne sztuczne umocnienia wprowadzone przez człowieka.

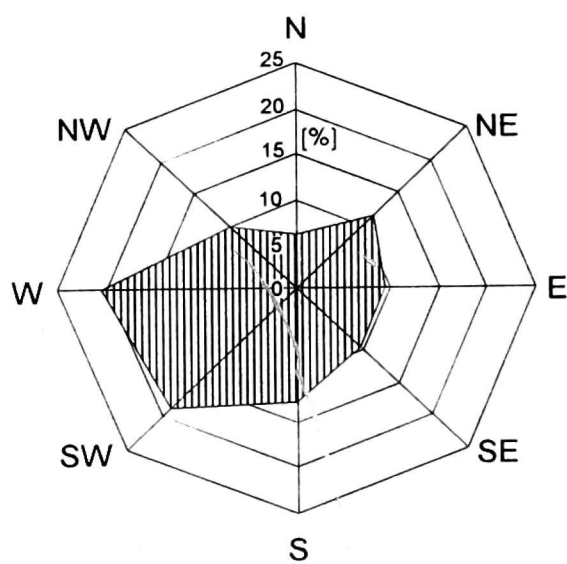
Lokalizacja przekroju z zapleczem wału wydmy jest oddalona o 1 km na wschód od pierwszego. Linia przekrojowa charakteryzuje się bardzo szeroką plażą. Przy niskich stanach morza osiąga ona ok. 100 m, przy wysokich – 20–30 m. Plaża cechuje się małym nachyleniem (1:21), a w górnej części występowaniem licznych form zaczątkowych, usytuowanych wokół pojedynczych kęp roślinności *Ammophila arenaria*. Wał wydmy przedniej osiąga wysokość ok. 8 m n.p.m. i pokryty jest zarówno od strony dystalnej, jak i proksymalnej roślinnością. W okresie badań pracownicy Urzędu Morskiego uzupełniali miejsca pozbawione naturalnej roślinności systemem sztucznych nasadzeń, a inicjalne formy wałów niższego rzędu obudowane zostały płotem faszynowym.

Przekrój z bramą deflacyjną na zapleczu zlokalizowany jest o ok. 3 km w kierunku wschodnim od przekroju drugiego. Plaża na linii przekrojowej charakteryzuje się dość znacznym nachyleniem (1:14). Sucha plaża osiąga szerokość ok. 36 m, mokra – kilku metrów. Rozcięcie wału wydmy przedniej ma sze-

rokość ok. 3 m i wynika z usytuowania w tym miejscu szlaku turystycznego przebiegającego przez Wydmy Czołpińską, wykorzystywanego głównie w sezonie turystycznym. Skrzydła bramy deflacyjnej o wysokości ok. 5 m porośnięte są roślinnością, a od strony plaży obudowane niskim płotem faszynowym.

WARUNKI AERODYNAMICZNE MIERZEI GARDNIEŃSKO-ŁEBSKIEJ W ASPEKTCIE ZMIENIAJĄCEJ SIĘ SZEROKOŚCI PLAŻY

Na wybrzeżu południowego Bałtyku wiatr wpływa w istotny sposób na charakter i dynamikę brzegu morskiego. Na omawianym odcinku wybrzeża dominują w wieloleciu wiatry z kierunków zachodnich (>20%) i południowo-zachodnich (ok. 20%). Mniejszym udziałem zaznaczają się wiatry z kierunków: południowego, północno-zachodniego i północno-wschodniego (10–17%). Najniższy jest udział wiatrów z sektora północnego. Dla tego odcinka wybrzeża notuje się także bardzo mało dni z ciszą (ok. 1%) (rys. 2).



Rys. 2. Struktura kierunków wiatrów w wieloleciu 1971–1990 – stacja IMGW w Łebie

Fig. 2. Percentage-diagram of wind directions in 1971–1990 – Łeba Meteorological Station

Mierzejowy pas wybrzeża charakteryzuje się znaczną dynamiką wiatru. Średnia roczna prędkość wiatru, mierzona na wysokości 14 m nad powierzchnią gruntu, oscyluje koło 5 m/s. Dla wielolecia 1971–1990 wynosiła 5,25 m/s. Największe prędkości wiatru na wybrzeżu Bałtyku notowane są w okresie jesienno-zimowym, określanym często sztormowym, gdyż bardzo duże prędkości wiatru (kilkanaście m/s lub >20 m/s), notowane z kierunków odmorskich (NW, N, NE), odpowiadają za spiętrzenia wód południowego Bałtyku, przyczyniają się do zalania plaży i abrazji niektórych fragmentów nadbrzeżnych wałów wydmy (MAJEWSKI i in. 1983).

Na warunki termiczne pasa mierzejowego duży wpływ ma sąsiedztwo Morza Bałtyckiego. Jego łagodzący wpływ na klimat wyraża się najniższą dla terenu Polski amplitudą roczną dla wielolecia, wynoszącą 16,8°C (dwudziestolecie 1971–1990). Średnia roczna temperatura dla tego okresu to ok. 8°C. Najzimniejsze miesiące w roku to styczeń i luty, najcieplejsze: lipiec i sierpień.

Natomiast największe wartości wilgotności względnej powietrza notowane są w okresie zimowym. Średnie wartości roczne dla wielolecia 1971–1990 wynoszą 83%.

Analiza opadów atmosferycznych w ciągu roku pokazuje, że największe ich wartości mierzy się w miesiącach letnich, w lipcu, sierpniu i wrześniu (80–90 mm). Minimum opadowe w ciągu roku przypada na luty, marzec i kwiecień. Opady atmosferyczne na wybrzeżu Bałtyku występują w postaci deszczu. Opady śnieżne występują przez ok. 40 dni w roku, a pokrywa śnieżna utrzymuje się zimą przez 56 dni (średnia 1961–1990). Maksymalna liczba dni z pokrywą śnieżną w tym okresie wynosiła 133, minimalna 10 w ciągu roku.

METODY BADAŃ

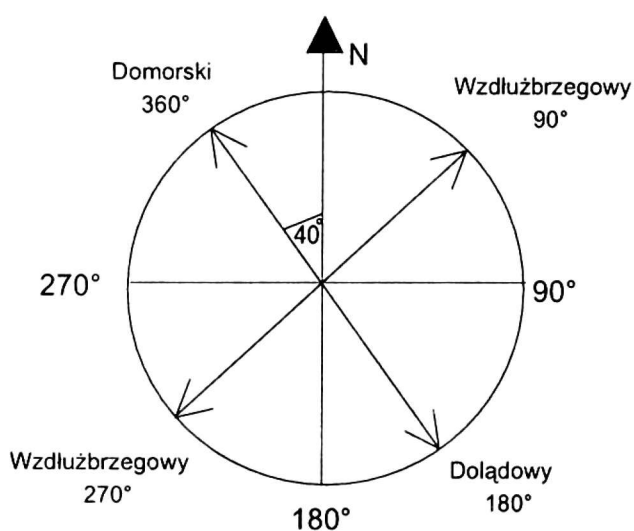
Badania prowadzono na plaży położonej w kierunku północnym i północno-wschodnim od Wydmy Czołpińskiej (199.–205. km plaży). Linie przekrojowe zlokalizowano na trzech odcinkach plaży o odmiennym wykształceniu zaplecza plaży w postaci: klifu wydmy, niższego wału wydmy przedniej i bramy deflacyjnej. Wybór linii przekrojowych uzasadniają zarówno własne obserwacje terenowe, jak i wnioski wypływające z literatury (BORÓWKA 1986), dowodzące wpływu odmiennych typów zaplecza plaży na modyfikację kierunków transportowych oraz na zróżnicowanie natężenia transportu eolicznego.

Prace terenowe wykonywano na wytypowanych wcześniej liniach przekrojowych. Na każdej linii przekrojowej zlokalizowano trzy punkty pomiarowe charakteryzujące plażę górną, środkową i dolną. Lokalizacja punktów pomiarowych warunkowana była szerokością plaży. W zależności od szerokości plaży dzielono profil poprzeczny plaży na trzy odcinki, w połowie każdego odcinka sytuowano punkt pomiarowy. W przypadku bardzo wąskiej plaży, na przekroju z zapleczem klifu wydmy zlokalizowano tylko jeden punkt pomiarowy na plaży górnej. Wykonywanie pomiarów w trzech punktach na linii przekrojowej umożliwiło rozpoznanie warunków aerodynamicznych oraz rozmiarów natężenia transportu eolicznego w strefie plaży dolnej, środkowej i górnej.

W wyznaczonych punktach pomiarowych wykonano pomiary intensywności transportu eolicznego chwytnym pionowym EŁ. Riabichina o wysokości 20 cm (1969, za BORÓWKA 1980), podzielonym na kolektory o wymiarach 1 cm². (Borówka zmodyfikował ten chwytny, podwyższając go z 10 do 20 cm). Czas

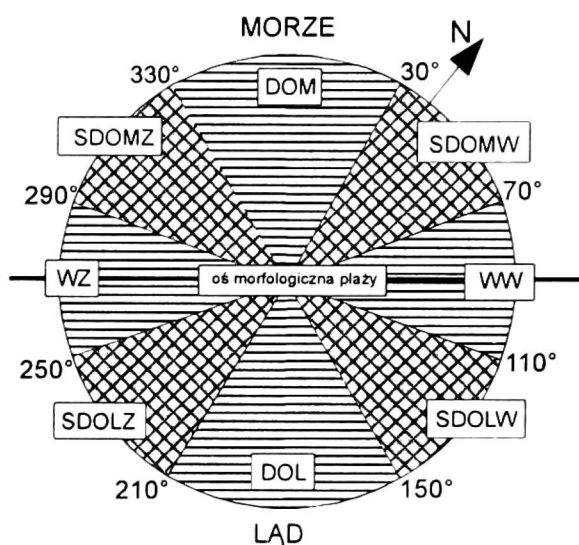
ekspozycji chwytacza, mierzony stoperem, dostosowany był do tempa wypełniania chwytacza materiałem i wahał się od kilkudziesięciu sekund do 4–5 minut. Pomiary wykonywano głównie w sezonach: jesiennym i wiosennym w ciągu trzech lat: 1995, 1996, 1997. W czasie pomiarów dodatkowo notowano średnią prędkość wiatru mierzoną anemometrem ręcznym A-1200 E na wysokości 1 m n.p.g. (producent: Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Automatyki i Urządzeń Precyzyjnych w Łodzi), zliczaną automatycznie w czasie 1 minuty.

Kierunki wiatrów oznaczano w punktach pomiarowych według lokalnej orientacji plaży na wysokości 1 m n.p.g. za pomocą skonstruowanej tablicy z oznaczonymi co 10 stopni kierunkami. Oś podłużną plaży traktowano jako kierunek 90–270°. W takim układzie kierunek odmorski, prostopadły do osi plaży, przybiera wartość 0° (360°). Jest on odchylony od kierunku północy o 40° ku zachodowi. Przyjęcie lokalnej skali kierunków wiatrów związane było z wykorzystaniem kierunków wiatru jako kryterium bilansowania transportu eolicznego na plaży (rys. 3).



Rys. 3. Układ lokalnych kierunków transportowych na plaży względem orientacji geograficznej

Fig. 3. Diagram of local transport directions on beach in relation to geographical orientation



Rys. 4. Schemat wydzielenia lokalnych sektorów transportowych

DOM – domorski, SDOMZ – skośny domorski zachodni, SDOMW – skośny domorski wschodni, WZ – wzdłużbrzegowy zachodni, WW – wzdłużbrzegowy wschodni, DOL – dolądowy, SDOLZ – skośny dolądowy zachodni, SDOLW – skośny dolądowy wschodni

Fig. 4. Schematic diagram of separation of local transport sectors

DOM – seaward, SDOMZ – oblique seaward western, SDOMW – oblique seaward eastern, WZ – longshore westward, WW – longshore eastward, DOL – landward, SDOLZ – oblique landward western, SDOLW – oblique landward eastern

Uwzględniając morfologię plaży jako wąskiego, płaskiego pasa rozciągającego się wzdłuż linii brzegowej, wydzielono zróżnicowane szerokością sektory transportowe, dla których określano związki natężenia transportu eolicznego i prędkości wiatru. Sektory wzdłużbrzegowe są węższe aniżeli sektory dolądowe i domorskie. Biorąc pod uwagę te cechy oraz stopień dokładności pomiarów terenowych kierunków wiatru, jak i danych stacji IMGW w Łebie (pomiar określany jest z dokładnością do 10°), wydzielono następujące sektory (rys. 4):

- wzdłużbrzegowy wschodni i zachodni (o szerokości 40°) (WW i WZ)
- skośny dolądowy wschodni (o szerokości 40°) (SDOLW)
- skośny dolądowy zachodni (o szerokości 40°) (SDOLZ)

- skośny domorski zachodni (o szerokości 40°) (SDOMZ)
- skośny domorski wschodni (o szerokości 40°) (SDOMW)
- prostopadły dolądowy (o szerokości 60°) (DOL)
- prostopadły domorski (o szerokości 60°) (DOM).

Dodatkowo wykonywano pomiary temperatury i wilgotności powietrza na wysokości 1 m n.p.g. za pomocą ręcznego termohigrometru (typu STYLO) oraz pomiary wilgotności powierzchni, zdzierając 2–3-milimetrową warstwę piasku i pakując ją do szczelnie parafinowanych epruwetek, które później ważono.

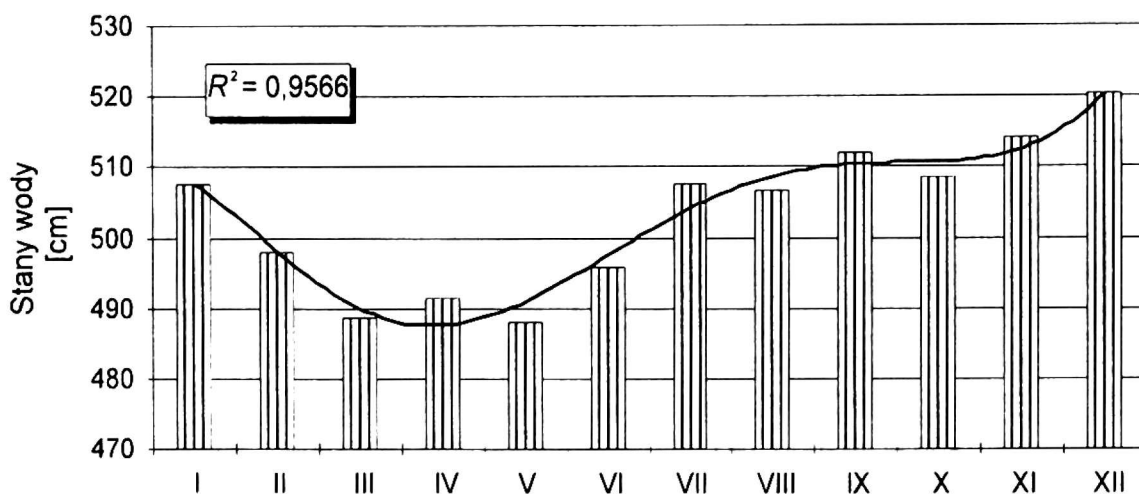
ZMIANY SZEROKOŚCI PLAŻY JAKO POWIERZCHNI ŹRÓDŁOWEJ TRANSPORTU EOLICZNEGO

Szerokość plaży jako powierzchni źródłowej transportu eolicznego warunkowana jest przede wszystkim zmiennością stanów wody Morza Bałtyckiego. Według DAVIDSON-ARNOTTA i LAWY (1990) dystans potrzebny do maksymalnego nasycenia strumienia wiatrowego wynosi 10–15 m dla prędkości ponadprogowych i wzra-

sta do 40 m dla wiatrów przekraczających 50 km/h (ok. 14 m/s).

Najwyższe stany wody na polskim wybrzeżu zdarzają się w sytuacjach cyklonalnych, gdy nad morzem występują sztormowe wiatry odmorskie wiejące z kierunków NW, N, NE, doprowadzające wodę do brzegów (MAJEWSKI i in. 1983; DZIADZIUSZKO, JEDNORAŁ 1987). Zdaniem tych autorów 55% przypadków spiętrzenia wód zdarza się przy cyrkulacji północnej (niżej wędrujące z kierunków N i NW), 31% przy cyrkulacji północno-zachodniej, 14% przypadków związanych jest z cyrkulacją północno-wschodnią. Najwyższe spiętrzenia sztormowe na południowym wybrzeżu Bałtyku mogą spowodować podniesienie się poziomu morza o 70-100 cm (MAJEWSKI i in. 1983; DZIADZIUSZKO, JEDNORAŁ 1987).

Analiza stanów wody w cyklu rocznym w wieloleciu pokazuje, że najwyższe średnie miesięczne stany wody występują w okresie jesienno-zimowym (okresy sztormowe), od września do grudnia, i wynoszą 520 cm (w grudniu). Najniższe stany wody występują w okresie wiosennym, od marca do maja, i wynoszą średnio 487 cm (marzec, maj) (rys. 5).



Rys. 5. Średnie miesięczne stany wody w latach 1971–1990 dla mareografu Łeba (zero wodowskazu = -500 cm NN₅₅ Amsterdam)

Fig. 5. Mean monthly sea-level in 1971–1990 – Łeba Marigraphic Station (zero of water-gauge = -500 cm NN₅₅ Amsterdam)

Tabela 1. Średnia szerokość plaży w latach 1995 i 1996 na badanych stanowiskach
Table 1. Mean beach width in 1995 and 1996 on studied profile sections

Kierunek wiatru	Kierunek transportu eolicznego	Szerokość plaży w roku 1995			Szerokość plaży w roku 1996		
		klif wydmowy	wydma	brama deflacyjna	klif wydmowy	wydma	brama deflacyjna
ODM	DOM	4,55	9,39	10,13	3,24	6,25	6,85
SODLZ	SDOMW	10,86	24,25	26,41	10,44	19,91	21,91
WZ	WW	13,07	69,14	53,23	30,49	41,35	39,86
SODMZ	SDOLW	5,79	12,30	10,88	2,56	6,29	8,31
ODL	DOL	2,06	3,25	4,94	0,77	1,93	2,16
SODMW	SDOLZ	2,11	4,01	5,90	2,11	3,97	5,44
WW	WZ	4,71	8,95	9,08	6,86	9,67	11,10
SODMW	SDOMZ	3,86	5,07	5,53	4,28	5,46	5,08

Współwystępowanie silnych wiatrów z kierunków odmorskich i podwyższonych stanów morza powoduje, że oddziaływanie potencjalnie efektywnych transportowo wiatrów ograniczone jest do stosunkowo wąskiej plaży (tab. 1).

Z opracowanego zestawienia wynika, że wiatry wiejące z sektorów: odmorskich, skośnych odmorskich wschodnich, skośnych odlądowych wschodnich i skośnych odlądowych zachodnich wpływają na ograniczenie szerokości plaży. Największe zmiany szerokości plaży notowane są przy wiatrach z sektorów odmorskich na stanowisku z klifem wydmowym na zapleczu. To stanowisko charakteryzuje się największym spośród badanych nachyleniem plaży oraz stosunkowo małą jej szerokością, osiągającą maksymalnie ok. 12 m.

Najszerza plaża towarzyszy zachodnim kierunkom wiatru. Prawidłowość ta dotyczy wszystkich badanych stanowisk. Potencjalnie więc transport eoliczny w kierunku wzdłużbrzegowym wschodnim (zachodnie kierunki wiatru) powinien charakteryzować się wysoką efektywnością eoliczną, wynikającą z szerokiej powierzchni źródłowej.

WPLYW SZEROKOŚCI PLAŻY NA EFEKTYWNOŚĆ TRANSPORTU EOLICZNEGO NA PLAŻY MIERZEJOWEJ

Badania transportu eolicznego materiału piaszczystego dowodzą, że oprócz prędkości wiatru także jego kierunki pełnią ważną rolę w transporcie na plaży (BORÓWKA 1986; NICKLING, DAVIDSON-ARNOTT 1990; BORÓWKA, ROTNICKI 1995). Obserwacje terenowe, jak i literatura dostarczają informacji o ograniczonym oddziaływaniu wiatrów odmorskich (BORÓWKA 1986; ARENS 1994a). Wspomniano już wcześniej, że zarówno na południowym wybrzeżu Bałtyku, jak i na wybrzeżach holenderskich oddziaływanie wiatrów z tych kierunków skorelowane jest z wysokimi poziomami wody, ograniczającymi szerokość plaży, wpływającymi na wzrost jej wilgotności i przyczyniającymi się w następstwie do redukcji transportu.

Ważnym wnioskiem wynikającym z badań NORDSTROMA i JACKSON (1992 i 1993) było stwierdzenie, że natężenie transportu z ukośnych kierunków odmorskich jest więcej niż dwudziestokrotnie wyższe aniżeli z prostopadłych kierunków odmorskich. Z kierunków prostopadłych odmorskich notowali oni największą zmienność natężenia transportu eolicznego. Podobnych obserwa-

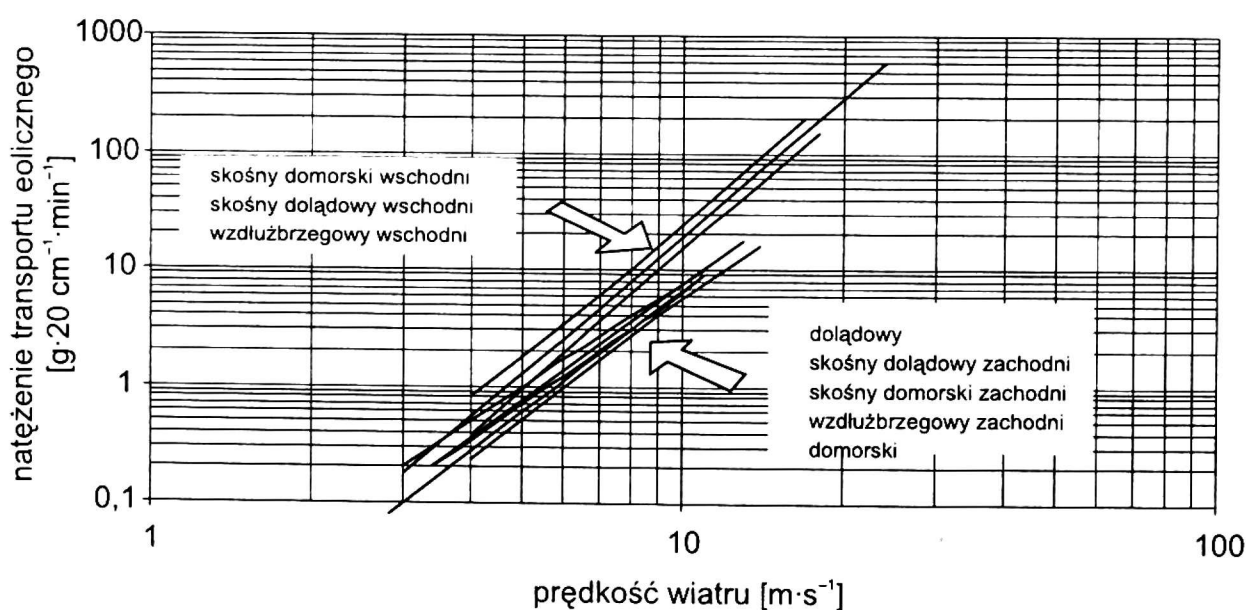
cji dostarczają także badania ARENSA (1994a) przeprowadzone na wybrzeżu Holandii.

Przyjęcie kryterium kierunków wiatrów przy bilansowaniu transportu eolicznego piasku na plaży pokazuje, iż nieodzowne staje się rozpoznanie roli kierunków wiatru w modyfikowaniu wielkości transportu eolicznego na plaży. Z tego też względu transport eoliczny, w przeciwieństwie do kierunków wiatru, przedstawiany jest nie z kierunku, a w kierunku przemieszczania się materiału piaszczystego.

Porównanie linii regresji określających związek natężenia transportu eolicznego i prędkości wiatru, według badanych sektorów transportowych w poszczególnych punktach pomiarowych, dostarcza następujących wniosków (rys. 6). We wszystkich badanych punktach pomiarowych linie regresji obliczone dla wyróżnionych sektorów transportowych zaznaczają się w postaci dwu grup. W jednej grupie znajdują się sektory, dla których notowano transport eoliczny charakteryzujący się największą efektywnością. Odpowiadają one transportowi notowanemu przy

prędkościach wiatru przekraczających 20 m/s. W drugiej grupie maksymalnie notowany transport odbywał się przy prędkościach wiatru wynoszących 10–12 m/s. Pierwsza grupa we wszystkich badanych punktach pomiarowych obejmuje sektory: wzdłużbrzegowy wschodni, skośny dolądowy wschodni, skośny domorski wschodni i niekiedy prostopadły dolądowy. Druga grupa natomiast – sektory: skośny domorski zachodni, skośny dolądowy zachodni, prostopadły domorski, wzdłużbrzegowy zachodni i prostopadły dolądowy.

Nie notuje się więc pomiędzy liniami regresji charakteryzującymi poszczególne kierunki transportowe tak istotnych różnic natężenia transportu eolicznego pomiędzy prostopadłymi dolądowymi i skośnymi dolądowymi kierunkami, jak to wykazywali NORDSTROM i JACKSON (1993) w swoich badaniach. Relacje pomiędzy badanymi punktami pomiarowymi oraz notowanym w nich natężeniem transportu według sektorów mają na Mierzei Gardnieńsko-Łebskiej bardziej skomplikowany charakter. Największe różnice transportu eolicznego notowane są pomiędzy sektorami: wzdłużbrzego-



Rys. 6. Związek natężenia transportu eolicznego i prędkości wiatru według sektorów transportowych: brama deflacyjna – plaża środkowa

Fig. 6. Relation between aeolian transport intensity and wind velocity for transport sectors: deflation gate – middle beach

Tabela 2. Natężenie transportu eolicznego [$\text{g} \cdot 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$] według sektorów transportowych przy prędkości $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Table 2. Intensity of aeolian transport [$\text{g} \cdot 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$] for local transport sections at wind velocity $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Punkty pomiarowe	Natężenie transportu eolicznego wg sektorów transportowych przy prędkości wiatru 10 m/s							
	DOL	SDOLZ	WZ	SDOMZ	DOM	SDOMW	WW	SDOLW
Klif wydmy – plaża dolna	4,94	3,09	2,91	3,82	3,41	5,35	5,70	5,17
Klif wydmy – plaża środkowa	4,94	5,10	5,49	5,31	7,70	7,95	10,59	9,99
Klif wydmy – plaża górna	7,55	4,37	4,61	3,92	5,46	11,44	7,67	9,81
Wał wydmy – plaża dolna	4,94	4,43	3,53	5,19	6,28	6,96	8,27	7,29
Wał wydmy – plaża środkowa	12,13	6,84	5,07	6,38	6,04	19,13	19,65	17,60
Wał wydmy – plaża górna	7,28	5,95	6,97	7,31	7,58	24,68	14,89	18,73
Brama deflacyjna – plaża dolna	6,16	4,54	4,97	4,20	4,56	11,80	11,62	9,03
Brama deflacyjna – plaża środkowa	12,09	4,64	5,07	5,45	4,23	17,64	17,27	16,10
Brama deflacyjna – plaża górna	12,69	6,24	6,00	5,79	6,08	16,47	14,54	21,22

wym wschodnim (lub skośnym domorskim wschodnim) a wzdłużbrzegowym zachodnim lub skośnym dolądowym zachodnim i dolądowym. W jednym punkcie pomiarowym mogą one być dziesięciokrotne, np. na plaży środkowej przy przekroju z wałem wydmy przedniej na zapleczu (przy 10 m/s – obserwuje się czterokrotne różnice) (tab 2).

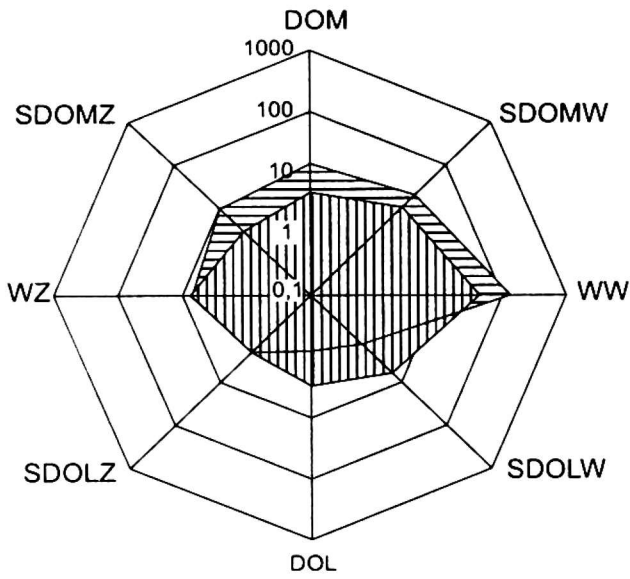
Porównanie zróżnicowania natężenia transportu eolicznego pomiędzy wszystkimi punktami pomiarowymi pozwala stwierdzić, że maksymalne odnotowane natężenie transportu eolicznego w kierunku wzdłużbrzegowym wschodnim na plaży środkowej, przy przekroju z wałem wydmy przedniej, przekracza trzydziestokrotnie natężenie transportu odnotowane w kierunkach prostopadłych domorskich czy skośnych domorskich zachodnich, przy takiej samej prędkości (20 m/s) na plaży dolnej, przy prze-

kroju z klifem wydmy na zapleczu (przy 10 m/s – różnica siedmiokrotna).

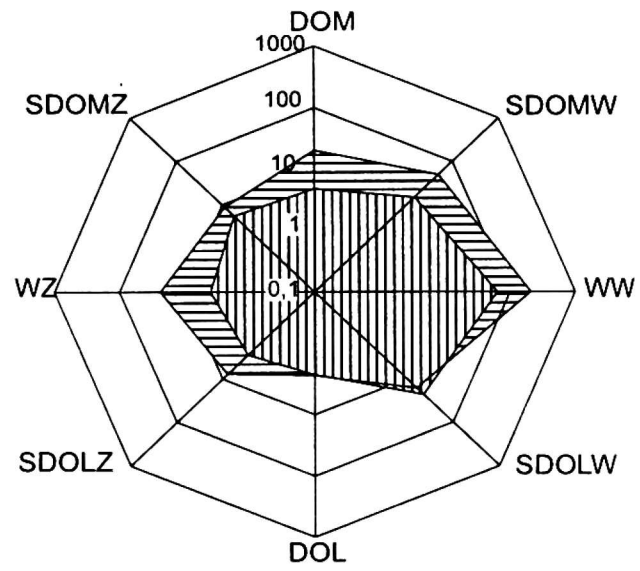
Z powyższych faktów można wyciągnąć wnioski, iż sektory dolądowe (prostopadły i skośny dolądowy zachodni) nie wykazują wysokiej efektywności transportu eolicznego, gdyż obydwa związane są z cyrkulacją sztormową, przyczyniającą się na wybrzeżu południowego Bałtyku do redukcji szerokości plaży. Duże zróżnicowanie natężenia transportu eolicznego dla tych samych sektorów transportowych w poszczególnych punktach pomiarowych wskazuje, że typ zaplecza plaży oraz szerokość plaży na linii przekrojowej warunkują w znacznym stopniu wielkość transportu eolicznego na plaży.

Na przekroju z zapleczem klifu wydmy, na plaży dolnej najwyższe wartości osiąga transport w kierunkach skośnych domorskich wschodnich

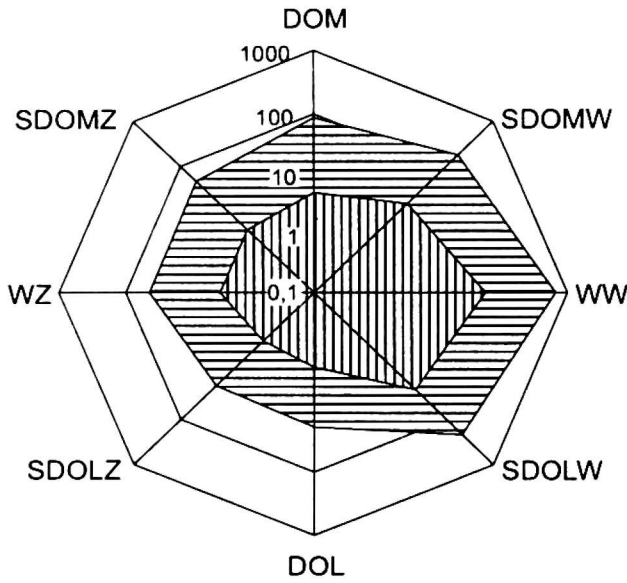
Klif wydmowy – plaża dolna



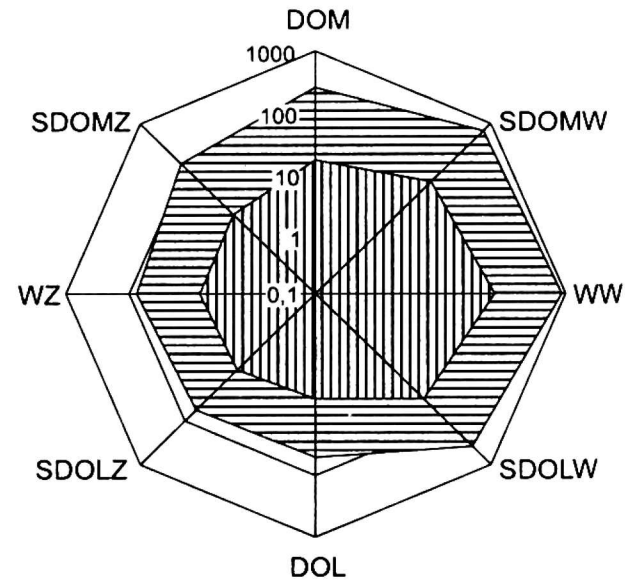
Klif wydmowy – plaża środkowa



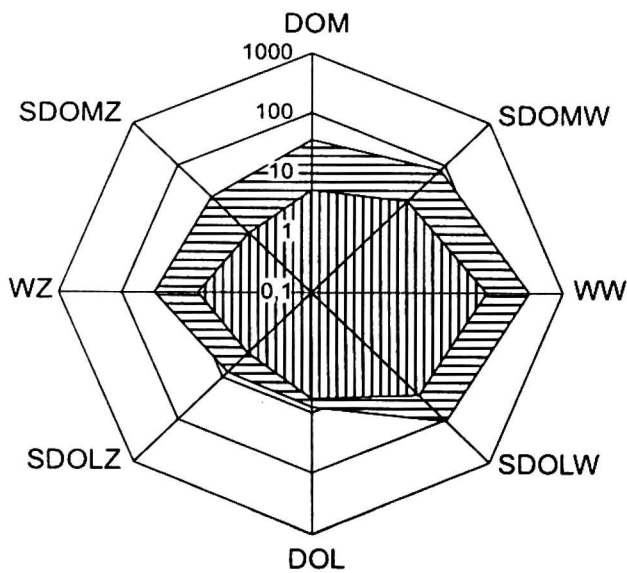
Wał wydmy przedniej – plaża dolna



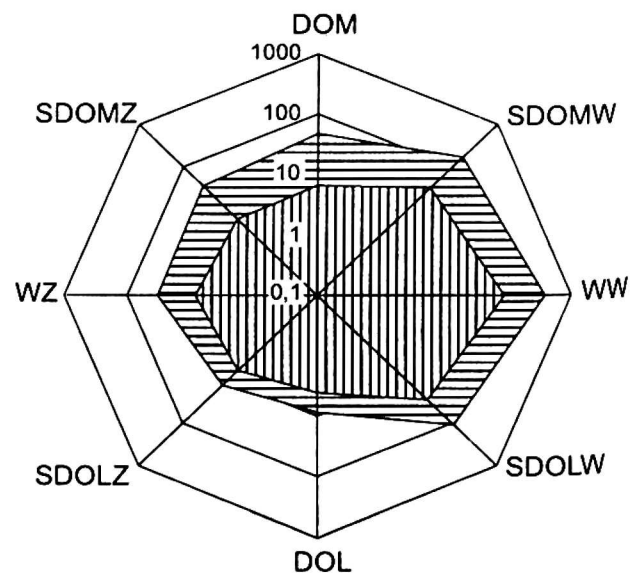
Wał wydmy przedniej – plaża środkowa



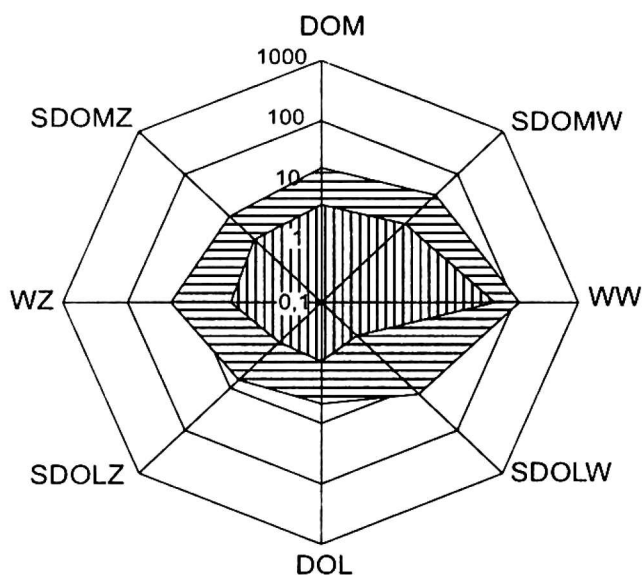
Brama deflacyjna – plaża dolna



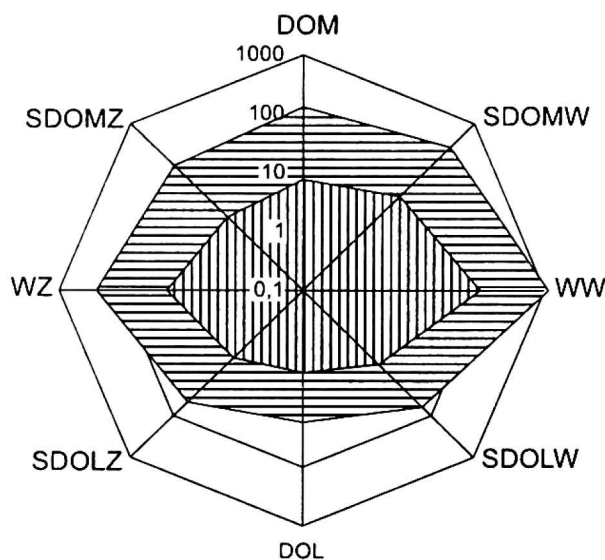
Brama deflacyjna – plaża środkowa



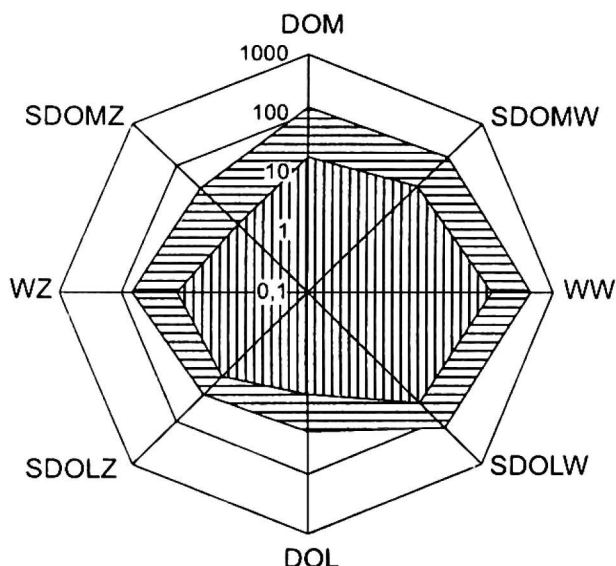
Klif wydmowy – plaża górna



Wał wydmy przedniej – plaża górna



Brama deflacyjna – plaża górna



i wzdłużbrzegowym wschodnim, szczególnie przy dużych prędkościach wiatru (>12 m/s). Natomiast na plaży środkowej i górnej na badanym stanowisku największe znaczenie ma transport w sektorze wzdłużbrzegowym wschodnim i skośnym domorskim wschodnim. Sektory dolądowe na przekroju tym nie odgrywają dużej roli w transporcie eolicznym ze względu na to, iż dużym prędkościom wiatru z kierunków odmorskich towarzyszą szybkie zmiany szerokości plaży wywołane wezbraniem sztormowymi, powodujące jej zalew. Prawidłowość ta dotyczy szczególnie plaży dolnej.

Na przekroju z zapleczem wału wydmy przedniej, na plaży dolnej najwyższa efektywność transportu eolicznego związana jest z sektorem wzdłużbrzegowym wschodnim i skośnym dolądowym wschodnim, na plaży środkowej – wzdłużbrzegowym wschodnim i skośnym domorskim wschodnim, a na plaży górnej – skośnym domorskim wschodnim, skośnym dolądowym wschodnim i wzdłużbrzegowym wschodnim. Przekrój ten charakteryzuje się znaczną szerokością plaży, której redukcja podczas podwyższonych stanów morza jest ograniczona. Szeroka plaża ponadto umożliwia nasycenie różnokierunkowych strumieni wiatrowo-piaszczystych.

Rys. 7. Struktura transportu eolicznego według lokalnych sektorów transportowych: z uwzględnieniem szerokości plaży (t/szerokość plaży dolnej, środkowej lub górnej/rok) i bez uwzględnienia szerokości plaży (t/m/rok)

Fig. 7. Structure of aeolian transport according to local transport sectors: taking into consideration beach width (tonne/width of the lower, middle or upper beach/year), and without taking beach width into consideration (t/m/year)

▨ t/szerokość plaży/rok ▧ t/m/rok

Na przekroju z zapleczem bramy deflacyjnej, który charakteryzuje się stosunkowo wąską plażą, w jej strefie dolnej i środkowej najwyższe wartości osiąga transport w kierunku wzdłużbrzegowym wschodnim i skośnym domorskim wschodnim, na plaży górnej – w kierunku skośnym dolądowym wschodnim. Na plaży górnej efektywność tego kierunku wymuszona jest sytuacją morfologiczną – przerwą w obrębie wału, która przy dużych prędkościach staje się tunelem aerodynamicznym i ukierunkowuje przypowierzchniowe strugi powietrza.

Na wszystkich stanowiskach najmniejsze wartości transportu eolicznego notowane są w kierunkach: prostopałym domorskim, skośnym domorskim zachodnim, wzdłużbrzegowym zachodnim, skośnym dolądowym zachodnim. Z tych kierunków notowane są małe prędkości wiatru, a więc nie notowane są wiatry sztormowe, dla których obserwowana jest największa efektywność transportu eolicznego. Na niższe wielkości natężenia transportu eolicznego notowane przy kierunkach domorskich wpływ może mieć także niewielka odległość pomiędzy wałem wydmy przedniej a punktami pomiarowymi, uniemożliwiająca, szczególnie w przypadku punktu pomiarowego na plaży górnej, nasycenie strumienia wiatrowo-piaszczystego przy tych kierunkach. Powyższe wnioski są potwierdzeniem wyników badań uzyskanych wcześniej przez BORÓWKĘ (1986), BORÓWKĘ, ROTNICKIEGO (1994, 1995); NICKLINGA, DAVIDSON-ARNOTTA (1990), NORDSTROMA, JACKSON (1992).

Jeszcze innych informacji dostarcza bilans transportu eolicznego wykonany na podstawie danych IMGW w Łebie (4 pomiary na dobę), przeliczony na podstawie wcześniej ustalonych zależności statystycznych pomiędzy danymi stacji

IMGW w Łebie a lokalnymi pomiarami terenowymi w 9 punktach pomiarowych. W bilansie rozumianym jako ilościowe zestawienie transportu eolicznego według wyróżnionych sektorów transportowych do szacowania wielkości transportu eolicznego wykorzystano równanie regresji wielokrotnej, uwzględniające takie zmienne, jak prędkość wiatru, temperatura powietrza i kierunki wiatru.

Na rysunku 7 przedstawiono zestawienie wielkości transportu eolicznego dla 9 punktów pomiarowych, bez uwzględnienia szerokości plaży (t/m/rok) oraz z uwzględnieniem szerokości plaży (t/szerokość plaży dolnej, środkowej lub górnej/rok). Aby porównać zróżnicowane ilościowo dane, zastosowano skalę logarytmiczną.

Opracowane zestawienie pokazuje wyraźne różnice ilościowe transportu eolicznego pomiędzy badanymi stanowiskami wynikające z innego wykształcenia zaplecza plaży na badanych stanowiskach, różnego nachylenia, topografii i pokrycia powierzchni plaży np. przez roślinność.

Natomiast w porównywanych rozmiarach transportu eolicznego w każdym punkcie pomiarowym zaznacza się wpływ szerokości plaży na rozkład transportu eolicznego w poszczególnych sektorach transportowych. Największa redukcja transportu eolicznego, warunkowana zmiennością szerokości plaży, dotyczy stanowiska z klifem wydmy na zapleczu, najmniejsza – plaży z wałem wydmy na zapleczu.

Na plaży dolnej i środkowej z klifem na zapleczu największe ograniczenia transportu wynikające ze zmniejszenia się szerokości plaży dotyczą kierunków: dolądowego i skośnego dolądowego wschodniego. Zmiany te nie zaznaczają się na plaży górnej, gdyż w tym wypadku na rozkład kierunków transporto-

wych większy wpływ wywiera zaplecze plaży – klif wydmowy, modyfikujący kierunki wiatru do wzdłużbrzegowych.

Na stanowisku z zapleczem wydmowym, jak już wspomniano wcześniej, redukcja szerokości plaży jest mniejsza i nie ma wyraźnego odbicia w redukcji transportu eolicznego.

Natomiast na trzecim analizowanym stanowisku z bramą deflacyjną na zapleczu ograniczenie wielkości transportu eolicznego dotyczy szczególnie kierunku dolądowego na plaży dolnej i środkowej. Pozostałe kierunki dolądowe również wskazują na redukcję szerokości plaży i ograniczenie transportu eolicznego, ale już w mniejszym stopniu, we wszystkich punktach pomiarowych.

WNIOSKI

Przeanalizowanie zależności pomiędzy natężeniem, rozmiarami i kierunkami transportu eolicznego a zmiennością warunków meteorologicznych oraz zmianami szerokości plaży Mierzei Gardnieńsko-Łebskiej pozwala na przedstawienie następujących stwierdzonych prawidłowości:

1. Wiatry wiejące z sektorów: odmorskich, skośnych odmorskich wschodnich, skośnych odlądowych wschodnich, skośnych odlądowych zachodnich wpływają na ograniczenie szerokości plaży.

2. Największe zmiany szerokości plaży notowane są przy wiatrach z sektorów odmorskich na stanowisku z klifem wydmowym na zapleczu. To stanowisko charakteryzuje się największym spośród badanych nachyleniem plaży oraz stosunkowo małą jej szerokością, maksymalnie osiągającą ok. 12 m.

3. Najszerza plaża na wszystkich badanych stanowiskach towarzyszy zachodnim kierunkom wiatru.

4. Analiza natężenia transportu eolicznego według wyróżnionych sektorów transportowych wykazała jego zróżnicowanie we wszystkich punktach pomiarowych. Ze względu na efektywność transportu eolicznego można wydzielić dwie grupy sektorów transportowych. Jedna grupa obejmuje sektory, z których notowano transport przy prędkościach przekraczających 20 m/s, druga – kierunki wiatru, z których maksymalne prędkości transportowe nie przekraczają 10–12 m/s. Do pierwszej grupy należą sektory: wzdłużbrzegowy wschodni, skośny dolądowy wschodni, skośny domorski wschodni i prostopadły dolądowy. Druga grupa obejmuje sektory: skośny domorski zachodni, skośny dolądowy zachodni, wzdłużbrzegowy zachodni i prostopadły domorski.

5. Kierunkami o wysokiej efektywności transportu eolicznego na plaży są kierunki: wzdłużbrzegowy wschodni (na wąskiej plaży), skośny dolądowy wschodni lub skośny domorski wschodni (na plaży szerokiej, przy niewysokim zapleczu plaży).

6. Największa redukcja transportu eolicznego, warunkowana redukcją szerokości plaży, dotyczy stanowiska z klifem wydmowym na zapleczu, najmniejsza – plaży z wałem wydmowym na zapleczu.

7. Redukcja szerokości plaży ogranicza rozmiary transportu eolicznego w największym stopniu w kierunku prostopadłym dolądowym i skośnym dolądowym wschodnim na plaży dolnej i środkowej z klifem wydmowym na zapleczu oraz kierunku dolądowym na plaży dolnej i środkowej z bramą deflacyjną na zapleczu.

LITERATURA

- BAUER B.O., SHERMAN D.J., NORDSTROM K.F., GARES P.A., 1990: Aeolian transport measurement and prediction across a beach and dune at Castroville, California. [W:] K. Nordstrom, N. Psuty, B. Carter (red.), *Coastal Dunes: Form and processes*. John Wiley sons. 39–53.
- BORÓWKA M., 1986: Współczesne procesy modelujące powierzchnię plaży piaszczystej morza bezpływowego. *Archiwum Zakładu Geologii i Paleogeografii Czwartorzędu, Instytut Badań Czwartorzędu UAM, Poznań, praca doktorska [maszynopis]*.
- BORÓWKA M., ROTNICKI K., 1994: Intensity, directions, and balance of aeolian transport on the beach and the problem of sand nourishment of the active dune field of the Łeba Barrier. [W:] K. Rotnicki (red.), *Changes of the Polish Coastal Zone, IGU Commission on Coastal Systems, Symposium on Changes of Coastal Zones, Gdynia, Poland, 1994, Poznań, 108–115*.
- BORÓWKA M., ROTNICKI K., 1995: Balance of the aeolian sand transport on the beach and the problem of sand nourishment of the active dune field on the Łeba Barrier. [W:] K. Rotnicki (red.), *Polish Coast: Past, Present and Future. Special Issue nr 22, autumn 1995. Journal of costal research. An International Forum for the Littoral Sciences, 257–267*.
- BORÓWKA R.K., 1980: Współczesne procesy transportu i sedymentacji piasków eolicznych oraz ich uwarunkowania i skutki na obszarze wydm nadmorskich. *Prace Kom. Geogr.-Geol. PTPN, 20*.
- DAVIDSON-ARNOTT R.W.G., LAW M.N., 1990: Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes. [W:] K. Nordstrom, N. Psuty, B. Carter (red.), *Coastal Dunes: Form and processes*. John Wiley sons., 177–199.
- DZIADZIUSZKO Z., JEDNORAŁ T., 1987: Wahania poziomów jezior na polskim wybrzeżu Bałtyku. *Studia i Materiały Oceanologiczne, 52. Dynamika Morza, 6, 215–238*.
- GOLDSMITH V., ROSEN P., GERTNER Y., 1990: Eolian transport measurements, winds, and comparison with theoretical transport in israeli coastal dunes. [W:] K. Nordstrom, N. Psuty, B. Carter (red.), *Coastal Dunes: Form and processes*. John Wiley sons., 79–101.
- MAJEWSKI A., DZIADZIUSZKO Z., WIŚNIEWSKA A., 1983: *Monografia powodzi sztormowych 1951–1975. Atlasy i Monografie IMGW, Warszawa*.
- NORDSTROM K.F., JACKSON N.L., 1992: Effect of source width and tidal elevation changes on transport on an estuarine beach. *Sedimentology, 39, 769–778*.
- SHERMAN D.J., HOTTA S., 1990: Aeolian sediment transport: Theory and measurement. [W:] K. Nordstrom, N. Psuty, B. Carter (red.), *Coastal Dunes: Form and processes*. John Wiley sons., 17–33.

Recenzent: prof. dr hab. Bolesław Nowaczyk

Zakład Geologii i Paleogeografii Czwartorzędu
Instytut Badań Czwartorzędu i Geoekologii
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu

EFFECT OF BEACH WIDTH ON INTENSITY OF AEOLIAN TRANSPORT ON THE BEACH OF THE GARDNO-ŁEBA BARRIER

Summary

The article presents the influence of beach width on reduction of aeolian transport on the Gardno-Łeba Barrier. The study was carried out on three profile sections from different hinterlands: a dune cliff, a foredune and a deflation gate. The analysis of changes in the beach was referred to the different intensity of aeolian transport, which was dependent on wind direction – a derivative of the south Baltic shoreline storm circulation. The results indicate that the onshore, oblique onshore east, oblique

offshore east, and offshore west winds were correlated with the maximum reduction of beach width. The greatest changes in beach width were observed at onshore sectors on the cliff sections. The widest beaches of all sections were correlated with longshore wind directions. The highest effectiveness of aeolian transport was observed for longshore wind direction (on the narrow beach) and for oblique offshore east or oblique onshore east wind directions (on the wide beach and moderate hinterland of the beach).