INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH

Nr 2/1/2006, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 15–32
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Artur Radecki-Pawlik, Paul Carling, Emil Gölz

BUDOWA GRANULOMETRYCZNA I GEOMETRYCZNA FORM DENNYCH RZEKI NIZINNEJ RZEKI REN

Streszczenie

W artykule przedstawiono budowę granulometryczną oraz geometryczną form dennych rzeki nizinnej zwanych inaczej wydmami dennymi. Wydmy są typowymi utworami dennymi rzeki nizinnej o dnie piaskowym. Studiowanie procesu ich powstawania jest wyjątkowo istotne w celu poznania działania systemów fluwialnych. Także znajomość graunulometrii i struktur sedymentacyjnych wydm dennych jest ważna z punktu widzenia geologii oraz paleogeologii.

W pracy pokazano, że badane wydmy reńskie nie osiągają takiej wysokości, na jaką pozwalałaby aktualna głębokość wody. Przyczyn tej sytuacji można upatrywać w braku na badanym odcinku Renu przepływu o odpowiednio długim czasie trwania, a w związku z tym w niewystarczającej dostawie materiału dennego. Dla warunków badanego odcinka pomiarowego Renu zależności funkcyjne pomiędzy stromością a długością wydm obliczone na podstawie danych z lat 1991 i 1992 opisują następujące równania, odpowiednio: $H/L = 0{,}082\ L^{-0{,}55}$ i $H/L = 0{,}104\ L^{-0{,}63}$. Bezpośrednie wykonane za pomocą dzwonu do nurkowania pomiary gęstości objętościowej piasku budującego wydmy wykazały, że gęstość ta wynosi 1,5–1,69 $g \cdot cm^{-3}$. Tak niewielką wartość gęstości objętościowej piasku budującego wydmy na Renie należy przypisać faktowi, że wydmy te podlegają ciągłemu procesowi transformacji. Praca powstała na rzece Ren w Niemczech w okolicach Moguncji, a jej realizacja była możliwa dzięki współpracy międzynarodowej z instytutami badawczymi w Wielkiej Brytanii i Niemczech oraz dofinansowaniu British Council Polsce.

Słowa kluczowe: formy denne, rzeka nizinna, morfologia dna, skład granulometryczy

WSTĘP

Formy denne są jednymi z ważniejszych elementów w morfologii dna koryta rzeki nizinnej o dnie piaszczystym. Powstawanie form dennych zależy od wielkości transportowanego materiału dennego oraz prędkości płynącej wody. Formy denne mają generalnie wielkość od kilkudziesięciu metrów do kilku centymetrów. Zbudowane są przeważnie z ziaren drobnych (w korytach rzek nizinnych) [Allen 1971] oraz z ziaren grubszych (w korytach rzek żwirowych) [Radecki-Pawlik 2002]. Duże formy denne rzeki o dnie piaskowym znane są pod nazwą wydm [*ang. dunes*], ale także występują pod innymi nazwami. W literaturze obcojęzycznej nazewnictwo form dennych rzek nizinnych podawało wielu badaczy. Najważniejsze prace poruszające tę tematykę są autorstwa Leliavskyego [1965], Allena [1971], Allena [1997], Grafa [1971] oraz Yalina [1972]. Mimo to, do niedawna nazewnictwo form dennych i korytowych było niespójne i niejasne [Ashley 1990], wszelkie formy denne rzeki nizinnej nazywano wydmami, a formy korytowe rzeki górskiej – dennymi. Dopiero prace polegające na wyjaśnieniu i uporządkowaniu nazewnictwa, przeprowadzone w 1987 roku w Austin w Teksasie dały podwaliny dla nowoczesnego nazewnictwa utworów dennych [Ashley 1990]. W literaturze polskiej, przykładowo, jedną z form dennych zwaną z angielskiego „dune" tłumaczono jak dotąd na kilka sposobów. W publikacji Allena J.R.L [1971] wyraz „dune" tłumaczony jest jako „wydma". Z kolei w książce Dąbkowskiego i innych [1982] wyraz „dune" tłumaczony jest jako „fałda". Kolejną wersją nazwy „dune" proponuje tłumaczenie książki Allena P.A. [1997] na wyraz „pręga". Autor niniejszego artykułu pozostał przy tradycyjnej nazwie proponowanej m.in. przez największego polskiego geomorfologa Klimaszewskiego [1995], gdzie wyraz „dune" tłumaczony jest po prostu jako wydma (także u Gładki [1976]). Rola wydm uzasadniona jest poprzez ich rozmiary geometryczne, usytuowanie oraz wpływ na warunki hydrauliczne przepływu, głównie na opory ruchu i szorstkość [Allen 1971; Ashley 1990; Bogardi 1978]. Formy denne rzeki nizinnej były lub są tematem pracy wielu badaczy [Allen 1971; Bogardi 1978; Dąbkowski i in. 1982; Graf 1971; Przedwojski 1998; Radecki-Pawlik 2002], a szczególne zainteresowanie nimi nasiliło się w ostatnich latach, ponieważ utwory te, występujące w korytach rzek uregulowanych tworzą problemy nawigacyjne. Podczas niżówek wielkozanurzeniowe barki, pomimo zachowanej głębokości nawigacyjnej, zaczepiają dnem o formacje piaskowe,

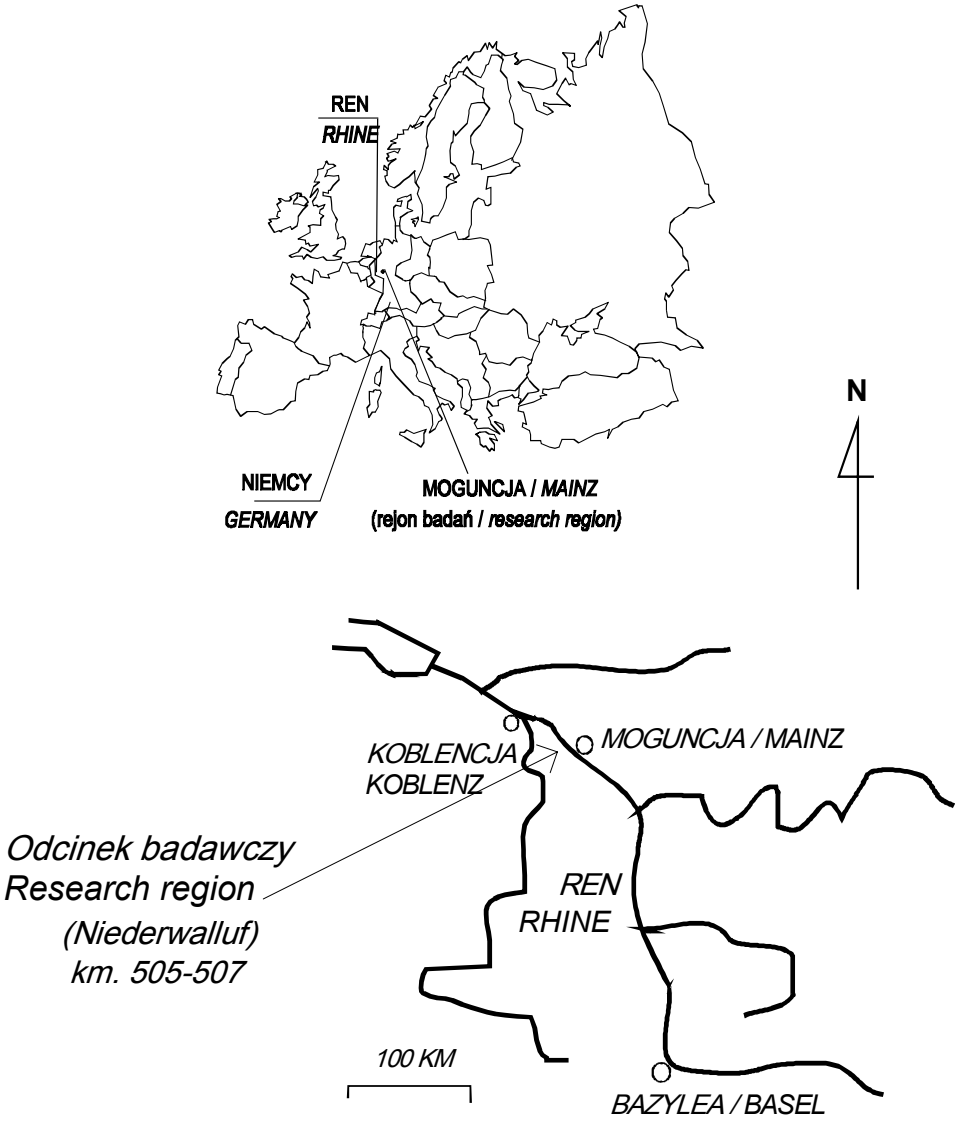
co w konsekwencji jest powodem zatrzymania barek lub ich uszkodzenia (problemy takie występują przykładowo na rzece Ren, poniżej zapory w Iffezheim zbudowanej w kilometrze 334+00 [Gölz 1990]).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie budowy geometrycznej oraz granulometrycznej wydm piaskowych powstających wzdłuż odcinka rzeki Ren w Niemczech. Praca ma charakter badawczy, podstawowy. Pracę zrealizowano w ramach wspólnych badań autora z Institute of Freshwater Ecology w Ambleside w Wielkiej oraz Niemieckiego Instytutu Hydrologicznego (BFG – Bundesaltstalt für Gewasserkunde) w Koblencji.

OPIS OBIEKTU BADAŃ

Na rejon badawczy wybrano część zlewni rzeki Ren poniżej Moguncji, w rejonie miasta Niederwalluf (rys. 1). Ren płynie w tym miejscu poniżej zapory Iffezheim w kilometrze 334+00. Zarówno dno rzeki, jak i jej brzegi nie wykazują tendencji do szczególnej agradacji lub erozji [Gölz 1994]. Źródłem budulca piaskowego, który pojawia się w rzece w okolicach Niederwalluf i tworzy piaskowe formy denne, jest erozja części dna położonego około 10 kilometrów powyżej przekroju pomiarowego oraz materiał wyerodowany ze zboczy otaczających rzekę [Carling i in. 2000]. Erozja dna na tym odcinku wynika ze specyficznej budowy geologicznej, a w szczególności nagromadzenia materiałów czwartorzędowych na krótkim odcinku cieku. Częściowo materiał piaskowy budujący wydmy w przekroju Niederwalluf dostarczany jest przez rzeki Neckar i Main. Na odcinku górnego Renu, poniżej zapory Iffezheim, formy denne przemieszczają się z prędkością około 40 metrów na dzień.

Przesuwając się w dół rzeki, w związku z gwałtownym załamaniem się spadku dna i zmniejszeniem prędkości średniej wody, migracja piaskowych form dennych po dnie Renu ulega zwolnieniu do kilku metrów na dzień. Powoduje to powstawanie olbrzymich form dennych pomiędzy kilometrem 495+00 (Moguncja) i kilometrem 508+00 (Bingen). Tak duża akumulacja materiału dennego powoduje wypłycenie koryta rzeki, co w konsekwencji zatrzymuje ruch statków i barek, powodując poważne problemy nawigacyjne.



Rysunek 1. Rejon badań
Figure 1. Research region

W Renie można wyróżnić dwie populacje wydm: dwuwymiarowe, o długości do kilku metrów i wysokości do kilkunastu centymetrów oraz trójwymiarowe, o długości do kilkudziesięciu metrów i wysokości do kilkudziesięciu centymetrów. Badane wydmy w większości są

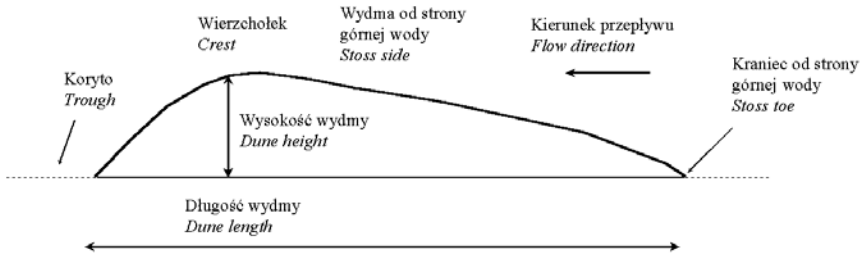
dwuwymiarowe z relatywnie prostą i łagodnie zaokrąglającą się linią grzbietową. Generalnie układają się równolegle do kierunku przepływu wody. Część wydm to formacje trójwymiarowe z zaokrąglonymi punktami szczytowymi (ang. *crest*) w kierunku przepływu głównego lub lokalnego [Allen 1971].

METODYKA BADAŃ

Dane dotyczące form dennych rzeki nizinnej zebrano na przełomie lat 1991–1995, podczas kilku kampanii pomiarowych. W celu pomiarów morfologicznych wydm wykonano bezpośrednie pomiary z dzwonu do nurkowania oraz pomiary pośrednie, stosując echosondę (echosondowanie liniowe). Ustalono długość i wysokość poszczególnych dużych form dennych, a także zmarszczek. Pomiary echosondowe służyły także określeniu prędkości migracji wydm. Próbki materiału do badań granulometrycznych budującego formy denne pobrano bezpośrednio z dna rzeki metodą pudełkową (ang. *box coring*) [Carling i in. 1993], aby następnie odtworzyć przekroje wydm w warunkach laboratoryjnych (utrwalając przekroje pobranych prób na płaszczyźnie za pomocą lepiszcza) .

Pomiary wysokości wydm z udziałem echosondy i dzwonu do nurkowania wykonywano podczas różnych stanów wody monitorowanych na wodowskazie w Moguncji (gdzie średni poziom wody wynosi 3,03 m, a dla przepływu pełnokorytowego SWW = 7,0 m). Średnia głębokość wody podczas pomiarów w przekroju obliczeniowym w Niederwalluf kształtowała się w granicach 3,5–6,5 m. Szerokość przekroju pomiarowego wynosiła średnio 500 m. Podczas pomiarów w latach 1991 i 1992 łącznie zlokalizowano 1153 wydmy. Pomiary morfologiczne dna cieku wykonano za pomocą trzech różnego rodzaju echosond. Poczynając od rutynowej echosondy badającej konfigurację dna (o dokładności 5 cm), poprzez echosondę przenośną, podwieszoną do platformy dzwonu do nurkowania (o dokładności 10 cm), aż do echosondy trójwymiarowej skanującej dno w pasie o szerokości 100 m z dokładnością do 15 cm. Pomiary echosondowe były następnie weryfikowane za pomocą bezpośrednich pomiarów wysokości wydm na dnie rzeki z dzwonu, a także kontrolowane sondowaniami dna za pomocą łat pomiarowych. Pomiary bezpośrednie były możliwe dzięki użyciu dzwonu do nurkowania, który opuszczano na dno, nie powodując naruszenia struktury wydm i zmarszczek dennych. Dzwon mógł być opuszczany do maksymalnej głębokości 8 m, następnie woda

z dzwonu była wypompowywana, co umożliwiało bezpośredni dostęp do dna rzeki. Pomiaru wydm dokonywano, mierząc ich długość (L), wysokość (H), poziomą długość od strony dolnej wody wydmy (ang. *lee side*) – L_l oraz poziomą długość od strony górnej wody wydmy (ang. *stoss side*) – L_s. Szkic pomiarowy wydmy przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Schemat punktów charakterystycznych wydmy
Figure 2. Characteristic points of a dune

Badaniami składu granulometrycznego objęto zarówno wewnętrzną, jak i zewnętrzną strukturę wydm. Badania te wykonano za pomocą pomiarów bezpośrednich na dnie rzeki, pobierając próby w punktach charakterystycznych wydm metodą pudełkową [Carling i in. 1993], a także pobierając bezpośrednio materiał piaskowy do pojemników, aby następnie poddać go analizie wagowo-sitowej w laboratorium. Wewnętrzna struktura wydm była badana za pomocą wspomnianej już sondy pudełkowej, a także przez wykonanie w wybranych wydmach głębokich przekrojów poprzecznych. Przeprowadzono również pomiary inklinometryczne nachylenia strony odprądowej i zaprądowej wydm.

WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

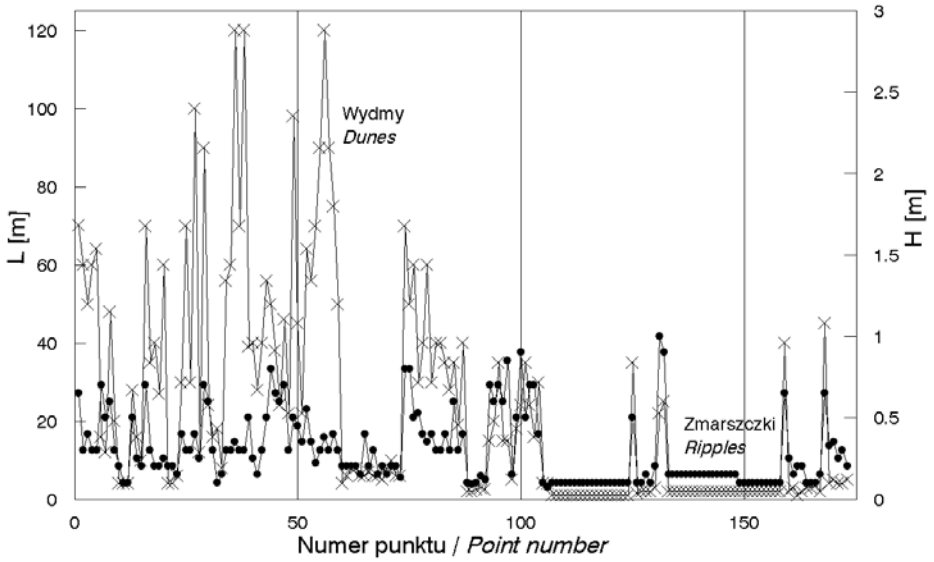
Obserwacje form dennych na rzece Ren pozwalają na stwierdzenie, że materiał koryta buduje wydmy zróżnicowane, o zmiennej wysokości i długości. Generalnie wydmy można podzielić na duże i małe. Do dużych zaliczamy wydmy o długości od metra do dziesiątek metrów i o wysokości nieprzekraczającej 1,5 m, zaś do małych wydmy, których długość wynosi od kilku centymetrów do kilku metrów, a wysokość nie przekracza kilkunastu centymetrów. Oprócz wydm na dnie Renu zaobserwowano także zmarszczki, których wymiar można mie-

rzyć w decymetrach. Często, lecz nie zawsze, małe wydmy znajdowano od strony dolnej wody wydm dużych. W niektórych miejscach tworzyły się one obok nich, bezpośrednio na płaskim dnie. Na dnie płaskim, w rejonach bez wydm stwierdzono także obecność zmarszczek. Dane z lat 1991 i 1992 pokazują, że małe wydmy zmniejszały się zarówno na długości, jak i na wysokości w miarę jak przesuwały się w stronę najwyższego punktu dużej wydmy, po jej grzbiecie, natomiast rosły, wtedy gdy poruszały się w dół strony odprądowej dużych wydm. Mimo, że badane wydmy podzielono na wydmy duże i małe (zgodnie z propozycjami Ashley [1990]), nie stwierdzono żadnej różnicy w ich budowie granulometrycznej. Zaobserwowano również, że na większych obszarach dna istnieją rejony intensywnie pokryte wydmami, jak i równoległe do nich obszary o dnie płaskim, bez form dennych.

Wydmy duże miały silnie zakrzywione punkty szczytowe (szczególnie wydmy trójwymiarowe) i wykazywały tendencję do łączenia się w sposób nieregularny w grupy po kilka. W tym samym czasie zaobserwowano wydmy występujące indywidualnie. Wydmy małe były głównie dwuwymiarowe, z reguły występowały w grupach, układały się w nich równolegle do siebie, a ich szczyt był zazwyczaj ostro zakończony. Geometrię wydm opisuje się, definiując dwa parametry: wysokość w punkcie szczytowym (H) oraz długość (L). Na podstawie tych dwóch parametrów wprowadza się tzw. wskaźnik stromości wydmy (H/L). Pomiary (H) i (L) wykonano bezpośrednio na dnie rzeki za pomocą dzwonu do nurkowania MS Kaiman oraz pośrednio, mierząc ich długość i wysokość z wydruków echosondowych (statek MS Dhron). Pomiary długości i wysokości wydm wykonano z trzech powodów. Po pierwsze, założono, że dane uzyskane z Renu mogą być porównane z danymi w opublikowanej literaturze przedmiotu i dodatkowo z klasycznymi funkcjami empirycznymi dotyczącymi geometrii wydm, aby ewentualnie wychwycić różnice lub podobieństwa pomiędzy formacjami dennymi Renu a innymi formacjami piaskowymi rzek nizinnych. Porównanie tego typu może sugerować, że w warunkach Renu istnieją specyficzne warunki hydrauliczne dotyczące transportu rumowiska dennego. Po drugie funkcje empiryczne podawane w literaturze zwykle dotyczą warunków pewnej równowagi (warunków średnich). Porównanie funkcji empirycznych z danymi uzyskanymi na Renie pozwala określić, w jaki sposób wydmy denne Renu odbiegają od stanu tej równowagi i stwierdzić, czy dane z Renu powinny być rozpatrywane oddzielnie, czy też ogólne równania klasyczne mogą się

odnosić się także do nich. Po trzecie założono, że dane geometryczne Renu mogą być wykorzystane do sformułowania autorskich równań empirycznych opisujących geometrię wydm, a później być przydatne w modelowaniu matematycznym.

Rysunek 3 przedstawia długości i wysokości poszczególnych wydm zmierzone podczas kampanii pomiarowej w roku 1992, z wykorzystaniem do tego celu dzwonu do nurkowania oraz za pomocą echosondy. Ze względu na ograniczoną długość dzwonu, bezpośrednio na dnie mogły być pomierzone, tylko wydmy o długości do 5 m. Na rysunku 4 przedstawiono zależność wysokości od długości wydmy (tu: przykładowo dla pomiarów zrealizowanych w roku 1992).



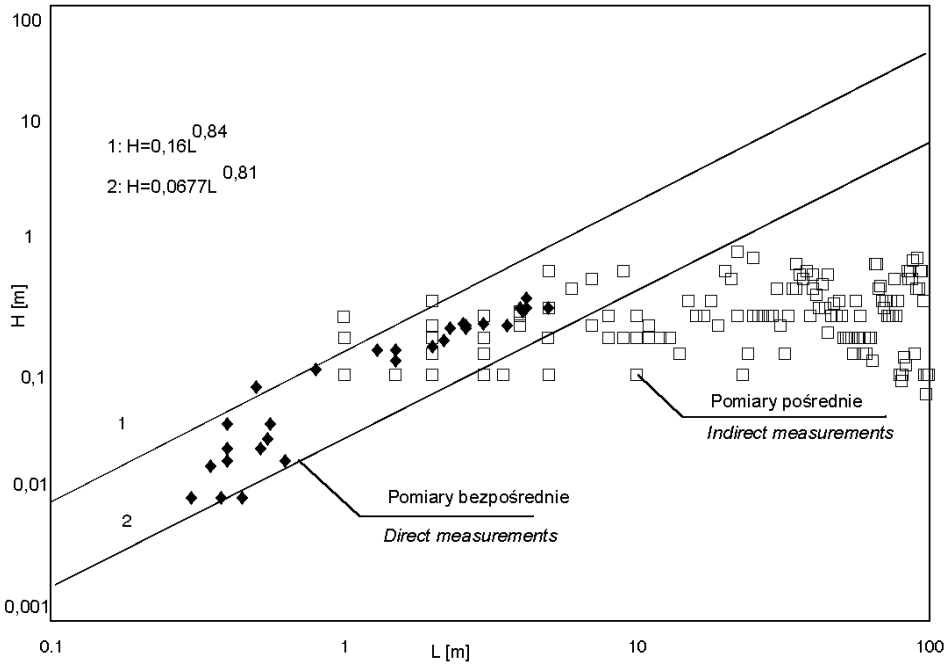
Rysunek 3. Długość (L) i wysokość (H) wydm
– pomiary z udziałem echosondy
Figure 3. Length (L) and high (H) of dunes – echosonding observations

Na wykresie naniesiono linie wyznaczone przez Flemminga [1988], który przeanalizował dane dotyczące długości i wysokości wydm kilkunastu rzek o dnie piaszczystym. Ashley w 1990 r., analizując wskaźniki podane przez Flemminga, stwierdziła brak informacji o wydmach mających długość 0,5–1,0 m. Dane z Renu uzupełniają tę

lukę. Równanie prostej, stanowiącej ograniczenie górne danych, przedstawione przez Flemminga ma postać:

$$H = 0{,}16\, L^{0{,}84}$$

Równanie to określa górny limit, powyżej którego nie zaobserwowano powiększania się wydm. Linia dolna naniesiona na rysunku 4 przedstawia równanie regresji dotyczące wszystkich danych zebranych przez Fleminga [1988] (w pracy tego autora przedstawione jako $H = 0{,}0677\, L^{0{,}8098}$). Rezultaty uzyskane z pomiarów na Renie pokazują, że dane tej rzeki generalnie potwierdzają obserwacje cytowanego badacza oraz uzupełniają je o informacje na temat wydm krótkich. Wyjątek stanowiły wydmy o długości powyżej 20 m. Wydmy o takiej długości były bardziej płaskie niż wydmy, przedstawione w pracy Fleminga [1988].



Rysunek 4. Zależność wysokości wydmy (H) od jej długości (L) – przykład z roku 1992
Figure 4. Length (L) versus high (H) of dune – the 1992 example

Allen w 1968 r. zestawił dane z różnych prac dotyczące indeksu stromości wydm i wyraził stromość wydm w zależności od ich długości:

$$H/L = 0{,}074\ L^{-0{,}23}$$

Dane z Renu (oddzielnie z pomiarów w 1991 i 1992 r.) zostały naniesione na wykres zależności stromości (H/L) od długości (L) wydmy i porównane z funkcją uzyskaną przez Allena [1968]. Zauważono, że funkcji tej odpowiadały tylko małe wydmy. Wydmy duże były wyraźnie bardziej płaskie i dłuższe. Zależności funkcyjne pomiędzy stromością a długością wydm obliczone na podstawie danych z lat 1991 i 1992 opisują następujące równania:

1991: $H/L = 0{,}082\ L^{-0{,}55}$ ($r^2 = 0{,}76$; $F_{1,\,208} = 654{,}74$; $p > 0{,}001$)

1992: $H/L = 0{,}104\ L^{-0{,}63}$ ($r^2 = 0{,}84$; $F_{1,\,171} = 914{,}35$; $p > 0{,}001$)

gdzie: r – współczynnik korelacji, F – wartości rozkładu $F_{n,\,m,}$ dla n, m stopni swobody, p – poziom istotności rozkładu F.

W celu znalezienia kąta nachylenia wydmy od strony dolnej wody (ang. *stoss*) i od strony wody górnej (ang. *lee side*) wykonano kilkadziesiąt pomiarów echosondowych, zarówno liniowych, jak i przestrzennych. Wyniki wykonanych bezpośrednio za pomocą dzwonu do nurkowania pomiarów małych wydm przedstawiono w tabeli 1. Zauważono, że kąt nachylenia takich wydm od strony wody górnej wyniósł od 1° do 23°, a od strony wody dolnej pomiędzy 25° do 31°. W wypadku wydm trójwymiarowych (dużych) w ich części centralnej, kąt nachylenia od strony wody dolnej wyniósł średnio 30°. Różnica ta spowodowana jest faktem, że w części środkowej duże wydmy trójwymiarowe są bardziej strome, ponieważ zbierają więcej materiału dennego, a ich brzegi ulegają spłaszczeniu, niejako gubiąc nachylenie w stronę centralną wydmy. Dla wydm małych kąt nachylenia od strony wody dolnej wyniósł średnio 33° i był prawie równy kątowi stoku naturalnego. Według Changa [1980] separacja prądu następuje wyłącznie wtedy, gdy kąt od strony wody dolnej przekracza 12°. W konsekwencji separacja prądu musi być rozważana jako czynnik hydrauliczny, z wyjątkiem niektórych bardzo długich wydm o małej wysokości (tarcie warstwy wody płynącej po innej warstwie wody jest małe w porównaniu z tarciem o wydmę, przeto dochodzi wówczas do znacznego zwiększenia prędkości średniej, separacji prądu i ostatecznie oderwania strumienia na zasadzie nagłego zmniejszenia oporów przepływu [Henderson 1966]).

Tabela 1. Dane geometryczne małych wydm reńskich
(pomiary bezpośrednie na dnie)
Table 1. Geometric data of small Rhine River dunes
(measurements from the river bed)

Przekrój pomiarowy *Sampling cross section*	Długość *Length* [m]	Wysokość *Height* [m]	Kąt nachylenia *Angle* [°]	
			od strony górnej wody *stoss side*	od strony dolnej wody *lee side*
101	4,20 0,35 – 0,40	0,35 (0,24) 0,018 – 0,025		30 – 31
102	1,3 0,95 1,5 0,8 1,5	0,16 – 0,16 0,11 0,13	17 – 16 16 13	30 – 30 30 28
103	> 3,60 0,56 0,52	0,25 0,04 0,025	4 – –	30 – –
104	5,0 0,4 – 0,55	0,35 0,01 – 0,03	6	28
107	4,0 0,38 – 0,63	0,35 – 0,45 0,01 – 0,02		
108	4,20 0,30 – 0,40	0,35 0,01 – 0,02	2, 5, 6, 8	31
109	4,10 0,40 – 0,50	0,33 0,04 – 0,08	7 – 8	30 30
110	3,0	0,26 – 0,30	7 – 8	28
112	2,55 2,60	0,26 0,25	1, 12, 5, 18 4, 12, 16	30 30
113	2,30 – 2,60	0,24	10 – 14	30
114	2,00 – 2,20	0,17 – 0,19	5, 12, 23	30

Za pomocą dzwonu do nurkowania bezpośrednio z dna rzeki zebrano dużą ilość próbek materiału budującego wydmy, dzięki czemu stwierdzono przestrzenną zmienność składu granulometrycznego reńskich formacji dennych. Podstawowe dane dotyczące granulometrii wydm na badanym odcinku Renu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Dane granulometryczne wydm na reńskich (badania szczegółowe 1991)

Table 2. Grain size data of the Rhine River (1991 survey)

Lp. *No*	Opis miejsca / *Location*	d_{50}	d_{84}	d_{16}	Współczynnik wysortowania (φ) *Sorting coefficient*
1	koryto / *trough*	4,00	8,60	0,76	-1,75
	szczyt / *crest*	0,80	4,00	0,35	-1,76
	od strony wody dolnej / *stoss side*	0,90	2,00	0,38	-1,20
2	opancerzenie / *basal*	9,00	44,00	0,66	-3,03
4	dno, wydma wtórna / *coarse lag in trough of secondary dune*	1,40	2,80	0,65	-1,05
	zmarszczka / *dune ripple*	0,70	1,10	0,42	-0,69
	od strony wody dolnej wydmy wtórnej / *stoss slope of secondary dune*	0,80	1,60	0,40	-1,00
9	dno / *trough*	3,20	6,00	1,70	-0,91
	na wierzchołku szczytu *slipface of dune crest*	1,20	2,30	0,48	-1,13
11	drobnoziarnista fala piaskowa *fine bed sandwave*	0,80	1,40	0,53	-0,70
	gruboziarnista fala piaskowa *coarse bed sandwave*	1,40	2,20	0,70	-0,83
	od strony wody górnej fali piaskowej *sandwave slipface*	0,80	1,60	0,50	-0,84
	punkt załamania fali piaskowej *brink point of sandwave*	1,30	1,90	0,70	-0,72
12	od strony wody dolnej / *slipface*	0,53	0,90	0,33	-0,72
	szczyt / *crest*	0,60	0,98	0,33	-0,78
	dno / *trough*	1,10	1,90	0,56	-0,88
13	dno / *trough*	1,20	2,60	0,45	-1,26
	szczyt / *crest*	1,25	2,60	0,57	-1,09
	od strony wody górnej / *stoss slope*	0,61	1,10	0,34	-0,85
14	od strony wody dolnej fali piaskowej *sandwave slipface*	1,50	2,40	0,70	-0,89
15	podłoże żwirowe w miejscu	10,50	30,80	0,71	-2,72
	odprądowym *basal gravel trough toe of sandwave*	1,30	1,80	0,63	-0,76
16	podłoże / *trough*	1,30	2,50	0,62	-1,01
	od strony wody dolnej / *slipface*	1,40	2,40	0,78	-0,81
	punkt załamania przed szczytem *crest brinkpoint*	0,70	1,40	0,37	-0,96
	od strony wody górnej / *stoss slope*	0,80	1,70	0,48	-0,91
17	próbka objętościowa-mieszana *bulk sample*	1,20	1,8	0,61	-0,78

cd. Tabeli 2.

Lp. *No*	Opis miejsca / *Location*	d_{50}	d_{84}	d_{16}	Współczynnik wysortowania (φ) *Sorting coefficient*
18	szczyt / *crest*	1,20	1,8	0,60	-0,79
19	żwir z dna podłoża / *basal gravel*	12,00	48,00	0,68	-3,07
	kraniec od strony wody górnej *toe of sandwave*	0,62	1,10	0,51	-0,55
21	dno / *trough*	3,20	6,00	0,90	-1,37
	punkt załamania / *brinkpoint*	0,30	0,59	0,18	-0,86
	kraniec od strony wody górnej / *toe*	1,01	1,10	0,30	-0,94
22	dolna część od strony wody górnej *lower stoss*	0,56	1,00	0,25	-1,00
	dolna część od strony wody dolnej *lower slipface*	1,05	1,17	0,80	-0,27
	górna część od strony wody górnej *upper stoss*	0,62	1,20	0,34	-0,91
	punkt załamania / *brinkpoint*	0,59	1,10	0,22	-1,16
23	próba objętościowa ze szczytu *bulk sample crest*	1,35	1,85	0,69	-0,71
	mieszana próba objętościowa ze strony wody dolnej / *slipface of sandwave, bulk sample*	1,20	1,80	0,60	-0,79
24	kraniec od strony wody górnej, próba objętościowa / *toe of sandwave, bulk sample*	1,00	1,80	0,55	-0,85

Wydmy zarówno duże, jak i małe zbudowane były z piasku, o średnicy ziaren bliskiej jednemu milimetrowi (0,81–0,96 mm). Wartość d_{84} wahała się między 1,4–2,4 mm, wynosząc średnio d_{84} = 1,6 mm, a wartość d_{16} 0,31–0,78 mm, średnio d_{16} = 0,53 mm. Dane te wskazują, że piasek był dobrze wysortowany – wartość odchylenia standardowego wynosiła od –0,81 do –0,96. Podłoże denne (obrukowanie) znajdujące się pod wydmami miało następujące parametry granulometrczne: d_{50} = 10 mm, d_{84} = 46 i d_{16} = 0,67 mm, standardowe odchylenie – wynosiło –3,0. Typowo, od strony górnej wody materiał tworzący małą wydmę miał dwukrotnie większą średnicę niż od strony wody dolnej, np. 1,4 mm w porównaniu z 0,7–0,8 mm. Gęstość objętościowa rumowiska Renu kształtowała się w granicach 1,5–1,69 g · cm^{-3}. Najmniejszą gęstością charakteryzowały się szczególnie duże wydmy głównie w części strony wody dolnej. W okolicach szczytu wydm gęstość rumowiska stawała się większa, by przybrać największą wartość

od strony górnej wody wydm, tam gdzie znajduje się najwcześniej zgromadzony piasek budujący formację. Podstawową przyczyną bardzo małej gęstości objętościowej od strony dolnej wody wydmy jest fakt, że podlega ona ciągłemu procesowi transformacji, a także, że to po tej właśnie stronie dużej wydmy przemieszczają się małe wydmy.

Tabela 3. Gęstość objętościowa materiału wydm
Table 3. Bulk density of dune material

Numer próby *Sample number*	Rok / *Year*	Miejsce na wydmie / *Position on dune*	Gęstość objętościowa *Bulk density* [g · cm^{-3}]
38	1991	od strony górnej wody, blisko dna / *slip slope near base*	1,50
39	1991	*od strony dolnej wody blisko szczytu / stoss slope near crest*	1,50
107	1992	szczyt, około 0,005-0,015 m poniżej powierzchni wydmy *crest, 0,005-0,015 m below dune surface*	1,60
108	1992	od strona dolnej wody / *stoss slope*	1,69
109	1992	szczyt małej wydmy, umiejscowionej od strony dolnej wody dużej wydmy / *crest of a small dune on stoss slope of large dune*	1,54
111	1992	od strony górnej wody / *slip slope*	1,52
112/1	1992	szczyt, 0,05-0,15 m w głąb wydmy / *crest, 0,05-0,15 m below dune surface*	1,53
112/2	1992	szczyt, 0,35-0,50 m w głąb wydmy / *crest, 0,35-0,50 m below dune surface*	1,50
114	1992	od strony dolnej wody wydmy dużej / *stoss slope of large dune*	1,58
115	1992	od strony górnej wody / *slip slope*	1,53

Na podstawie danych z pomiarów terenowych w warunkach laboratoryjnych odtworzono strukturę wewnętrzną małej i dużej wydmy. Podczas gdy typowa mała wydma wykazywała poprzeczne ułożenie warstw, wydma duża miała budowę wewnętrzną bardziej skomplikowaną. Próby do oceny struktury wewnętrznej wydmy zostały pobrane z odkrywek kopanych równolegle do kierunku przepływu wody ponad wydmą. Profile wewnętrzne wykazywały dużo punktów nieciągłości w strukturze wewnętrznej wydmy dużej, co należy tłumaczyć głównie erozją strony powierzchniowej tej formacji, spowodowaną przez przemieszczanie się małych wydm w dół dużej wydmy od strony wody dolnej. Znaleziono miejsce, gdzie od strony dolnej wo-

dy dużej wydmy wykazują one układ warstw normalny (laminacja normalna), z kątem nachylenia warstw równym 30–33°. Rozpatrując dużą wydmę jako układ przestrzenny, należy stwierdzić, że typowy układ poprzeczny warstw (laminacja poprzeczna) występował w części środkowej wydmy, podczas gdy wszelkie nieciągłości w budowie struktury wewnętrznej towarzyszyły skrajnym częściom wydmy.

PODSUMOWANIE

Kształt dużych wydm potwierdza generalne obserwacje dotyczące zachowania się takich wydm na dnie rzeki opisywanych w literaturze przedmiotu. Jednakże, należy podkreślić pewne specjalne cechy wyróżniające wydmy tworzące się w korycie Renu od wydm „klasycznych" o jakich pisze Allen [1984]. Cechy te związane są głównie z budową geologiczną podłoża dna Renu, a także z budową granulometryczną wydm. W konsekwencji wydmy reńskie nie osiągają takiej wysokości, na jaką pozwalałaby aktualna głębokość wody. Przyczyn tej sytuacji można upatrywać w braku na badanym odcinku Renu przepływu o odpowiednio długim czasie trwania, a w związku z tym w niewystarczającej dostawie materiału dennego. Dla warunków badanego odcinka pomiarowego Renu, zależności funkcyjne pomiędzy stromością a długością wydm obliczone na podstawie danych z lat 1991 i 1992 opisują następujące równania, odpowiednio:

$$H/L = 0{,}082\ L^{-0{,}55}$$

$$H/L = 0{,}104\ L^{-0{,}63}$$

Bezpośrednie wykonane za pomocą dzwonu do nurkowania pomiary gęstości objętościowej piasku budującego wydmy wykazały, że gęstość ta wynosi 1,5–1,69 g · cm^{-3} . Tak niewielką wartość gęstości objętościowej piasku budującego wydmy na Renie należy przypisać faktowi, że wydmy te podlegają ciągłemu procesowi transformacji.

BIBLIOGRAFIA

Allen J. *Physical process of sedimentation*. GA&U Ltd, London 1971 (tłumaczenie polskie 1977, PAN, biblioteka problemów, tłum. J. Muller).

Allen J. *Sedimentary structures: their character and physical basis*. Elsevier, Amsterdam 1984.

Allen P.A. *Earth surface processes*. Blackwell Science Ltd, London 1997 (tłumaczenie polskie 2000, Wydawnictwa Naukowe PWN SA).

Ashley G. *Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at the old problem*. J.Sedim. *Petrol*. 60, 1990, s. 160–172.
Bogardi J. Sediment transport in alluvial streams. Akademia Kiado, Budapeszt 1978.
Carling P.A., Gölz E., Glaister M., Radecki-Pawlik A., Rosenzweig S. *Study and numerical modelling of subaquatic dunes in the River Rhine near Niderwalluf. Bundesaltstalt für Gewasserkunde*. Koblenz Institue of Freshwatere Ecology, Ambleside UK, Koblenz, Niemcy, BIG-no-0774, 1993, s. 1–31.
Carling P.A., Gölz E., Orr H.G., Radecki-Pawlik A. *The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany*. I. Sedimentology and morphology. Sedimentology, 47, 2000, s. 227–252.
Chang H.H. *Geometry of gravel stream*. Journ. of Hydr. Div, ASCE, 106, 1980, s. 1443–1456.
Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982, pp. 533.
Flemming B. *Zur klassifikation sunaquatischer stömungstransversaler transportkörper*. Bochumer Geol. Univ. Geotechn., Arb., 29, 1988, s. 44–47.
Gładki H. *Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie Karpackich dopływów Wisły*. Zesz. Nauk. AR, Kraków 1976, rozpr. hab.
Gölz E. *Suspended sediment and bedload problems of the Upper Rhine*. Catena, 17, 1990, s. 127–140.
Gölz E. *Bed degradation: natures, causes, countermeasures*. Wat. Sci. Tech., 29, 1994, s. 325–333.
Graf W. H. *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw – Hill, London 1971.
Henderson F. *Open channel flow*. Mac Millan Publ., New York, London 1966.
Klimaszewski M. *Geomorfologia*. PWN, Warszawa 1978, 1981, 1995.
Leliavski S. River and Channel Hydraulics. London 1965.
Leyton L. *Fluid behavior in biological system*. Clarendon Press., Oxford, 1975, s. 160–163.
Przedwojski B. *Morfologia rzek i prognozowanie procesów rzecznych*. AR Poznań 1998.
Radecki-Pawlik A. *Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 2002, seria Rozprawy, nr 281.
Yalin M. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, Oxford 1972.

dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik,
Akademia Rolnicza w Krakowie,
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji,
Katedra Inżynierii Wodnej,
Al. Mickiewicza 24/ 28, 30- 059 Kraków,
e- mail: rmradeck@cyf-kr.edu.pl

Prof. Paul Carling,
School of Geography
Highfield
University of Southampton
Southampton SO17 1BJ
Wielka Brytania

Prof. Emil Gölz, Instytut Hydrologiczny,
Bundesanstalt für Gewässerkunde
(Federal Institute of Hydrology)
Am Mainzer Tor 1
D-56068 Koblenz
Niemcy

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Ratomski*

Artur Radecki-Pawlik, Paul Carling, Emil Gölz

GRANULOMETRY AND GEOMETRY DUNES OF THE LOWLAND PART OF THE RHINE RIVER

SUMMARY

The paper describes geometric internal granulometric structure of lowland river bed forms called sand river dunes. Dunes are typical features associated with sand river bed and studies of processes connected with their formation are essential in understanding fluvial processes within the catchment. Also the knowledge of sedimentary structure and morphology of dunes are important for geologists and paleogeologists to interpret how sedimentary rocks were deposited. Also, in the time of changes of global and local climates, frequent changes of water regime in river could be noted when the development or not-development of river bed-forms can have an important influence on quantity of sediment moving in rivers and water reservoirs built on such rivers. The work was set up on the Rhine River in Germany close to Niderwalluf. The research conducted on the Rhine River involved many of research equipment and river vessels is very rare and unique in the world as far as fieldwork is concerned.

Within a paper it is show, that the Rhine River Dunes do not reach the height H which would be expected by the water depth which is responsible for their formation. There could be a couple of reasons for such situation. One of those is the fact that along the research reach there was not noticed a forming channel discharge which would last long enough to supply a sediment discharge for building up the dunes. Also the density of the Rhine river sediment differs from those found along other sand bed rivers. The density which was found was 1,5–1,69 g · cm^{-3}. This low value of the density is due to the fact that the Rhine river dunes are under the continuous process of formation. Such detailed sediment research was possible since

the diving bell was employed. It was found that for the research reach the function between the steepness and the length of dunes is described by following functions (respectively for 1991 and 1992): $H/L = 0{,}082\ L^{-0{,}55}$ and $H/L = 0{,}104\ L^{-0{,}63}$. The work described in the paper was set up clone to Mainz in Germany, and was possible because of the cooperation of the Institute of Freshwater Ecology from Great Britain and Hydrological Institute from Koblenz in Germany. Also thanks to support of the British Council.

Key words: dunes, lowland river, river-bed morphology, river-bed granulometry