

Artur RADECKI-PAWLIK

Katedra Inżynierii Wodnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Department of Hydraulics Engineering, Agricultural University of Kraków

Wybrane problemy związane z powstawaniem piaszczysto- -żwirowych form dennych w ujściowym odcinku rzeki podgórskiej

On chosen problems with sand-gravel subaquatic dunes formation along the outlet of highland river

Słowa kluczowe: formy denne, rzeka podgórska, żwir, parametry granulometryczne i hydrodynamiczne

Key words: bed forms, subaquatic sand-gravel dunes, highland river, gravel, granulometric parameters, hydrodynamics parameters

Wprowadzenie

Rzeki stanowią jeden z najbardziej frapujących naukowo, a jednocześnie najwciążniejszych tematów badawczych. Szczególnie koryta rzek górskich i podgórskich, gdzie badania można skoncentrować na stosunkowo niewielkim obszarze, a jednocześnie prowadzić je poprzez akces pieszy, są wyzwaniem dla wielu przedstawicieli nauk o Ziemi. Badania koryt rzecznych są niezmiernie ważne w obecnym czasie, gdy odnotowujemy gwałtowne ich wcinanie się, przy jednoczesnym ograniczeniu retencji dolinowej i korytowej oraz zwiększeniu spływów jednostko-

wych. Jak dotąd, prawie wyłącznie geomorfolodzy interesowali się formami i strukturami powstającymi na dnie koryt rzecznych. Należy jednak podkreślić, że wiedza o formach dennych oraz formach korytowych jest wyjątkowo przydatna dla inżynierów hydrotechników zajmujących się utrzymaniem koryt rzecznych, szczególnie tam, gdzie precyzyjne obliczenia hydrauliczne wymagają uwzględnienia konfiguracji dna przy obliczaniu przepływów, a gdzie powinniśmy uwzględnić zmiany związane z rumowiskiem dennym (np. zmiany wartości współczynnika szorstkości związane albo z wielkością ziarna rumowiska budującego dno cieków, albo z wysokością formy dennej lub korytowej – Radecki-Pawlik 2002a).

W korytach rzecznych, będących w stanie naturalnym, zwiększenie wartości prędkości płynącej wody zazwyczaj związane jest również ze zmianą warunków ruchu rumowiska dennego.

Po przekroczeniu wartości granicznych początku ruchu na dnie rzeki obserwujemy ruch rumowiska wlezonego oraz powstawanie form dennych. Formy denne powstają na dnie rzeczonym, gdy reżim przepływu oraz materiał budujący to dno zezwala na ich tworzenie. W literaturze znaleźć można dwu- (2D) lub trójwymiarowe (3D) formy denne, a ich kształt może ulegać zmianie w czasie na długości koryta oraz na jego szerokości.

Najbardziej znane opracowania dotyczące form dennych, uznawane dziś za klasyczne, to prace Simonsa i Richardsona (1966), Allena (1968), Ashley (1990) oraz Carlinga i innych (2000). Prace te dotyczą formowania się oraz warunków hydrodynamicznych podczas rozwoju form zbudowanych z piasków. W ostatnim czasie badania form dennych zapoczątkowano również w odcinkach rzek o podłożu piaszczyto-żwirowym, a najnowsze doniesienia na ten temat w literaturze światowej są autorstwa: Dinaharta (1989), Besta (1996), Kleinhausa (2002), Carlinga i innych (1993, 2005, 2006), Williams i innych (2007) oraz Radeckiego-Pawlika i innych (2006).

Należy zaznaczyć, że badanie form piaszczyto-żwirowych w terenie jest zadaniem skomplikowanym. Pominąć tu należy fakt niezmiernie trudnego zlokalizowania wspomnianych utworów, przede wszystkim wynika to z trudności logistycznych oraz kosztów w prowadzeniu badań terenowych. Utwory denne są niezmiernie dynamiczne, nie zawsze można je odnaleźć w tym samym miejscu, a dodatkowo proces komplikuje zmiana napełnienia koryta, czasem tylko pozwalająca na akces pieszy do badanych form, a częściej wymuszająca pomiary

z łodzi lub urządzeń montowanych na dnie rzeki na specjalnych rusztowaniach lub platformach. Badania form o budowie żwirowo-piaszczystej na szerszą niż dotąd skalę podjęli się na rzece Sewern w Wielkiej Brytanii w 2003 roku Carling i Radecki-Pawlik (Carling i in. 2005, 2006) i za uzyskane fundusze grantowe z Royal Society w Londynie wykonali szczegółowe pomiary granulometryczne i morfometryczne utworów na dnie rzeki, będącej na tym odcinku rzeką o charakterze pływowym, mającą możliwość budowania żwirowych form dennych. Prace te następnie kontynuowano, by w 2007 roku (Carling i in. 2007) opisać ich morfodynamikę. Z kolei w 2004 roku podczas wizji terenowej w ujściowym odcinku rzeki Raby, wzdłuż koryta rzeki bezpośrednio przed połączeniem z rzeką Wisłą, na dnie cieką odkryto wiele różnorodnych form dennych. Przy analizie wstępnej okazało się, że znalezione formy denne zbudowane są z materiału piaszczysto-żwirowego o $d_{50} > 2$ mm (w niektórych pracach > 1 mm).

Ze względu na rzadkość tworzenia się tego typu form w naturze, z powodu spełnienia całej gamy czynników hydrodynamicznych, granulometrycznych rumowiska rzeczno-geomorfologicznych koryta cieką podjęto się szczegółowego badania tych struktur oraz warunków, w jakich powstają. Badania prowadzono w ramach grantu British Council, grantu KBN oraz pracy ujętej w tematyce rozprawy doktorskiej Słowik-Opoki (2006), również u Słowik-Opoki i Radeckiego-Pawlika 2006.

W niniejszej pracy zebrano ważniejsze problemy związane z kształtowaniem się form dennych o budowie piaszczysto-żwirowej, a celem prezentowanego

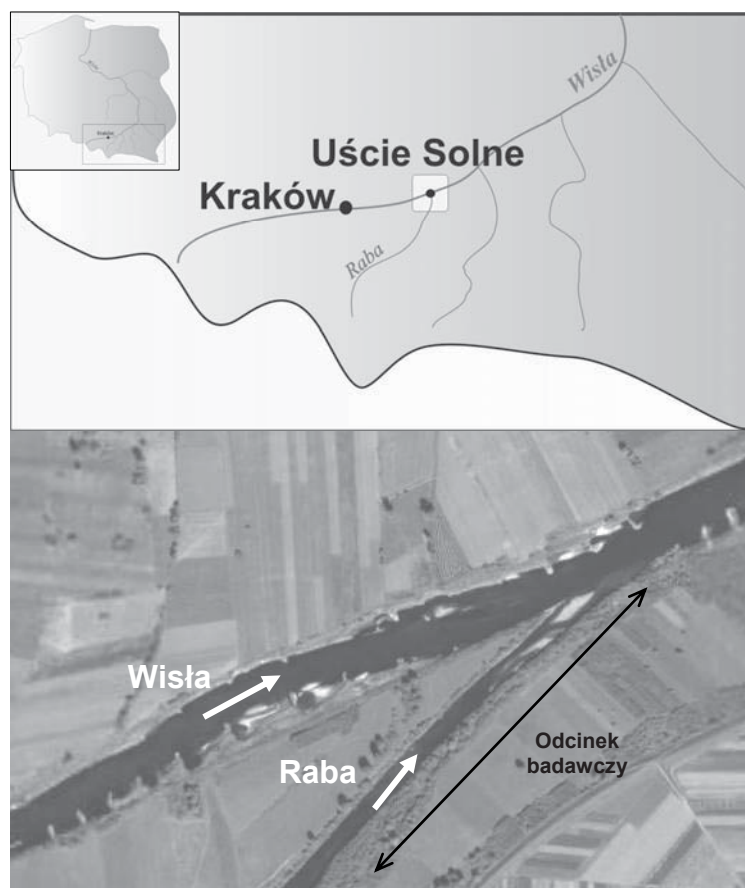
artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów parametrów geometrycznych form, takich jak wysokość i długość, oraz granulometrii. Praca przedstawia również wyniki pomiarów rozkładów prędkości nad charakterystycznymi punktami form i nieobliczone wielkości parametrów hydrodynamicznych, takie jak: prędkość dynamiczna, naprężenia styczne oraz współczynniki oporu. Na podstawie zebranych danych opracowano zależności graficzne oraz empiryczne. Wyniki prezentowanych badań mogą być wykorzystane w praktyce przez

projektantów regulacji rzek i potoków w rejonie podgórskim, geologów oraz geomorfologów fluwialnych.

Material i metody

Usytuowanie obiektu badań

Formy denne, będące obiektem badań przedstawionym w pracy, zlokalizowano wzdłuż odcinka rzeki Raby położonego w jej ujściowej części, w miejscu połączenia z rzeką Wisłą (rys. 1 i 2). Odcinek badawczy liczył 200 m długości



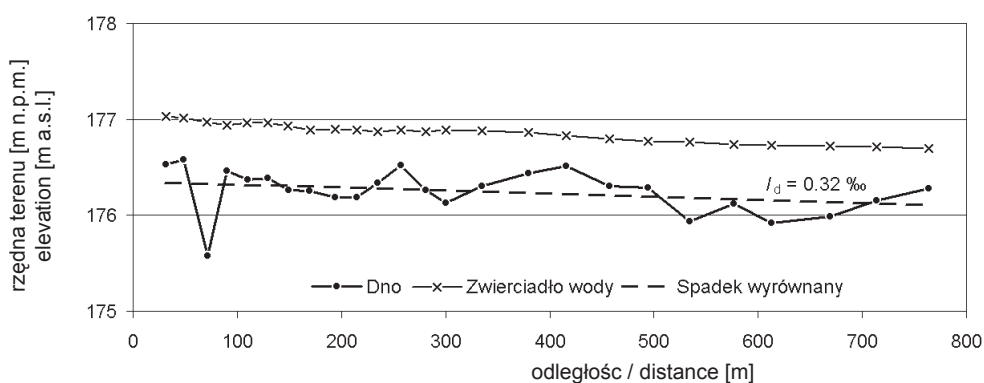
RYSUNEK 1. Usytuowanie rejonu badań – rzeka Raba
FIGURE 1. Research region – the Raba River



RYSUNEK 2. Miejsce połączenia odcinka badawczego rzeki Raby z rzeką Wisłą
 FIGURE 2. Conjunction point of the Raba River research region and the Vistula River

i posiadał wyrównany spadek o średniej wielkości 0,32‰ (rys. 3). Koryto rzeki jest tu szerokie średnio na około 45 m. Przepływ średni roczny, obliczony według wzoru Krzanowskiego (1972), wynosi tu $20,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a przepływ średni niski $2,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wzdłuż całego odcinka objętego badaniami zaznacza się zróżnicowanie w budowie granulometrycznej dna. Występują tu zarówno żwiry, jak i piaski. Morfologicznie koryto główne płynie naprzemienne wzdłuż lewego

i prawego brzegu. Na dnie cieku występują łachy żwirowe, małe przegłębienia oraz płycizny. Brzegi rzeki są tu wysokie na 4–6 m, strome, porośnięte roślinnością. Najważniejszą formą morfologiczną, jaką zaobserwowano wzdłuż badanego odcinka, są formy denne zbudowane z frakcji piaszczystej oraz piaszczysto-żwirowej, o $d_{50} > 2 \text{ mm}$. Wszystkie znalezione tu utwory denne są uwzględnione w prezentowanych w pracy wynikach.



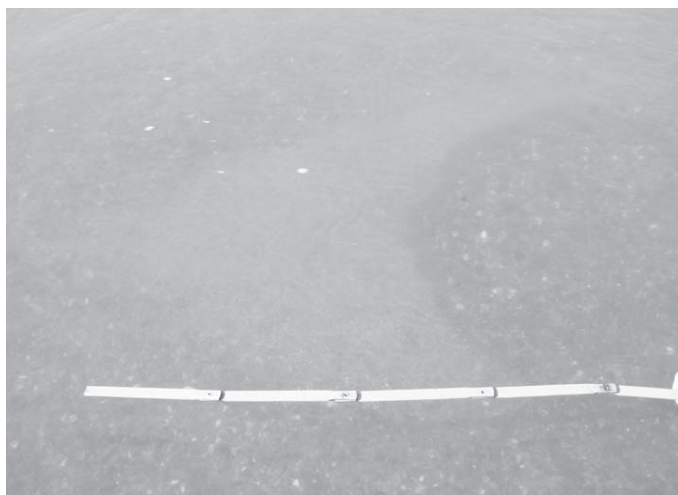
RYSUNEK 3. Profil podłużny odcinka ujściowego, pomiary z lipca 2005 roku (Książek i in. 2006)
 FIGURE 3. Longitudinal profile of the measuring river reach, July 2005 (Książek et al. 2006)

Generalnie rzeka Raba bierze swój początek w pobliżu miejscowości Obidowa na wysokości 785 m n.p.m. i przepływa przez trzy główne regiony geograficzne: Karpaty Zewnętrzne – Beskidy, Pogórze Karpackie oraz Kotlinę Sandomierską. Powierzchnia całkowita zlewni Raby wynosi 1537 km², a całkowita długość 137 km. W strefie karpackiej znajduje się 86% dorzecza, co przesądza o jej charakterze podgórskim. W budowie geologicznej obszaru badań większość stanowią utwory gruboklastyczne, o średnicy ziarna przekraczającej 1 cm, wśród których przeważają zdecydowanie piaskowce karpackie, a drobniejsze żwiry składają się zarówno z kwarcu, jak i piaskowców. Odcinek źródłowy charakteryzuje się znaczną liczbą dopływów, z których największy to prawobrzeżny dopływ Poniczanka (Słowik-Opoka 2006). Powyższe dane ogólne mają wpływ na charakter odcinka ujściowego, wzdłuż którego mogły utworzyć się takie, a nie inne formy denne, o takiej, a nie innej budowie.

Szczegółowa metodyka badań

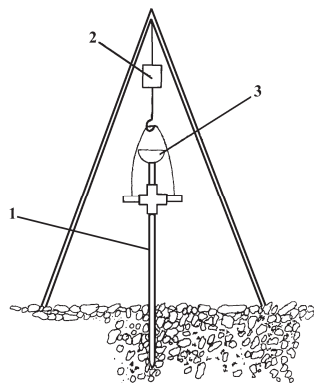
W ramach prac terenowych wykonano pomiary morfometryczne znalezionych form dennych, a następnie pobrano próby materiału, z których formy były zbudowane do analizy granulometrycznej. Równolegle zmierzono rozkłady prędkości w pionach tachymetrycznych w charakterystycznych punktach morfologicznych badanych form dennych w celu wyznaczenia parametrów hydrodynamicznych. Badając geometrię utworów korytowych, pomierzono wysokość formy w punkcie szczytu (H) i jej długość (L) – rysunek 4. Dodatkowo zmierzono kąt nachylenia strony doprądowej i zaprądowej form. Zmierzono również napełnienie nad charakterystycznymi punktami form. Pomiary wyżej wymienione zalecane są jako podstawowe przez Yalina (1964) i Allena (1968) w ich opracowaniach uznanych za klasyczne.

Pomiary granulometryczne polegały na poborze prób sedymentu bezpośrednio z form dennych. W przypadku utwo-



RYSUNEK 4. Pomiar długości wydmy piaszczysto-żwirowej – rzeka Raba
FIGURE 4. On measuring the length of the sand-gravel dune – the Raba River

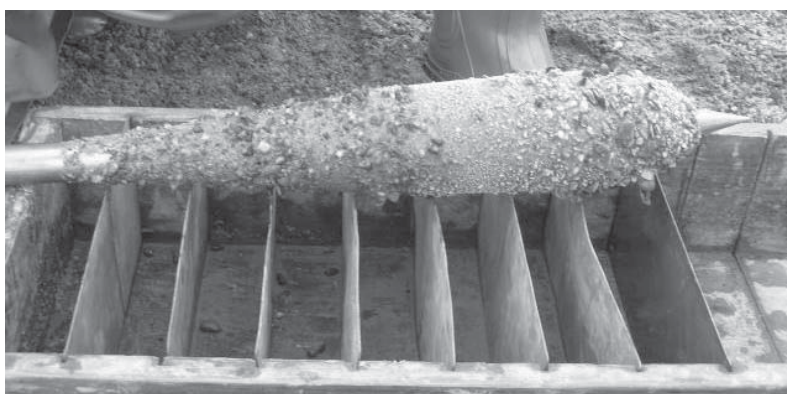
rów większych próby pobrano w charakterystycznych punktach form – ze strony doprądowej, ze szczytu oraz ze strony zaprądowej. Do poboru prób zastosowano metodę *in situ*. Metoda zamrażania próby w dnie rzeki opracowana została przez Carlinga i Readera, a zaadaptowana przez Michalik i innych (1996) dla warunków rzek i potoków Podkarpacia. Metoda zamrażania próby rumowiska *in situ* polega na zamrażaniu próby rumowiska bezpośrednio w dnie potoku lub rzeki. Odbywa się to przy użyciu sondy wbijanej w dno, do której doprowadza się ciekły azot (rys. 5). Szybkie ochłodzenie rurki zamraża przylegające do niej rumowisko. Czas zamrażania zależy głównie od uziarnienia rumowiska, stopnia konsolidacji oraz temperatury wody. Wyjętą próbkę rumowiska dennego układa się na skrzynce z przegrodami co 5 cm tak, aby rozmrożony materiał opadł do stosownej przegrody (rys. 6), dzięki czemu można określić skład granulometryczny rumowiska w każdej warstwie, tj. uzyskać dokładną informację o składzie granulometrycznym pokrywy i podłoża. Po rozmrożeniu każdą próbkę poddaje się analizie sitowej. W przypadku ma-



RYSUNEK 5. Budowa urządzenia do poboru rumowiska metodą zamrażania próby: 1 – rurka miedziana $\varnothing = 5$ cm, 2 – wyciągarka ręczna, 3 – lejek do wprowadzania ciekłego azotu
 FIGURE 5. Freeze sampler: 1 – copper tube $\varnothing = 5$ cm, 2 – hoist holder, 3 – funnel

łych form pobieranie próbek obejmowało całe formy. Pobrane próby poddane zostały analizie składu granulometrycznego, w wyniku której wyznaczone zostały kolejno średnice charakterystyczne (d_{16} , d_{84}) oraz średnica miarodajna (d_{50}). Ta ostatnia, wyjątkowo ważna, może być zastosowana m.in. do wzoru Stricklera do obliczania współczynnika szorstkości (n).

Parametry hydrodynamiczne w postaci wartości prędkości dynamicznej,



RYSUNEK 6. Przykładowa zamrożona próbka rumowiska – rzeka Raba
 FIGURE 6. Freezed sample of the bed material – Raba River

naprężeń stycznych, bezwymiarowego parametru Shieldsa określono na podstawie wielokrotnej bytności w terenie na przestrzeni kilku lat (2003–2007), dla różnych warunkach przepływu. W tym celu wykonano serię pomiarów hydrometrycznych. Piony pomiarowe prędkości założono we wszystkich charakterystycznych punktach form dennych (nad szczytem formy, od strony za- i odprądowej oraz nad stokiem zaprądowym – rys. 7). Szczególną wagę przywiązano do pomiarów prędkości w strefie rozkładu logarytmicznego, aby w konsekwencji móc obliczyć naprężenia styczne. Gordon i inni (1992), jak również Bergeron i Abrahams (1992) stwierdzają, że jeżeli pomiary prędkości zostały przeprowadzone tuż nad dnem cieku, a ich wykresy są w przybliżeniu liniami prostymi (podziałka logarytmiczna w odniesieniu do skali głębokości h), to naprężenia styczne można obliczyć, znając wielkość

prędkości ścinającej w rejonie przepływu turbulentnego ze wzoru:

$$\tau = \rho (V_*)^2 \quad [\text{N}\cdot\text{m}^{-2}]$$

gdzie:

ρ – gęstość wody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

τ – naprężenia styczne [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$],

V_* – prędkość dynamiczna [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

Wartość prędkości dynamicznej (V_*) można wyznaczyć wprost z wykresu prostej $v = f(h)$:

$$V_* = a / 5,75 \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

gdzie:

a – współczynnik nachylenia prostej

$v = f(h)$, zgodnie z równaniem: $y =$

$= ax + b$ (prosta jest przedstawiona

w układzie półlogarytmicznym),

h – odległość pomiaru prędkości wody nad dnem cieku [m].

Znajomość wartości naprężeń stycznych jest istotna z punktu widzenia ruchu ziaren i formowania się łańcuchów korytowych.



RYSUNEK 7. Pomiar prędkości w rejonie wydmy piaszczysto-żwirowej – rzeka Raba

FIGURE 7. On measuring water velocity within the region of the sand-gravel dune – the Raba River

Na podstawie analizy działania sił hydrodynamicznych można podać parametr Shieldsa w postaci (Allen 1968, Radec ki-Pawlik 2002b):

$$\Theta = \frac{\tau_{kr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{\tau_{kr}}{gd(\rho_s - \rho)} = \frac{hJ\rho}{gd(\rho_s - \rho)}$$

który wyraża stosunek siły wleczenia do siły ciężkości ziarna. Wprowadzając pojęcie prędkości dynamicznej (v_*), powyższą zależność można zapisać inaczej:

$$\frac{\tau_{kr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{v_*^2 \rho}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{v_*^2}{(s-1)gd} = \Theta$$

gdzie:

$$s = \rho_s / \rho,$$

τ_{kr} – naprężenie krytyczne na dnie koryta,

ρ_r – gęstość rumowiska [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

ρ_w – gęstość wody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

h – głębokość wody [m],

S – spadek [–],

d_{50} – średnica ziaren [m],

τ – naprężenie styczne [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$].

Tak otrzymany parametr, zwany również parametrem Shieldsa lub bezwymiarowym naprężeniem krytycznym, jest wielkością podstawową, określającą początek ruchu ziarna rumowiska o zadanej średnicy.

Liczbę Froude'a obliczono z formuły (Dąbkowski i in. 1982):

$$Fr = v^2 / gh$$

Liczbę Reynoldsa obliczono z zależności:

$$Re = vh / \eta$$

gdzie η – lepkość.

Opory ruchu (f) obliczono:

- dla ruchu turbulentnego z formuły Blasiusa (Sobota 1994)

$$f = 0,3164 / Re^{-0,25}$$

- dla ruchu laminarnego z formuły Poiseuille'a (Sobota 1994)

$$f = 60 / Re$$

Wyniki badań wraz z dyskusją

Wyniki w pracy zamieszczono w formie graficznej i tabelarycznej w celu ułatwienia dyskusji. Uzyskane dane związane są z formacjami dennymi zarówno piaszczystymi, jak i piaszczysto-żwirowymi – różnymi ich rodzajami, jako że takie zlokalizowano wzdłuż badanego odcinaka Raby. I tak w tabeli 1 przedstawione zostały wartości poszczególnych parametrów geometrycznych wydmy. Dla ułatwienia dyskusji grupy wydmy nazwano odpowiednio: Raba 1, Raba 2 oraz Raba 17, zachowując nazwy archiwalne. Szczegółowy opis badanych parametrów, dotyczący omawianego tematu, podzielony na pojedyncze zagadnienia, z rozwinięciem na inne formy denne – również w postaci zmarszczek, można znaleźć u Radeckiego-Pawlika i in. (2005, 2006), Słowik-Opoki (2006) oraz Słowik-Opoki i Radeckiego-Pawlika (2006). W niniejszej pracy skupiono się na syntezie problemu z jednoczesnym przedstawieniem całości zagadnienia dotyczącego geometrii i hydrodynamiki.

Formy denne zbioru Raba 1 charakteryzują się wysokością 0,07 m oraz długością równą 1,2 m. Wskaźnik stromości (H/L) jest równy 0,06, a wartość poziomego i pionowego indeksu kształtu form wynosi odpowiednio: 0,83 i 17,14. W porównaniu ze zbiorem Raba 1 wydmy

TABELA 1. Zestawienie parametrów geometrycznych wydym
 TABLE 1. Measured dunes geometrical parameters results

Nazwa zbioru Research nomenclature	Punkt pomiarowy Research point	Głębokość wody h [m] Water depth	Wysokość formy H [m] Dune height	Długość formy L [m] Dune length	Szerokość formy W [m] Dune width	H/L	W/L	L/H
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Raba 1	P1	0,18	0,07	1,20	1,00	0,06	0,83	17,14
	P2	0,20						
	P3	0,13						
	P4	0,14						
Raba 2	1-1	0,19	0,04	1,15	0,50	0,03	0,43	28,75
	2-2	0,21						
	3-3	0,17						
	4-4	0,20						
Raba 17	68	0,32	0,06	1,10	2,15	0,05	1,95	18,33
	69	0,30	0,05	1,05	1,60	0,05	1,52	21,00
	70	0,28	0,07	1,40	2,10	0,05	1,50	20,00
	71	0,26	0,11	0,68	3,10	0,15	4,56	6,48
	72	0,27	0,05	0,67	1,40	0,07	2,09	13,40
	73	0,31	0,06	1,08	1,15	0,06	1,06	18,00
	74	0,32	0,08	0,96	2,00	0,08	2,08	12,00
	75	0,35	0,04	1,05	2,30	0,04	2,19	26,25
	76	0,29	0,11	0,83	1,40	0,13	1,69	7,55
	77	0,30	0,08	1,25	2,40	0,06	1,92	15,63
	78	0,30	0,07	1,42	1,70	0,05	1,20	20,29
	79	0,31	0,08	0,85	2,60	0,09	3,06	10,63
	80	0,30	0,06	1,00	3,48	0,06	3,48	18,18
	81	0,31	0,06	0,73	3,43	0,08	4,70	12,17
	82	0,34	0,04	0,97	2,55	0,04	2,63	27,71
	83	0,35	0,06	0,97	2,47	0,06	2,55	17,64
	84	0,40	0,07	1,38	2,70	0,05	1,96	19,71
	85	0,43	0,07	1,45	1,50	0,05	1,03	20,71
	86	0,45	0,09	1,33	2,25	0,06	1,69	15,65
	87	0,46	0,12	0,76	1,37	0,16	1,80	6,33
	88	0,42	0,07	1,32	2,15	0,05	1,63	20,31
89	0,47	0,07	1,80	1,76	0,04	0,98	25,71	
90	0,45	0,06	0,97	2,60	0,06	2,68	17,64	
91	0,46	0,09	0,83	2,57	0,11	3,10	9,22	
92	0,44	0,04	0,70	1,24	0,06	1,77	17,50	
93	0,51	0,06	1,46	1,27	0,04	0,87	26,55	
94	0,40	0,07	0,94	1,26	0,07	1,34	14,46	
95	0,37	0,03	0,83	3,20	0,04	3,86	27,67	

cd. tabeli 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Raba 17	96	0,40	0,08	1,15	3,30	0,07	2,87	14,38
	97	0,38	0,08	0,73	2,20	0,11	3,01	9,13
	98	0,35	0,04	0,64	1,30	0,06	2,03	16,00
	99	0,35	0,04	0,65	1,40	0,06	2,15	16,25
	100	0,43	0,05	0,93	2,00	0,05	2,15	18,60
	101	0,46	0,08	0,61	2,10	0,13	3,44	7,63
	102	0,51	0,05	0,94	1,15	0,05	1,22	20,89
	103	0,49	0,05	1,19	1,35	0,04	1,13	23,80
	104	0,52	0,10	0,95	2,00	0,11	2,11	9,50
	105	0,48	0,06	0,63	2,47	0,09	3,92	11,45
	106	0,52	0,04	0,90	1,68	0,04	1,87	22,50
	107	0,50	0,06	0,60	1,90	0,09	3,17	10,91
	108	0,53	0,07	0,68	1,38	0,10	2,03	10,46
	109	0,49	0,04	0,74	2,60	0,05	3,51	18,50
	110	0,50	0,03	0,88	1,89	0,03	2,15	35,20
111	0,46	0,04	0,77	1,39	0,05	1,81	22,00	
112	0,39	0,07	1,10	1,83	0,06	1,66	15,71	
113	0,43	0,04	1,06	2,24	0,04	2,11	26,50	
114	0,43	0,05	1,02	2,26	0,05	2,22	20,40	
115	0,43	0,06	1,02	1,89	0,06	1,85	17,00	

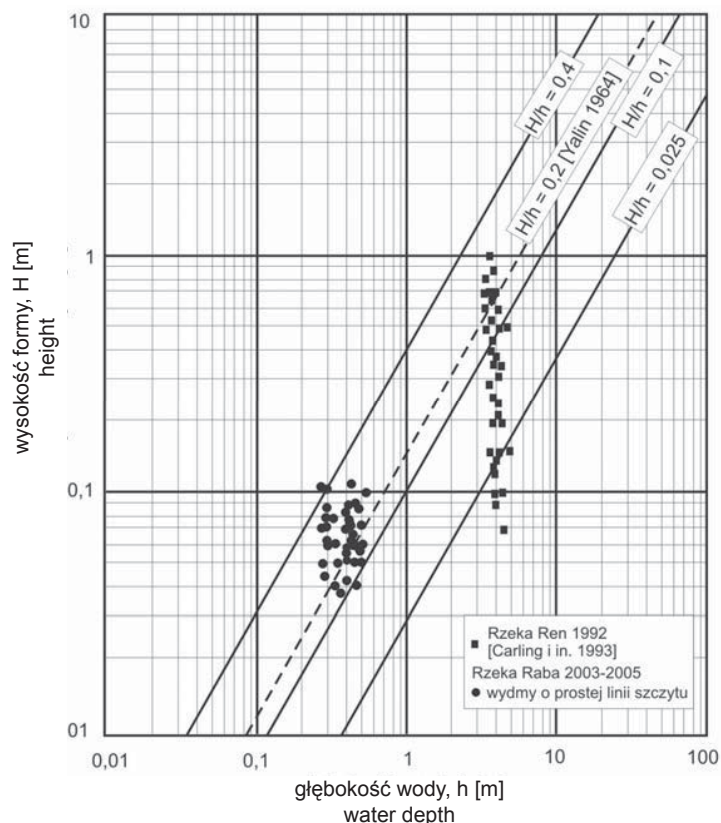
zbioru Raba 2 są formami posiadającymi łagodniejsze stoki, a wskaźnik stromości jest równy 0,03. Poziomy indeks kształtu w przypadku tych wydym wynosi 0,43, a pionowy 28,75, przy wysokości form 0,04 m i długości 1,15 m.

Zbiór form Raba 17 to wśród badanych wydym najliczniejsza grupa form wybitnie piaszczystych o prostej linii szczytu, zbudowanych z ziaren o średnicy $d_{50} = 0,0007$ m. Wysokość wydym wynosi od 0,03 do 0,16 m, a długość mieści się w przedziale 0,61–1,80 m. Jeśli chodzi o wskaźnik stromości form (H/L), to wykazuje on dość duże zróżnicowanie i wynosi od 0,03 do 0,07, a w kilku przypadkach 0,11. W porównaniu z wydymami zbioru Raba 1 oraz Raba 2 wydymy Raba 17 charakteryzują się większymi wartościami zarówno poziomego, jak

i pionowego indeksu kształtu ($W/L = 0,87-4,7$, $L/H = 6,33-35,20$).

W przypadku większości omawianych wydym (Raba 1, Raba 2 oraz Raba 17) wskaźnik stromości form jest mniejszy od $H/L = 0,08$. Potwierdza to spostrzeżenia Ashley (1990), która podała, że wskaźnik ten w przypadku wydym nie przekracza wartości 0,08.

Formy denne zlokalizowane na dnie badanego odcinka Raby to utwory o wysokości od 0,03 do 0,12 m, znalezione przy głębokości wody równej od 0,13 do 0,53 m. Analizując położenie punktów odpowiadających zależności wysokości wydym od głębokości wody (H/h) – rysunek 8, można zaobserwować, że przeważająca większość badanych wydym znajduje się w pasie $H/h = 0,1-0,4$. Oznacza to, że głębokość wody (h) w obszarze



RYSUNEK 8. Zależność wysokości formy (H) od głębokości wody (h)
 FIGURE 8. Height (H) of a dune versus water depth (h)

występowania form odpowiada od 2,5- do 10-krotności wysokości wydmy (H).

Rysunek 9 z kolei ilustruje zależność długości wydmy (L) od głębokości wody (h). Wydmy, będące przedmiotem badań, posiadają długość równą od 0,6 do 1,8 m. Większość form znajduje się w obszarze (L/h) pomiędzy 1 a 5. Tak więc długość wydmy o prostej linii szczytu może odpowiadać głębokości wody w obrębie form, jak również osiągać 5-krotność tej głębokości.

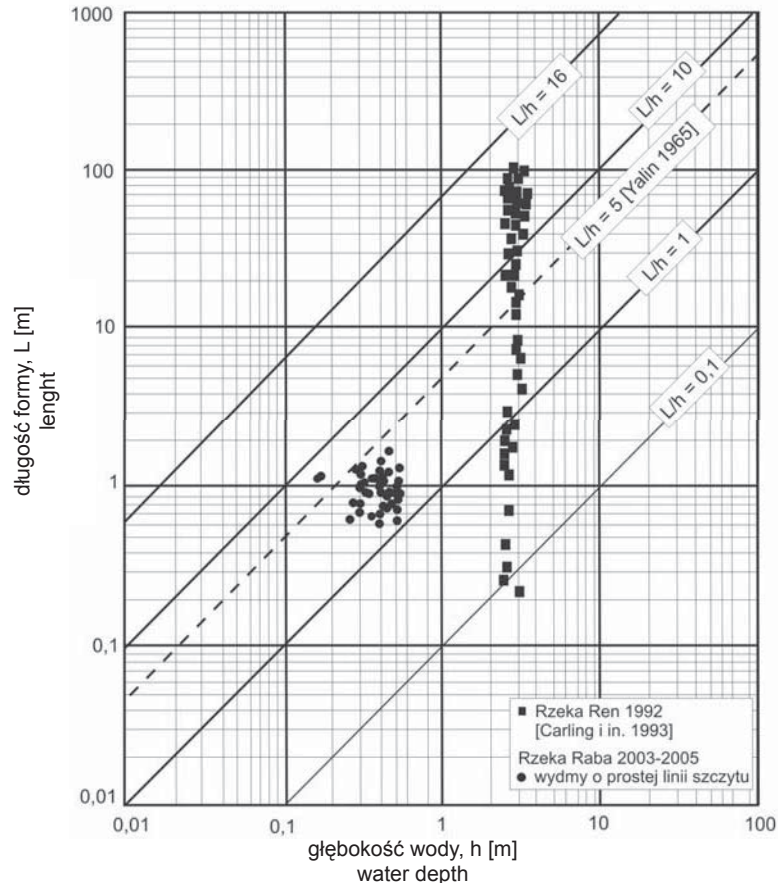
Na podstawie danych zebranych w terenie opracowano wykres zależności funkcjonalnej pomiędzy wysokością wydmy (H)

a długością (L), opisanej równaniem (tzw. równaniem osi zredukowanej):

$$H = 1,072L - 2,95$$

dla: $r = 0,55$; $0,28 < r < 0,73$; $\alpha = 0,05$; $n = 38$; $F_{kryt\ 0,05;1;38} = 4,11 < F_{obl} = 15,62$.

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 10, można zauważyć, że wraz ze wzrostem długości form wzrasta ich wysokość. Ponadto wyniki badań, dotyczące wysokości i długości form, zestawiono z wykresem prostej wyznaczającej górne ograniczenie zaproponowane przez Flemminga (1988). Przeważająca



RYSUNEK 9. Zależność długości formy (L) od głębokości wody (h)
 FIGURE 9. Length (L) of a dune versus water depth (h)

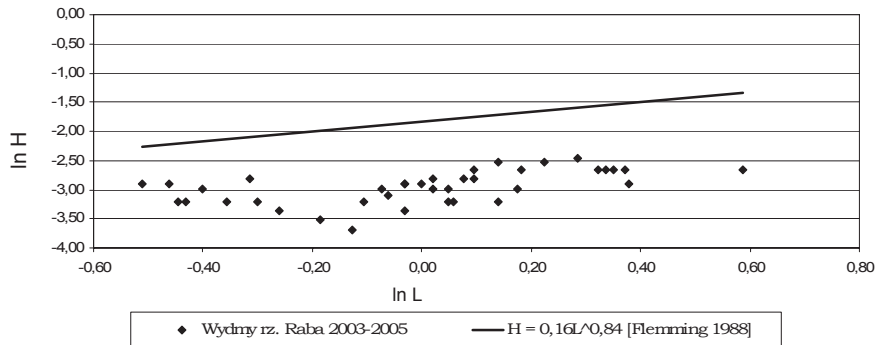
większość punktów znajduje się poniżej tego ograniczenia, co oznacza, że omawiane wydmy odcinka rzeki Raby są krótsze i niższe w porównaniu z wydmiami opisanymi przez Flemminga (1988). Ponieważ, jak zauważa Ashley (1990), w literaturze nie ma informacji na temat wydmy krótszych i niższych w stosunku do danych literaturowych, więc wyniki badań geometrycznych wydmy ujściowego odcinka Raby uzupełniają tę informację, dostarczając wyników badań

na temat wydmy mniejszych – o długości nieprzekraczającej 1,0 m.

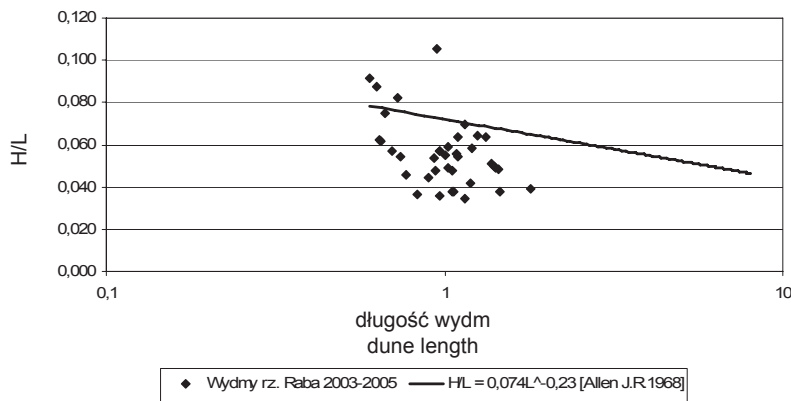
Na rysunku 11 przedstawiono wykres zależności funkcjonalnej pomiędzy wskaźnikiem stromości (H/L), a długością wydmy (L). Postać funkcji aproksymującej w tym przypadku przedstawia się następująco (równanie osi zredukowanej):

$$H/L = -0,052L + 0,107$$

dla: $r = -0,42$; $-0,31 < r < 0,32$; $\alpha = 0,05$;
 $n = 38$; $F_{kryt.0,05;1;38} = 4,11 < F_{obl.} = 7,30$.



RYSUNEK 10. Wykres zależności wysokości formy (H) od długości formy (L)
 FIGURE 10. Dunes height (H) versus dunes length (L)



RYSUNEK 11. Wykres zależności wskaźnika stromości (H/L) od długości formy (L)
 FIGURE 11. Steepness (H/L) versus dune length (L)

Wyniki badań geometrycznych form naniezione zostały na klasyczny wykres zależności: $H/L = f(L)$ (Allen 1968). Zdecydowana większość punktów odpowiadających $H/L = f(L)$ badanych wydmy znajduje się poniżej wykresu prostej o równaniu: $H/L = 0,074L^{-0,23}$, opracowanej na podstawie wyników badań terenowych, przedstawionych w pracy Allena (1968). Oznacza to, że wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu w porównaniu z formami badanymi przez Allena są niższe i dłuższe, a przez to mniej strome.

Wyniki obliczeń parametrów hydraulicznych zamieszczono w tabeli 2. Również tutaj zastosowano nomenklaturę archiwalną, odnoszącą się do rejonów, gdzie prowadzono pomiary na odcinku badawczym Raby. Jak można zaobserwować, wydmy z rejonu R-5 powstały przy prędkości średniej od 0,39 do 0,47 $m \cdot s^{-1}$, przy czym wartość prędkości średniej nad szczytem wynosi $v_{sr} = 0,39 m \cdot s^{-1}$. Największą prędkość dynamiczną zlokalizowano nad doprądowną stroną wydmy ($0,04 m \cdot s^{-1}$). Największe $\tau = 1,334 N \cdot m^{-2}$ otrzymano nad stroną doprądowną, natomiast nad samym szczytem wydmy

naprężenie (τ) jest o połowę mniejsze ($\tau = 0,565 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$). Z kolei największe naprężenia bezwymiarowe $\Theta = 0,0294$ uzyskano nad doprądowną stroną wydmy, a nad jej szczytem $\Theta = 0,0125$. Wielkość naprężeń (Θ), jak sugeruje Carling (1999), wskazuje na to, że wydmy w chwili prowadzenia badań znajdowały się w fazie spłaszczenia. Natomiast wyniki obliczeń naprężeń stycznych (τ) niejako potwierdzają spostrzeżenia Radeckiego-Pawlika (2002b), który podał, że powstawanie wydym uzależnione jest od występowania znacznych naprężeń stycznych oraz że przy $\tau < 0,29 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ nie obserwuje się powstawania wydym. Z zestawienia wyników obliczeń w tabeli 2 można również odczytać, że w przypadku wydym R-5 zbioru Raba 3 zarówno współczynniki oporu $f_1 = 0,06517$, $f_2 = 0,00105$, jak i $f_3 = 0,00116$ wartości największe przyjmują nad doprądowną stroną formy, a najmniejsze nad zaprądownym stokiem. Nad szczytem wydym współczynnik oporu $f_1 = 0,02972$, $f_2 = 0,00044$, a $f_3 = 0,00049$.

Wydmy R-5 zbudowane zostały z drobnego żwiru (o średnicy $d_{50} = 0,0028 \text{ m}$), które powstały w warunkach przepływu podkrytycznego, przy liczbie Fr = 0,36 (nad szczytem) i Fr = 0,47 (nad zaprądownym stokiem). Carling (1999) podaje, że wydmy zbudowane z materiału o takiej właśnie średnicy i występujące przy takiej wielkości liczby Fr, to wydmy dwuwymiarowe (2D). Autor ten sugeruje jednak, by w przypadku, gdy dodatkowo wydma posiada kształt barchana, przypisać ją do grupy wydym trójwymiarowych (3D). Tak więc można przyjąć, że wydmy R-5 zbioru Raba 3 są wydmami trójwymiarowymi.

Oprócz wydym R-5 w zbiorze Raba 3 znalazły się także językoksztaltne wydmy R-6, zbudowane z drobnego żwiru ($d_{50} = 0,0021 \text{ m}$). Wydmy tego zgrupowania charakteryzują się tym, że największą prędkość średnią w pionie ($v_{sr} = 0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) zaobserwowano nad punktem szczytu formy, z kolei maksymalną prędkość dynamiczną ($v^* = 0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), jak również największe naprężenia styczne ($\tau = 0,799 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$) oraz bezwymiarowe ($\Theta = 0,0235$) otrzymano nad doprądowną stroną wydym. Naprężenia (τ) nad punktem szczytu jest mniejsze, równe $0,302 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$. Z obliczeń współczynnika oporu wynika, że wartości największe przyjmuje nad doprądowną stroną wydym, natomiast najmniejsze nad zaprądownym stokiem. Liczba Fr w obrębie wydym wynosi od 0,33 do 0,38, a nad szczytem 0,34. Głębokość wody w obrębie wydym grupy R-6 (mierzona nad punktem szczytu) nie przekraczała 0,15 m.

Forma denna Raba 8 (W) ma budowę żwirową ($d_{50} = 0,008 \text{ m}$), posiadającą kształt barchana, o linii szczytu skierowanej w kierunku dolnej wody. Wysokość wydmy wynosi 0,16 m, długość 1,80 m, a szerokość nie przekracza 2,50 m. Podczas prowadzenia pomiarów głębokość wody w obrębie wydmy nie przekraczała 0,20 m, a przepływ (Q) wynosił $3,90 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Największą prędkość średnią ($0,47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), prędkość dynamiczną ($0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz naprężenia τ ($0,717 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$) zlokalizowano nad szczytem wydmy (P3), a najmniejsze – po stronie zaprądownej (tab. 2). Naprężenia bezwymiarowe nad szczytem wydmy wynosiły $\Theta = 0,0076$ oraz $\Theta = 0,0012$ po stronie zaprądownej. Współczynnik oporu przepływu kształtował się w gra-

TABELA 2. Zestawienie parametrów hydrodynamicznych w rejonie badanych form
 TABLE 2. Hydrodynamical parameters within the region of researched dunes

Zbiór	Rejon pomiaru	Punkt	v_{sr} [m·s ⁻¹]	v^* [m·s ⁻¹]	τ_1 [N·m ⁻²]	Θ_1	Współczynnik oporu			Fr	d_{50} [mm]
							f_1	f_2	f_3		
Raba 3	R-5	P1	0,47	0,02	0,566	0,0125	0,02050	0,00044	0,00049	0,43	0,0028
		P2	0,44	0,02	0,566	0,0125	0,02501	0,00044	0,00049	0,47	
		P3	0,39	0,02	0,565	0,0125	0,02972	0,00044	0,00049	0,36	
		P4	0,39	0,04	1,334	0,0294	0,06517	0,00105	0,00116	0,39	
		P5	0,40	0,03	1,092	0,0241	0,05445	0,00086	0,00095	0,39	
Raba 8	R-6	P1	0,41	0,02	0,327	0,0096	0,01557	0,00026	0,00029	0,38	0,0021
		P2	0,40	0,01	0,151	0,0044	0,00756	0,00012	0,00013	0,34	
		P3	0,42	0,02	0,302	0,0089	0,01403	0,00024	0,00026	0,34	
		P4	0,36	0,02	0,573	0,0168	0,03535	0,00045	0,00050	0,32	
		P5	0,36	0,03	0,799	0,0235	0,04933	0,00063	0,00070	0,33	
Raba 12	W	5	0,19	0,01	0,115	0,0018	0,02537	0,00015	0,00006	0,16	0,008
		4	0,32	0,02	0,448	0,0062	0,03257	0,00058	0,00024	0,22	
		3	0,47	0,03	0,717	0,0076	0,02582	0,00093	0,00039	0,75	
		2	0,34	0,01	0,132	0,0012	0,00863	0,00017	0,00007	0,30	
		1	0,38	0,02	0,421	0,0037	0,02391	0,00054	0,00023	0,27	
Raba 12	W1	4	0,61	0,02	0,427	0,0038	0,00918	0,00132	0,00131	0,37	0,007
		3	0,52	0,02	0,413	0,0036	0,01223	0,00128	0,00127	0,33	
		2	0,56	0,02	0,377	0,0033	0,00963	0,00117	0,00116	0,41	
		1	0,40	0,02	0,521	0,0046	0,02605	0,00162	0,00160	0,26	
Raba 12	W2	1	0,34	0,04	1,592	0,0089	0,11015	0,00494	0,00489	0,25	0,0110
		2	0,81	0,02	0,607	0,0034	0,00740	0,00188	0,00187	0,67	
		3	0,66	0,01	0,194	0,0011	0,00357	0,00060	0,00060	0,44	
		4	0,50	0,02	0,432	0,0024	0,01383	0,00134	0,00133	0,24	
Raba 12	W3	1	0,42	0,04	1,335	0,0118	0,06053	0,00414	0,00410	0,27	0,007
		2	0,79	0,02	0,552	0,0049	0,00707	0,00171	0,00170	0,63	
		3	0,72	0,01	0,207	0,0018	0,00320	0,00064	0,00064	0,49	
		4	0,52	0,03	0,870	0,0077	0,02575	0,00270	0,00268	0,29	

nicach od $f_1 = 0,00862-0,03257$ do $f_2 = = f_3 = 0,00015-0,00093$. Wielkości tych współczynników są zbliżone do f_1, f_2 i f_3 wydm R-5 i R-6 (Raba 3) oraz wykazują zadowalającą zgodność z wynikami obliczeń współczynnika (f) podanymi w pracy Gładkiego (1976), otrzymanymi na podstawie badań oporów ruchu na dnie rzeki Raby.

Ostatnią diskutowaną grupę wydm reprezentują formy żwirowe W1, W2 oraz W3 (zbiór Raba 12), o średnicy ziaren d_{50} odpowiednio: 0,007, 0,011 i 0,007 m. Wydma 1 to forma o wysokości 0,09 m, długości 1,6 m i szerokości 6,5 m. Wydma 2 jest trzykrotnie wyższa i dłuższa w porównaniu z wydmą 1. Trzecia z form to wydma o wysokości 0,08 m, długości 2,20 m i szerokości 6,5 m. Są to wydmy językkształtne.

W dniu pomiarów głębokość wody (h) w obrębie wydm nie przekraczała 0,45 m. Największą prędkość średnią, równą $0,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla W1, $0,79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla W2 oraz $0,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla W3 zlokalizowano nad punktem szczytu form. Największe naprężenia τ (podobnie jak bezwymiarowe naprężenia Θ) otrzymano nad zaprawową stroną form. Jeśli chodzi o współczynnik oporu, to zarówno f_1 , jak i f_2 największe wartości, odpowiednio 0,11015 i 0,00494, przyjmują nad zaprawową stroną formy (W2). Z wyników obliczeń parametrów hydraulicznych można zauważyć, że największe wartości liczby $Fr = 0,44-0,63$ odnotowano nad punktem szczytu form.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań wysunięto następujące wnioski:

1. Wydmy opisane w pracy charakteryzują się długością od 0,6 do 1,8 m. Mogą odpowiadać głębokości wody (h) w obrębie form, jak również osiągać 5-krotność tej głębokości.
2. Związek pomiędzy wysokością wydm (H) a długością (L) opisuje zależność funkcjonalna, w postaci: $H = 1,072L - 2,95$ ($r = 0,55$; $0,28 < r < < 0,73$; $\alpha = 0,05$; $n = 38$; $F_{\text{kryt}0,05;1;38} = 4,11 < F_{\text{obl}} = 15,62$). Omawiane wydmy odcinka rzeki Raby są krótsze i niższe w porównaniu z wydmi opisanymi w literaturze.
3. Postać funkcji aproksymującej zależność stromości wydm od ich długości przedstawia się następująco: $H/L = = -0,052L + 0,107$ ($r = -0,42$; $-0,31 < r < 0,32$; $\alpha = 0,05$; $n = 38$; $F_{\text{kryt}0,05;1;38} = 4,11 < F_{\text{obl}} = 7,30$). Stwierdzono, że zdecydowana większość punktów odpowiadających $H/L = f(L)$ badanych wydm znajduje się poniżej wykresu prostej o równaniu: $H/L = 0,074L^{-0,23}$, opracowanego na podstawie badań przedstawionych w klasycznej pracy Allena (1968). Oznacza to, że wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu są niższe i dłuższe, a więc i mniej strome.
4. Wydmy piaszczyste o prostej linii szczytu znalezione na badanym odcinku rzeki Raby pod względem wysokości (H), długości (L) oraz wielkości wskaźnika stromości (H/L) odpowiadają klasycznym wydmom o prostej linii szczytu, opisywanym w literaturze przedmiotu.
5. Przy napełnieniu wodą w korycie nieprzekraczającym 0,80 m na dnie ujściowego odcinka rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym możliwe jest tworzenie się żwirowych wydm je-

- zykokszałtnych o linii szczytu ułożonej zgodnie z kierunkiem przepływu.
6. Największa prędkość średnią (v_{sr}), w zakresie $0,39\text{--}0,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, występuje nad punktem szczytu badanych wydym.
 7. Naprężenia styczne (τ) w obrębie wydym językkształtnych form wynoszą $0,115\text{--}1,59\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, natomiast naprężenia bezwymiarowe (Θ) $0,0044\text{--}0,0294\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$.
 8. Możliwe jest występowanie wydym zbudowanych z ziaren o średnicy $d_{50} > 0,002\text{ m}$ przy naprężeniach bezwymiarowych mniejszych od $0,025\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$.
 9. Wielkość współczynnika oporu przepływu: $f_1 = 0,00707\text{--}0,02900$, $f_2 = 0,00024\text{--}0,00188$ oraz $f_3 = 0,00026\text{--}0,00187$ (nad punktem szczytu wydym) odpowiada wielkości współczynnika oporu (f) występującemu w obszarze wydym klasycznych ($0,042 < f < 0,16$).
- CARLING P.A. 1999: Subaqueous gravel dunes. *Journal of Sedimentary Research* 69: 534–545.
- CARLING P., READER N. 1982: Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels. *Earth Surface Processes and Landforms* 7, 4: 349–365.
- CARLING P.A., GÖLZ E., GLAISTER M., RADECKI-PAWLIK A., ROSENZWEIG S. 1993: Study and numerical modelling of sub-aquatic dunes in the River Rhine near Niderwalluf. BFG, Koblenz Institute of Freshwater Ecology, Ambleside, UK, Koblenz, Niemcy, BIG-no-0774.
- CARLING P.A., GÖLZE., ORR H.G., RADECKI-PAWLIK A. 2000: The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology* 47: 227–252.
- CARLING P.A., RADECKI-PAWLIK A., WILLIAMS J.J., RUMBLE B., MESHKOVA L., BELL P., BREAKSPEAR R. 2005: The morphodynamics and internal structure of intertidal fine-gravel dunes. 8th International Conference on Fluvial Sedimentology, August 7–12, Delft University of Technology, Netherlands.
- CARLING P.A., RADECKI-PAWLIK A., WILLIAMS J.J., RUMBLE B., MESHKOVA L., BELL P., BREAKSPEAR R. 2006: The morphodynamics and internal structure of intertidal fine-gravel dunes: Hill Flats, Severn Estuary, *Sedimentary Geology* 183: 159–179.
- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- DINEHART R.L. 1989: Dune migration in a steep, coarse bedded stream. *Water Resources Research* 25: 911–923.
- FLEMMING B.W. 1988: Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Boch. Geol. U. Geotechn. Arb.* 29.
- GŁADKI H. 1976: Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie karpackich dopływów Wisły. Rozpr. hab. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie* 118.

Literatura

- ALLEN J. 1968: Current ripples: their relation to patterns of water and sediment motion. North Holland Publ., Amsterdam.
- ASHLEY G. 1990: Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at the old problem. *J. Sedim. Petrol.* 60: 160–172.
- BERGERON N.E., ABRAHAMS A.D. 1992: Estimating shear velocity and roughness length from velocity profiles. *Water Resources Research* 28, 8: 2155–2158.
- BEST J. 1996: The fluid dynamics of small-scale alluvial bedforms. In: *Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy*. Eds. P.A. Carling, M.D. Dawson, Chichester, U.K., Wiley: 67–125.

- GORDON D.N., MCMAHON T.A., FINLAYSON B.L. 1992: Stream Hydrology – an Introduction for Ecologists. Wiley and Sons, London.
- KLEINHAUS M. 2002: Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers. Proefschrift Universiteit Utrecht, PhD Thesis.
- KRZANOWSKI S. 1972: Przestrzenna zmienność odpływu średniego (spływu jednostkowego) na obszarze Karpat polskich. Praca doktorska, maszynopis.
- KSIĄŻEK L., FLOREK J., ŚWIDERSKA A., RADECKI-PAWLIK A. 2007: Zmiany morfologiczne oraz granulometryczne w rejonie ujściowego odcinka rzeki Raby. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Komis. Tech. Inf. Wsi PAN Oddz. w Krakowie 1: 42-52.
- MICHALIK A., BARTNIK W., KRÓL L., NIZIOŁEK A., RADECKI-PAWLIK A. 1996: Badania składu granulometrycznego rumowiska w rzekach górskich metodą zamrażania próby in situ. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie* 306: 79–92.
- RADECKI-PAWLIK A. 2002a. Określenie wartości współczynnika szorstkości koryta potoku górskiego na podstawie pomiarów terenowych. *Zesz. Nauk. AR Kraków* 23: 251–261.
- RADECKI-PAWLIK A. 2002b: Wybrane zagadnienie kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawy* 281.
- RADECKI-PAWLIK A., CARLING P.A., SŁOWIK-OPOKA E., BREAKSPEARE R. 2005: Badania terenowe form żwirowo-piaszczystych w rzece o charakterze podgórskim. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, Komis. Tech. Inf. Wsi, PAN Oddz. w Krakowie 4: 119-133.
- RADECKI-PAWLIK A., CARLING P., SŁOWIK-OPOKA E., KSIĄŻEK L., BREAKSPEARE R. 2006: Field investigations of sand-gravel bed forms within the Raba River, Poland. *River Flow Monograph* edited by Rui. M.L. Ferreira, Elsa C.T.L. Alves, Jao G.A.B. Leal and Antonio H. Cardoso, Engineering, Water and Earth Science, AABALKEMA Taylor&Francis group, Rotterdam.
- SIMONS D.B., RICHARDSON E.V. 1966: Resistance to flow in alluvial channels. U.S. Geol. Surv. Profess. Papers 422-J.
- SŁOWIK-OPOKA E. 2006: Warunki hydrauliczne kształtujące dno rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym. Praca doktorska. KIW, WIŚiG, AR Kraków.
- SŁOWIK-OPOKA E., RADECKI-PAWLIK A. 2006: Wybrane parametry hydrauliczne w obrębie wydmy żwirowych językokoształnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4/2: 159–172.
- SOBOTA J. 1994: Hydraulika. T. I i II. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- WILLIAMS J., CARLING P., BELL P. 2007: Dynamics of Intertidal gravel dunes II. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 50: 673–677.
- YALIN M. 1964: Geometrical properties of sand waves. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, Raport 90.

Summary

On chosen problems with sand-gravel subaquatic dunes formation along the outlet of highland river. In the paper the research results of forming observations of sand-gravel dunes developing on the riverbed along the outlet reach of the highland type of river. The subject of subaquatic river forms one can find in many scientific works, however most of the existing papers cover sand dunes and ripples found in the lowland rivers. Moreover, the majority of research was conducted in laboratory flumes, since all fieldworks need very complex research, complicated logistic as well as is extremely money consuming (hiring ships, diving bell, long time echosounding etc.). Thus there is a nowadays need to present field data covering a subject of the river bed forms which still could be considered as dunes but are built up with material coarser than 2 mm (which is fine gravel) and coarser. The research reach described along the present paper is lying in the region of confluence of the Raba and the Vistula Rivers, within the outlet of the Raba River, close to Uscie Solne, just below the

Polish Carpathians mountains line. The research results show such parameters as: length, height and granulometric composition of the dunes found along that reach as well as the hydrodynamics parameters such as: shear velocity, shear stresses and resistant coefficients. Having gathered in one place the field measurements results many relationships between mentioned parameters are presented. The work could be useful for river engineers, fluvial geomorphologists, geologists and ecologists working with river channels.

Author's address:

Artur Radecki-Pawlik
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Inżynierii Wodnej
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków