

*Artur Radecki-Pawlik, Paul A. Carling,
Ewa Słowik-Opoka, Richard Breakspeare*

BADANIA TERENOWE FORM ŻWIROWO-PIASZCZYSTYCH W RZECE O CHARAKTERZE PODGÓRSKIM

Streszczenie

Artykuł przedstawia ważny, zarówno w zakresie badań podstawowych, jak i w aspekcie praktycznym, problem wpływu utworów żwirowo-piaszczystych w rzece o charakterze podgórskim na wielkość przepływu obliczeniowego. W ciekach naturalnych, z powodu przestrzennego charakteru ruchu i wahań przepływu w czasie, układ form dennych jest złożony. Formy te zmieniają się nie tylko w czasie i na długości koryta, ale także na jego szerokości i odgrywają znaczną rolę w tworzeniu warunków hydraulicznych w korycie. Ponadto, w zależności od generującego je przepływu występują one jako formy dwu- lub trójwymiarowe. Doniesień na temat pomiarów terenowych utworów rzecznych w postaci wydym i zmarszczek, zbudowanych z materiału o średnicach większych niż piaskowe, jest zaledwie kilka. Większość prac ujmujących problematykę powstawania, migracji i dyssypacji form dennych dotyczy utworów formujących dno rzeki nizinnej.

W pracy przedstawione zostały wstępne wyniki badań terenowych form piaszczystych oraz żwirowo-piaszczystych, znalezionych na ujściowym odcinku rzeki o charakterze podgórskim. Badania te obejmują pomiary parametrów geometrycznych form, tj. wysokość, długość oraz kąt nachylenia strony doprądowej i zaprądowej, pomiary prędkości chwilowych nad charakterystycznymi punktami form, a także pobór prób rumowiska do analizy składu granulometrycznego. Na podstawie danych zebranych bezpośrednio w terenie opracowano wiele zależności empirycznych oraz graficznych, a także wyznaczono całą gamę parametrów hydraulicznych, m.in. naprężenia styczne czy współczynnik oporów przepływu. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła autorom niniejszej

pracy uzyskać pewne informacje na temat tego, w jakich warunkach hydraulicznych formy denne badanego odcinka powstają, migrują oraz ulegają rozmyciu, a także w jakim stopniu obecność tych form na dnie rzeki wpływa na zmianę wartości współczynnika szorstkości. Badania te mogą być wykorzystane w praktyce przez projektantów regulacji rzek i potoków w rejonie podgórskim.

Słowa kluczowe: formy denne, rzeka podgórska, współczynnik szorstkości, regulacje rzek

WPROWADZENIE

Cieki naturalne, występujące w obrębie zlewni podgórskiej, nieustannie prowadzą zarówno wodę, jak i rozdrobniony materiał skalny, zwany rumowiskiem rzeczonym. Wynikiem wzajemnego oddziaływania tych dwóch ośrodków (płyn-ziarno) jest zmiana morfologii dna cieku. Cząstki sedymentu, przemieszczając się zgodnie z kierunkiem nurtu, nie rzadko gromadzą się w większe zgrupowania ziaren. Wtedy ma miejsce formowanie się struktur bardziej stabilnych, o różnorodnej geometrii oraz uziarnieniu, powodujących powstawanie oporów ruchu, których wielkość uzależniona jest od kształtu czy rozmiarów tych utworów [Gładki 1976; Dąbkowski 1982; Carling 1996; Carling 1999; Parzonka i in. 2002; Radecki-Pawlik 2002]. Powstałe struktury odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu wielkości przepływu wody poprzez zmianę szorstkości dna, a w konsekwencji zmianę warunków hydraulicznych oraz wysokości piętrzenia. Jest to niezmiernie ważne dla projektantów wodno-melioracyjnych, przy regulacji rzek i potoków górskich. Niejako równolegle ze zmianami hydrauliki koryta zaznaczają się również zmiany warunków hydro-ekologicznych, kształtujących tzw. życie biologiczne w cieku, co jest ostatnio zauważalne w sytuacji rabunkowego poboru rumowiska rzeczowego, zwłaszcza żwiru [Radecki-Pawlik 2001]. Znajomość wielkości współczynnika szorstkości jest zagadnieniem bardzo istotnym, ponieważ wiedza ta umożliwia poprawne określenie wielkości przepływu miarodajnego, który odgrywa zasadniczą rolę w początkowej fazie procesu projektowania budowl i urządzeń wodnych oraz w melioracjach rolniczych.

Generalnie występowanie utworów dennych na dnie rzeki o charakterze podgórskim jest w chwili obecnej zagadnieniem słabo poznanym. Wynika to m.in. z trudności w przeprowadzaniu badań terenowych. Dotychczas badania tego rodzaju form w rzece o podłożu żwirowo-piaszczystym nie były prowadzone w naszym kraju, a w za-

granicznych ośrodkach badawczych są one dopiero zapoczątkowane [Carling i in. 2005].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wstępnych wyników badań terenowych form żwirowo-piaszczystych kształtujących dno ujściowego odcinka rzeki podgórskiej. Na podstawie wyników możliwe będzie określenie warunków kształtowania się oraz zanikania poszczególnych formacji dennych. Praca ma także na celu ustalenie w jakim stopniu pojawianie się zgrupowań żwirowo-piaszczystych wpływa na zmianę szorstkości dna i opory ruchu, a więc pośrednio na zmianę wielkości przepływu i transport rumowiska wleczonego. Praktycznym aspektem pracy jest podanie wartości współczynnika szorstkości z uwzględnieniem wielkości formy korytowej, co jest istotne przy wykonywaniu prawidłowych obliczeń dla celów regulacji technicznej rzeki górskiej.

MATERIAŁY I METODY

Opis obiektu badań

Obiektem badań był ujściowy odcinek rzeki Raby w miejscowości Uście Solne. Rzeka Raba bierze swój początek w pobliżu miejscowości Obidowa na wysokości 785 m n.p.m. i przepływa przez trzy główne regiony hydrograficzne, tj. Karpaty Zewnętrzne – Beskidy, Pogórze Karpackie oraz Kotlinę Sandomierską, a jej zlewnia wynosi 1537 km². Bieg rzeki osiąga długość 137 km, przy średnim spadku równym 4,4‰. W strefie karpackiej znajduje się 86% dorzecza, co przesądza o jej charakterze podgórskim. W budowie geologicznej obszaru badań przeważają utwory gruboklastyczne, o średnicy ziarna przekraczającej niekiedy 1 cm, wśród których przeważają zdecydowanie piaskowce karpackie, a drobniejsze żwiry składają się zarówno z kwarcu, jak piaskowców. Odcinek źródłowy charakteryzuje się znaczną ilością dopływów, a więc potoków ze znacznymi spadkami, niejednokrotnie większymi od 50 ‰, z których największy to prawobrzeżny dopływ Poniczanka. W obrębie omawianego obszaru badań dorzecze jest wyjątkowo wąskie, o szerokości średniej równej 3 km, gdzie zaznacza się brak dopływów.

Odcinek rzeki, na którym przeprowadzono pomiary terenowe formacji dennych żwirowo-piaszczystych, o różnej postaci, położony jest na wysokości 180,0 m n.p.m. i rozciąga się na długości 200 m. Średni spadek badanego odcinka rzeki wynosi 1,98‰. Koryto rzeki ma średnią szerokość 45 m. W poszczególnych dniach, kiedy przepro-

wadzano pomiary terenowe średnie napełnienie wodą w korycie wynosiło 0,5m. Przepływ średni roczny obliczony wg wzoru Krzanowskiego [1972] wynosi 20,86 [m³·s⁻¹], a przepływ średni niski 2,71 [m³·s⁻¹]. Na całym odcinku objętym badaniami zaznacza się zróżnicowanie w budowie granulometrycznej dna. Występują tu zarówno żwiry, jak i piaski.

METODYKA BADAŃ

Metodyka pracy obejmowała pomiary terenowe, a następnie prace studialne. W ramach prac terenowych wykonano głównie pomiary geometrii form kształtujących dno rzeki oraz pobrano próby materiału budującego te utwory do analizy granulometrycznej. Pomierzono również rozkłady prędkości w pionach tachimetrycznych w rejonie badanych formacji żwirowo-piaszczystych w celu obliczenia współczynnika szorstkości n . Ponieważ geometrię utworów korytowych opisuje się za pomocą takich dwóch parametrów, jak wysokość formy w punkcie szczytu (H) i jej długość (L), te właśnie dane zostały pozyskane bezpośrednio w terenie. Dodatkowo zmierzono kąt nachylenia strony dopływowej i zapływowej form. W związku z tym, że wielu autorów [m.in. Yalin 1964; Allen 1968] przypisuje zmiany w geometrii form zmianie głębokości wody w korycie, zmierzone zostało również napełnienie nad charakterystycznymi punktami form.

Pomiary granulometryczne polegały na poborze prób sedymentu budującego formy denne. W przypadku utworów większych, próby pobrano w charakterystycznych punktach form: ze strony dopływowej, ze szczytu oraz ze strony zapływowej. W przypadku małych form pobieranie prób 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 może być zastosowana m.in. do wzoru Stricklera do obliczania współczynnika szorstkości n .

Na podstawie pomierzonych wielkości możliwe było przystąpienie do wykonania prac kameralnych, a w szczególności do wyznaczenia charakterystyk geometrycznych utworów rzecznych i na ich podstawie przeprowadzono wiele analiz porównawczych, których wyniki umożliwiły wskazanie pewnych różnic i podobieństw między własnościami geometrycznymi form dennych oraz warunkami hydraulicznymi transportu rumowiska. W literaturze przedmiotu opublikowane zostały klasyczne związki empiryczne dotyczące geometrii form

w rzekach, np. wysokość formy w zależności od jej długości, czy też wskaźnik stromości formy (H/L) [Allen 1968] Przykładem klasycznym zależności między wysokością formy H i jej długością L jest opracowane przez Flemminga dla rzek o dnie piaszczystym, równanie postaci [Carling i in. 1993]:

$$H = 0,16 L^{0,84}, \quad (1)$$

które opisuje tzw. górne ograniczenie, po przekroczeniu którego nie obserwuje się dalszego wzrastania form. Allen [1968], z kolei, na podstawie wielu prac dotyczących wskaźnika stromości wyraził stromość formy w zależności od jej długości:

$$H/L = 0,074 L^{-0,23} \quad (2)$$

W ramach badań terenowych zmierzono zostało również napełnienie wody w korycie w obrębie występowania form dennych. Dane te posłużyły do opracowania nomogramów ujmujących związek, kolejno pomiędzy wysokością formy H, jej długością L, a napełnieniem wody w korycie h (H/h, L/h). Yalin [1964] i Allen [1968] zdefiniowali górne i dolne ograniczenie tych zależności. Górne ograniczenie dla H/h = 0,4, dolne H/h = 0,025, natomiast górnym limitem dla L/h jest 16, a dolnym wartość 0,1.

Podczas prac kameralnych, zwrócono szczególną uwagę na zmiany współczynnika szorstkości, w zależności od zastosowanej formuły obliczeniowej. Autorzy pracy, mając na uwadze spostrzeżenia m.in. Bakera i Pickupa [1987], Radeckiego-Pawlika [2002] oraz Parzonki [Parzonka i in. 2002], że obliczanie szorstkości w przekroju rzeki górskiej powinno mieć miejsce z uwzględnieniem wysokości form budujących relief dna, obliczyli wartość współczynnika szorstkości n na podstawie zarówno oryginalnej formuły Stricklera, w której dodatkowo średnica miarodajna d_{50} (zamiennie z wysokością szorstkości) zastąpiona została bezwzględną wysokością formy dennej. Formuła Stricklera ma postać:

$$k = \frac{21,1}{\sqrt[6]{d}} \quad (3)$$

$$n = \frac{1}{k} \quad (4)$$

gdzie:

k – współczynnik Stricklera,

d – średnica miarodajna lub wysokość szorstkości (która może być zastąpiona wysokością formy H) [m],

n – współczynnik szorstkości.

Współczynnik szorstkości n obliczono także z zastosowaniem formuły Stricklera, w modyfikacji Gładki [1976] (6), która opierając się na wynikach przeprowadzonych badań terenowych zdefiniowała K_s , dla cieków karpackich:

$$K_s = 2,54 d_{s0}, \quad (5)$$

$$n = 0,067 K_s^{0,33}, \quad (6)$$

gdzie:

n – współczynnik szorstkości Manninga,

K_s – wysokość szorstkości,

d – średnica ziaren [m].

Wykorzystując dane z pomierzonych profili prędkości w rejonie form dennych, wyznaczono współczynnik szorstkości, korzystając ze wzoru Chézy na średnią prędkość przepływu wody.

Znajomość wielkości współczynnika szorstkości jest również wykorzystywana do obliczania transportu rumowiska wlezonego. Niektórzy autorzy [Parzonka i in. 2002] zauważają, że istniejący w empirycznej formule na obliczanie intensywności wleczenia Meyer-Petera i Müllera parametr K_s/K_r , uwzględniający wpływ transportu i zmiany form dennych na opory przepływu ma istotne znaczenie i nie zawsze jest, jak zwykle się przyjmować, równy 1, bowiem taka sytuacja może mieć miejsce w przypadku prawie płaskiego dna. Jak pokazują wyniki analiz ilorazu K_s/K_r , przeprowadzone dla Górnego i Środkowego odcinka rzeki Bóbr [Parzonka i in. 2004], a także górnej Odry [Parzonka i in. 2002], gdzie może on przyjmować wartość od 0,60–0,88 (dla średnicy d_{50} rzędu 15 mm), zaś dla odcinka środkowej Odry od 0,39–0,63, przy wyrównanym spadku zwierciadła wody oraz materiale drobnym, o średnicy rzędu 1 mm.

W prezentowanym artykule, korzystając z formuły (7), zawierającej takie wielkości, jak promień hydrauliczny R_h i spadek koryta

I oraz współczynnik prędkości C wg Manninga (6), w wyniku przekształceń wzoru obliczony został współczynnik szorstkości n . Klasyczny wzór Chézy przedstawia się następująco [Sobota 1994]:

$$v = C\sqrt{R_h I} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (8)$$

gdzie:

- v – prędkość średnia [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- C – współczynnik prędkości Manninga,
- R_h – promień hydrauliczny [m],
- I – spadek hydrauliczny [-],
- n – współczynnik szorstkości [-].

Wartości prędkości średniej odczytano z tachoid prędkości opracowanych na podstawie pomiarów prędkości chwilowej nad charakterystycznymi punktami form. Wartości współczynnika szorstkości z pomiarów wyznaczono, wykorzystując sposób podany przez Chow [1959]:

$$n = \frac{(x-1) \cdot y^{\frac{1}{6}}}{6,78 \cdot (x+0,95)} \quad (9)$$

gdzie:

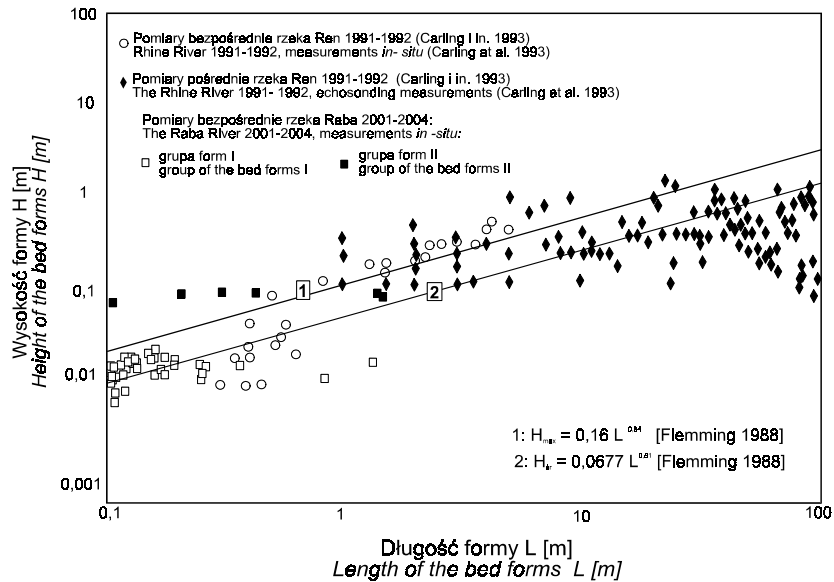
- $x = \frac{v_{0,8}}{v_{0,2}}$,
- y – maksymalne napełnienie w przekroju [m],
- $v_{0,2}$ – wartość zmierzonej prędkości na wysokości $0,2y$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- $v_{0,8}$ – wartość zmierzonej prędkości na wysokości $0,8y$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

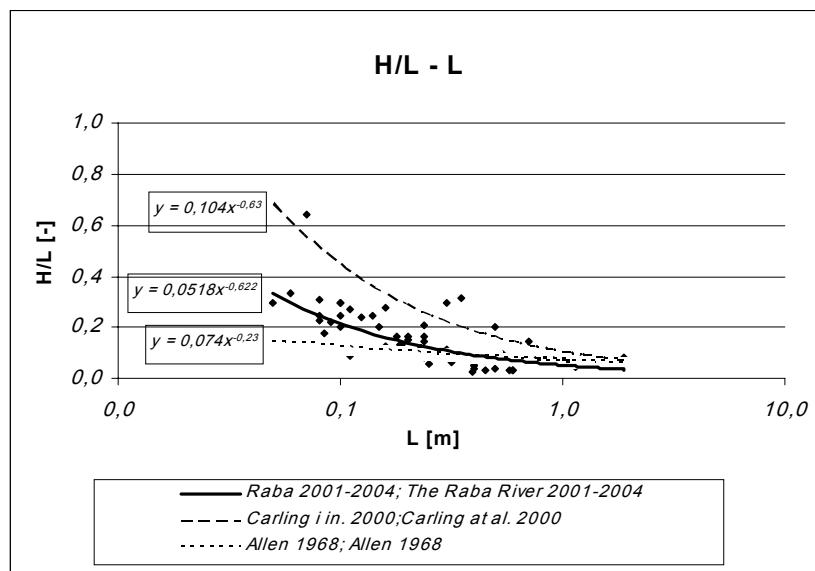
Wyniki badań terenowych przedstawione zostały w postaci graficznej oraz tabelarycznie. Na rysunku 1, przedstawiającym zależność wysokości formy H od jej długości L , na który naniesione zostały dane z Raby, wyodrębnione zostały dwie grupy punktów, oznaczone sym-

bolem I i II. Grupę I reprezentują formy o długości od 0,1 do 0,6 m i wysokości od 0,01–0,04m oraz średnicy $d_{50} < 6$ mm. Grupa II ujmuje utwory większe, o długości od 0,1 do 1,4 m, wysokości 0,2 m i średnicy ziaren z przedziału $0,002 < d_{50} < 0,004$ m. Większość zbadanych utworów budujących dno badanego odcinka to małe formy piaszczyste i żwirowo-piaszczyste przypisane do grupy (I) oraz utwory grupy (II), o długości odpowiadającej opisywanym w literaturze wydmom [Allen 1968], lecz znacznie mniejsze w wysokości. Wyniki pomiarów geometrii form badanego odcinka Raby (rys. 1) ujęte zostały równaniem funkcji potęgowej postaci: $H = 0,05 L^{0,35}$ ($r^2 = 0,47$; $F_{0,05 (1;55)} = 3,95$; $\alpha = 0,05$; $n = 57$). Dane te zostały porównane z równaniami klasycznymi, opracowanymi przez Flemminga [1988] oraz Carlinga [Carling i in. 1993]. Wyniki pomiarów z Raby w pewnym stopniu potwierdzają spostrzeżenia Flemminga dotyczące wzrostu form. Rozmieszczenie grupy punktów (II) pomiędzy linią 1 i 2 sugeruje, że wzrostowi długości form nie musi towarzyszyć wzrost w ich wysokości. Można również zauważyć, że utwory żwirowo-piaszczyste ujściowego odcinka rzeki są niższe, w porównaniu z formami przedstawionymi przez Flemminga. Prawdopodobnie czynnikiem powodującym tą sytuację jest różnica w budowie granulometrycznej materiału dna rzeki.

Interesująco z punktu widzenia przebiegu omawianego zjawiska przedstawia się zależność stromości formy (H/L) od jej długości (L), przedstawiona na rysunku 2. Dane zebrane bezpośrednio w terenie posłużyły do wykreślenia zależności (H/L)/L, która następnie porównana została z wykresami opracowanymi przez Allena [1968] oraz Carlinga [Carling i in. 1993]. Dane z rzeki Raby, ujęte równaniem postaci $H/L = 0,0518 L^{0,622}$ ($r^2 = 0,71$; $F_{0,05 (1;51)} = 7,24$; $\alpha = 0,05$; $n = 52$) mieszczą się prawie w całości pomiędzy krzywymi opracowanymi przez Allena [1968] i Carlinga [Carling i in. 1993]. Wskaźnik stromości form rzeki Raby (H/L) zawiera się pomiędzy 0,05 a 0,35 i prawie w 50% uzależniony jest od ich długości. Utwory te są jednak bardziej strome, w porównaniu z danymi Allena oraz mniej strome w stosunku do wydm, występujących na dnie rzeki Ren, badanych przez Carlinga [Carling i in. 1993].

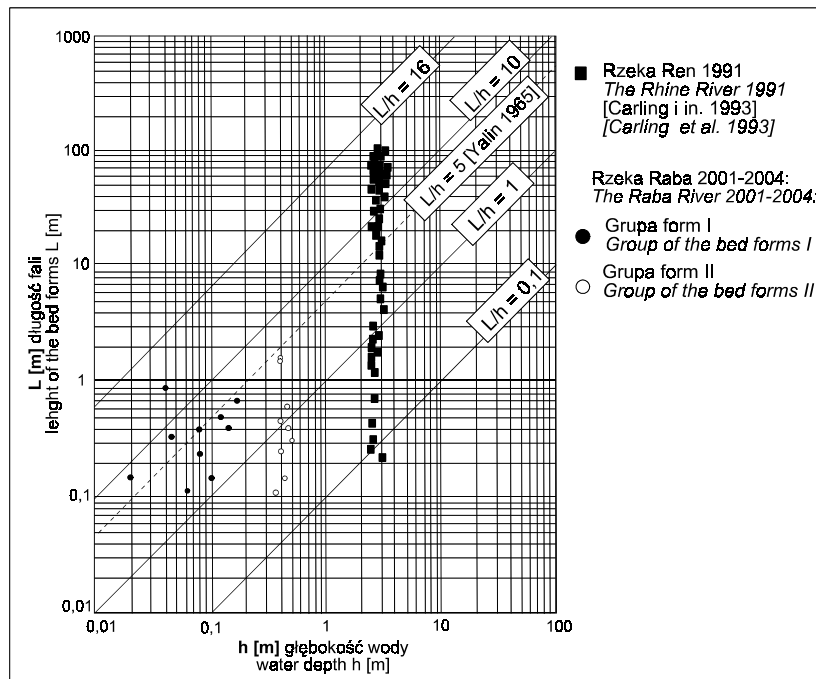


Rysunek 1. Zależność wysokości formy H od jej długości L
Figure 1. Height-Length relation

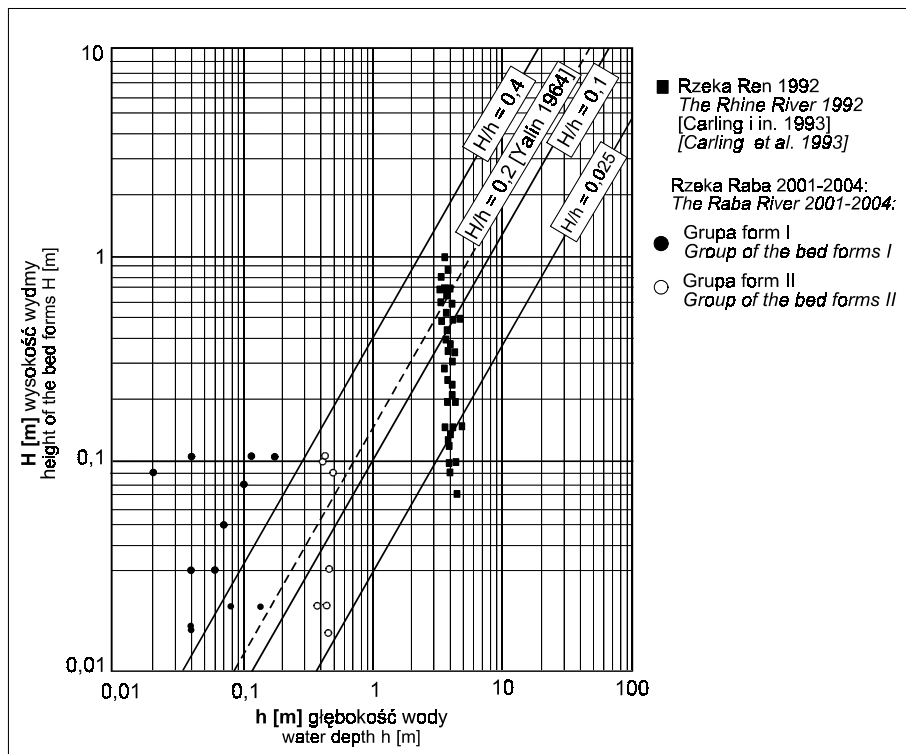


Rysunek 2. Zależność wskaźnika stromości formy H/L od jej długości L
Figure 2. Steepness of the bed forms H/L versus bed forms lengths L

Na rysunku 3a i 3b przedstawiono zależności: długości formy (L) oraz wysokości formy (H) z napełnieniem wodą w korycie h , w obrębie występowania poszczególnych form. I tak w przypadku pierwszym (rys. 3a), spośród danych uzyskanych z Raby wyszczególniono dwie charakterystyczne grupy punktów. Grupa pierwsza, oznaczona symbolem I, obejmowała utwory o długości od 0,1 do 1,0 m przy napełnieniu h (mierzonym bezpośrednio nad formą) od 0,02–0,18 m, druga natomiast to grupa form (II) o długości od 0,1 do 1,7 m, oraz h w granicach od 0,35 do 0,5 m. Grupa I mieści się pomiędzy ograniczeniami $L/h = 1$ oraz $L/h = 10$, natomiast grupa punktów II ograniczona jest $L/h = 0,1$ i $L/h = 5$ [Yalin 1964]. Kolejno, na rysunku 3b, podobnie jak na rysunku 3a, udało się wyodrębnić dwa zgrupowania punktów: I i II. Punkty należące do obydwu grup odpowiadały utworom dennym o wysokości od 0,015 m do 0,11 m, z tą różnicą, że w pierwszej z nich (I) formy występowały przy napełnieniu nie większym niż 0,2 m, zaś grupa II to formy tworzące się przy napełnieniu w obrębie występowania form, od 0,39–0,5 m. Ponadto, grupa I w całości znajduje się powyżej ograniczenia $H/h = 0,4$, podczas gdy grupa II znajduje się w przedziale od $H/h = 0,025$ do $H/h = 0,4$.



Rysunek 3a. Zależność długości formy L od napełnienia wodą h
Figure 3a. Lengths of the bed forms L versus water depth h



Rysunek 3b. Zależność wysokości formy H od napełnienia wodą h
Figure 3b. Heights of the bed forms H versus water depth h

Wyniki obliczeń współczynnika szorstkości n zestawiono w tabeli 1. Pokazują one, że współczynnik ten wartość najniższą, równą 0,012 przyjmuje przy wykorzystaniu do obliczeń formuły Gładkiego oraz wzoru Stricklera, z uwzględnieniem średnicy d_{50} , natomiast obliczoną wartość maksymalną, równą 0,05 – stosując wzór Chézy. Zastosowanie wzoru Stricklera z zastąpieniem d_{50} wysokością formy dennej H spowodowało uzyskanie pośrednich wartości współczynnika n , w zakresie od 0,02–0,04. Najwyższą wartością współczynnika szorstkości, równą 0,06 jest wartość odczytana z tablic opracowanych przez Ven Te Chow'a.

Tabela 1. Zestawienie wartości współczynnika szorstkości n z pomiarów w terenie
Table 1. Roughness coefficients values n based on field measurements

Punkty pomiarowe (nazewnictwo zachowane zgodnie z materiałami archiwalnymi) Measuring points (nomenclature after archival materials from the field)	Liczba Reynoldsa (Re)	Przepływ Q [m ³ s ⁻¹] Water discharge Q [m ³ s ⁻¹]	Wartości n n value				z pomiarzonego profilu prędkości, dla formuły Chezy from measured velocity profiles, for Chezy formula	formuła Ven Te Chow's equation
			formuła Stricklera Strickler's equation		w modyfikacji Gładki (1976) modified by Gładki (1976)			
			dla zmierzonoj wysokości formy H	for measured bed form height H	dla zmierzonoj Gładki (1976) modified by Gładki (1976)	for measured bed height H		
R1	8550	4,1	0,0173	0,0264	0,0164	0,0190	0,0551	
R2 (P3)	9400		0,0173	0,0264	0,0164	0,0718	0,0158	
R3 (P1)	4500		0,0173	0,0317	0,0164	0,0764	0,0412	
R4 (P1)	34 000		0,0173	0,0311	0,0164	0,0505	0,0177	
R5 (P2)	39 600		0,0178	0,0264	0,0193	0,0365	0,0403	
R6 (P1)	49 200		0,0170	0,0328	0,0195	0,0419	0,0128	
D2(P2)	217 300	11,4	0,0159	0,0160	0,0134	0,0452	0,0337	
D2(P3)	221 400		0,0212	0,0160	0,0248	0,0351	0,0377	
D2 (P2)	58 800		0,0146	0,0323	0,0117	0,0351	0,0482	
D3 (P2)	39 200	11,4	0,0157	0,0323	0,0113	0,0351	0,0269	
P 1.1	391 500		0,0160	0,0247	0,0157	0,0198	0,0047	
P 1.2	389 500	7,5	0,0202	0,0220	0,0238	0,0181	0,0112	
P3	87 000		0,0146	0,0247	0,0127	0,0296	0,0071	
P4	24 500		0,0187	0,0220	0,0193	0,0351	0,0133	
22.04.2004			0,0189	0,0264	0,0212	0,0312		
23.04.2004 A (1)	-	10,6	0,0134	0,0323	0,0227	0,0382		
23.04.2004 A (2)			0,0136	0,0323	0,0119	0,0344		
23.04.2004 B (1)			0,0129	0,0247	0,0083	0,0337		
23.04.2004 B (2)			0,0160	0,0317	0,0127	0,0344		
Seria C Zm	187 000	3,9	0,0152	0,0247	0,0124	0,0300	0,0126	
W1 (P3)	18 800		0,0193	0,0349	0,0227	0,0400	0,0131	
L (P6)	384 000		0,0220	0,0482	0,0256	0,0179	0,0177	
Zm (P3)	65 000	8,3	0,0160	0,0304	0,0157	0,0344	0,0100	

WNIOSKI

Na podstawie powyższych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Napotkane formacje denne, kształtujące ujściowy odcinek rzeki Raby to utwory żwirowo-piaszczyste, odpowiadające pod względem parametrów geometrycznych, klasycznym zmarszczkom oraz wydmom w rzece nizinnej o dnie piaszczystym. Formacje te mają wpływ na wartość współczynnika szorstkości, a co za tym idzie na opory ruchu i wielkość przepływu.

2. W przypadku utworów rzecznych badanego odcinka Raby, długość formy jest tym parametrem, który zasadniczo wpływa na jej wysokość. Wzrastanie form w blisko 50% badanych przypadków determinowane jest ich długością. Dane z Raby wskazują, że możliwe jest dalsze wzrastanie utworów, po przekroczeniu „górnego ograniczenia”, podanego przez Flemminga [1988].

3. W badanym zakresie przepływów, od $Q = 3,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $Q = 11,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, długość badanych form ulega zmianie w przedziale od 0,01 m do 0,11 m, przy napełnieniu (mierzonym bezpośrednio nad punktem szczytowym formy) równym odpowiednio od 0,02 m do 0,50 m.

4. Dla większości zbadanych utworów dennych z ujściowego odcinka Raby, stosunek wysokości formy H do napełnienia h wynosi 0,4. Z kolei napełnienie w rejonie występowania form rzecznych odpowiada od 2,5–4-krotności wysokości tych utworów.

5. Dla utworów dennych z ujściowego odcinka Raby, stosunek ich długości L do napełnienia h przyjmuje wartości od 0,1 do 10. Napełnienie w obszarze występowania formacji dennych oscyluje w przybliżeniu wielkości odpowiadającej 10-krotności długości tych form.

6. Wskaźnik stromości (H/L) utworów żwirowo-piaszczystych, znalezionych na odcinku objętym badaniami zależy od ich długości – im forma jest krótsza, tym bardziej stroma. Zależność ta wyrażona jest wzorem:

$$H/L = 0,0518 L^{0,622} \quad (r^2 = 0,71; F_{0,05(1;51)} = 7,24; \alpha = 0,05; n = 52).$$

7. Sugeruje się, że w niektórych przypadkach, w praktyce inżynierskiej, można przyjmować wartości współczynnika szorstkości, obliczone z wykorzystaniem wzorów uwzględniających wysokość formy korytowej.

BIBLIOGRAFIA

- Allen J. *Current ripples: their relation to patterns of water and sediment motion*. North Holland Publ., Amsterdam 1968.
- Baker V., Pickup G. *Flood geomorphology of the Katherine Gorge., Northern territory*. Geol. Am. Soc. Bull., 1987, 98, s. 635–646.
- Carling P.A., Gözl E., Glaister M., Radecki-Pawlik A., Rosenzweig S. *Study and numerical modelling of subaquatic dunes in the River Rhine near Niderwalluf*. BFG, Koblenz Institute of Freshwater Ecology, Ambleside, UK, Koblenz, Niemcy, BIG-no-0774, 1993, s. 1–31.
- Carling P. A. *Morphology, sedimentology and palaeohydraulic interpretation of large gravel dunes, Altai mountains, Siberia*, Sedimentology 43, 1996, s. 647–664.
- Carling P.A., Gözl 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.
- Carling P.A. *Subaqueous gravel dunes*. Journal of Sedimentary Research, 69, 1999, s. 534–545.
- Carling, P.A., Radecki-Pawlik A., Williams J.J., Rumble B., Meshkova L., Bell P. Breakspear R. *The morphodynamics and internal structure of intertidal fine-gravel dunes*, 2005 (w recenzji).
- Chow V.T. *Open channel hydraulics*. McGraw Hill. New York, London 1959.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982.
- Flemming B.W. *Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper*. Boch. Geol. U. Geotechn. Arb., 29, Hannover 1988.
- Gładki H. *Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie karpackich dopływów Wisły*. Zesz. Nauk. AR Kraków, ser. Rozpr. Hab., 1976, 118.
- Krzanowski S. *Przestrzenna zmienność odpływu średniego (spływu jednostkowego) na obszarze Karpat Polskich*. 1972. Praca doktorska, maszynopis.
- Parzonka W., Kasperek R., Bartnik W. *Modelowanie transportu rumowiska wlezonego w korytach rzek z dnem aluwialnym na przykładzie górnej i środkowej Odry*. Przegląd Nauk. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Rocznik XI, Zesz. 2(25), 2002, s.70–79.
- Parzonka W., Kasperek R., Bartnik W. *Bed-load transport of polyfractional material in mountain rivers*. Zesz. Nauk. AR Wrocław, nr 481, 2004, s. 529–536.
- Radecki-Pawlik A. *Formy korytowe potoku górskiego*. Gosp. Wodna, 2001, 5, s. 210–213.
- Radecki-Pawlik A. *Wybrane zagadnienie kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej*. Zesz. Nauk. AR Kraków, 281, 2002, ser. Rozprawy.
- Sobota J. *Hydraulika*. AR Wrocław, 1994, tom I i II.
- Yalin M. *Geometrical properties of sand waves*. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Raport 90, 1964, ps. 119.

Dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik
Adiunkt

Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 24/28, Polska
Tel. +48 (12) 633 53 42; +48 (12) 662 41 05
mradeck@cyf-kr.edu.pl

prof. Paul A. Carling
Geography Department, Southampton University
Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom
P.A.Carling@soton.ac.uk

mgr inż. Ewa Słowik-Opoka
Katedra Inżynierii Wodnej, Akademia Rolnicza w Krakowie
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 24/28, Polska

PhD Student Richard Breakspear
Geography Department, Southampton University
Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

Recenzent: *Prof. dr hab Jerzy Ratomski*

Artur Radecki-Pawlik

ON SAND-GRAVEL BED FORMS INVESTIGATION WITHIN THE MOUNTAINOUS RIVER

SUMMARY

The paper presents very important, both from practical and theoretical reasons, problem of forming the river bed-forms within the gravel-bed mountainous riverbed and the influence of those bed forms on the discharge value. In natural rivers, due to the complicated nature of the discharge and changes in the water level, the bed forms are quite complicated structures. Those forms are changing in length and height and when present they change hydraulics conditions of the discharge. They could be both 2-dimentional and 3-dimentional, situated in all pars of the cross section. Up to now there are only a few notes and papers about the gravel bed forms which can be found in rivers. Most of scientific papers focus on sand riverbed forms. The present paper shows and concentrates on the field measurements of gravel bed forms found in the estuarial part of the mountain river - the Raba River - in Polish Carpathians. Such research was carried out first time in Poland. The research focuses here mostly on geometrical parameters of these bed forms such as height, length, stoss and trough angle as well as granulometric characteristics of gravel built those forms. Basing on *in-site* measurements many different hydraulics parameters

were also determined, mostly the roughness coefficient, which is very important from practical point of view for engineers and designers working with river training works. It was showed that the presents of bed forms change the value of roughness, which in consequence also has the influence on bedload transport calculations.

Key words: bed forms, mountainous river, roughness coefficient, river training works