

*Artur Radecki-Pawlik, Jarosław Bencal,  
Marcin Kowalski, Bartosz Radecki-Pawlik*

**ZRÓŻNICOWANIE WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH I GRANULOMETRYCZNYCH  
PODCZAS TWORZENIA SIĘ  
ŁACHY ŚRODKOWO-KORYTOWEJ  
W POTOKU GÓRSKIM O DNIE ŻWIROWYM**

**Streszczenie**

Praca ma na celu poznanie zróżnicowania granulometrycznego i warunków hydraulicznych charakteryzowanych przez parametry przepływu w rejonie występowania łachy korytowej o budowie roztokowej. Badania skoncentrowano na poznaniu budowy wierzchniej warstwy łachy roztokowej (jej opancerzenia), wyznaczeniu parametrów sedymentologicznych, przeprowadzeniu pomiarów prędkości wody, a na ich podstawie wyznaczeniu podstawowych parametrów hydraulicznych przepływu w charakterystycznych punktach badanego odcinka.

Próbki materiału tworzącego łachy pobrano w dziesięciu przekrojach pomiarowych założonych w obrębie wyznaczonej do badań łachy korytowej. Na podstawie uzyskanych w ten sposób danych granulometrycznych sporządzono histogramy uziarnienia i krzywe przesiewu oraz obliczono następujące parametry granulometryczne: wskaźnik wysortowania według Traska, stopień wysortowania według Hazena, wskaźnik różnoziarnistości według Knoroza, wskaźnik jednostajności (cecha dominacji) według Kollisa, współczynnik skośności według Traska i średnie odchylenie standardowe według Folka. Pomiary prędkości wody umożliwiły wyznaczenie wielkości takich jak: prędkość przepływu, prędkość średnią, parametry hydrauliczne (liczba Freuda, Reynoldsa, prędkość ścinania, naprężenia styczne, współczynnik oporu  $f$ ) przepływu. W pracy zwrócono szczególną uwagę na sposób przepływu strug wody ponad formą korytową oraz w jej bezpośrednim sąsiedztwie, jak

też jego wpływ na ewolucję łachy roztokowej. Badania zrealizowano w zlewni rzeki Skawy, w rejonie przekroju Zembrzyce w Karpatach Polskich.

**Słowa kluczowe:** łacha roztokowa, skład granulometryczny, parametry hydrauliczne, potok górski

## WSTĘP

Rzeki górskie i wyżynne płynące korytami swobodnymi są najwładźniejszym obiektem badań procesów fluwialnych. Stosunkowo niewielka szerokość i głębokość koryta tych rzek czynią je dostępnymi do bezpośredniej obserwacji i znakomicie ułatwiają wszelkie pomiary. Znaczna energia tych rzek powoduje wyraźne przyspieszenie procesów fluwialnych, dlatego pełny cykl zjawiska o charakterze cyklicznym można tu zaobserwować w ciągu kilku do kilkunastu lat. Stwarza to wyjątkową okazję badania przebiegu procesów fluwialnych i ich wytworów jakimi są formy korytowe [Teisseyre 1984]. Jedną z najbardziej charakterystycznych form korytowych rzeki górskiej są łachy korytowe. W większości przypadków, w ciągu długiego czasu, nie są to struktury trwałe, ponieważ w zależności od warunków przepływu ulegają ciągłym, dynamicznym zmianom. Niemniej mają bardzo duże znaczenie, ponieważ przyczyniają się do stabilizacji skarp i brzegów koryta. Wywierają znaczny wpływ na hydraulikę przepływu, głównie poprzez zwiększenie szorstkości i oporów przepływu. Ponadto łachy korytowe poprzez urozmaicenie środowiska w obrębie cieką spełniają wiele ważnych funkcji ekologicznych, między innymi jako siedlisko wielu gatunków makrobezkręgowców dennych [Kłównowska-Olejnik; Radecki-Pawlik 2000]. Jako ważny element morfologii koryta nie są jednak zbyt dobrze rozeznane, a ich znaczenie jest często bagatelizowane [Radecki-Pawlik 2002]. Omawiana w pracy łacha roztokowa powstała na odcinku rzeki Skawy, który ma charakter roztokowy (lub warkoczowy [Przedwojski 1998]). Generalnie koryta rzek warkoczowych są środowiskiem niezwykle sprzyjającym powstawaniu i ewolucji różnego rodzaju form korytowych. Wynika to ze znacznej energii tych koryt, która w połączeniu z dużą dostawą materiału rumowiskowego powoduje inicjację procesów roztokowych. Procesy roztokowe wiążą się z sekwencyjnie zachodzącymi procesami erozji i depozycji, których konsekwencją jest wytworzenie się koryta warkoczowego. W naturze możemy zaobserwować różne typy koryt roztokowych [Robert 2003]:

– pierwszy typ posiada wieloodnogowe koryta, podzielone przez brzegi łach korytowych. W tym modelu przepływ może być często kierowany z pojedynczego koryta w inne typy koryt, jako funkcja lokalnej depozycji sedymentu. Ten rodzaj roztokowania jest często obserwowany, na przykład w dolnym biegu dolin glacialnych.

– drugą kategorię koryt roztokowych stanowi bardziej stabilny, nawet w warunkach wysokich stanów wody, wielokanałowy model rzeki. Cechą charakterystyczną w tym modelu roztokowania jest podział głównego nurtu rzeki na odnogi przez dobrze wykształcone, porośnięte roślinnością i w miarę ustabilizowane wyspy.

– trzeci typ roztokowania może być zdefiniowany bardziej jako wielonurtowy z roztokami oddzielonymi od siebie przez zanurzone przy wyższych stanach wody łachy korytowe. To z takim typem roztokowania mamy do czynienia na Skawie.

Niniejsza praca ma na celu lepsze poznanie zróżnicowania granulometrycznego i warunków hydraulicznych charakteryzowanych przez parametry przepływu w rejonie występowania łachy korytowej o budowie roztokowej na wybranym odcinku rzeki Skawy. Badania wykonano bezpośrednio po wezbraniu wiosennym, tak że podczas pomiarów cała powierzchnia łachy pozostawała ciągle jeszcze pod wodą.

## MATERIAŁY I METODY

**Opis badanej zlewni.** Odcinek badawczy rzeki leży w pobliżu miejscowości Zembrzyce, obok mostu drogowego relacji Sucha Beskidzka–Zembrzyce, w odległości 200 m w górę biegu rzeki od mostu drogowego. Zlewnia Skawy położona jest w Beskidach Zachodnich utworzonych z fliszu o dużym udziale piaskowców i sięga do wysokości 1725 m n.p.m. W rejonie badań koryto Skawy o grubożwirowym dnie ma stosunkowo znaczny spadek. Dysponując wysoką energią i wykazując dużą zmienność przepływu, w warunkach naturalnych Skawa najprawdopodobniej miałaby charakter niestabilnej rzeki żwirodennej. Jednakże prace regulacyjne prowadzone w ciągu dwudziestego wieku doprowadziły tu do uformowania niemal prostego (krętość 1,04), jednonurtowego koryta. Od początku stulecia pogłębiło się ono o 2,3 metra, w tym o nieomal połowę tej wielkości w ostatnich kilkunastu latach. Wskutek wcięcia się rzeki czynna przed kilkudziesięciu laty równia zalewowa uległa przekształceniu w terasę nadzalewową, a na obszarze nierozciętych fragmentów dawnego dna rzeki uformowały się wąskie współczesne równie zalewowe [Wyźga 1999]. W tym miej-

scu podano niektóre dane hydrologiczne i morfologiczne rzeki Skawy do wodowskazu Wadowice, w rejonie badanego przekroju [Wyźga 1999] w celu zorientowania w charakterze rzeki: powierzchnia zlewni 835 km<sup>2</sup>, długość rzeki 21,1 km, średni roczny przepływ (1961–1997) 12,7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, średnie roczne wezbranie (1961–1997) 242 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, spadek koryta 0,0031, szerokość pełnokorytowa 66,3 m, przepływ pełnokorytowy 211 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, jednostkowa moc strumienia przy przepływie pełnokorytowym 96,8 W·m<sup>-2</sup>.

**Pomiary i obliczenia granulometryczne.** Próbki materiału tworzącego łąchy pobrano w okolicach dziesięciu przekrojów pomiarowych założonych w obrębie wyznaczonej do badań łąchy korytowej. Materiał potrzebny do wykonania analizy sitowej zdjęto z obszaru 1 metra kwadratowego do głębokości nieprzekraczającej zagłębienia najgrubszego z ziaren. Na podstawie uzyskanych w ten sposób danych granulometrycznych sporządzono histogramy uziarnienia i krzywe przesiewu. Krzywa kumulacyjna sporządzona w skali metrycznej [Michalik 1990] pozwala na wyznaczenie charakterystycznych średnic uziarnienia niezbędnych do wyliczenia parametrów, takich jak [Radecki-Pawlik 2002]:

– wskaźnika wysortowania, według Traska:

$$S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$$

– stopnia wysortowania według Hazena:

$$u = \frac{d_{90}}{d_{10}}$$

– wskaźnika różnoziarnistości według Knoroza:

$$\varepsilon = \frac{d_{95}}{d_5}$$

– wskaźnika jednostajności (cecha dominacji) według Kollisa:

$$C_d = \frac{d_{90} \cdot d_{10}}{d_{50}^2}$$

– współczynnika skośności według Traska:

$$S_k = \frac{d_{25} \cdot d_{75}}{d_{50}^2}$$

gdzie:

$d_i$  – wartość percentyla o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia odczytanego z krzywej przesiewu w skali metrycznej.

W celu umożliwienia analizy przebiegu zmiany różnoziarnistości stosuje się opracowaną przez Krumbeina skalę logarytmiczną zdefiniowaną jako:

$$\varphi = -\frac{\log \cdot d}{\log \cdot 2} = \log_2 d$$

Jest to skala, która pozwala na bardziej równomierny rozkład poszczególnych klas wielkości i dzięki temu, stosując wzór na średnie odchylenie standardowe np. według Folka, można znacznie dokładniej wyznaczyć stopień wysortowania niż za pomocą klasycznej skali:

$$GSO = \frac{\varphi_{84} \cdot \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} \cdot \varphi_5}{6,6}$$

Ponadto na podstawie skali Krumbeina można wyliczyć takie parametry jak:

– graficzną średnią średnicę według Folka:

$$GSS = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$$

– graficzną skośność według Folka:

$$GSK = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)}$$

– graficzne spłaszczenie według Folka:

$$GSP = \frac{\varphi_{95} - 2\varphi_5}{2,44(\varphi_{75} - \varphi_{25})}$$

gdzie:  $\varphi_i$  – wartość percentyla o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia odczytanego z krzywej przesiewu w skali logarytmicznej.

**Pomiary i obliczenia hydrometryczne.** Pomiary prędkości umożliwiły wyznaczenie wielkości, takich jak: prędkość przepływu, prędkość średnią, parametry hydrauliczne (liczba Freuda, Reynoldsa, prędkość ścinania, naprężenia styczne, współczynnik oporu  $f$ ) przepływu. Pomiary wykonano za pomocą młynka hydrometrycznego NAUTILUS-2000 firmy OTT-Hell Electronic. Urządzenie to pozwala

mierzyć prędkości wody z zakresu 0,001–10 m·s<sup>-1</sup>. Wykorzystanie równania von Karmana-Prandtla:

$$\frac{v}{V_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{y \cdot V_*}{v} \right) + B$$

(gdzie:  $v$  – prędkość średnia w przekroju [m·s<sup>-1</sup>],  $V_*$  – prędkość dynamiczna [m·s<sup>-1</sup>],  $y$  – odległość od dna [m],  $k$ ,  $B$  – stałe wyznaczone empirycznie w zależności od szorstkości i morfologii koryta) pozwoliło na wykreślenie zależności  $v = f(h)$  w układzie półlogarytmicznym. Jeżeli profile prędkości zostały sporządzone dla pomiarów w okolicy dna cieku, a ich wykresy są w przybliżeniu liniami prostymi to prędkość dynamiczną można wyznaczyć z zależności [Gordon 1992]:

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

gdzie:  $a$  – współczynnik nachylenia ( $a = \operatorname{tg} \alpha$ ) prostej  $v = f(h)$  przyjmującej postać równania  $y = ax + b$  ( $x$  – wysokość nad dnem, na której wykonano pomiar prędkości;  $b$  – wyraz wolny równania). Mając wyznaczoną prędkość dynamiczną, możemy obliczyć naprężenia styczne, korzystając ze wzoru [Gordon 1992]:

$$\tau_0 = \rho \cdot (V_*)^2 [N \cdot m^{-2}]$$

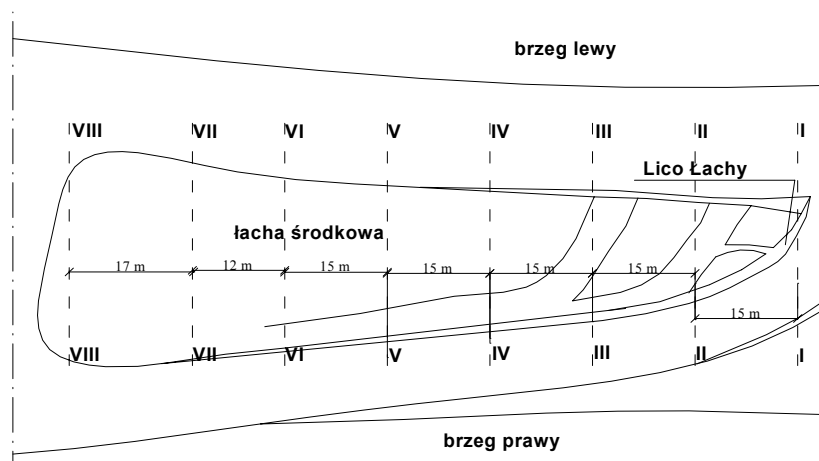
Opory ruchu powstałe w wyniku tarcia cząstek przepływającej wody o chropowatą powierzchnię można obliczyć z zależności [Sobota 1994] oddzielnie dla  $Re > 2500$  i  $Re < 500$ , odpowiednio:  $f = 0,223/Re^{0.25}$  i  $f = 60/Re$ .

## WYNIKI BADAŃ

Poniżej zestawiono wyniki badań przeprowadzonych w obrębie badanego odcinka. Badania wykonane w ramach niniejszej pracy obejmują: analizę granulometryczną rumowiska oraz pomiary prędkości wraz z wyznaczeniem charakterystycznych parametrów hydraulicznych.

Po przesianiu próbek rumowiska pobranego w rejonie badanej łachy (rys. 1) uzyskano wiele danych, które zestawiono w formie tabelarycznej, pozwalającej na ich późniejsze wykorzystanie przy

wykreślaniu krzywych kumulacyjnych zarówno w skali metrycznej, jak i logarytmicznej.



**Rysunek 1.** Położenie przekrojów badawczych do badań granulometrycznych  
**Figure 1.** Localization of measuring points for granulometric investigations

W tabelach przedstawiono jedynie dane charakterystycznych średnic rumowiska odczytane z krzywych przesiewu, których zamieszczenie w pracy było niemożliwe ze względu na jej objętość.

**Tabela 1.** Charakterystyczne średnice w przekrojach badawczych łachy roztokowej

**Table 1.** Characteristic grain-sizes of the braided bar within the research cross-sections

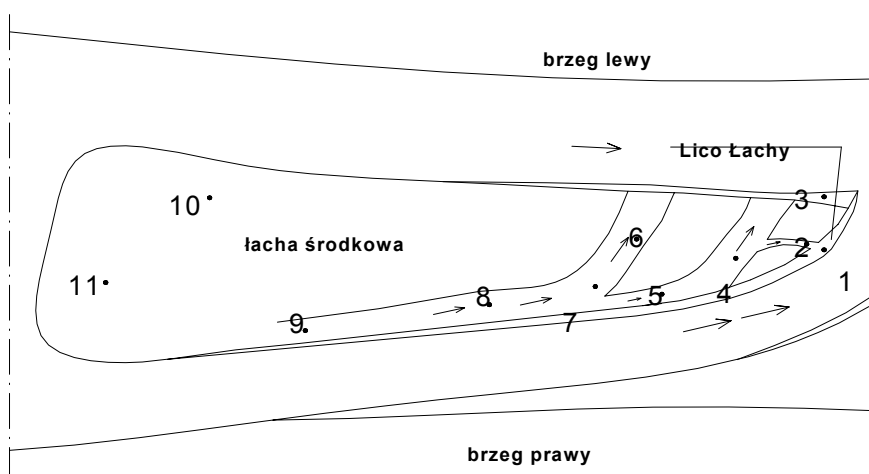
d	Przekroje							
	I-I	II-II	III-III	IV-IV	V-V	VI-VI	VII-VII	VIII-VIII
d <sub>5</sub>	11	13	12	3	6	12	10	2
d <sub>10</sub>	17	17	15	9	13	17	14	3
d <sub>16</sub>	22	22	17	19	21	22	18	6
d <sub>25</sub>	31	26	22	39	32	31	25	12
d <sub>50</sub>	79	36	63	102	85	71	34	30
d <sub>60</sub>	111	42	71	134	120	98	38	40
d <sub>75</sub>	157	61	94	186	170	139	123	75
d <sub>84</sub>	184	81	117	219	199	154	206	105
d <sub>90</sub>	201	101	138	242	218	165	255	125
d <sub>95</sub>	216	137	158	260	234	182	299	143

**Tabela 2.** Parametry granulometryczne w poszczególnych przekrojach badawczych  
**Table 2.** Granulometric parameters of the braided bar within the research cross-sections

Parametr	Przekroje							
	I-I	II-II	II-III	IV-IV	V-V	VI-VI	VII-VII	VIII-VIII
$S_0$	2,25	1,53	2,07	2,18	2,30	2,12	2,22	2,50
$u$	6,53	2,47	4,73	14,89	9,23	5,76	2,71	13,33
$\varepsilon$	19,64	10,54	13,17	86,67	39,00	15,17	29,90	71,50
$C_d$	0,55	1,32	0,52	0,21	0,39	0,56	3,09	0,42
GSO	1,38	1,00	1,26	1,86	1,46	1,33	1,62	1,94
GSS	-6,12	-5,31	-5,67	-6,22	-6,15	-5,99	-5,60	-4,75
GSK	0,24	-0,15	0,36	0,49	0,25	0,20	-0,33	0,21
$S_k$	0,78	1,22	0,52	0,70	0,75	0,85	2,66	1,00
GSP	0,74	1,31	0,84	1,05	0,63	0,77	1,02	0,99

W rejonie badanego obiektu wykonano pomiary prędkości przepływu wody w wybranych jedenastu punktach pomiarowych. Punkty pomiarowe zostały założone w taki sposób, aby jak najlepiej zobrazować sytuację hydrauliczną w obrębie badanej formy korytowej.

Rozmieszczenie pionów tachimetrycznych założonych w punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 2.



**Rysunek 2.** Rozmieszczenie pionów tachimetrycznych nad badana łachą roztokową  
**Figure 2.** Research points of hydrodynamic measurements for investigated braided bar



**Tabela 3.** Wyniki pomiarów hydrologicznych i obliczeń hydraulicznych w punktach badawczych łachy roztopowej

**Table 3.** The results of hydrological measurements and hydraulics calculations for investigated braided bar

Lokalizacja	Punkt 1			Punkt 2			Punkt 3		
Pomiar	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$V^*$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	0,034	0,03	0,032	0,082	0,093	0,091	0,064	0,005	0,009
$\tau_0$ [ $N \cdot m^{-2}$ ]	1,14	0,877	0,997	6,65	8,638	8,286	0,039	0,03	0,073
$h_{max}$ [cm]	19			6			14		
$V_{sr}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	1,171			0,667			0,08		
Fr [-]	0,736			0,756			0,005		
Re [-]	1 948 248,70			350 437,80			98 073,60		
f [-]	0,006			0,0092			0,0126		
Lokalizacja	Punkt 4			Punkt 5			Punkt 6		
Pomiar	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$V^*$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	0,011	0,015	0,019	0,035	0,033	0,033	0,022	0,023	0,022
$\tau_0$ [ $N \cdot m^{-2}$ ]	0,112	0,233	0,374	1,222	1,118	1,068	0,505	0,539	0,482
$h_{max}$ [cm]	9			11			7		
$V_{sr}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	1,188			1,692			0,722		
Fr [-]	1,599			2,653			0,759		
Re [-]	936 252,20			1 629 772,30			442 556,90		
f [-]	0,0072			0,0062			0,0086		
Lokalizacja	Punkt 7			Punkt 8			Punkt 9		
Pomiar	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$V^*$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	0,031	0,03	0,032	0,011	0,015	0,016	0,018	0,021	0,022
$\tau_0$ [ $N \cdot m^{-2}$ ]	0,938	0,934	0,98	0,126	0,229	0,261	0,317	0,425	0,498
$h_{max}$ [cm]	11			12			6		
$V_{sr}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	1,261			0,636			0,428		
Fr [-]	1,474			0,344			0,311		
Re [-]	1 214 623,50			668 301,20			712 084,10		
f [-]	0,0067			0,0078			0,0077		
Lokalizacja	Punkt 10			Punkt 11					
Pomiar	I	II	III	I	II	III			
$V^*$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	0,017	0,018	0,02	0,007	0,007	0,006			
$\tau_0$ [ $N \cdot m^{-2}$ ]	0,283	0,32	0,417	0,046	0,054	0,031			
$h_{max}$ [cm]	9			7					
$V_{sr}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	0,963			0,725					
Fr [-]	1,05			0,765					
Re [-]	758 931,70			444 395,80					
f [-]	0,0076			0,0086					

## DYSKUSJA

Wszystkie pomiary przedstawione w pracy wykonano na Skawie tuż po przejściu blisko pełnokorytowego wezbrania. Pomimo, że obserwacje były prowadzone w czasie, gdy opadająca woda powracała już do swojego głównego koryta, to ponad badaną strukturą nadal przepływała warstwa wody. Dzięki temu procesy odpowiedzialne za formowanie i ewolucje łańcuch roztokowych były nadal obserwowalne. Woda, zbliżając się do badanego utworu (punkt 11) (rys. 2) przepływała ruchem nadkrytycznym, co charakteryzuje liczbą Frouda osiągniętą w tym punkcie wartość  $F=0,765$ . Ponadto liczba Reynoldsa ( $Re=444395,8$ ) informuje nas o tym, że mamy tu do czynienia z ruchem turbulentnym. Pobrana w tym miejscu (przekrój VIII–VIII) (rys. 1) próbka rumowiska rzeczno-ekologicznego charakteryzuje się większym udziałem drobnych frakcji i rozkładem bimodalnym, co pozwala stwierdzić, że mamy tu do czynienia z dwiema populacjami, z których każda odpowiada innym procesom transportu i sedymentacji. Grubsze ziarna zostały zdeponowane w trakcie stabilizacji rumowiska wleczonego, natomiast drobniejsze mogły się osadzić dopiero w momencie, gdy obniżone parametry przepływu pozwoliły na ich sedymentację. Obliczone dla przekroju VIII–VIII parametry sedymentologiczne pozwalają stwierdzić, że w pobranej próbce znajdował się bardzo słabo wysortowany materiał ( $S_0=2,50$ ;  $u=13,33$ ;  $GSO=1,94$ ) o dużej różnoziarnistości ( $\varepsilon=71,50$ ;  $C_d=0,42$ ). Współczynniki skośności według Traski ( $S_k=1$ ) i Folka ( $GSK=0,21$ ) oraz graficzne spłaszczenie ( $GSP=0,98$ ) wskazują na to, że rozkład uziarnienia w tym przekroju jest zbliżony do rozkładu normalnego. Następnie przepływ jest rozdzielany przez łąkę na dwie flankujące utwór odnogi.

W wyniku zmiany przekroju koryta następuje zmiana warunków przepływu, co można zaobserwować w punkcie 10 ( $F=1,05$ ). W punkcie 9 położonym w pobliżu grzbietu łąki woda przepływa ruchem spokojnym ( $F=0,311$ ). Zwiększone liczby Reynoldsa (w punkcie 10  $Re=758931,7$ ; w punkcie 9  $Re=712084,1$ ) świadczą o intensywniejszej w tych miejscach turbulencji. Zaobserwowano tu znaczny (w punkcie 10  $\tau_0=0,283\pm 0,417$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]; w punkcie 9  $\tau_0=0,317\pm 0,498$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]) w stosunku do punktu 11 ( $\tau_0=0,046\pm 0,054$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]) wzrost naprężeń stycznych. Materiał klastyczny zdeponowany w okolicach punktu 10 (przekrój VII–VII) ma rozkład bimodalny o znacznie lepszym niż w poprzednim przekroju wysortowaniu ( $S_0=2,22$ ;  $u=2,71$ ;  $GSO=1,62$ ) i mniejszej różnoziarnistości ( $\varepsilon=29,90$ ;  $C_d=3,09$ ). W omawianym prze-

kroju zaznacza się dominacja grubszych frakcji ( $S_k=2,66$ ;  $GSK=-0,33$ ), przy czym obliczony współczynnik graficznego spłaszczenia ( $GSP=1,02$ ) wskazuje, że rozkład uziarnienia jest zbliżony do rozkładu normalnego. W przekroju VI położonym w okolicach punktu 9 rumowisko jest słabo wysortowane ( $S_0=2,12$ ;  $u=5,76$ ;  $GSO=1,33$ ) o dużej różnoziarnistości ( $\varepsilon=15,17$ ;  $C_d=0,56$ ) z przewagą frakcji drobniejszych ( $S_k=0,85$ ;  $GSK=0,20$ ). Dodatkowo materiał denny w tym przekroju charakteryzuje się bimodalnym rozkładem i w miarę równomiernym udziałem poszczególnych frakcji ( $GSP=0,77$ ). Przesuwając się dalej w stronę dystalną łachy (przekrój V–V, a następnie IV–IV), odłożone rumowisko jest coraz słabiej wysortowane (przekrój V–V:  $S_0=2,30$ ;  $u=9,23$ ;  $GSO=1,46$ ; przekrój IV–IV:  $S_0=2,18$ ;  $u=14,89$ ;  $GSO=1,86$ ) przy coraz większej różnoziarnistości (przekrój V–V:  $\varepsilon=39,00$ ;  $C_d=0,39$ ; przekrój IV–IV:  $\varepsilon=86,67$ ;  $C_d=0,21$ ), oprócz tego w obu omawianych przekrojach występuje przewaga drobnych frakcji (przekrój V–V:  $S_k=0,75$ ;  $GSK=0,25$ ; przekrój IV–IV:  $S_k=0,70$ ;  $GSK=0,49$ ). W przekroju IV–IV zaznacza się zdecydowana przewaga jednej frakcji nad pozostałymi ( $GSP=1,05$ ), natomiast w przekroju V–V występuje stosunkowo płaski bimodalny rozkład uziarnienia ( $GSP=0,63$ ). W obrębie sekcji zamykanej przez przekroje V–V i IV–IV znajduje się punkt pomiarowy 8. Woda przepływa tu bardzo spokojnym ( $F=0,344$ ), turbulentnym ( $Re=668301,2$ ) ruchem, podobnie jak w innych punktach położonych w okolicach grzbietu omawianej łachy. Punkt pomiarowy był założony w obrębie wlotu do rynny wyżłobionej przez przepływającą ruchem rwącym ( $F=1,474$ ) wodę. Przepływ w tym miejscu odznaczał się dużym nasileniem turbulencji ( $Re=1214623,5$ ) i zwiększonymi wartościami naprężeń stycznych ( $\tau_0=0,938\div 0,980$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]).

Materiał rumowiskowy pobrany w tym rejonie (przekrój III–III), pomimo znacznie lepszego wysortowania niż w poprzednich przekrojach, można było jedynie określić jako słabo wysortowany ( $S_0=2,07$ ;  $u=4,73$ ;  $GSO=1,26$ ). Odznaczał się on dużą różnoziarnistością ( $\varepsilon=13,17$ ;  $C_d=0,52$ ), większym udziałem frakcji drobnych ( $S_k=0,52$ ;  $GSK=0,36$ ) oraz relatywnie płaskim bimodalnym rozkładem ( $GSP=0,84$ ). W okolicach środkowego biegu rynny (punkt 6) odprowadzającej wodę z grzbietu łachy przepływ miał już nieco spokojniejszy charakter ( $F=0,759$ ) niż u jej wlotu, ponieważ woda spływająca po powierzchni łachy wytracała znaczną ilość energii na pokonanie oporów ruchu wynikających ze znacznej szorstkości utworu. Utrata energii znajduje również swoje odzwierciedlenie w umiarkowanych wartościach naprężeń stycznych ( $\tau_0=0,482\div 0,539$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]). W okolicach

punktu 5 talweg, jednej z odnóg cieku, zbliża się do prawego brzegu łachy korytowej, w wyniku czego parametry przepływu, takie jak liczba Frouda ( $F=2,653$ ), Reynoldsa ( $Re=1629772,3$ ), czy naprężenia styczne ( $\tau_o=1,068\div 1,222$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]) osiągają stosunkowo duże wartości. Można w tym miejscu zauważyć ślady po bardzo intensywnej erozji. Główny nurt prawej odnogi po „odbiciu” się od łachy w punkcie 5 przesuwa się w stronę prawego brzegu koryta Skawy. Część wody przepływającej w punkcie 5 kieruje się w stronę rynny odprowadzającej wodę z dystalnej części łachy. W okolicy przekroju II–II większa energia przepływu znajduje swoje odzwierciedlenie w lepszym wysortowaniu rumowiska ( $S_0=1,53$ ;  $u=2,47$ ;  $GSO=1,00$ ) i mniejszej różnoziarnistości ( $\varepsilon=10,54$ ;  $C_d=1,32$ ) przy wyraźnej dominacji jednej z frakcji ( $GSP=1,31$ ). W bimodalnym rozkładzie uziarnienia zaznacza się wyraźna przewaga grubych frakcji ( $S_k=1,22$ ;  $GSK=-0,15$ ). W miejscu, gdzie rynna zbliża się do grzbietu łachy (punkt 4), woda przepływa już nieco spokojniej ( $F=1,599$ ;  $Re=936252,2$ ) niż w punkcie 5, co objawia się poprzez obniżone wartości naprężeń stycznych ( $\tau_o=0,112\div 0,374$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]). W punkcie 3 spotykamy się z tak zwanym cieniem łachy. Jest to bardzo ważne z punktu widzenia ekologii cieku zjawisko, ponieważ miejsca o obniżonych parametrach hydraulicznych przepływu ( $F=0,005$ ;  $Re=98073$ ;  $\tau_o=0,030\div 0,073$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]), pozwalają rybom na dogodne żerowanie i odpoczynek. W niewielkiej odległości od punktu 4 główna rynna ulega rozgałęzieniu.

W obrębie jednej z tych odnóg założono punkty pomiarowe 1 i 2, przy czym punkt 2 znajduje się tuż przed krawędzią lica łachy, a punkt 1 w miejscu, gdzie woda prowadzona przez strugę sływa po stromym licu łachy i wpada do prawej odnogi koryta cieku. Obliczona w punkcie 2 liczba Frouda ( $F=0,756$ ) pozwala stwierdzić, że woda przepływa tu ruchem podkrytycznym o charakterze turbulentnym ( $Re=936252,2$ ). Naprężenia styczne osiągają tu największe dla całej łachy wartości ( $\tau_o=6,650\div 8,368$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]), czego konsekwencją może być pogłębienie i poszerzenie się rynny. W punkcie 1 woda porusza się ruchem spokojnym ( $F=0,756$ ), ale mieszanie się wód strugi z wodą przepływającą w prawej odnodze rzeki powoduje powstanie znacznych turbulencji ( $Re=1948248,7$ ). W omawianym punkcie dość duże wartości naprężeń stycznych ( $\tau_o=0,877\div 1,140$  [ $N\cdot m^{-2}$ ]) mogą sugerować, że zachodziła tu bardzo intensywna erozja, której efektem jest obserwowane podcięcie lica łachy. Próbką rumowiska pobrana z lica łachy (przekrój I–I) charakteryzuje się złym wysortowaniem ( $S_0=2,25$ ;  $u=6,53$ ;  $GSO=1,38$ ), dużą różnoziarnistością ( $\varepsilon=19,64$ ;  $C_d=0,55$ )

i przewagą drobnych frakcji ( $S_k=0,78$ ;  $GSK=0,24$ ). Pobrane w tym miejscu rumowisko charakteryzuje się płaskim ( $GSP=0,74$ ) bimodalnym rozkładem uziarnienia. W proksymalnych częściach utworu (przekroje VIII-VIII i VII-VII) materiał budujący łachę roztokową zawiera znacznie więcej drobnych frakcji niż rumowisko pobrane w części środkowej czy dystalnej. Wynika to z koncentracji przepływu w okolicach punktu 5, powodującej wymycie drobnych ziaren rumowiska i ich transport w kierunku cienia łachy, gdzie mogą być ponownie zdeponowane, przyczyniając się do nadbudowy utworu. Na powierzchni omawianej struktury można było zauważyć charakterystyczne zgrupowania wielu ziaren, które układały się w sposób zimbrykowany. Wyznaczone w przekrojach pomiarowych graficzne średnie średnice wskazują na dominację frakcji z zakresu 22 do 39 mm ( $GSS=-4,75 \div -6,22$ ). W proksymalnej części łachy roztokowej rumowisko było najdrobniejsze (przekrój VIII-VIII  $GSS=-4,75$ ), po czym stopniowo (przekrój VII-VII,  $GSS=-5,60$ ) zwiększała się grubość najliczniejszych ziaren, by w przekrojach położonych w centralnej (przekrój IV-IV  $GSS=-5,99$ ; przekrój V-V  $GSS=-6,15$ ; przekrój VI-VI  $GSS=-6,22$ ) i dystalnej części utworu (przekrój I-I  $GSS=-6,12$ ) osiągnąć największe grubości. Wyznaczone w 11 punktach pomiarowych współczynniki oporu są znacznie mniejsze ( $f=0,0060 \div 0,0126$ ) niż wartości obliczone dla Raby w przekroju Proszówki ( $f=0,0252 \div 0,0420$ ) [Gładki 1976].

## WNIOSKI

Z przeprowadzonej dyskusji nasuwają się następujące wnioski:

1. Formowaniu się łach żwirowych towarzyszą znaczne zmiany parametrów hydrodynamicznych obserwowanych w różnych częściach struktur.

2. Słabe wysortowanie rumowiska w obrębie całej formy korytowej sugeruje, że po przejściu ostatniego wezbrania woda musiała opadać bardzo gwałtownie, co w konsekwencji nie pozwoliło na dobre wysortowanie odłożonego materiału dennego.

3. Konsekwencją szybkiego opadania wód fali wezbraniowej jest brak rozległych struktur zimbrykowanych.

4. Wymycie drobnych frakcji rumowiska ułatwia ruszenie większych ziaren materiału klastycznego, przyczyniając się do intensyfikacji procesów roztopowych.

5. Zachodząca w obrębie rynien intensywna erozja powoduje rozcięcie łachy na mniejsze struktury, przyczyniając się do powstania struktury roztopowej.

6. W cieniu łachy żwirowej następuje wyraźne zmniejszenie wartości wszystkich charakterystyk hydrodynamicznych.

7. Obserwowane wartości naprężeń stycznych były zbyt małe, aby mogło mieć miejsce aktywne formowanie utworu. Przeprowadzone badania zobrazowały procesy zachodzące podczas przepływu wody ponadroztokową łachą korytową.

8. Obecność łach korytowych w rzece górskiej powoduje koncentrację przepływu w obrębie wąskich odnóg, prowadząc do intensywniejszej erozji dna i brzegów cieku, czego konsekwencją może być wykształcenie wysp środkokorytowych, a następnie procesy roztopowe.

## BIBLIOGRAFIA

- Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L. *Stream Hydrology – an Introduction for Ecologists*. Wiley and Sons, London 1992.
- Kłonowska-Olejnik M., Radecki-Pawlik A. *Zróżnicowanie mikrosiedliskowe makrobezkręgowców dennych w obrębie łach korytowych potoku górskiego o dnie żwirowym* (Point bar and its influence on macroinvertebrates structure distribution). XVIII Zjazd Hydrobiologów Polskich, 4–8.09.2000, Białystok, 2000, s. 119–120.
- Michalik A. *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich*. Zesz. Nauk. AR Kraków, ser. Rozpr. hab. 138, 1990.
- Przedwojski B. *Morfologia rzek i prognozowanie procesów rzecznych*. Wyd. AR Poznań 1998.
- Radecki-Pawlik A. *Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej*. Zeszyty Naukowe AR Kraków, 2002, seria rozprawy, 281, s. 142.
- Robert A. *River processes*. Arnold, London 2003.
- Sobota J. *Hydraulika*, t. 1 i 2. Wydawnictwo AR Wrocław 1994.
- Teisseyre A. K. *The River Bóbr in the Błażkowa study reach (central Sudetes): a study in fluvial process and fluvial sedimentology*, Geologia Sudetica, 1984, vol. XIX, 1, s. 8–65.
- Wyzga B. *Wpływ pogłębiania się koryt karpackich dopływów Wisły na zmiany warunków sedimentacji pozakorytovej*. [w:] Międzynarodowa konferencja z okazji 20-lecia Kazimierzowskiego Parku Krajobrazowego nt.: Problemy ochrony i renaturyzacji dolin dużych rzek Europy, Kazimierz Dolny, 1–4 wrzesień 1999, Uniwersytet Lubelski, s. 27–34.

dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik\*, mgr. inż. Jarosław Bencal\*,  
mgr inż. Marcin Kowalski\*, Bartosz Radecki-Pawlik\*\*

\* Katedra Inżynierii Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademia Rolnicza w Krakowie, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 24-28, adiunkt oraz absolwenci (0-12) 662 4105, e-mail: RMRADOCK@CYF-KR.EDU.PL

\*\*Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, student, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, (0-12) 628 2000

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Ratomski*

*Artur Radecki-Pawlik, Jarosław Bencal, Marcin Kowalski, Bartosz Radecki-Pawlik*

**DISPARITY OF HYDRODYNAMIC  
AND GRANULOMETRIC CONDITIONS DURING CREATION  
THE SANDBANK OF CONICAL-CHANNEL SHAPE  
IN MOUNTAIN STREAM WITH GRAVELLY BOTTOM**

**SUMMARY**

The main aim of the work is to presents the results of examination of some basic granulometric and hydraulic parameters of the discharge within the region of the braided river bar formation. The research was concentrated on the investigation of the armoring layer of the braided bar in terms of the basic sedimentological parameters, and this way on understanding the forming process of this structure. At the same time hydrological measurements were carried out in the region of the bar and on the basis of these hydraulics calculations of hydrodynamics parameters were performed. For granulometric investigations the samples of the gravel forming the braided bar were collected in ten cross sections of the bar. On the basis of sieve analysis the grain size curves were prepared, so the main granulometric characteristics were described, as follows: Trask sorting coefficient, Hazen sorting coefficient, Knoroz grain parameter, Kollis domination parameter, Trask skewness coefficient and Folk mean deviation. The measurements of water velocities just over the river bed allowed calculating main hydraulics parameters, such as: shear velocity, shear stresses, Froude number, Reynolds number, flow resistance coefficient within the region of the braided middle gravel bar formation in the mountainous river. Hydrodynamics survey was done just immediately after the spring flood in 2003 when the braided bar developed within the river channel. The number of observations connected with the hydrodynamics influence on stream braided bar formation was done

which describe the braided process of the middle braided bar development. The study was undertaken in the Skawa River at the Polish part of the Carpathian Mountains.

**Key words:** braided gravel bar, granulometric composition, hydraulics parameters, mountain stream