

*Lukasz Bąk, Alicja Michalik*

**ZMIENNOŚĆ SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO  
RUMOWISKA WLECZONEGO WZDŁUŻ POTOKU  
SŁOMKA**

---

***VARIATION OF GRAIN-SIZE COMPOSITION  
OF BED LOAD ALONG SŁOMKA STREAM***

**Streszczenie**

Skład uziarnienia materiału dennego rzeki odzwierciedla charakter i moc jego transportu i może być wykorzystany jako zmienna świadcząca o stabilności lub niestabilności dna koryta. W artykule przedstawiono ocenę składu granulometrycznego rumowiska wleczonego wzdłuż potoku Słomka. Krzywe uziarnienia wyznaczono metodą fotograficzną, której podstawą jest analiza cyfrowa zdjęć powierzchni rumowiska. Jest to metoda wystarczająco dokładna, aby zanalizować zmiany składu granulometrycznego. Wyniki badań zilustrowano przez 14 krzywych uziarnienia. Pokazano również, że zmienność średnic charakterystycznych i parametrów krzywych uziarnienia rumowiska wzdłuż potoku przebiega zgodnie z procesami fluwialnymi. Niektóre krzywe pokazujące wzrost zawartości drobnych ziaren korespondują z lokalną erozją boczną, a inne reprezentują stabilizujące się odcinki potoku.

**Słowa kluczowe:** rumowisko rzeczne, skład uziarnienia, metoda fotograficzna

***Summary***

*Size distribution of the river bed material reflects the character and strength of sediment transport and can be used as a variable denoting stability or instability of the channel bed. This paper presents an estimation of grain-size compositions of bed load along the Słomka stream. These size distributions were determined by the photographic method basing on digital analysis of photos of the bed material surface. It is a sufficiently accurate method to analyze the grain size distribution changes. Results of investigations are illustrated by 14 grain-size di-*

*stributions. It is also showed that variation of characteristic grain diameters and of characteristic parameters along the stream is compatible to the fluvial processes. In some grain-size compositions a percentage gain of fine grains in material corresponds to the local bank erosion, and the others cases are connected with stabilization of the channel sectors.*

## WSTĘP

Skład granulometryczny rumowiska w potokach górskich jest zależny od stanu równowagi hydrodynamicznej oraz wielkości przepływów wody w nich występujących. W korytach z dnem stabilnym wielkość ziaren regularnie maleje wzdłuż całego ciekę, licząc od źródeł do ujścia.

Zależnie od ich wielkości i czasu trwania, wezbrania powodują stopniowe sortowanie materiału dennego, utrzymując jednak tendencję do ponownej stabilizacji dna czyli do jego obrukowania [Parker 1982]. W ciekach, gdzie występują odcinki zdegradowanych koryt, przebieg zmienności składu uziarnienia rumowiska ma inny charakter i zależy od tego czy warunki hydrauliczne umożliwiają transport materiału dennego, czy raczej jego lokalną akumulację [Lisle 2002]. Charakterystyka składu granulometrycznego wzdłuż całego ciekę stanowi ważny aspekt oceny warunków stabilności lub degradacji jego koryta. Z tego powodu opracowuje się coraz lepsze metody wyznaczania krzywych uziarnienia rumowiska [Wolcott, Church 1991; Fripp, Diplas 1993]. Problemem najbardziej istotnym w tego typu badaniach jest odpowiedni pobór próby materiału. Najbardziej efektywnym jest pobór próby przez jej zamrożenie [Michalik i in. 1996], gdyż pozwala on na pomiar wszystkich frakcji rumowiska i ocenę czy jest rozróżnialna warstwa obrukowania i podłoża, czy też całość jest wymieszana, co świadczy o braku stabilności dna. Metoda ta ze względu na swoją dokładność powinna być stosowana przede wszystkim w sytuacjach, w których ważne jest rozpoznanie najmniejszych frakcji ziarnowych (problem ekosystemów) lub określenie stopnia degradacji dna. W badaniach zmian warunków hydrodynamicznych wzdłuż ciekę, gdzie występuje intensywna erozja boczna i denną wystarczające jest zastosowanie metody mniej dokładnej. Taką metodą, której przydatność została wcześniej sprawdzona [Michalik i in. 2006], jest metoda fotograficzna, pomimo pewnych ograniczeń zapewnia ona możliwość wyznaczenia zmian składu uziarnienia i uwzględnienia ewentualnego wpływu procesów erozji na te zmiany.

## OPIS ZASTOSOWANEJ METODY

Do oceny składu granulometrycznego rumowiska korytowego zastosowano metodę fotograficzną, zaliczaną do metod powierzchniowych. Umożliwia ona ustalenie procentowej zawartości poszczególnych frakcji o średnicach więk-

szych  $d_i > 0,50$  cm, bez naruszenia struktury dna cieku. Analizie poddaje się fotografię przedstawiającą fragment rumowiska o powierzchni około  $1 \text{ m}^2$  (rys. 1). Zaletą tej metody jest mała pracochłonność zgromadzenia materiału badawczego w terenie, która sprowadza się do prawidłowego wykonania fotografii, tak aby nie posiadała ona skrótów perspektywicznego.



**Rysunek 1.** Materiał denny potoku Słomka  
**Figure 1.** Bed material of the Słomka stream

Do określenia procentowego udziału poszczególnych frakcji wykorzystano metodę zaproponowaną przez Gładki i Niziołek [1973], polegającą na zastąpieniu rzeczywistej powierzchni ziarna powierzchnią koła. Porównując powierzchnie oczka sita o danej średnicy z powierzchnią poszczególnych ziaren, określa się ilość cząstek należących do poszczególnych frakcji. Do określonej frakcji zalicza się cząstki, których powierzchnia jest mniejsza lub równa powierzchni oczka sita odpowiadającego górnej granicy i większa od powierzchni oczka sita odpowiadającego dolnej granicy frakcji. Powierzchnię zajętą przez jedną frakcję ziarnową oblicza się ze wzoru:

$$F_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (1)$$

gdzie:  $d_i = \frac{(a_i + b_i)}{2}$ ,  $a_i, b_i$  – główne wymiary ziaren.

Powierzchnię zajmowaną przez frakcje mniejsze od powierzchni koła o średnicy  $d = 0,5$  cm, oblicza się jako różnicę pomiędzy całkowitą badaną powierzchnią a sumą powierzchni wyznaczonych frakcji:

$$F_n = F \sum_{i=1}^n F_i \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – całkowita badana powierzchnia

Ze względu na występowanie porów pomiędzy najmniejszymi frakcjami do prawidłowego określenia zajmowanej przez nie powierzchni konieczne jest zastosowanie współczynnika poprawkowego w postaci:

$$\varphi = \frac{\gamma_{omi}}{\gamma_s}^{2/3} \quad (3)$$

gdzie:

- $\gamma_{omi}$  – ciężar objętościowy rumowiska,
- $\gamma_s$  – ciężar gatunkowy rumowiska.

Powierzchnię zajmowaną przez frakcje najmniejsze, po uwzględnieniu współczynnika poprawkowego, oblicza się ze wzoru:

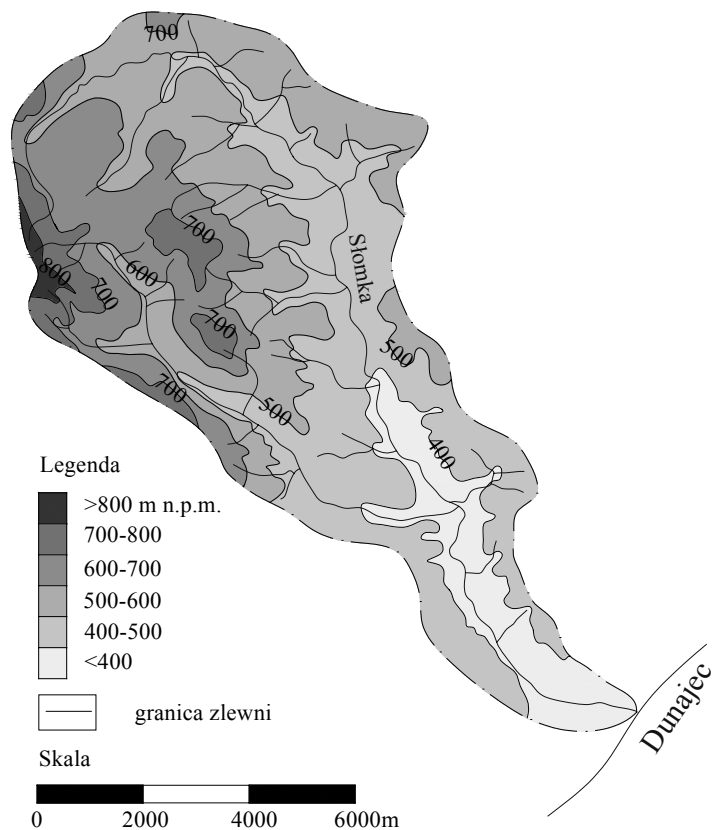
$$F = \varphi \cdot F_n \quad (4)$$

Udział procentowy każdej frakcji wyznacza się ze wzoru:

$$\alpha = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \cdot 100 \quad (5)$$

## OBIEKT BADAŃ

Przedstawiona metoda została zastosowana do oceny składu granulometrycznego rumowiska na całej długości potoku Słomka, lewobrzeżnego dopływu rzeki Dunajec o całkowitej długości 25,20 km i powierzchni zlewni 69,90 km<sup>2</sup> (rys. 2). Partie źródłowe cieku położone są na wysokości 888 m n.p.m. W górnym biegu potok płynie na ogół zwartym i wciętym korytem, w biegu środkowym i dolnym dno doliny stopniowo się rozszerza, płynąc korytem o niskich brzegach i wykazując tendencję do meandrowania. Na odcinku środkowym pokonuje dwa przełomy skalne w km 10+470 i w km 13+000. Górski charakter potoku powoduje występowanie gwałtownych, krótkotrwałych wezbrań transportujących znaczne ilości rumoszu dennego oraz powodujących intensywną migrację stromych brzegów koryta. Występowanie dużych spadków oraz wahań przepływów sprzyja nasileniu procesów erozji bocznej i dennej, co w połączeniu z dużą zdolnością transportową cieku może prowadzić do niszczenia zabudowy regulacyjnej oraz stwarzać bezpośrednie zagrożenia dla infrastruktury technicznej zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie potoku.



**Rysunek 2.** Mapa hipsometryczna zlewni potoku Słomka  
**Figure 2.** Hypsometric map of the Słomka water catchment area

### WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Do określenia zmian składu uziarnienia rumowiska wykorzystano materiał w postaci 14 fotografii przedstawiających powierzchnię nienaruszoną warstwę rumowiska korytowego. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci krzywych kumulacyjnych (rys. 4, 6, 7), na podstawie których określono parametry charakterystyczne [Gradziński i in. 1976; Dąbkowski i in. 1982], takie jak:

– wskaźnik różnoziarnistości:

$$\varepsilon = \frac{d_{95}}{d_5} \quad (6)$$

- stopień wysortowania wg Hazena:

$$u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7)$$

- wskaźnik jednostajności (cecha dominacji) wg Kollisa:

$$C_d = \frac{d_{90} \cdot d_{10}}{d_{50}^2} \quad (8)$$

- odchylenie standardowe krzywej uziarnienia:

$$\sigma = \left( \frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

- $d_i$  – średnica ziaren, której wraz z mniejszymi jest w osadzie 10%, 16%, 50%, 60%, 84%, 90%.

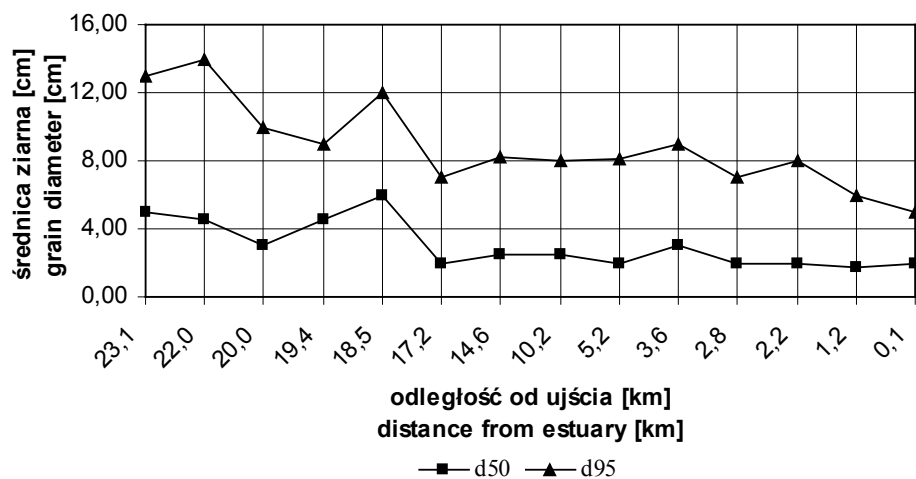
O dobrym wysortowaniu i małej różnoziarnistości materiału świadczą następujące wartości:

- stopień wysortowania wg Hazena  $u < 5$ ,
- wskaźnik różnoziarnistości wg Knoroza  $\varepsilon \leq 4 \div 5$ ,
- wskaźnik jednostajności wg Kollisa  $C_d \cong 1$ .

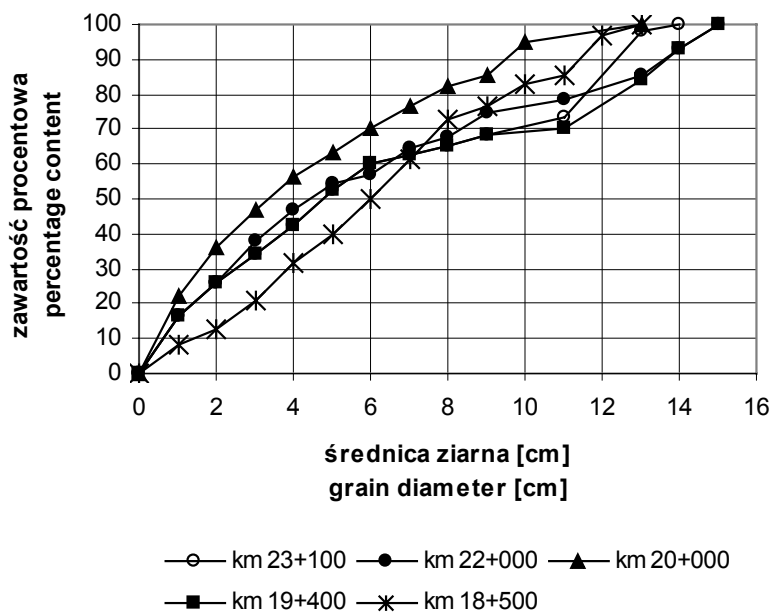
Przebieg wartości wymienionych parametrów oraz średnic charakterystycznych:  $d_{50}$  i  $d_{95}$ , wzdłuż potoku przedstawiono na rysunkach 3 i 5.

Analizując przebieg zmian średnic charakterystycznych materiału korytowego na długości, można stwierdzić, że największe wartości przyjmują one na odcinku położonym powyżej 18,0 km biegu ciek. Średnice  $d_{50}$  zawierają się w przedziale od 3,0 cm do 6,0 cm oraz średnica  $d_{95}$  od 7,0 cm do 14,0 cm (rys. 3). Na tym odcinku koryta procesem mającym dominujący wpływ na jego morfologię jest erozyjne rozmywanie dna oraz podcinanie skarp brzegowych. Jest to główne źródło dostawy rumowiska do koryta, które może wywołać lokalne zmiany składu uziarnienia materiału dennego.

W obrębie tego odcinka dominuje materiał frakcji kamienistej, stanowiący od 45% (km 20+000) do 68% (km 18+500) próby (rys. 4). Zawartość ziaren o średnicy większej od 8 cm wynosi od 20% do 35% procent, udział ziaren o średnicy mniejszej od 2 cm wynosi od 11% (km 18+500) do 35% (km 20+000). Tak duża zawartość drobniejszych frakcji w km 20+00 jest skutkiem tego, że lokalnie występuje tam erozja boczna.

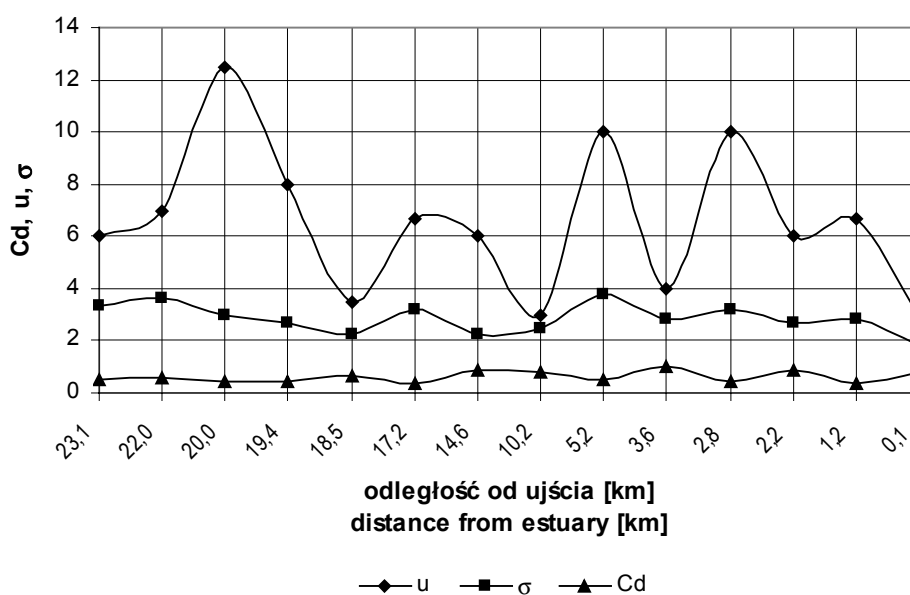


**Rysunek 3.** Zmienność średnic charakterystycznych rumowiska wzdłuż potoku Słomka  
**Figure 3.** Variability of the characteristic diameters of the bed material along the Słomka stream



**Rysunek 4.** Krzywe uziarnienia rumowiska na odcinku km 18+500 – 23+100  
**Figure 4.** Grain-size distributions of the river bed material on section km 18+500 – 23+100

Główne wskaźniki uziarnienia pozwalają na scharakteryzowanie materiału dennego ze względu na jego wysortowanie, różnoziarnistość oraz dominację frakcji. Materiał korytowy w obrębie tego odcinka charakteryzuje się bardzo słabym wysortowaniem ( $u = 3,5 - 12,5$ ) i dużą różnoziarnistością ( $e = 12,0 - 65,0$ ), odchylenie standardowe przyjmuje wartość  $\sigma = 2,24$  (km 18+500) –  $3,61$  (km 20+000). Cecha dominacji zmienia się w przedziale od  $C_d = 0,40$  (km 19+800) do  $0,88$  (19+400) (rys. 5). Tak duże różnice pomiędzy wartościami poszczególnych wskaźników mogą świadczyć o transporcie wszystkich frakcji rumoszu dennego podczas wezbrań.



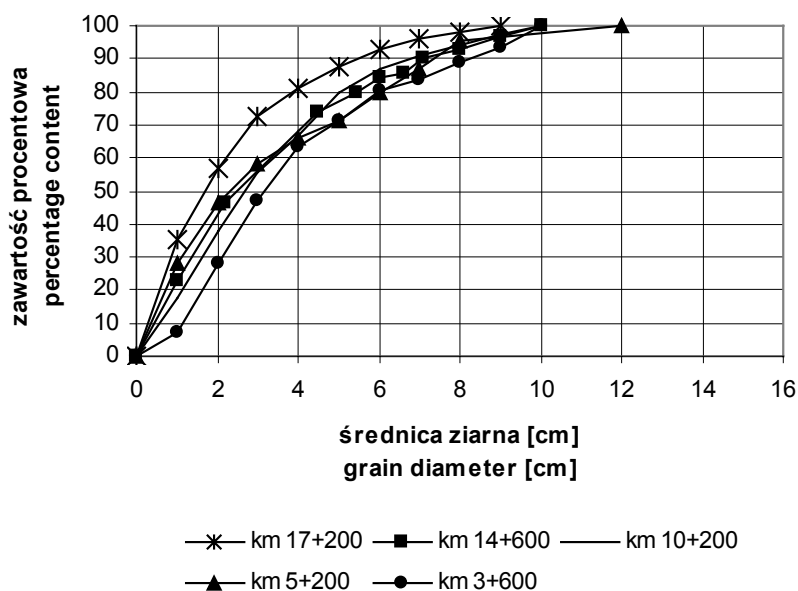
**Rysunek 5.** Zmienność wskaźników charakterystycznych rumowiska wzdłuż potoku Słomka

**Figure 5.** Variability of characteristic parameters of the bed material along the Słomka stream

Odcinek położony pomiędzy kilometrem 3+600 i 18+500 charakteryzuje się większą szerokością i mniejszym spadkiem podłużnym niż górne partie koryta. Ma to istotny wpływ na intensywność transportu materiału dennego, jak i na wielkość ziaren transportowanych w danych warunkach hydrodynamicznych. W obrębie tego odcinka obserwujemy zmniejszenie średnic charakterystycznych  $d_{50}$  oraz  $d_{95}$ , których wartości odpowiednio zawierają się w przedziale  $d_{50} = 1,8 - 3,0$  cm,  $d_{95} = 6,0 - 9,0$  cm (rys. 3). W materiale dennym dominuje frakcja zwirowa, której zawartość stanowi od 62% do 80% próby (rys. 6). Cząstki o średnicy nieprzekraczającej 2,0 cm stanowią przy tym odpowiednio



od 28% (km 3+600) do nawet 58% (km 17+200). Frakcja kamienista stanowi odpowiednio od 38% do 20%. Procentowy udział ziaren o średnicy większej od 8 cm w próbie jest zbliżony dla wszystkich krzywych i nie przekracza 10%. W kilometrze 3+600 materiał denny charakteryzuje się największym procentowym udziałem w próbie frakcji cząstek o średnicy większej od 8,0 cm. Jest to spowodowane dostawą gruboziarnistego materiału do koryta ze stromo nachylonych brzegów, intensywnie podcinanych przez strumień płynącej wody. Podobnie jak w górnych partiach cieku materiał denny jest słabo wysortowany i bardzo różnoziarnisty. Stopień wysortowania przyjmuje wartości z przedziału  $u = 3,0$  (km 10+200) –  $10,0$  (km 12+600), wskaźnik różnoziarnistości  $e = 9,0$  -  $70,0$ , wskaźnik odchylenia standardowego  $\sigma = 2,0$  (km 7+800) –  $3,16$  (km 17+200), a cecha donacji  $C_d = 0,38$  –  $1,0$  (rys. 5).

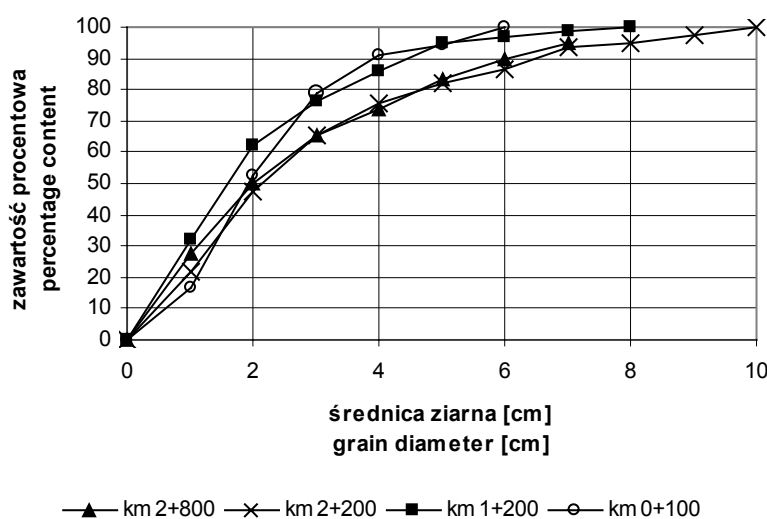


**Rysunek 6.** Krzywe uziarnienia rumowiska na odcinku km 3+600 – 17+200

**Figure 6.** Grain-size distributions of the river bed material on section km 3+600 – 17+200

Materiał denny odcinka ujściowego reprezentowanego przez krzywe wykonane pomiędzy kilometrem 0+000 i 2+800 odznacza się dużą zawartością frakcji żwirowych, stanowiących od 72% (km 2+800) do 92% (0+100) badanej próby. Materiał drobnofrakcyjny o średnicy maksymalnej do 2,0 cm stanowi od 45% do 60%. Frakcje o średnicy powyżej 8,0 cm obserwowano jedynie w km

2+200 (rys. 7). W obrębie tego odcinka stwierdzono dalsze zmniejszenie wartości średnic  $d_{50}$  i  $d_{95}$ , które mieści się w przedziale  $d_{50} = 1,8 - 2,0$  cm,  $d_{95} = 5,0 - 8,0$  cm (rys. 3). Wynika to ze spadku zdolności transportowej cieku rozumianej w kategorii wydajności, to jest zdolności do transportu ziaren o maksymalnej średnicy i określonym ciężarze właściwym przy danych warunkach panujących w cieku. Dotyczy to braku innych źródeł dostawy materiału grubofrakcyjnego do koryta (brak dopływów oraz aktywnych podcięć skarp koryta).



**Rysunek 7.** Krzywe uziarnienia rumowiska na odcinku km 0+100 – 2+800

**Figure 7.** Grain-size distributions of the river bed material on section km 0+100 – 2+800

Materiał denny jest słabo wysortowany i silnie różnoziarnisty. Stopień wysortowania przyjmuje wartości z przedziału  $u = 3,0$  (km 0+100) –  $10$  (km 2+800), wskaźnik różnoziarnistości  $e = 5,0 - 40,0$  wskaźnik odchylenia standardowego  $\sigma = 1,8$  (km 0+100) –  $2,83$  (km 2+800), a cecha dominacji  $C_d = 0,31 - 0,88$  (rys. 5).

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie uproszczonej metody fotograficznej do analizy składu uziarnienia materiału dennego wzdłuż cieku daje wystarczająco dokładne wyniki. Podstawową zaletą tej metody jest skrócenie czasu pomiarów w warunkach polowych. Metoda ta jest mniej pracochłonna od metody konwencjonalnej (polegającej na mechanicz-

nym rozdziale próby) i pozwala na analizę składu uziarnienia rumowiska bez naruszenia jego struktury. Przy jej użyciu można z wystarczającą dokładnością określić wielkość ziaren, jak również zbadać ich kształt.

Omawiana metoda ma pewne ograniczenia w zastosowaniu i wady. Swego rodzaju ograniczeniem jest możliwość jej stosowania wyłącznie do oceny składu uziarnienia materiału o średnicach frakcji większych od 0,50 cm. Wadą jest stosowane uproszczenie przy obliczaniu powierzchni ziarna, gdzie rzeczywista powierzchnia cząstki zamieniana jest na odpowiadającą jej powierzchnię koła.

Z badań wynika, że stopniowe zmniejszanie się ziaren rumowiska zostało zakłócone w obszarze intensywnej erozji bocznej, która spowodowała wzrost zawartości procentowej materiału drobnego z 11% do 35%. Natomiast poniżej tego odcinka zaobserwowano wzrost średnich charakterystycznych  $d_{50}$  i  $d_{95}$  odpowiednio o 30% dla średnicy  $d_{50}$  i 70% dla średnicy  $d_{95}$ .

Parametry charakteryzujące krzywe uziarnienia, takie jak cecha dominacji i odchylenie standardowe wzdłuż całego ciekę nie ulegają większym zmianom, natomiast stopień wysortowania ulega ostrym zmianom sięgającym rzędu wielkości, podobnie jak i wskaźnik różnoziarnistości. Materiał denny na całej długości ciekę charakteryzuje się słabym wysortowaniem i dużą różnoziarnistością.

Na podstawie wyznaczonych krzywych uziarnienia oraz zmian wielkości średnic charakterystycznych można stwierdzić, że stabilność koryta potoku Słomka została zachwiana w pobliżu przekrojów w km 18+500.

## BIBLIOGRAFIA

- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982.
- Fripp, J. B., Diplax P. *Surface sampling in gravel streams*. Journal of Hydraulic Engineering 119(4), 1983, s. 473–491.
- Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R. *Sedymentologia*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1976.
- Gładki H., Niziołek A. *Ustalenie krzywej uziarnienia rumowiska rzecznoego metodą fotograficzną*. Z. Nauk. AR w Krakowie, nr 79, Seria Melioracja z. 6, 1973, s. 55–65.
- Lisle T. E. *Sediment transport-storage relations for degradation of gravel bed channel*. Water Resources Research, vol. 38, No. 11, 2002.
- Michalik A., Bartnik W., Król T., Książek L., Niziołek A., Radecki-Pawlik A. *Badania składu granulometrycznego rumowiska w rzekach górskich metodą zamrażania próby in situ*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 306, Seria Inżynieria Środowiska z. 16, 1996, s. 79–92.
- Michalik A., Tekielak T., Wałag D. *Zastosowanie metody fotograficznej do oceny składu granulometrycznego rumowiska wzdłuż potoku Kasinka*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 433, ser. Inżynieria Środowiska, 27, 2006, s. 191–201.
- Parker G. *On why gravel bed streams are paged*. Water Resources Research, vol. 18, No. 5, 1982, s. 1409–1423.
- Shin S., M., Komar P., D. *Hydraulic controls of grain size of bedload gravels in Oak Creek, Oregon USA*. Sedimentology, 37, 1990, s. 367–376.

*Łukasz Bąk, Alicja Michalik*

---

Wolcott J., Church M. *Strategies for sampling heterogeneous phenomena: The example of river gravels*. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 61, No. 4, 1991, s. 534–543.

Wolman M. G. *A method of sampling coarse river-bed material*. *American Geophysical Union Trans.*, 35, 1954, s. 951–956.

Alicja Michalik  
Łukasz Bąk  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
Katedra Inżynierii Wodnej

Recenzent: *Prof. dr hab. Włodzimierz Parzonka*