

**Dorota Giritat, Joanna Bożek**

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,  
Zakład Geomorfologii, ul. Krakowskie Przedmieście 30,  
e-mail: dagiritat@uw.edu.pl

## **ANALIZA UZIARNIENIA OSADÓW GRUBOZIARNISTYCH – METODA POMIARU BEZPOŚREDNIEGO, SITOWA I ANALIZA OBRAZÓW CYFROWYCH**

### **Grain-size analysis of coarse-grained deposits – pebble count, sieve and digital analysis comparison**

**Słowa kluczowe:** osady gruboklastyczne, metoda Wolmana, metoda sitowa, metoda cyfrowa

**Key words:** coarse grain deposits, grain size analysis, Wolman method, sieve analysis, digital image analysis

## **WPROWADZENIE**

Skład granulometryczny jest jednym z podstawowych parametrów pozwalających na opisanie właściwości skał oraz umożliwiający określenie warunków ich depozycji. Do przeprowadzenia analizy uziarnienia wykorzystywanych jest wiele metod wybieranych adekwatnie do celu badań, rodzaju rozpoznawanego utworu i zakresu pomiarowego. Wyróżnia się wśród nich metody pomiaru bezpośredniego; sitowe; grawitacyjne: przepływowe – Kopeckiego; sedymentacyjne: wagowe, np. Attenberga, pipetowe – Köhna, badanie gęstości zawiesiny - areometryczna (Bouyoucosa, modyf. Casagrande'a i Prószyńskiego), wagi sedymentacyjnej, badania fotoekstynkcji zawiesiny; odwirowania; optyczne: mikroskopowe, dyfrakcji laserowej (elektroniczne); rentgenograficzne i planimetryczne (Myślińska 1998, Rutkowski 2007). Rozpoznanie uziarnienia utworów drobnoziarnistych nie stanowi zwykle problemu. W Polsce najczęściej wykonywane są one metodą sitową, sedymentacyjną (areometryczną) lub optyczną (laserową). Utwory gruboklastyczne (gruboziarniste), np. osady korytowe rzek zwirodennych, już na etapie poboru próbek wymagają podjęcia decyzji o metodzie analizy. Wielkość badanych cząstek, ich waga i masa próbki determinują ilość osadu, jaka powinna być pobrana, aby otrzymać wiarygodne wyniki. Do analizy sitowej zaleca się, aby masa próbki w gramach była około 200 razy większa od średnicy największego ziarna w mm

(Mycielska-Dowgiałło 2007). Przykładowo, jeśli w badanej warstwie osadów największe ziarna zawierają się w przedziale 128-256 mm, całkowita masa próbki do analizy powinna wynosić 25 600 gramów (256 kg). Dlatego też część analizy sitowej takich osadów wykonywana jest bezpośrednio w terenie lub stosowane są inne metody określania składu granulometrycznego. Do najbardziej rozpowszechnionych należy metoda bezpośredniego pomiaru osi ziarna – metoda Wolmana (1954) oraz metoda planimetryczna (Stephenson 1970, Syvitski 1991, Bunte 2001). Od lat dziewięćdziesiątych XX wieku coraz częściej do określania wielkości ziarna stosuje się technologie cyfrowe i skanowania laserowego (TLS) (Nikora i in. 1998, Goring i in. 1999, Butler i in. 2001, Aberle, Smart 2003, Marion i in. 2003, Nikora, Walsh 2004, Smart i in. 2004, Aberle, Nikora 2006, Heritage, Milan 2009). Wymienione metody analizy składu granulometrycznego osadów gruboziarnistych pozwalają na określenie rozkładu uziarnienia w procentach wagowych, objętościowych lub ilościowych, na podstawie których, można obliczyć wybrane parametry statystyczne. Analiza uziarnienia osadów gruboklastycznych przez badaczy jest postrzegana jako uciążliwa, czasochłonna a porównywanie uzyskanych różnymi metodami wyników problematyczne (Diplas, Sutherland 1988, Fraccarollo, Marion 1995, Bartholdy i in. 2007). Określenie składu granulometrycznego jest jednak szczególnie istotne przy rekonstrukcji lub modelowaniu warunków morfodynamicznych danego środowiska depozycyjnego i wartości progowych ruchu ziarna (Bartnik 1992, van Rijn 1993, Mycielska-Dowgiałło 2007). Otrzymane różnymi metodami wyniki nie zawsze jednak są ze sobą porównywalne i od wielu lat toczy się dyskusja nad tym zagadnieniem (m.in. Church i in. 1987, Ferguson, Paola 1997, Latulippe i in. 2001, Bartholdy i in. 2007). Znaczna część publikacji koncentruje się jednak na porównywaniu metod badań osadów drobnoziarnistych, np. metody kombinowanej i laserowej (m.in. Loizeau i in. 1994, Kornet, Vandenberghe 1997, Beuselinck i in. 1998, Ryzak i in. 2004, Płaskonka 2010).

Celem niniejszego artykułu jest porównanie wyników analizy uziarnienia gruboklastycznych osadów korytowych z wykorzystaniem trzech powszechnie stosowanych metod: analizy Wolmana, sitowej zaproponowanej przez Rutkowskiego (1995) i planimetrycznej – cyfrowej, przeprowadzonej przy pomocy programu Sedimentrics Digital Gravelometer.

## WYBRANE METODY OKREŚLENIA UZIARNIENIA OSADÓW GRUBOZIARNISTYCH

Metoda pomiaru bezpośredniego - Wolmana (1954) polega na pomiarze osi pośredniej „b” każdego ziarna znajdującego się na badanej powierzchni. Zwykle analiza ta stosowana jest w badaniach współczesnych osadów, np. osadów korytowych (Kondolf i in. 2005). Zebranie i zmierzenie istotnej statystycznie liczby ziaren przeprowadza się w punktach przecięcia linii siatki umieszczonej na powierzchni formy (ang. *grid sampling*) lub wzdłuż wyznaczonych linii transektu (ang. *step-toe*

*sampling*) (Wolman 1954, Leopold 1970, Klingeman, Emmett 1982, Bunte, Abt 2001, Kondolf i in. 2005). Jeśli przeprowadzamy pomiar na powierzchni łachy lub w strefie przemiału, pierwszy transekt wyznaczamy w odległości jednego kroku od brzegu formy (prostopadle do uśrednionego -przybliżonego kierunku płynięcia wody w korycie rzeki). Początek transektu można wyznaczyć losowo rzucając otoczek. Następnie podnosimy i mierzymy oś „b” każdego ziarna znajdującego się w pobliżu dużego palca u stopy. Kolejny transekt wyznaczamy znów prostopadle do przepływu, w odległości jednego kroku od poprzedniego i powtarzamy czynności. Jeśli forma jest mała (poniżej 2 m), transekty wyznaczamy „zygzakowato”. Aby zmniejszyć subiektywność wyboru ziarna do pomiaru. K. Bunte, S.R. Abt (2001) zaproponowali, aby używać ramki o wielkości 60x60 cm z rozciągniętą wewnątrz niej siatką co 10 cm i wybierać ziarna znajdujące się na ich przecięciach. Aby określić rozkład uziarnienia w poszczególnych frakcjach zaleca się minimalnie zmierzyć 100 ziaren. Metoda ta stosowana jest do określenia uziarnienia klastów większych niż 4 mm (tab. 1) (Leopold 1970, Rutkowski 1995, 2007, Kondolf i in. 2005).

Metoda sitowa analizy osadów gruboklastycznych (ang. *bulk sampling*), opisana w polskojęzycznej literaturze przez Rutkowskiego (1995, 2007), przeprowadzana jest w terenie i w laboratorium. W pierwszym etapie należy z odsłonięcia (wybranej warstwy) lub z określonej powierzchni pobrać próbkę o odpowiedniej masie. C.K. Wentworth (1926) zaproponował „praktyczną” masę próbki, jaka może być wystarczająca do przeprowadzenia analizy (tab. 2). Posłużyło to do opracowania kilku norm dotyczących masy próbki (Mycielska-Dowgiało 2007). Wielu badaczy przeprowadzało weryfikację tego problemu. M.P. Mosley, D.S. Tinsdale (1985) zalecali, aby waga największej frakcji nie była mniejsza niż 5% masy całej próbki. Według M.A. Church’a i in. (1987) masa ta powinna stanowić tylko 0,1% lub 1% wagi próbki. Problem ten wciąż pozostaje dyskutowany (Milan i in. 1999).

W praktyce, zwykle do przygotowanego pojemnika o określonej objętości, wsypywany jest materiał a następnie sukcesywnie przesiewany. Uziarnienie największych frakcji określa się przy pomocy pojedynczych ramek lub korzysta się z płytki o odpowiednich wymiarach oczek (np. 32 mm, 64 mm, 128 mm, 256 mm). Pozostały materiał przesiewa się przez sita 8 i 16 mm a następnie zabiera próbkę osadu do laboratorium w celu wykonania dalszej analizy. Każdą z wydzielonych w ten sposób frakcji badanego osadu ważymy, a następnie obliczamy ich procentową zawartość (Rutkowski 1995).

Jeśli analizowany materiał jest różnoziarnisty i występuje w nim wiele ziaren o znacznej średnicy możliwe jest zastosowanie metody objętościowej. Mierzymy wówczas trzy osie ziaren należących do tych frakcji oraz ważymy te ziarna. Następnie oblicza się objętość pozorną ziaren (lub rzeczywiście) i wykreśla krzywą regresji pomiędzy objętością a wagą. Na jej podstawie można oszacować rozkład uziarnienia (Rutkowski 1995).

Metoda cyfrowa (fotograficzna, ang. *photographic grid methods*) zaliczana jest do metod pomiaru objętościowego i stosowana jest do określenia uziarnienia na

**Tabela 1.** Przykładowe wyniki pomiaru ziaren z powierzchni formy i obliczenia udziału procentowego poszczególnych frakcji (wg Kondolf i in. 2005)

**Table 1.** Example of notes from a pebble count, showing field-generated histogram (acc. Kondolf et al. 2005)

Wielkość ziarna Grain size [mm]	Wielkość ziarna Grain size [mm]	Liczba ziaren Pebble count	Liczba ziaren Pebble count	%	% skumulowany Cumulative percent	Frakcje drobniejsze niż Pebbles finer than [mm]
256	-8		2	1,6	100	360
180	-7,5	☐	5	4	98,4	256
128	-7	☐☐☐	16	12,8	94,4	180
90	-6,5	☐☐☐☐☐ ☐☐	30	24	81,6	128
64	-6	☐☐☐☐☐ ☐☐	30	24	57,6	90
45	-5,5	☐☐☐☐☐	19	15,2	33,6	64
32	-5	☐	6	4,8	18,4	45
23	-4,5	☐	7	5,6	13,6	32
16	-4	☐	4	3,2	8,0	22,6
11	-3,5	┌	2	1,6	4,8	16
8	-3		1	0,8	3,2	11,3
Pon. 8	Pon. -3	┌	3	2,4	2,4	8
			Σ = 125			
			Σ > 8 mm = 122			

szlifach, analizie mikrostruktur lub właśnie do analizie osadów gruboklastycznych. Przeprowadzenie jej wymaga wykonania na powierzchni formy lub odsłonięcia fotografii o określonych wymiarach (może być to kwadrat o powierzchni 1 m<sup>2</sup>, chociaż R. Kellerhals, D.I. Bray (1971) stosowali również czterokrotnie mniejsze pole testowe kwadrat o polu powierzchni 0,25 m<sup>2</sup>. Ważne jest aby oś obiektywu była ustawiona możliwie prostopadłe do badanej powierzchni i stale w określonej odległości np. 1 lub 1,5 m (ryc. 1).

W metodzie planimetrycznej, powierzchnia zajęta przez klasty danej frakcji  $A(fi)$  w osadzie wyrażona jest w procentach powierzchni całego analizowanego pola A, co odpowiada zawartości tych klasów w procentach objętościowych  $V(fi)$  (Rutkowski, 1995)

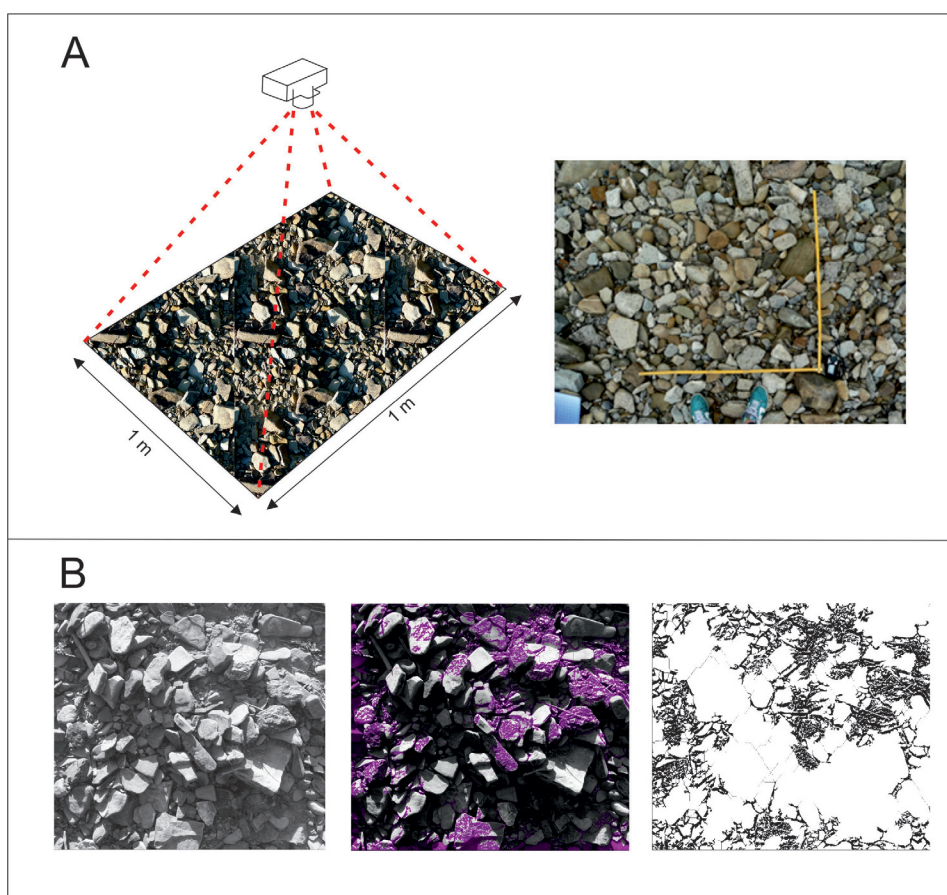
$$V(fi) = (A(fi))/A$$

Aby obliczyć udział objętościowy poszczególnych ziaren stosuje się również metodę liniową. W tych samych wybranych odległościach wykreśla się równoległe linie pionowe (lub sieczne) a następnie oblicza stosunek długość linii przypadających na klasty o określonej wielkości do długości całkowitej. Analizę można również przeprowadzić metodą punktową (punktów losowych lub siatkową), polegająca na przykład na obliczeniu stosunku liczby punktów siatki przypadającej na ziarna o określonej wielkości do ich liczby całkowitej (Rutkowski 1995). Regularnie rozmieszczonych w polu punktów powinno być co najmniej 300.

**Tabela 2.** Masy próbek do analizy sitowej wg Wentworth'a (1926)

**Table 2.** Ideal and „practical” sample size of Wentworth (1926)

Wielkość frakcji maksymalnej <i>Maximum grain size [mm]</i>	Wymagana masa próbki <i>Ideal minimum sample size [kg]</i>	Sugerowana, „praktyczna” masa próbki <i>Suggested practical sample size [kg]</i>
64-128	256	32
32-64	32	16
16-32	4	8
8-16	0,5	4

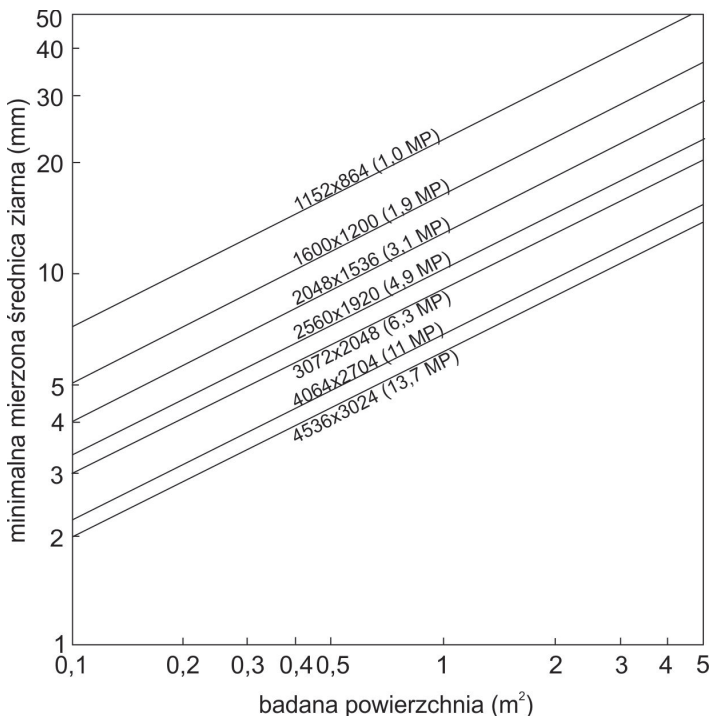


**Ryc. 1.** Przykład zdjęcia cyfrowego wykorzystywanego do przeprowadzenia analizy planimetrycznej A – wykonywanie zdjęcia w terenie, B – przykład obróbki zdjęcia w programie Sedimetries Digital Gravelometer

**Fig. 1.** An example of digital photo used in planimetric grain size analysis. A - Illustration of the recommended photographic procedure, B - Illustration of the results of the image-processing procedure

Od kilkunastu lat opracowywane są metody automatycznego pomiaru wielkości i kształtu ziaren. Wykorzystują one założenia metody planimetrycznej a uziarnienie określane jest przy pomocy programów komputerowych oraz analizatorów optyczno-elektronicznych (Kondolf i in. 2005). Analiza rozkładu uziarnienia na podstawie obrazów cyfrowych opracowywana jest od kilku lat, i obecnie coraz powszechniej wykorzystywana z uwagi na szybkość i dokładność uzyskiwania danych (Ghalib 1999, McEwan i in. 2000, Butler i in. 2001, Reid i in. 2001, Sime i Ferguson 2003, Graham i in. 2005). Analiza przetwarzania obrazu cyfrowego może być wykonywana na dwa sposoby - na podstawie wykrywania krawędzi ziaren lub na podstawie segmentacji i liczenia pikseli, przy czym według Grahama i in. (2005) najmniejsze ziarno na obrazie nie może mieć mniej niż 23 piksele (ryc.2). W obu przypadkach w pierwszym etapie obraz przetwarzany jest do skali szarości.

W badaniach przeprowadzanych przez autorów niniejszego artykułu do analizy zdjęć cyfrowych osadów na powierzchni wynurzonych odsypów korytowych wykorzystano program Sedimentrics Digital Gravelometer opracowanym przez



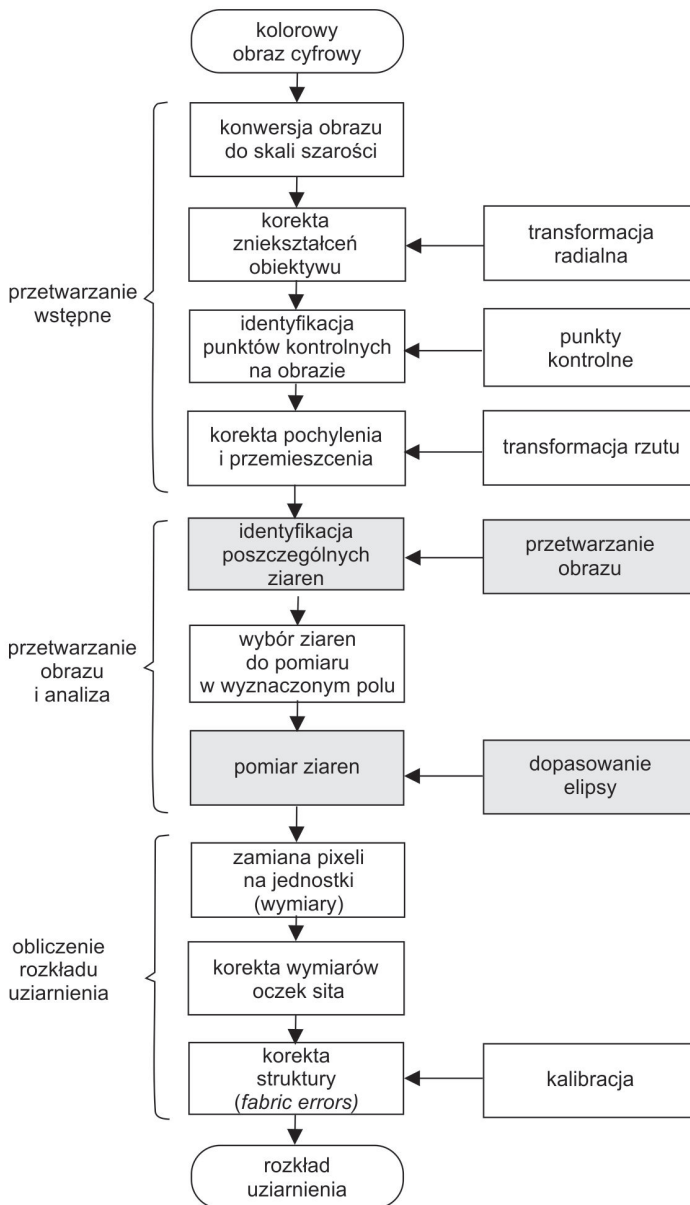
**Ryc. 2.** Związek pomiędzy powierzchnią analizowanego pola na zdjęciu cyfrowym a wielkością zmierzonych frakcji, w zależności od rozdzielczości obrazu (Graham i in. 2005).

**Fig. 2.** The relation between minimum resolvable grain size and ground area coverage for various camera resolutions (acc. Graham et al. 2005)

naukowców z Department of Geography Loughborough University Loughborough Leics w Wielkiej Brytanii (Graham i in. 2005). Program Digital Gravelometer korzysta z zaawansowanych technik przetwarzania obrazu mierząc wielkości ziaren z fotografii. Koniecznym warunkiem do uzyskania dokładnego wyniku jest zrobienie zdjęcia prostopadle do powierzchni, wyznaczenie czterech kontrolnych punktów na fotografii oraz określenie odległości między tymi punktami. Ważnym elementem jest również dobre oświetlenie zdjęcia. Identyfikacja i pomiar ziaren przez program Sedimetrics Digital Gravelometer przebiega w ośmiu etapach (ryc. 3): (1) konwersja na skalę szarości, (2) korekta zniekształceń obiektywu, (3) rektyfikacja osi obiektywu i określenie rozdzielczości, (4) identyfikacja ziarna w obrazie (konwertowanie obrazu w skali szarości na obraz binarny (czarno-biały)), (5) Oddzielne stykających się ziaren, (6) wybór ziaren do mierzenia, (7) pomiar ziaren w pikselach, (8) konwersja zmierzonych wielkości ziarna na milimetry z wykorzystaniem skali obrazu (ryc. 2). Po przetworzeniu zdjęcia program (etap 4 i 5) ukazuje liczone powierzchnie w barwie fioletu. Uzyskane wyniki z każdej z analiz można przedstawić przy pomocy oferowanych przez program metod statystycznych tj. momentów, graficzną Folka i Warda (1957) wykonanych na podstawie pomiarów ilościowych (ang. *grid-by-numer sampling*) lub powierzchniowych ziarna (ang. *area-by-numer sampling*) według pomiaru osi pośredniej b. Po wybraniu metody analizy statystycznej program dzieli materiał na frakcje, liczy ich ilość, procentowy udział w klasach oraz procent skumulowany. Generuje także wykresy uziarnienia i częstości. Następnym krokiem jest wygenerowanie raportu z którego uzyskujemy informację o podstawowych parametrach badanego materiału, np. średniej średnicy ziaren, wysortowaniu, skośności czy kurtozie badanych okruchów widniejących na zdjęciu (Graham i in. 2005, Bożek 2015).

## OBSZAR I METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na wybranych odsypach zwirowych Wisłoki w jej górnym, górskim odcinku. Prezentowane wyniki pochodzą z badań mezor formy zlokalizowanej w odcinku erozyjno-akumulacyjnym koryta Wisłoki, w dnio szerokiej doliny (Stawowczyk 2001), poza zasięgiem wpływu cofki zbiornika w Krempnej. W każdym miejscu poboru próbki wykonywane były zdjęcia materiału na powierzchni łachy prostopadle do powierzchni, z wysokości ok. 1,5 m. Na zdjęciu umieszczano miarkę, pomocną przy wyznaczaniu w programie kwadratu o bokach 1m x 1m, który podlegał analizie. Zdjęcia wykonane zostały na fragmentach łach nieporośniętych roślinnością, w siatce co kilka metrów. Na odsypie w Kotani jednorazowo wykonano ok. 40 zdjęć, na łasze w Myscovej około 20. W badanych polach przeprowadzono analizę uziarnienia metodą pomiaru bezpośredniego Wolmana (1954) oraz metodą sitową zgodnie z metodyką proponowaną przez Churcha i in. (1987), Bunte i Abt (2001) oraz Rutkowskiego (1995). Następnie obliczono podstawowe parametry uziarnienia wg Folka i Warda (1957) oraz wygenerowano



**Ryc. 3.** Schemat etapów pomiaru wielkości ziarna na zdjęciach cyfrowych przez program Sedimetrics Digital Gravelometer (wg Graham i in. 2005)

**Fig. 3.** Illustration of the stages required to extract grain-size data from a digital image with use of the Sedimetrics Digital Gravelometer software (acc. Graham et al. 2005)



krzywe uziarnienia i częstości (Mycielska-Dowgiałło 2007). Wyniki są szczegółowo omówione w pracy J. Bożek (2015). Do zagadnienia prezentowanego w niniejszym artykule wybrano 5, najbardziej charakterystycznych punktów. Wyniki z poszczególnych typów analiz przedstawiono na wykresach zbiorczych. Na podstawie krzywych uziarnienia i częstości określono średnice charakterystyczne rumowiska dla poszczególnych badanych stanowisk. Relacje pomiędzy wynikami pokazano przy pomocy rozstępu R (im większa wartość mary dyspersji - rozstępu R, tym większe rozproszenie wyników wokół średniej) oraz na wykresach pudełkowy.

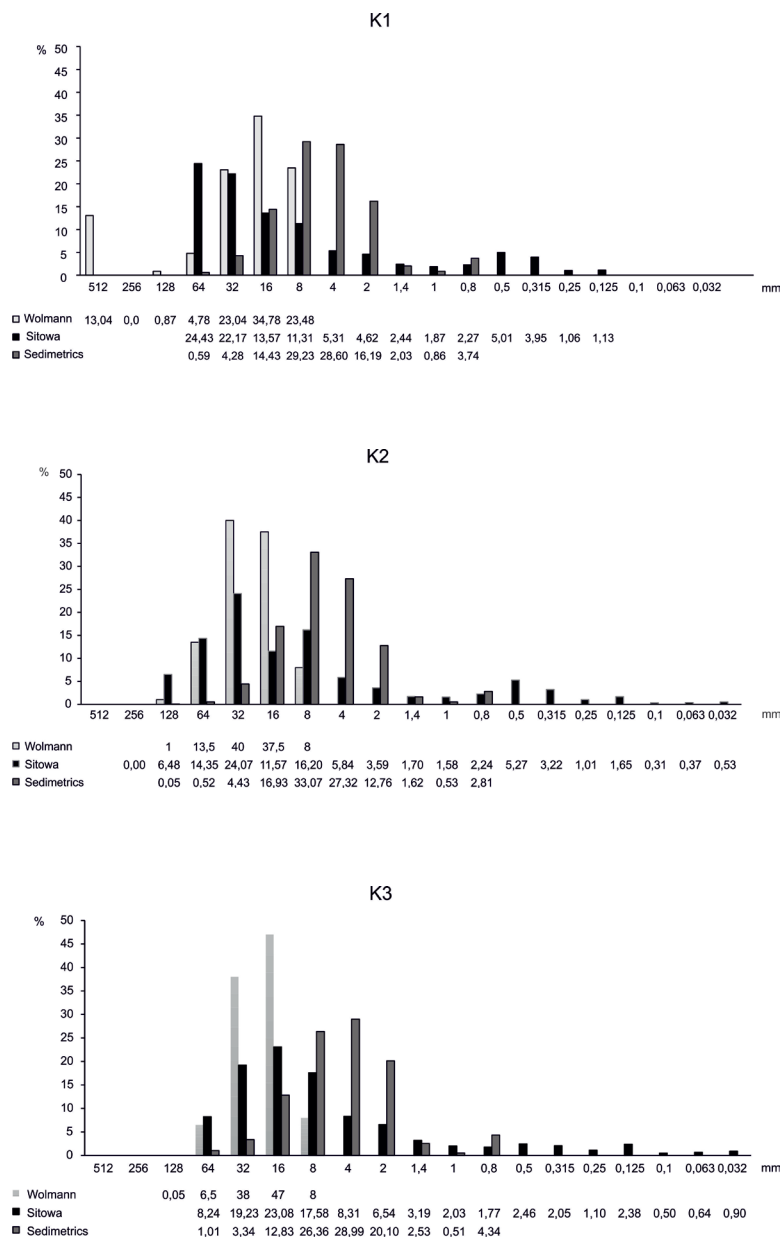
## WYNIKI I Dyskusja

Aby określić rodzaj i typ osadu należy ustalić procentową zawartości frakcji podstawowych, które w zależności od przyjętej klasyfikacji (ustalonych przedziałów granicznych frakcji) lub normy, uważane są za kryterium podstawowe do tego typu rozpoznania. Podstawową metodą prezentacji wyników rozkładu uziarnienia osadu jest histogram lub krzywa częstości (gęstości). Pozwala to ocenić, czy badany materiał ma układ jednomodalny – jednorodny pod względem materiału wyjściowego lub procesu – jego dynamiki bądź przebiegu, czy też wielomodalny – różnoziarnisty osad deponowany w środowisku o zmiennej energii środowiska depozycyjnego.

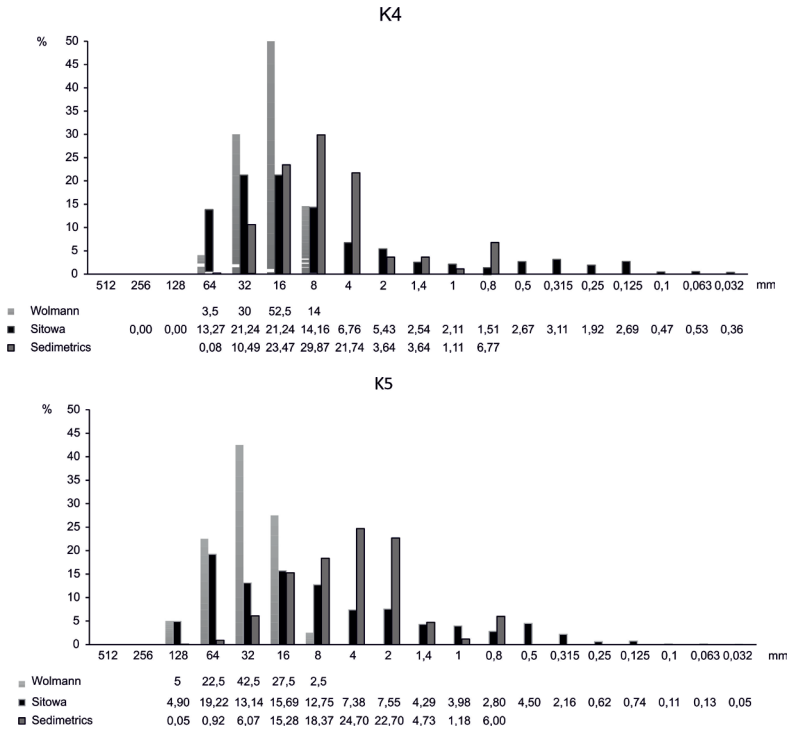
Wykreślone histogramy (ryc. 4) pokazują znaczą różnicę pomiędzy zastosowanymi trzema analizami. Współczynnik zmienności pomiędzy udziałem procentowym poszczególnych frakcji (ryc. 4) osiąga wartość powyżej 60 %, a nawet 100%, zaś dyspersja (rozstęp R) osiąga wartość 30, co oznacza duże i bardzo duże zróżnicowanie wyników. Krzywe częstości (ryc. 5) wykreślone na podstawie wyników analizy Wolmana są jednomodalne (lepto- i mezokurtyczne, o rozkładzie ujemno skośnym i symetrycznym), a wartość mód sięga powyżej 52 (ryc. 5). Sugeruje to jednorodny skład rumowiska (bardzo gruboziarniste i gruboziarniste żwiry). Metoda sitowa daje układ wielomodalny (dwie lub trzy mody, rozkład dodatnio skośny, bardzo dodatnio skośny, symetryczny lub mezokurtyczny) - średnioziarniste żwiry, a cyfrowa w większości przypadków dwumodalny – drobno- i średnioziarnisty żwir. Wartości mód z analizy sitowej i cyfrowej są niższe niż z analizy bezpośredniej i osiągają maksymalnie wartość około 36 (ryc. 5). Zatem, jeśli osad miałby być tylko sklasyfikowany ogólnie, do której z podstawowych frakcji należy, każda z zastosowanych metod wskazuje na dominację frakcji żwirowych. Jednak do rozważań litodynamicznych lub litostratygraficznych porównywanie takich wyników może być problematyczne i prowadzić do błędów interpretacyjnych.

Rozbieżności w wynikach zaznaczają się również na krzywych uziarnienia (ryc. 6), gdzie widoczne jest ich przesunięcie w zależności od analizy, albo w stronę frakcji gwałowej i otczakowej (-9 – -5 phi) lub ku frakcji żwirów bardzo i gruboziarnistych z domieszką frakcji drobnożwirowych i grubopiaszczystych (-4 – 1 phi). Chociaż ocena litogenetyczna i interpretacja litodynamiczna osadów

w wykorzystaniu metody graficznej (krzywych kumulacyjnych rozkładu uziarnienia w skali prawdopodobieństwa) jest metodą dyskusyjną, dość powszechnie jest ona stosowana we wstępnych pracach. Krzywe analizuje się pod względem cechy ich załamania, wygięcia i nachylenia poszczególnych odcinków, segmentów (Sindowski 1958, Visher 1969, Racinowski i in. 2001, Mycielska-Dowgiałło 2007). Według wydzielenia Sindowskiego (1958) krzywe z analizy Wolmana reprezentują typ SG (stromo-nachylona krzywa pod kątem  $> 60^\circ$ ), z analizy sitowej – KX-KV-PG (krzywa wypukło-wygięta w stronę frakcji grubszych, przechodzi we wklęsłe wygięcie, a końcowy krótki odcinek ma charakter płaski), z analizy cyfrowej – KG-KX (krzywa początkowo o umiarkowanym nachyleniu, wygięta wypukło w stronę frakcji drobniejszych). Gdyby celem prac było rozpoznanie litogenetyczne osadu różny typ krzywej mógłby wskazywać na odmienne środowisko sedymentacyjne. Podobny problem pojawia się przy określaniu litodynamiki środowiska prądowego na podstawie krzywych kumulacyjnych uziarnienia (Visher 1969, Mycielska-Dowgiałło 2007). Krzywe wykonane według pomiaru bezpośredniego ograniczają się jedynie do populacji A odpowiadającej saltacji i są to frakcje o średnicy większej niż 32 mm i o stosunkowo dobrym wysortowaniu (znaczne nachylenie członu A). Można zatem przyjąć, że rumowisko dennego przemieszczane było saltacyjnie. Krzywe wykreślone na podstawie wyników analizy sitowej wskazują na transport we wleczeniu i toczeniu (segment C) oraz w saltacji i unoszeniu (segment A i B). Wleczeniu podlegać miałyby ziarna żwirowe a saltacji i unoszeniu - frakcje grubopiaszczyste i piaszczyste. Segment C jest słabo nachylony (populacja słabo wysortowana) lecz populacja ta ma największy udział. Segmenty A i B zaznaczają się słabo i są słabo nachylone lub płaskie. Wskazuje to na różnoziarnisty materiał wyjściowy, stosunkowo szybką depozycję frakcji największych niesionych głównie w trakcji (Mycielska-Dowgiałło 2007). Krzywe z analizy cyfrowej (Sedimetrics) wskazują na przewagę transportu saltacyjnego – dobrze rozbudowany segment A o umiarkowanym nachyleniu (frakcje 256-2 mm), i poprzez unoszenie – segment B, płaski (frakcje drobniejsze niż 2 mm). Słabo wysortowany osad transportowany był zatem głównie w przydennej zawieszynie, depozycja zachodziła stosunkowo szybko a środowisko cechowała znaczna koncentracja zawiesziny. Duże rozbieżności wśród wyników występuje także pomiędzy wskaźnikami uziarnienia (ryc. 7). Widoczna jest znaczna asymetria rozkładu (lewostronna) wartości  $d_{50}$  oraz jej znaczne rozproszenie. W przypadku wysortowania nadal zaznacza się duże zróżnicowanie wyników jednak wszystkie wskazują na słabe wysortowanie osadu. Powyższe zestawienia poddają w wątpliwość możliwość wymiennego stosowania ich do określenia typu osadu oraz oceny warunków litodynamicznych środowiska. Powodów tak dużej różnicy pomiędzy wynikami jest kilka. Underwood (1970) podaje trzy ich główne typy: a) błędy wynikające z subiektywizmu metody, b) z niewłaściwie przeprowadzonej analizy (błędy techniczne), c) błędy z braku wystarczającego materiału do analizy lub złego dobrania analizy do celu badań.

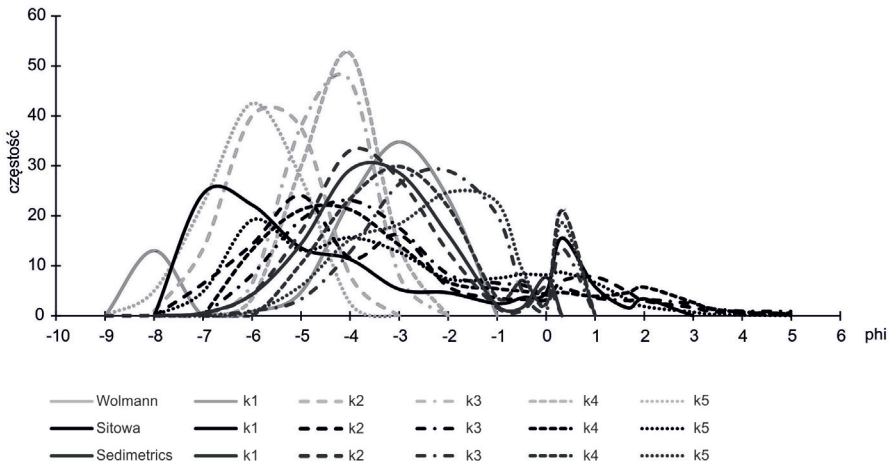


**Ryc. 4.** Histogramy rozkładu uziarnienia próbek według analizy metodą Wolman’a, sitową i cyfrową  
**Fig. 4.** Frequency histogram of bed-material size distribution for samples obtained with use of the Wolmann, sieving and digital analysis



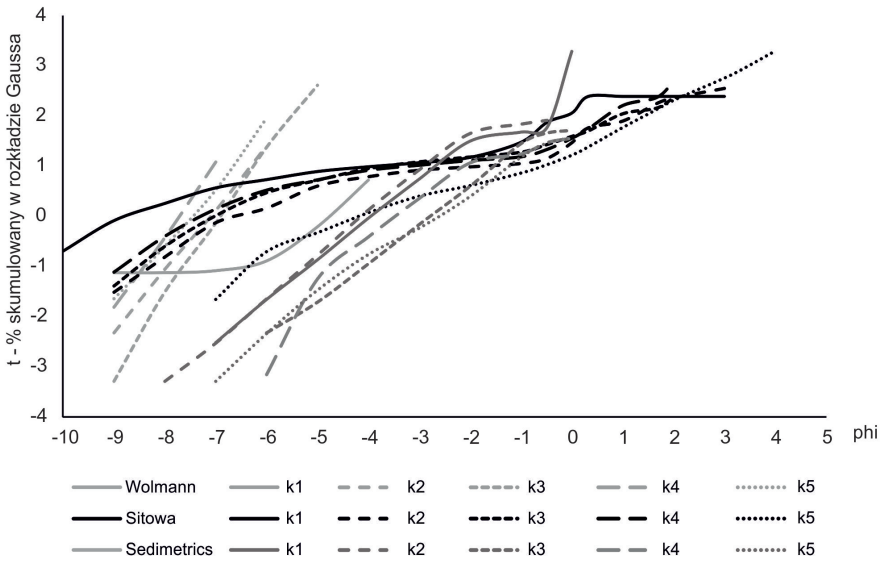
Ryc. 4. Histogramy rozkładu uziarnienia próbek według analizy metodą Wolman’a, sitową i cyfrową

Fig. 4. Frequency histogram of bed-material size distribution for samples obtained with use of the Wolmann, sieving and digital analysis

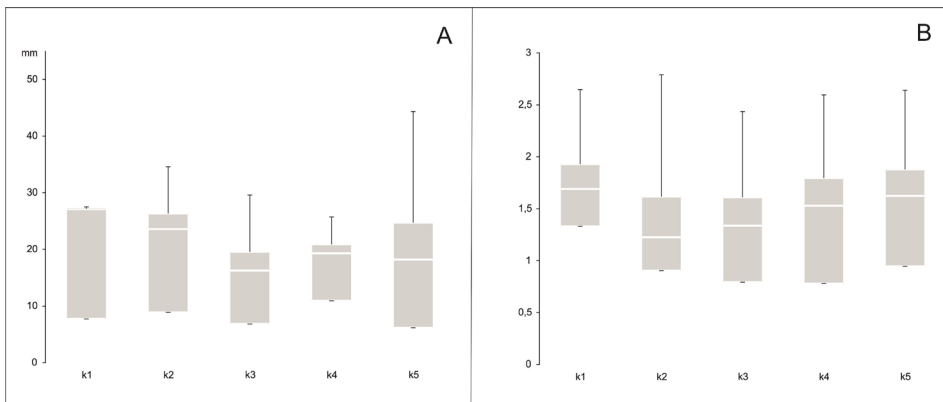


Ryc. 5. Krzywe częstości próbek osadów ze stanowiska Kotań wykonane na podstawie analizy Wolmana, sitowej i cyfrowej

Fig. 5. Frequency distribution curves for the Kotań channel-bar surface sediments plotted according to the data from Wolmann, sieving and digital analysis



**Ryc. 6.** Krzywe uziarnienia próbek osadów we stanowiska Kotań wykonane na podstawie analizy Wolmana, sitowej i cyfrowej. Krzywe przedstawiane są w rozkładzie Gaussa  
**Fig. 6.** Cumulative grain-size distribution curves for the Kotań channel-bar surface sediments showing the range of textures in the bed material used to test Wolmann, sieving and digital analysis. Curves are plotted in the Gaussian distribution



**Ryc. 7.** Rozkład wartości parametrów d50 w mm (A) i wysortowania (B) na podstawie 3 analiz, w poszczególnych punktach pomiarowych  
**Fig. 7.** Variability of d50 parameter (in mm) (A) and sorting index of the studied surface channel-bar sediments

Pierwszy typ błędu wynika z czynników błędu ludzkiego, takim może być subiektywny wybór frakcji lub mała liczebność zmierzonych ziaren. Dokładność analizy może być zwiększona poprzez staranne próbkowanie i zwiększenie liczebności próbki. W analizie bezpośredniego pomiaru mierzona jest zwykle oś „b” zwykle bez ziaren z przedziału piasków. Stąd brak w wynikach udziału frakcji drobniejszych niż 8 mm lub 4 mm. Niejednokrotnie błędne wyniki mogą wynikać właśnie ze zbyt małej ilości zmierzonych ziaren, na co zwracano już uwagę (Rice i Church 1998, Bunte i Abt 2003, Green 2003). Jeśli zastosuje się próbkę o liczebności 100 ziaren może to wystarczyć tylko do scharakteryzowania ogólnego rozkładu, np.  $d_{50}$  (najlepiej co 0,25 phi), ale w celu właściwej oceny uziarnienia osadu powinno się zmierzyć około 400 cząstek (jeśli udział ziaren drobniejszych stanowi co najmniej 10% badanego osadu). Błąd pomiaru będzie wtedy znacznie mniejszy, w granicach 0,05 (0,2 i 0,1 phi w dla  $d_{16}$  i  $d_{95}$ ) (Rice i Church 1998, Green 2003). Według Greena (2003) metoda pomiaru bezpośredniego najlepiej oddaje rozkład uziarnienia pomiędzy 66 a 91 percentylem, z maksimum dokładności w percentylu 73. W przedstawionych danych zmierzono 200 ziaren w 5 stanowiskach na każdej łasze. Dla pojedynczego stanowiska jest to miara zbyt mała, jak wykazało porównanie z wynikami innych analiz, jednak gdy zsumuje się wyniki i określi na tej podstawie uziarnienie rumowiska na powierzchni całej łachy, podniemiemy wartość statystyczną analizy bezpośredniej. Analiza cyfrowa bazuje na określeniu udziału objętościowego danej frakcji w osadzie i wykonywane jest to na podstawie pomiaru powierzchni danych otoczków. Dzięki analizie możliwe jest już rozpoznanie udziału frakcji piaszczystych, ale ich udział może być o kilka procent zaniżony. Metoda analizy obrazu określa objętości wagowej ziaren, natomiast wielkość ta ma wpływ na wyniki analizy sitowej mechanicznej. Ponadto, rozmiary ziaren przesiewanych mechanicznie mierzy się za pomocą osi „b” ziaren (czy przechodzą przez oczka sita o kształcie kwadratowym, lub nie). Wielkości ziarna określony przy pomocy analizy obrazu może nie być taka sama, jak ta określona przez przesiewanie mechaniczne. Trudno jest więc porównywać wyniki obydwu metod i większość wykazanych rozbieżności związana jest z tymi uwarunkowaniami. Różnice w wynikach analiz mogą wynikać również z niedokładności wykonywania pomiarów. Rubin (2004) zaleca, by zdjęcia cyfrowe były wykonywane prostopadle do podłoża i utrzymywanie w takiej samej odległości od powierzchni. Aparat powinien być za każdym razem tak samo skonfigurowany (zoom, ostrość, format pliku) w ten sam sposób dla wszystkich pól testowych. Jeśli stosowane jest doświetlenie zdjęcia, należy je wykonywać zawsze pod tym samym kątem. Obrazy, które są niedoświetlone lub prześwietlone powinny być wykluczone z analizy, ponieważ możliwe jest, że algorytm programu może zinterpretować „cienie” jako duże indywidualne ziarna. Bardzo ważnym czynnikiem jest rozdzielczość zdjęć, która powinna być tak dobrana, aby najmniejsze ziarna były reprezentowane przez więcej niż jeden pikseli. Ponadto, zwykle część ziaren jest przysłonięta przez inne klasty, co może być błędnie interpretowane przez algorytm jako drobniejsze frakcje. Problem ten można rozwiązać stosując najnowsze meto-

dy badań uziarnienia przy pomocy skaningu laserowego (TLS 3D), gdzie jednym z założeń jest „odtworzenie” kształtu klastu i jego pomiar na podstawie częściowo widocznych powierzchni ziarna. W analizie sitowej najczęściej popełniane błędy wynikają z zaniżonej masy próbki wziętej do analizy, niedokładnego przygotowania materiału (zbyt dużo agregatów) lub zbyt krótkiego czasu przesiewania (np. krócej niż 20 min.). Wyniki z analizy sitowej wydają się jednak najrzetelniej oddawać skład granulometryczny osadu, a obliczone na jej podstawie parametry uziarnienia mogą być wykorzystane do interpretacji morfodynamiki danego środowiska (Ibbeken i Schleyer, 1986).

## WNIOSKI

Celem pracy było porównanie wyników analiz uziarnienia gruboziarnistych osadów korytowych. Do porównania wybrano metodę pomiaru bezpośredniego (Wolmana), sitową i cyfrową (planimetryczną, przy pomocy programu Sediments Digital Gravelometer).

Porównanie wykazało rozbieżność w wynikach uzyskanych z różnych analiz. Wyniki z analizy bezpośredniej podają zaniżoną zawartość frakcji piaszczystych, ponieważ podczas analizy nie są zwykle brane pod uwagę frakcje drobniejsze niż 2 mm. Duży wpływ na wynik analizy ma również liczba mierzonych otoczków (Bunte i Abt 2003). Analiza cyfrowa (planimetryczna) uwzględnia frakcje piaszczyste, jednak duży wpływ na jej wynik ma tu rozdzielczość zdjęcia i oświetlenie (Graham i in. 2005). Najbardziej wiarygodne wyniki zdaje się dostarczać analiza sitowa, chociaż i tu można mieć zastrzeżenia dotyczące ilości przeanalizowanego materiału i ich reprezentatywności dla całej badanej powierzchni formy lub warstwy. Najbardziej zbliżone do wyników analizy sitowej wydają się być wyniki z analiz cyfrowych. Przed podjęciem decyzji o zastosowaniu danej metody należy dokładnie określić cel badania uziarnienia. Zastosowanie metody pomiaru bezpośredniego lub planimetrycznej do oceny warunków transportu może być obciążone pewnym błędem. Wspomniane metody są jednak znacznie łatwiejsze do przeprowadzenia i mniej pracochłonne niż analiza sitowa osadów gruboklastycznych. Dlatego też, z uwagi na ograniczenia tych metod, zaleca się, aby do tych analiz stosować dużą liczebność mierzonych obiektów (Syvitski 1991, Mycielska-Dowgiałło 2007, Flemming 2007).

## Literatura

- Aberle J., Smart G.M., 2003, The influence of roughness structure on flow resistance in mountain streams, *J. Hydraul. Res.*, 41(3), 259-269.
- Aberle J., Nikora V., 2006, Statistical properties of armored gravel-bed surfaces, *Water Resour. Res.*, 42, W11414, doi:10.1029/2005WR004674.
- Bartholdy J., Christiansen Ch., Pedersen J.B.T., 2007, Comparing spatial grain-size trends inferred from textural parameters using percentile statistical parameters and those based on the log-hyperbolic method, *Sedimentary Geology*, 202, 436-452.
- Beuselink L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L., 1998, Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sievipette method, *Catena*, 32, 193-208.
- Bożek J., 2015, Zróżnicowanie uziarnienia odsypu rzeki górskiej, Praca magisterska, WGiSR UW.
- Bunte K., Abt S.R., 2001, Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring, United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-74.
- Butler J. B., Lane S. N., Chandler J. H., 2001, Automated Extraction of Grain-size Data from Gravel Surfaces Using Digital Image Processing, *Journal of Hydraulic Research*, 39(4), 519-529.
- Church, M. A., McLean D. G., Wolcott J.F., 1987, River Bed Gravels: Sampling and Analysis, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, [w:] Thorne, C. R., Bathurst, J. C., Hey, R. D. (red.), John Wiley and Sons, Chichester, 43-88. Ferguson i Paola 1997.
- Diplas P., Sutherland A.J., 1988, Sampling techniques for gravel sized sediments. *Journal of Hydraulics Division, ASCE* 114, 484-499.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957, Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Fraccarollo, L., Marion, A., 1995, Statistical approach to bed material sampling, *Journal of Hydraulic Engineering* 121, 540-545.
- Flemming B.W., 2007, The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: Implications for sediment trend analysis, *Sedimentary Geology*, 202, 425-435.
- Ghalib A., Hryciw R., 1999, Soil Particle Size Distribution by Mosaic Imaging and Watershed Analysis, *J. Comput. Civ. Eng.*, 13:2(80), 80-87. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(1999).
- Goring D., Nikora V., McEwan I.K., 1999, Analysis of the texture of gravel beds using 2D structure functions. In *River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics*, [red:] Seminara G., Blondeaux P., Springer: New York; vol. 2, 111-120.
- Graham D. J., Rice S.P., Reid I., 2005, A Transferable Method for the Automated Grain Sizing of River Gravels, *Water Resources Research*, 41, W07020, doi:10.1029/2004WR003868.
- Green J.C., 2003, The Precision of Sampling Grain-Size Percentiles Using the Wolman Method, *Earth Surface Processes and Landforms* 28:979-991, doi: 10.1002/esp.513.
- Heritage G.L., Milan D.J., 2009, Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river, *Geomorphology*, 113, 4-11.
- Ibbeken H., Schleyer R., 1986, Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces, *Earth Surf. Process. Landforms*, 11: 59-77. doi:10.1002/esp.3290110108.



- Kellerhals R., Bray D.I., 1971, Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments, *Journal of the Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 97(HY8), 1165-1180.
- Klingemann P.C., Emmett W.W., 1982, Gravel bedload transport process. [w:] Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. (red.), *Gravel-Bed Rivers*. Wiley, Chichester, 141-169.
- Kondolf M., Lisle T. E., Wolman G.M., 2005, Bed Sediment Measurement [w:] Tools in Fluvial Geomorphology, red.: G. Mathias Kondolf, Hervé Piégay, Wiley, 347-396, DOI: 10.1002/0470868333.ch13.
- Kornet M., Vandenberghe J., 1997, Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction, *Sedimentology*, 44, 523-535.
- Latulippe Ch., Michel F., Lapointe M.F., Talbot T., 2001, Visual characterization technique for gravel-cobble River bed surface sediments; validation and Environmental applications contribution to the Programme of cirsa (centre interuniversitaire de Recherche sur le saumon atlantique), *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 307-318 (2001).
- Leopold L.B., 1970, An Improved Method for Size Distribution of Stream Bed Gravel, *Water Resour. Res.*, 6(5), 1357-1366, doi:10.1029/WR006i005p01357.
- Loizeau J.-L., Arbouille D., Santiago S., Vernet J. P., 1994, Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments, *Sedimentology*, 41, 353-361.
- McEwan I. K., Sheen T.M., Cnningham G.J., Allen A.R., 2000, Estimating the size composition of sediment surfaces through image analysis. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering: Water and Maritime*.
- Milan D.J., Heritage G.L., Large A.R.G., Brunson C.F., 1999, Influence of particle shape and sorting upon sample size estimates for a coarse-grained upland stream, *Sedimentary Geology*, 128, 85-100.
- Mosley M.P., Tindale D. S., 1985, Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 10, 465-482. doi:10.1002/esp.3290100506.
- Mycielska-Dowgiało E., 2007, Metody badań cech teksturalnych osadów klastycznych i wartość interpretacyjna wyników, [w:] E. Mycielska-Dowgiało, J. Rutkowski (red.), *Badania cech teksturalnych osadów czwartorzędowych i wybrane metody oznaczania ich wieku*. Wydawnictwo Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin, Warszawa, 95-180.
- Mycielska-Dowgiało E., Rutkowski J., (red), 2007, *Badania cech teksturalnych osadów czwartorzędowych i wybrane metody oznaczania ich wieku*, Wyd. SWPR, Warszawa.
- Myślińska E., 1998, *Laboratoryjne badania gruntów*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Nikora V.I., Goring D.G., Biggs B.J.F., 1998, On gravel bed roughness characterization, *Water Resources Research* 34, 517-527.
- Nikora V.I., Walsh, J., 2004, Water-worked gravel surfaces: high-order structure functions at the particle scale, *Water Resources Research*, 40, W12601.
- Płaskonka D., 2010, Różnice w wynikach analiz uziarnienia przeprowadzonych różnymi metodami, *Landform Analysis*, Vol. 12: 79-85 (2010).
- Reid I., Rice S., Garcia C., 2001, Discussion of "The measurement of gravel-bed river morphology", in *Gravel-Bed Rivers V*, edited by M. P. Mosley, 325-327, N. Z. Hydrol. Soc., Wellington.
- Rice S., Church M., 1998, Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links, *Earth Surf. Process. Land.*, 23, 345-363.
- Rubin D. M., 2004, A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, *Journal of Sedimentary Research*, 74(1), 160-165.

- Rutkowski J., 1995, Badania uziarnienia osadów bardzo gruboziarnistych. [w:] E. Mycielska-Dowgiałło, J. Rutkowski (red.), *Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników*. Wyd. Geogr. i Studiów Region. UW, 106-114.
- Rutkowski J., 2007, Petrografia żwirów – możliwości badawcze i podstawy interpretacji wyników. [w:] E. Mycielska-Dowgiałło, J. Rutkowski (red.), *Badania cech teksturalnych osadów czwartorzędowych i wybrane metody oznaczania ich wieku*. Wydawnictwo Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin, Warszawa: 45-74.
- Ryżak M., Walczak R.T., Niewczas J., 2004, Porównanie rozkładu granulometrycznego cząstek glebowych metodą dyfrakcji laserowej i metodą sedymentacyjną, *Acta Agrophysica*, 4, 2, 509-518.
- Sime L.C., Ferguson R.I., 2003, Information on grain sizes in gravel-bed rivers by automated image analysis, *J. Sediment. Res.*, 73 (4), 630-636.
- Sindowski K.H., 1958, Die synoptische Methode des Kornkurven-Vergleiches zur Ausdeutung fossiler Sedimentationsräume, *Geol. Jb.*, 73.
- Stawowczyk A., 2001, Struktura koryta Górnej Wisłoki, Praca magisterska UJ.
- Stephenson R. A., 1970, On The Use Of Grain Size Analysis In Geomorphological Studies. *The Professional Geographer*, 22, 200–203. doi:10.1111/j.0033-0124.1970.00200.x
- Syvitski J. P. M., 1991, Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis, Cambridge University Press, pp. 368.
- Racinowski R., Szczepk T., Wach J., 2001, Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych, Skrypt Uniw. Śląskiego, Katowice.
- Underwood E. E., 1970, Quantitative Stereology, Addison Wesley, 274 p.
- van Rijn, L.C., 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, 386 pp.
- Visher G.S., 1969, Grain size distributions and depositional processes, *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 1074-1106.
- Wolman M.G., 1954, "A Method of Sampling Coarse River-Bed Material," American Geophysical Union, Transactions, 35, 951-956.

### Summary

Particle size analysis are one of the most common methods to describe the sediment size distribution. Many methods are available for quick examination of particle size, but for coarse grain deposits there are some restrictions on their use. This article compares the results obtained from three most popular analyses of these deposits: direct measurement of axis „b” (Wolman method), sieve and digital – planimetric analysis. The results show significant discrepancy of the data obtained. The Wolman method do not take into account particles smaller than 2 mm and the accuracy of analysis is strongly dependant on sample size. Digital analysis (planimetric) took into account sandy fractions but analysis quality depends on the resolution and lighting. For the inference of the depositional environment dynamics, reliable data provides sieve analysis.