

## WPŁYW METODY BADAŃ UZIARNIENIA OSADÓW POFLOTACYJNYCH NA OCENĘ ICH PRZYDATNOŚCI W BUDOWNICTWIE ZIEMNYM

Magdalena Walczak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, e-mail: mwalczak@up.poznan.pl

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono porównanie wyników laboratoryjnych badań rozkładu uziarnienia osadów poflotacyjnych, pochodzących z procesu wzbogacania rudy miedzi. Zaprezentowano również wyniki analizy statystycznej parametrów uziarnienia, na podstawie której wykazano statystycznie istotne różnice w ocenie uziarnienia osadów zbadanych różnymi metodami. Badania przeprowadzono standardowymi metodami sitowymi – przesiewania i przemywania urobku pozyskanego z tej samej próby. Dobór właściwej metodyki i procedury badawczej determinowany jest zawsze analizą wstępną makroskopowego rozpoznania ośrodka gruntowego. Prawidłowo określony rozkład uziarnienia gruntu ma bowiem zasadniczy wpływ na jego klasyfikację i dalej na ocenę przydatności w budownictwie ziemnym. Problem ten nabiera większego znaczenia w przypadku gruntów antropogenicznych, które mogą być wykorzystywane do konstrukcji zapór lub uszczelniania konstrukcji hydrotechnicznych. W ujęciu praktycznym, znajomość ograniczeń wynikających z zastosowania danej metody, uniezależnia od błędnego wnioskowania o wynikach badań. Doskonale zagadnienie to zilustrować można na przykładzie doboru metody służącej ocenie parametrów oraz rozkładów uziarnienia gruntów.

**Słowa kluczowe:** osady poflotacyjne, analiza granulometryczna, metody sitowe.

## THE EFFECT OF GRAIN SIZE ANALYSIS FOR POSTFLOTATION SEDIMENTS ON ASSESSMENT OF THEIR APPLICABILITY IN EARTH STRUCTURE CONSTRUCTION

### ABSTRACT

This paper presents the comparison of the results of laboratory tests of postflotation sediments grain size distributions, originating from the copper ore flotation process. The paper also presents the results of statistical analysis conducted on grain size parameters. Statistically significant differences were shown in the assessment of grain size distribution, which result from the selection of the research procedure. A comparison of results recorded for wet and dry sieving methods was conducted within a group of the same samples of postflotation deposits. The selection of an appropriate research method and procedure should also be preceded by a thorough analysis and preliminary determination of the soil medium. A correctly determined grain size distribution is essential for its further classification and then, through grain size criteria, for the assessment of suitability of the analysed material in earth structure construction. This problem is of even greater importance in the case of anthropogenic soils, which are used to construct dams or seal hydroengineering structures. In practical terms knowledge on the limitations resulting from the application of a given method prevents erroneous conclusions on research results. This problem may be perfectly illustrated based on the selection of a method assessing parameters and soil grain size distributions.

**Keywords:** postflotation sediments, grain size analysis, sieving methods.

### WSTĘP

Gospodarka odpadami przemysłu górniczego, zgodna z obowiązującymi regulacjami prawnymi, stanowi priorytet dla właściwej eksploatacji obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych. Na szczególną uwagę zasługuje

kwestia możliwości ponownego wykorzystania składowanych, w zasadzie obojętnych dla środowiska odpadów. Właśnie w tego rodzaju grupie odpadów często mieszczą się odpady poflotacyjne, które wyróżnia kryterium ilościowe oraz różnorodność uziarnienia. Takie cechy uzależnione są od miejsca i technologii wytwarzania odpadów

[Tschuschke et al. 2015, b]. Wykorzystanie odpadów poflotacyjnych, jako materiału przydatnego w budownictwie ziemnym, wymaga określenia jego właściwości fizyczno-mechanicznych. Możliwości powtórnego wykorzystania uzależnione są także od rodzaju i wymagań konstrukcji, do budowy której materiał może być użyty. Punktem wyjścia do doboru metodyki badawczej jest także formalny podział gruntów. Podział ten wyróżnia grunty mineralne i antropogeniczne. Poddane analizie osady poflotacyjne, wpisujące się w grunty antropogeniczne, cechują się uziarnieniem od ilów do piasków drobnych, w zależności od miejsca ich deponowania. Znaczna część osadów wpisuje się w grupę tzw. gruntów przejściowych, wykazujących z jednej strony cechy spoistości, z drugiej strony nie kwalifikujących się do próby waleczkowania [Tschuschke 2006, 2013].

Podstawą do wyznaczenia parametrów geotechnicznych gruntów jest określenie ich rodzaju poprzez identyfikację uziarnienia. Analizy sedymentacyjne oraz sitowe są powszechnie stosowanymi metodami oznaczania składu granulometrycznego, zarówno gruntów naturalnych, jak i antropogenicznych [Płoskonka 2010]. Spośród laboratoryjnych metod badania uziarnienia wyróżnić należy grupy analiz sitowych oraz sedymentacyjnych. Optymalna metoda badania dobierana jest po wstępnym, makroskopowym rozpoznaniu cech ośrodka gruntowego. Do badania gruntów niespoistych, w tym również zapylnych, najczęściej stosowane są standardowe metody sitowe. Badania za pomocą metod sitowych mogą polegać zarówno na przesiewaniu – analiza sitowa na sucho, jak i na przemywaniu – analiza sitowa na mokro (PN-R-04032). Obydwie techniki, polegające na rozfrakcjonowaniu naważek



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań  
Fig. 1. Study site location

wysuszonego do stanu powietrznie suchego, wstępnie rozdrobnionego mechanicznie ośrodka, służą określeniu rozkładu cząstek i ziaren gruntu. Niemniej jednak metody te wykazują istotne różnice, zwłaszcza w zakresie najdrobniejszej frakcji, co prowadzi niejednokrotnie do różnej oceny rodzaju gruntu.

Celem pracy było wskazanie różnic w wynikach analizy uziarnienia tych samych prób osadów, wykonanych za pomocą dwóch metod sitowych, na sucho i na mokro, oraz wykazanie statystycznie istotnych różnic pomiędzy wynikami otrzymanymi z obydwu badań.

## MATERIAŁ I METODY

Poddany analizie ośrodek gruntowy, będący urobkiem poflotacyjnym, należy do grupy gruntów antropogenicznych. Klasyfikowany jest jako przemieszczony i nienaturalny. Według zaleceń Polskiej Normy PN-EN ISO 14688-2 klasyfikowany powinien być zgodnie z wymaganiami krajowymi (PN-EN ISO 14688-2). Urobek ten uzyskany został z rudy miedzionośnej łupków, dolomitów i pokładów piaskowca, co determinuje morfologię, w tym ostrokrawędzistość ziaren i cząstek osadów [Tschuschke et al. 2015b]. Takie cechy odpadów, związane z ich wyjściową morfologią, warunkują właściwości mechaniczne materiału. Osady charakteryzują się anizotropią, wysoką zawartością frakcji najdrobniejszych ( $< 0,063$  mm), często wysoką wapnistością  $10\% < \text{CaCO}_3 < 50\%$ , średnią wilgotnością naturalną ( $w_n \approx 20\%$ ), barwą szarą oraz zawartością metali ciężkich. Analizowany materiał pozyskano z obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych, który zlokalizowany jest w południowo-zachodniej części Polski (rys. 1).

Tego rodzaju odpady mogą być składowane jako osad poflotacyjny lub też efektywnie wykorzystywane w budownictwie hydrotechnicznym, ziemnym, rekultywacji, robotach inżynierskich, do budowy nasypów, obwałowań, torowisk, uszczelniania [Góralczyk 2011]. Najczęściej jednak odpady górnicze gromadzone są na składowiskach lub obiektach unieszkodliwiania odpadów wydobywczych i wtórnie wykorzystywane do rozbudowy oraz uszczelniania budowli hydrotechnicznych. Analizowane osady są grawitacyjnie namywane na plażę składowiska, w wyniku czego dochodzi do naturalnego procesu segregacji sedymentacyjnej. Podczas tego procesu grub-

sze frakcje odkładają się w sąsiedztwie miejsca zrzutu odpadów (plaża), natomiast frakcje drobniejsze spływają wraz z wodą po powierzchni plaży w kierunku centrum zbiornika (staw nadosadowy) [Tschuschke et al. 2015a]. Pozwala to na utrzymanie plaż w prawidłowym nachyleniu oraz gwarantuje utrzymanie linii akwenu wód nadosadowych w odległości co najmniej 200 m od koryony zapory. Schematyczny przekrój składowiska przedstawiono na rysunku 2. Osady o najgrubszym uziarnieniu, zakumulowane w obrębie plaż składowiska, wykorzystywane są do nadbudowy korpusu statycznego zapory. W ujęciu stosowanej instrukcji kontroli jakości formowania obwałowań, osady użyte do nadbudowy muszą spełniać m.in. następujące kryteria:

- kryterium zagęszczenia  $I_D > 0,70$ ,
- kryterium uziarnienia  $d_{10} > 0,05$  mm.

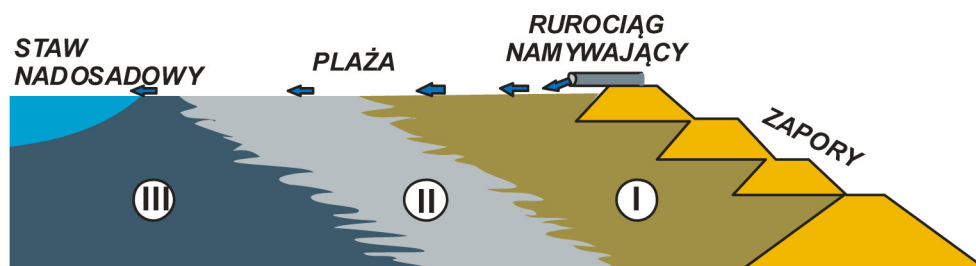
Wytypowanymi gruntami, poddanymi badaniom laboratoryjnym, były osady poflotacyjne pobrane w postaci rdzeni o nienaruszonej strukturze, za pomocą próbnika typu MOSTAP (rys. 3). Rdzenie osadów o długości 1 m i śred-

nicy 65 mm pobierano z profilu z częstotliwością co drugi metr przyrostu głębokości. Materiał osadów, przeznaczony do badań, pobierany był do nylonowej pończochy, umieszczonej wewnątrz rury obsadowej PCV.

Bezpośrednio po pozyskaniu rdzenia, pobrany materiał w terenie był analizowany makroskopowo, dokumentowany fotograficznie i typowany do dalszych badań laboratoryjnych.

Osady przygotowane i przebadane zostały zgodnie z zaleceniami obowiązujących norm (PN-R-04032, PN-88-B-04481, PN-EN ISO 14688-1, PN-EN ISO 14688-2).

Próbki osadów niespoistych, wykazujących jedynie pozorną spójność, zostały wysuszone w suszarce laboratoryjnej do stałej masy w temperaturze 105–110 °C i rozdrobnione w porcelanowym moździerzu. Oznaczona została wilgotność naturalna, gęstość objętościowa i właściwa oraz zawartość węgla wapnia. Uziarnienie osadów ustalono na podstawie wyników analizy sitowej, przeprowadzonej na sucho. Z uwagi na znaczne zapylenie osadów, analizę sitową wykonano także metodą na mokro, stosując przemywanie naważki.



Rys. 2. Schematyczny przekrój składowiska: I – osady grubsze – piaski drobnoziarniste, II – strefa przejściowa – pyły piaszczyste, III – szlamy (dominujące frakcje pylaste i ilaste), [za Tschuschke et al. 2015, a]

Fig. 2. Diagrammatic cross-section of dump: I – coarse tailings – fine sand, II – intermediate zone – sandy silt, III – discharge (predominate silt and clay fraction)



Rys. 3. Rdzeń osadów pobrany próbnikiem MOSTAP

Fig. 3. Sediment core with Mostap sampler



Metoda sitowa na sucho polega na rozdzielaniu próbki gruntu na frakcje granulometryczne w odpowiednim zestawie sit laboratoryjnych. Zastosowano zestaw sit o wymiarach otworów 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,10 oraz 0,063 mm z podkładką i przykrywką, a także wstrząsarkę mechaniczną oraz suszarkę laboratoryjną. Przygotowana wcześniej próbka o masie 200 g została przeniesiona ilościowo na górne sito zestawu umieszczonego we wstrząsarce mechanicznej. Po wstrząsaniu każdej próbki przez 5 minut zważono frakcje z poszczególnych sit i obliczono procentową zawartość poszczególnych frakcji według wzoru (PN-R-04032):

$$F = \frac{M_f}{M_c} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $M_f$  – masa próbki na danym sicie [g]  
 $M_c$  – ogólna masa próbki [g]

Analizę sitową na mokro, na tych samych próbach osadów, przeprowadzono ze względu na zauważalne zlepianie się najmniejszych cząstek, wynikające ze znacznego zapylenia. W celu oddzielenia cząstek frakcji pylastej i ilastej, naważkę gruntu przemyto. Roztarty osad przemywano strumieniem bieżącej wody, używając sita o najdrobniejszych oczkach (0,063 mm). Osad przemywano do momentu, aż spływająca z sita woda była klarowna. Następnie osad został wysuszony i poddany standardowej analizie przesiewania.

## WYNIKI I DISKUSJA

Podstawowe metody sitowe, wykorzystywane do oznaczenia składu granulometrycznego, są powszechnie stosowane w laboratoriach geotechnicznych. Nierzadko prostota wykonania danego badania utożsamiana może być z jednoznaczną interpretacją wyników. Często może prowadzić to do błędnego wnioskowania. Analiza sitowa na sucho jest metodą częściej stosowaną, jednak w przypadku osadów poflotacyjnych, często zapylnych, metodą mniej precyzyjną, niż analiza na mokro.

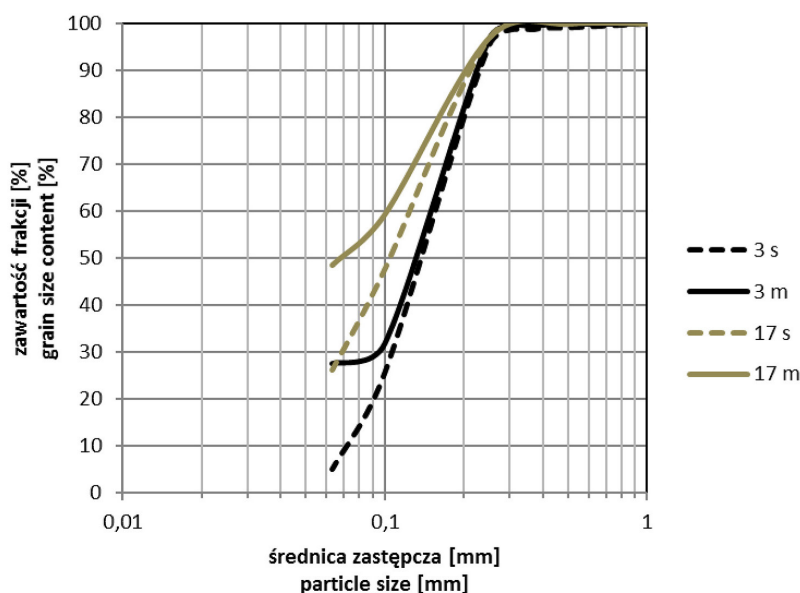
Nieprecyzyjne pomiary oznaczenia wynikają zazwyczaj z niedokładnego rozfrakcjonowania najdrobniejszych cząstek. Mogą także być skutkiem obecności wytrąconych związków soli zawartych w osadach lub innych związków chemicznych, wynikających ze stosowania procesu wzbogacania rudy.

Na podstawie wyników replikacyjnych testów uziarnienia stwierdzono, że wyniki rozkładu

uziarnienia tych samych prób osadów różnią się, w zależności od zastosowanej metody. Najczęściej stosowanym graficznym sposobem przedstawienia wyników badań uziarnienia gruntu jest krzywa kumulacyjna – krzywa uziarnienia. Na podstawie krzywych uziarnienia określono także rodzaj gruntu. Różnice w zawartościach poszczególnych frakcji przedstawiono na rysunku 4. Analiza sitowa na mokro pozwoliła uzyskać lepsze rozdzielanie, zwłaszcza w zakresie najdrobniejszej frakcji. Wyniki analizy sitowej, przeprowadzonej na mokro, wskazują większy udział najdrobniejszych cząstek w masie próbki w porównaniu z wynikami uzyskanymi na podstawie badania na sucho. Zależność pomiędzy zawartością frakcji < 0,063 mm z badania metodami na mokro i na sucho przedstawiono na rysunku 5.

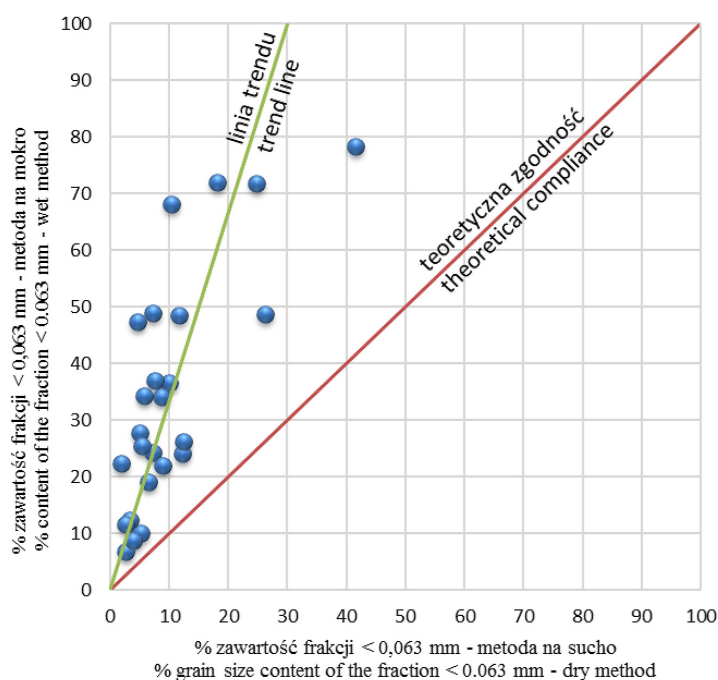
Analizę statystyczną wykonano przy użyciu pakietu statystycznego STATISTICA. W celu uogólnienia wniosków dotyczących wyników badań, tak aby charakteryzowały one cały materiał, zastosowano zasadę randomizacji. Zasada ta stosowana jest w celu doboru i decyzyjności losowej, aby badanie było niezakłócone i nie prowadziło do błędnych wnioskowań [Łomnicki 2006, Domański 1997]. Analizę przeprowadzono na próbie statystycznej o liczebności  $n = 25$ , na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wstępnie założono, że wyniki pochodzące z obydwu rodzajów analiz nie będą różniły się istotnie, wysuwając hipotezę zerową  $H_0 : \bar{D} = 0$  o braku różnic, przy hipotezie alternatywnej  $H_0 : \bar{D} \neq 0$ , gdzie  $\bar{D}$  oznacza średnią różnicę między wynikami w populacji [Stanisz 2006]. Wyniki testu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Zgodnie z założeniami testu zgodności przyjmuje się, że jeżeli  $\alpha > p$ , na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , hipotezę zerową należy odrzucić. Prowadzi to jednoznacznie do wniosku, że wyniki analizy na sucho i na mokro, pomimo przeprowadzania badań w jednakowych warunkach i z jednakową dokładnością, różnią się istotnie statystycznie [Stanisz 2006]. Odrzucenie hipotezy zerowej skutkuje przyjęciem hipotezy alternatywnej  $H_0 : \bar{D} \neq 0$ . Najwyraźniej widoczne jest to w obrębie frakcji najdrobniejszych, a zwłaszcza o średnicy mniejszej niż 0,063 mm. W przypadku analizy na sucho skutkiem wykazanych różnic jest błędna klasyfikacja gruntu. Osady poddane metodzie sitowej na sucho klasyfikowano jako piaski drobne, piaski pylaste lub pyły piaszczyste. Natomiast osady poddane metodzie sitowej na mokro klasyfikowano jako piaski pylaste, pyły



Rys. 4. Przykładowe krzywe uziarnienia: 3, 17 – numery próbek; s, m – odpowiednio metoda na sucho i na mokro

Fig. 4. Example of grain size distributions curves: 3, 17 – sample number; s, m – dry and wet sieving method



Rys. 5. Zależność pomiędzy zawartością frakcji < 0,063 mm z badania metodami na mokro i na sucho  
Fig. 5. Relationship between the content of the fraction < 0.063 mm in wet and dry sieving method

piaszczyste lub pyły. Powyższa klasyfikacja powoduje także jakościowe przesunięcie nazwy gruntu o jedną grupę. Powyższa błędna klasyfikacja prowadzi do przypisania analizowanemu materiałowi niewłaściwego rodzaju oraz nadania błędnej nazwy.

Na podstawie przeprowadzonej analizy przyjąć można, że dobór odpowiedniej metody badawczej determinuje przydatność materiału

do budowy. Według wspomnianego wcześniej kryterium uziarnienia  $d_{10} > 0,05$  mm tylko część zdeponowanych odpadów może być wykorzystywana jako materiał budowlany do konstruowania nadbudowy zapór, ponieważ zbyt drobne osady pylaste wykazują cechy materiału plastycznego. Zawartość frakcji mniejszej od 0,05 mm powinna być zatem ograniczona, aby spełniać kryterium uziarnienia.

**Tabela 1.** Zestawienie wyników: s – analiza sitowa na sucho, m – analiza sitowa na mokro, n – liczebność populacji  
**Table 1.** Results summary: s – dry sieving method, m – wet sieving method, n – population size

Zakresy frakcji [mm]	Rodzaj analizy	Średnia	Odchylenie standardowe	n	Różnica średnich	Odchylenie standardowe różnic
<0,063	s	10,15	9,05	25	-24,48	15,51
	m	34,63	21,05			
0,10–0,063	s	19,81	11,41	25	8,81	9,74
	m	10,99	4,87			
0,25–0,10	s	65,51	17,47	25	12,04	7,62
	m	53,47	22,62			
0,5–0,25	s	3,80	3,00	25	2,93	2,55
	m	0,87	1,03			
1,0–0,5	s	0,71	0,93	25	0,67	0,91
	m	0,04	0,04			
2,0–1,0	Różnice nie są istotne					
>2,0	Brak frakcji					

**Tabela 2.** Zestawienie wyników: s – analiza sitowa na sucho, m – analiza sitowa na mokro, t – wartość testu dla zmiennych, df – stopnie swobody, df = n-1, p – przyjęty poziom prawdopodobieństwa

**Table 2.** Results summary: s – dry sieving method, m – wet sieving method, t – variable test value, df – degrees of freedom, df = n-1, p – assumed probability

Zakresy frakcji [mm]	Rodzaj analizy	t	df	p	Ufność -95,0%	Ufność+95,0%
<0,063	s	-7,89	24	0,000000	-30,88	-18,08
	m					
0,10-0,063	s	4,52	24	0,000140	4,79	12,83
	m					
0,25-0,10	s	7,90	24	0,000000	8,90	15,18
	m					
0,5-0,25	s	5,74	24	0,000006	1,88	3,99
	m					
1,0-0,5	s	3,68	24	0,001183	0,29	1,05
	m					
2,0-1,0	Różnice nie są istotne					
>2,0	Brak frakcji					

Według wyników uzyskanych na podstawie analizy sitowej przeprowadzonej na sucho, zdecydowanie większa część materiału może być wykorzystana do budowy obwałowań, niż wskazywałyby na to wyniki analizy sitowej wykonanej z przemywaniem (rys. 4).

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych rozkładów uziarnienia osadów poflotacyjnych oraz wyników analizy statystycznej wykazano, że wyniki otrzymane z dwóch metod sitowych, przeprowadzonych na tych samych

próbach gruntów, różnią się statystycznie istotnie. Największe różnice zaznaczają się w obrębie najdrobniejszych frakcji. Przyjąć można, że wyniki badań przeprowadzonych na losowo wybranej próbie osadów zapylnych, powstałych w wyniku sedymentacji, są cechą populacji generalnej. Mogą odnosić się one do wszystkich osadów poflotacyjnych, zakumulowanych w obrębie plaż składowiska i zawierających podwyższoną zawartość frakcji najdrobniejszej. Zauważono również, że metoda sitowa na mokro jest metodą dokładniejszą. Wskazówką przy wyborze miarodajnej metody badań może być dopuszczalna różnica w ilości frakcji, która przenika przez najdrobniejsze sito w wyniku przemycia i przesia-

nia. Odwołując się do rysunku 5 założyć można, że krytyczną zawartością frakcji, która powoduje, że błąd oznaczenia może przekroczyć dokładność oznaczenia, wynosi już 6%. Przekroczenie wartości krytycznej skutkować może błędną oceną przydatności oraz możliwości wykorzystania osadów w budownictwie ziemnym, w tym do nadbudowy zapór. W ujęciu kryteriów kontroli jakości formowania zapór, metodą precyzyjnie określającą uziarnienie osadów jest analiza sitowa przeprowadzona z przemylaniem.

## LITERATURA

1. Domański Cz., 1979. Statystyczne testy nieparametryczne, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
2. Góralczyk S. (red.), 2011. Gospodarka surowcami odpadowymi z węgla kamiennego. Wyd. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa.
3. Łomnicki A., 2006. Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników, Wydawnictwo Naukowe PWN.
4. Płoskonka D., 2010. Różnice w wynikach analiz uziarnienia przeprowadzonych różnymi metodami. *Landform Analysis*, 12, 79–85.
5. Polska Norma 1998 – PN-R-04032 Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek gruntu i oznaczanie składu granulometrycznego. PKN, Warszawa
6. Polska Norma 1988 – PN-88-B-04481 Grunty Budowlane. Badania próbek gruntu. PKN, Warszawa.
7. Polska Norma 2006 – PN-EN ISO 14688-1 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis. PKN, Warszawa.
8. POLSKA NORMA 2006 – PN-EN ISO 14688-2 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. PKN, Warszawa.
9. Stanisław A., 2006. Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 1. Statystyki podstawowe. Stat Soft, Kraków.
10. Tschuschke W., 2006. Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo, z. 110, Gliwice.
11. Tschuschke W., 2013. Identyfikacja konsystencji gruntów mało spoistych na podstawie charakterystyk penetracji z badania statycznego sondowania. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, nr 4. Oficyna wydawnicza Politechniki Białostockiej.
12. Tschuschke W., Walczak M., Wierzbicki J., 2015a. Analiza przydatności odpadów górniczych w budownictwie ziemnym. Projektowanie, eksploatacja, diagnostyka i naprawy wybranych obiektów budownictwa ogólnego i hydrotechnicznego. Praca zbiorowa, IBiG, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 99–112.
13. Tschuschke W., Gogolik S., Kroll M., Walczak M., 2015b. Miary zagęszczenia odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbioru robót ziemnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 36(3), 200–203.