ACTA AGROPHYSICA

Magdalena Ryżak, Piotr Bartmiński, Andrzej Bieganowski

METODY WYZNACZANIA ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO GLEB MINERALNYCH

175

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
2009 (4)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny – Józef Horabik

Zastępca Redaktora Naczelnego – Grzegorz Józefaciuk

Sekretarz Redakcji – Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna

Dorota Witrowa-Rajchert – przewodniczący

Ryszard Dębicki
Bohdan Dobrzański
Danuta Drozd
Franciszek Dubert
Tadeusz Filipek
Józef Fornal
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN
Eugeniusz Kamiński
Andrzej Kędziora
Tadeusz Kęsik
Krystyna Konstankiewicz
Janusz Laskowski
Jerzy Lipiec
Piotr P. Lewicki
Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Edward Niedźwiecki
Viliam Novák, Słowacja
Josef Pecen, Czechy
Jan Sielewiesiuk
Witold Stępniewski
Bogusław Szot
Zbigniew Ślipek
Jerzy Weres

Opiniował do druku

Prof. dr hab. Edward Niedźwiecki

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (0-81) 744-50-61, www.ipan.lublin.pl

Streszczenia i pełne teksty prac dostępne są na stronie internetowej czasopisma
www.acta-agrophysica.org

Czasopismo jest umieszczone w następujących bazach:
Thomson Scientific Master Journal List
Polish Scientific Journals Contents – Life Sci.
Biblioteka Główna i Centrum Informacji Naukowej Akademii Rolniczej w Poznaniu
Instytut Bibliotekoznawstwa i Informacji Naukowej Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
Lonicera – serwis botaniczny

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2009

ISSN 1234-4125

Acta Agrophysica są do nabycia w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie. Prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie oraz w oddziałach firmy Kolporter S.A. na terenie całego kraju. Informacje pod numerem infolinii 0801-205-555 lub na stronie internetowej http://www.kolporter-spolka-akcyjna.com.pl/prenumerata.asp

Wydanie I. Nakład 200, egz. Ark. 7,1
Skład komputerowy: Irena Kulawiak, Druk: *ALF-GRAF*, ul. Abramowicka 6, 20-442 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 5
2. ROZKŁAD GRANULOMETRYCZNY JAKO JEDEN Z PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH WŁAŚCIWOŚCI GLEBY 6
3. ZAKRESY FRAKCJI GRANULOMETRYCZNYCH WEDŁUG KLASYFIKACJI 9
4. KLASYFIKACJE GLEB ZE WZGLĘDU NA ROZKŁAD GRANULOMETRYCZNY 13
5. PRZYGOTOWANIE GLEBY DO POMIARÓW ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO 23
   5.1. Usuwanie soli rozpuszczalnych 25
   5.2. Usuwanie substancji organicznej 25
   5.3. Usuwanie węglanów 27
   5.4. Usuwanie tlenków żelaza 28
   5.5. Usuwanie krzemionki 28
6. METODY DYSPERGOWANIA GLEBY W POMIARACH ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO 28
7. METODY POMIARU ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO CZĄSTEK 32
   7.1. Metoda organoleptyczna 34
   7.2. Metoda wykorzystująca przyrząd Kruedenera 39
   7.3. Metoda sitowa 40
   7.4. Metody sedymentacyjne 44
      7.4.1. Metoda Atterberga 45
      7.4.2. Metoda pipetowa 46
      7.4.3. Metoda pipetowa w modyfikacji Rząsy 48
      7.4.4. Metody areometryczne 48
      7.4.5. Metoda fotosedymentacyjna 51
      7.4.6. Metoda wykorzystująca promienie gamma 52
      7.4.7. Metoda wykorzystująca promienie Roentgena 53
      7.4.8. Waga sedymentacyjna 54
      7.4.9. Metody odwirowywania 54
   7.5. Metody sitowo- sedymentacyjne 56
      a) Metoda sitowo-areometryczna – PN-R-04032: 1998 56
      b) Metoda sitowo-pipetowa – PN ISO 11277: 2005 56

7.6. Metody przepływowe 57
7.7. Metoda licznika Coultera (Electrical Sensing Zone-ESZ) 58
7.8. Metody wykorzystujące zjawisko dyfrakcji laserowej 60
7.9. Metoda spektroskopii z korelacją fotonową (Photon Correlation Spectroscopy-PCS) 65
8. SPOSOBY PREZENTOWANIA DANYCH O ROZKŁADZIE GRANULOMETRYCZNYM GLEB 67
8.1. Liczbowe przedstawienie wyników 67
8.2. Graficzne przedstawienie wyników 68
8.3. Parametryczny opis wyników rozkładu 69
8.4. Parametry konieczne do pełnego opisu wyników 70
8.5. Rozkład masowy i rozkład objętościowy 71
9. PIŚMIENNICTWO 72
10. STRESZCZENIE 77
11. SUMMARY 78
12. ZAŁĄCZNIK 79

1. WSTĘP

Rozkład granulometryczny gleb jest jednym z najważniejszych parametrów opisujących gleby. Wyznaczanie rozkładu ważne jest zarówno z naukowego (jest niezbędny do interpretacji wielu wyników uzyskiwanych podczas badań prowadzonych w glebach) jak i praktycznego punktu widzenia (jest na przykład brany pod uwagę przy określaniu zaleceń nawozowych). Dlatego też nie może dziwić, że na przestrzeni lat opracowano wiele metod wyznaczania rozkładu granulometrycznego.

Niektóre z opracowanych metod odegrały ważną rolę w historii gleboznawstwa, ale z różnych przyczyn zostały już zarzucone. Inne przyjęły się i są wykorzystywane w codziennej praktyce. Jeszcze inne, czasem całkiem ciekawe i wiarygodne, nie znalazły szerszej akceptacji i były/są realizowane poprzez pojedyncze osoby lub ośrodki naukowe. Dorobek publikacji naukowych dotyczących metodycznych aspektów wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb jest całkiem pokaźny.

Mnogość metod już zaproponowanych nie zmienia faktu, że w chwili obecnej ciągle są opracowywane nowe, z założenia szybsze, tańsze i jednocześnie wiarygodne metody instrumentalne. W środowisku metrologów glebowych ciągle trwa dyskusja o zaletach, wadach, ograniczeniach i potencjalnych możliwościach poszczególnych metod. I zapewne, w miarę rozwoju techniki i możliwości obliczeniowych, będą pojawiały się ciągle nowe propozycje wyznaczania tego parametru.

Jeśli więc, jak już wspomniano, istnieje wiele publikacji z zakresu metod wyznaczania rozkładu granulometrycznego to może rodzić się pytanie: czy warto podejmować trud opracowania monografii na ten temat. Według nas jak najbardziej. Argumenty, które nas do tego przekonały to:

- prawdą jest, że istnieje na ten temat wiele publikacji. Ale w praktyce są one rozproszone. Były co prawda podejmowane już próby całościowego zebrania zagadnień metodycznych (szczególnie w podręcznikach i skryptach) ale dynamiczny rozwój nowoczesnych metod spowodował, że publikacje te w dużej mierze zdezaktualizowały się;
- przeglądając literaturę można się trochę pogubić ze względu na wielość podziałów poszczególnych frakcji gleb oraz klasyfikacji gleb w oparciu o zawartość tych frakcji. Temperatura dyskusji na ten temat, pomimo upływu lat, wcale nie opada. Warto więc opisać stan jaki obowiązuje w chwili obecnej;
- wyznaczanie rozkładu granulometrycznego stało się powszechną analizą, niezbędną do realizacji innych badań gleboznawczych. W praktycznie każdej publikacji z tego zakresu można znaleźć albo informację o zakwalifikowaniu gleby do określonego gatunku lub określenie zawartości poszczególnych

frakcji. Problem w tym, że autorzy tych prac często „prześlizgują się" nad tym zagadnieniem. Informacja, że rozkład granulometryczny wyznaczany był metodą pipetową lub areometryczną to za mało ponieważ praktyka wskazuje, że większość laboratoriów opracowało własne modyfikacje tych metod i w praktyce wyniki uzyskane przy wykorzystaniu tych modyfikacji mogą znacząco różnić się od metod opisanych w normach międzynarodowych. Ponadto mało kto zamieszcza informacje (ważnych z punktu widzenia interpretacji prezentowanych wyników) o sposobie przygotowaniu próbki oraz o zadanych/realizowanych parametrach pomiaru. Stąd też w niniejszej monografii pojawił się rozdział 8.4, który zawiera zestaw informacji jakie powinny być publikowane w metodycznej części prac.

2. ROZKŁAD GRANULOMETRYCZNY JAKO JEDEN Z PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH WŁAŚCIWOŚCI GLEBY

Gleba, zwana również pedosferą, jest naturalnym tworem wierzchniej warstwy skorupy ziemskiej powstałym ze zwietrzeliny skalnej w wyniku oddziaływania na nią zmieniających się w czasie różnych czynników (takich jak klimat, biosfera, hydrosfera, działalność człowieka, czas) w określonych warunkach rzeźby terenu. Jest ona ożywionym i dynamicznym tworem przyrody, której elementy składowe znajdują się w fazie stałej, ciekłej i gazowej (Zawadzki 1999).

Fazę stałą gleby stanowią cząstki mineralne, organiczne i organiczno-mineralne, w różnym stopniu rozdrobnienia. Stopień ten wpływa w istotny sposób na wiele właściwości gleby. Procentowy udział w glebie grup cząstek o określonych wielkościach nazywa się składem mechanicznym gleby (Turski i in. 1977), uziarnieniem, granulacją, składem granulometrycznym gleby (Mocek i in. 2000, Zawadzki 1999) lub rozkładem granulometrycznym gleby (Ryżak i in. 2004), czasem również teksturą.

W rzeczywistości zarówno skład, jak i rozkład granulometryczny opisują tę samą wielkość. Używając pojęcia *skład* podkreśla się fizyczne podejście do problemu, ponieważ gleba jest złożona z cząstek o różnej wielkości. Używając pojęcia *rozkład* zakłada się matematyczny opis składu granulometrycznego poprzez określenie prawdopodobieństwa znalezienia cząstki należącej do wybranego przedziału wielkości cząstek w zbiorze wszystkich cząstek (dystrybuanta). W dalszej części pracy używane będzie pojęcie rozkładu granulometrycznego.

Zbiory cząstek o podobnej wielkości, mieszczące się w określonym przedziale wartości granicznych określa się mianem frakcji granulometrycznych. Wyróżnia się dwie grupy frakcji: części szkieletowe (składające się z dwóch frakcji: kamieni i żwiru) i części ziemiste. Części ziemiste dzielą się na trzy zasadnicze frakcje: piasek, pył i ił (frakcja ilasta określana jest czasem jako części

spławialne), jednakże każda z tych frakcji może być dalej dzielona na frakcje drobniejsze (Zawadzki 1999). Liczby graniczne określające zakresy poszczególnych frakcji są różne dla różnych klasyfikacji. Najczęściej stosowanymi w Polsce podziałami na frakcje są podziały wg klasyfikacji PTG (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 1959, Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 1989) oraz według normy branżowej (BN-178/9180) lub PTG 2008 (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2008) zgodnej z systemem United States Department of Agriculture (USDA) (Soil Survey Staff, 1999; Soil Survey Staff, 2006) pod względem części ziemistych. Zestawienie liczb granicznych dla poszczególnych frakcji oraz nazwy frakcji według najczęściej stosowanych klasyfikacji przedstawiono w rozdziale 3.

Cząstki gleby należące do poszczególnych frakcji granulometrycznych różnią się między sobą nie tylko wielkością, ale często również składem mineralogicznym i chemicznym oraz właściwościami fizycznymi i fizyko-chemicznymi (Sokołowska i in. 2002, Turski i in. 1977, Uziak i in. 2005). Części szkieletowe gleby, czyli frakcje kamieni i żwiru, składają się głównie z odłamków skał macierzystych oraz okruchów minerałów. W niewielkich ilościach mogą wpływać rozluźniająco na gleby ciężkie, zaś w większych ilościach utrudniają lub uniemożliwiają uprawę. Frakcja piasku składa się głównie z okruchów kwarcu oraz otoczonych ziaren pierwotnych minerałów skałotwórczych. Obecność tej frakcji w glebie zwiększa jej przepuszczalność i przewiewność, zaś zmniejsza retencję wodną i wysokość podsiąku kapilarnego. Gleby o dużej zawartości tej frakcji są słabe, skłonne do przesychania oraz charakteryzują się niską żyznością. Frakcja pyłu składa się głównie z ziarenek kwarcu i bezpostaciowej krzemionki. Frakcja ta w utworach piaszczystych zwiększa pojemność wodną i wysokość podsiąku kapilarnego, w utworach gliniastych zmniejsza pęcznienie i plastyczność gleb, zaś w glebach pyłowych zwiększa podatność gleby na erozję wodną. Frakcja ilasta to głównie produkty wietrzenia pierwotnych minerałów z grupy kaolinitu, illitu i montmorylonitu, ale również koloidy próchnicy i połączenia organiczno-mineralne. Ił ma dużą zdolność sorpcji, głównie wymiennej i dużą molekularną pojemność wodną. Bierze udział przy tworzeniu trwałych agregatów glebowych, decyduje o lepkości, zwięzłości i plastyczności. Zbyt duży udział tej frakcji może powodować niekorzystne właściwości wodne gleby, nadmierną zwięzłość utrudniając wymianę gazową (Turski i in. 1977, Zawadzki 1999).

Utwory glebowe można ogólnie podzielić ze względu na skład granulometryczny na:

- równoziarniste (gdy wykazują zdecydowaną przewagę jednej frakcji, np.: piaski, utwory pyłowe, iły);

- różnoziarniste (gdy udział poszczególnych frakcji jest względnie wyrównany, utwory takie nazywa się glinami).

Podział gleb uwzględniający rozkład granulometryczny nazywa się podziałem gatunkowym. Przy podziale tym uwzględnia się nie tylko zawartość procentową dominującej frakcji, ale również zawartość pozostałych frakcji.

Właściwości cząstek stanowiących poszczególne frakcje decydują o wielu charakterystykach gleby. Wielkość cząstek oraz ich upakowanie wpływa na rozkład porów w glebie (Dechnik i Lipiec 1980, Konstankiewicz 1985), a tym samym decyduje o możliwościach wymiany gazowej (Stępniewski i Gliński 1983) oraz retencjonowania wody opadowej (Walczak 1984). Skład mineralogiczny cząstek (odmienny dla różnych frakcji) determinuje przede wszystkim:

- właściwości cieplne, czyli szybkość nagrzewania się i wychładzania gleby w okresie wiosenno-jesiennym (co ma związek z wilgotnością gleby oraz ciepłem właściwym substancji, które znajdują się w glebie) (Kossowski i Sikora 1978);
- właściwości sorpcyjne – zdolność do sorpcji mechanicznej i fizycznej w przypadku frakcji grubszych oraz sorpcji wymiennej – w przypadku najdrobniejszej frakcji (Mocek i in. 2000, Turski i in. 1977);
- zasobność gleby w składniki mineralne (Turski i in. 1977).

Proporcje pomiędzy poszczególnymi frakcjami w glebie decydują również o jej agregacji oraz wodoodporności agregatów glebowych (Walczak i Witkowska 1976, Witkowska-Walczak 2000), jak również o podatności gleby na erozję (Dębicki i Rejman 1990).

Na podstawie analizy między innymi rozkładu granulometrycznego gleby dokonuje się podziału gleb na klasy bonitacyjne oraz wyznacza się kompleksy przydatności rolniczej gleb ornych, które decydują o wartości użytkowej (Mocek i in. 2000). Również na podstawie analizy rozkładu granulometrycznego wyznacza się tzw. kategorie ciężkości gleb, które są m. in. podstawą do wydawania zaleceń nawozowych przez Stacje Chemiczno-Rolnicze.

Biorąc pod uwagę, że wiele właściwości gleby jest ściśle związanych z rozkładem granulometrycznym oczywiste staje się to, że jest on uważany za jedną z najbardziej podstawowych fizycznych charakterystyk gleby. Dodać należy również, że rozkład granulometryczny jest niezmienny – nie ulega zmianie pod wpływem zachodzących procesów glebowych (Mocek i in. 2000) i stosunkowo łatwo mierzalny, dzięki czemu służy jako parametr do wielu modeli, np.: szacowania krzywej retencji wodnej (Walczak 1984) czy przewodnictwa wodnego (Dechnik i Lipiec 1980, Lipiec 1983, Sławiński 2003).

3. ZAKRESY FRAKCJI GRANULOMETRYCZNYCH WEDŁUG RÓŻNYCH KLASYFIKACJI

Problem wydzielenia frakcji w klasyfikacji gleb pod względem granulometrycznym od wielu lat budzi gorące dyskusje i to nie tylko w Polsce. Efektem tych dyskusji są różne klasyfikacje. W Polsce obowiązywał do niedawna podział przyjęty przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (tab. 1), przedstawiony już w pierwszej powojennej Systematyce Gleb Polski (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 1959). Przez długi czas pozostawał on niezmienny i był powszechnie stosowany w badaniach naukowych, pomimo zastrzeżeń zgłaszanych przez badaczy zajmujących się problematyką uziarnienia gleby (Borowiec i in. 1967, Drzymała 2000, Drzymała i Mocek 2004). Zakresy wielkości cząstek dla poszczególnych frakcji nie odpowiadały zakresom najpopularniejszego w świecie podziału USDA, co prowadziło to do pewnych trudności w kontaktach międzynarodowych. Podejmowane były rozmaite próby wypracowania nowych podziałów (PN-R-04033 1998), ale znalazły one akceptację jedynie części środowiska gleboznawczego (Biały i in. 2000). Poszukując sposobów wyjścia z impasu w 2008 roku Polskie Towarzystwo Gleboznawcze przyjęło nowy podział, który w zakresie frakcji dla części ziemistych (< 2 mm) pokrywa się praktycznie z podziałem USDA (tab. 2 i 3).

Również na forum międzynarodowym problem określenia granic poszczególnych frakcji granulometrycznych budził wiele kontrowersji.

Podejmowane w celu ujednolicenia klasyfikacji typologicznej gleb świata próby zaowocowały, po wielu pracach wstępnych, wydaniem w roku 1988 Legendy do Mapy Gleb Świata, określanej powszechnie jako klasyfikacja gleb według FAO (Food and Agriculture Organization) (FAO 1988). Opracowanie to również podnosi problem uziarnienia gleby, niemniej jednak zarówno pierwsze wydania, jak też późniejsze aktualizacje cechuje duża niespójność w tym zakresie. Systematyka w części zaleceń metodycznych odnosi się do opracowań amerykańskich, w oczywisty sposób przyjmujących podział USDA. Jednocześnie opracowywane przez FAO podręczniki do opisu gleby (FAO 2006) wprowadzają odmienny podział na frakcje, inaczej definiujący granicę pomiędzy frakcją piasku i frakcją pyłu (tab. 4).

Tabela 1. Podział na frakcje granulometryczne według dawnej klasyfikacji PTG i Branżowej Normy (w chwili obecnej podziały nieaktualne)
Table 1. Division into soil particle size fractions according to the old Polish Society of Soil Science (PSSS) classification and branch standard (at this moment the division is obsolete)

	Frakcja Fraction	Podfrakcja Subfraction	Średnica – Diameter (mm)	
			Podział wg PTG[1] Division acc. to PSSS	Podział wg BN-78/9180-11 Division acc. to BN-78/9180-11
Części szkieletowe Soil skeleton particles	kamienie stones		> 20	> 20
		grube – coarse	–	> 200
		średnie – medium	–	200-100
		drobne – fine	–	100-20
	żwir gravel		20-1	20-1
		gruby – coarse	–	20-10
		średni – medium	–	–
		drobny – fine		10-1
	piasek – sand		1,00-0,10	1,00-0,10
		gruby – coarse	1,00-0,50	1,00-0,50
		średni – medium	0,50-0,25	0,50-0,25
		drobny – fine	0,25-0,10	0,25-0,10
	pył – silt		0,10-0,02	0,10-0,02
		gruby – coarse	0,10-0,05	0,10-0,05
		drobny – fine	0,05-0,02	0,05-0,02
Części ziemiste Fine earth	części spławialne fine particles		< 0,02	< 0,02
		ił pyłowy gruby coarse silty clay	0,020-0,005	0,020-0,006
		ił pyłowy drobny fine silty clay	0,005-0,002	0,006-0,002
		ił koloidalny colloidal clay	< 0,002	< 0,002

[1]Podział stosowany do 2008 r. według Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego.

Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku klasyfikacji WRB (Word Reference Base 2006), bazującej na systematyce FAO. Wprowadzając 0,063 mm jako dolną granicę frakcji piasku i nawiązując do wspomnianego powyżej podręcznika opisu gleby, rekomenduje jednocześnie stosowanie w pracach laboratoryjnych opracowania ISRIC (International Soil Reference and Information Centre) (Van Reeuwijk 2002)*, w którym autorzy zaznaczają

*Klasyfikacja WRB przywołuje dokument *Procedures for soil analysis*, wydanie 7 z 2006 roku. Z informacji uzyskanych z ISRIC wynika, że w chwili obecnej (październik 2009) dokument ten nie został jeszcze wydany. Dlatego też w tekście niniejszej publikacji odnosimy się do wydania szóstego z 2002 roku.

wyraźnie, że stosują podział zgodny z USDA, ze względów praktycznych: „(...) zważywszy na homogeniczność swojej bazy ISIS, ISRIC zdecydował odłożyć w czasie wprowadzenie granicy 0,063 mm w charakterystyce gleby". Polska wersja WRB (Bednarek i in. 2003) przywołuje wprost podział oparty na wartości 0,063 mm**.

W poniższych tabelach zestawiamy najczęściej wykorzystywane podziały frakcji granulometrycznych.

Tabela 2. Podział na frakcje granulometryczne według Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego z 2008 r.

Table 2. Division into soil particle size fractions according to the old Polish Society of Soil Science (PSSS) classification from 2008

	Frakcja Fraction	Podfrakcja Subfraction	Średnica – Diameter d (mm)
Części szkieletowe Rock fragments	blokowa – block		d > 600
	głazowa – boulder		600 ≥ d > 200
	kamienista – stone		200 ≥ d > 75
	żwirowa gravel		75 ≥ d > 2
		żwir gruby – coarse gravel	75 ≥ d > 20
		żwir średni – medium gravel	20 ≥ d > 5
		żwir drobny – fine gravel	5 ≥ d > 2
Części ziemiste Fine earth	piaskowa sand		2,0≥d > 0,05
		piasek bardzo gruby – very coarse sand	2,0 ≥ d > 1,0
		piasek gruby – coarse sand	1,0 ≥ d > 0,5
		piasek średni – medium sand	0,5 ≥ d > 0,25
		piasek drobny – fine sand	0,25 ≥ d > 0,1
		piasek bardzo drobny – very fine sand	0,1 ≥ d > 0,05
	pyłowa - silt		0,05 ≥ d > 0,002
		pył gruby – coarse silt	0,05 ≥ d > 0,02
		pył drobny – fine silt	0,02 ≥ d > 0,002
	iłowa – clay		d ≤ 0,002

**Wartość 0,063 (właściwie 0,0625 mm) wynika z zastosowania sedymentologicznej skali wielkości ziaren osadów klastycznych (phi), w której granicę pomiędzy piaskiem a pyłem określono na 4φ (phi) co odpowiada wspomnianej wartości metrycznej. Więcej na temat skali φ odnaleźć można w literaturze (Gradziński i in. 1976, Szmańda i Krzemień 2008).

Tabela 3. Podział na frakcje według USDA (Soil Survey Division Staff 1993)
Table 3. Division into soil particle size fractions according to USDA (Soil Survey Division Staff 1993)

Części szkieletowe – Rock fragments					
Kształt Shape	Frakcja – podfrakcja Fraction – subfraction	Średnica Diameter (mm)	Kształt Shape	Frakcja Fraction	Średnica Diameter (mm)
Sferyczne, sześcienne, równoboczne Spherical, cube-like, equiaxial	głazy – boulders	> 600	płaskie/flat	głazy boulders	>600
	kamienie – stones	600-250		kamienie stones	600-380
	kamienie drobne cobbles	250-76		płyty flagstones	380-150
	żwir – pebbles	76-2			
	gruby – coarse	76-2		płytki	150-2
	średni – medium	20-5			
	drobny – coarse	5-2			

części ziemiste – fine earth		
Frakcja – Fraction	Podfrakcja – Subfraction	Średnica – Diameter (mm)
Piasek – Sand		2-0,05
	bardzo gruby – very coarse	2-1,0
	gruby –coarse	1,0-0,5
	średni – medium	0,5-0,25
	drobny – fine	0,25-0,10
	bardzo drobny – very fine	0,10-0,05
Pył – Silt		0,05-0,002
	gruby – coarse	0,05-0,02
	drobny – fine	0,02-0,002
Ił – Clay		<0,002
	gruby – coarse	0,002-0,0002
	drobny – fine	<0,0002

Tabela 4. Podział na frakcje według FAO (2006)
Table 4. Division into soil particle size fractions according to FAO (2006)

	Frakcja Fraction	Podfrakcja Subfraction	Średnica Diameter (mm)
Części szkieletowe Rock fragments	duże głazy large boulders		>600
	głazy – boulders		600-200
	kamienie – stones		200-60
	żwir – pebbles		60-2
		gruby – coarse	60-20
		średni – medium	20-6
		drobny – coarse	6-2
Części ziemiste Fine earth	piasek – sand		2-0,063
		bardzo gruby very coarse	2-1,25
		gruby – coarse	1,25-0,63
		średni – medium	0,63-0,20
		drobny – fine	0,20-0,125
		bardzo drobny very fine	0,125-0,063
	pył – silt		0,063-0,002
		gruby – coarse	0,063-0,02
		drobny – fine	0,02-0,002
	ił – clay		<0,002

4. KLASYFIKACJE GLEB ZE WZGLĘDU NA ROZKŁAD GRANULOMETRYCZNY

Zalecane przez towarzystwa naukowe, jak również międzynarodowe organizacje, klasyfikacje gleb ze względu na rozkład granulometryczny, pozostają obecnie w dużej zbieżności. W porównaniu z klasyfikacjami FAO/WRB (FAO 2006) i USDA (Soil Survey Staff 2006) klasyfikacja Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2008) jest najbardziej szczegółowa (wyróżnia 16 grup granulometrycznych – tab. 5).

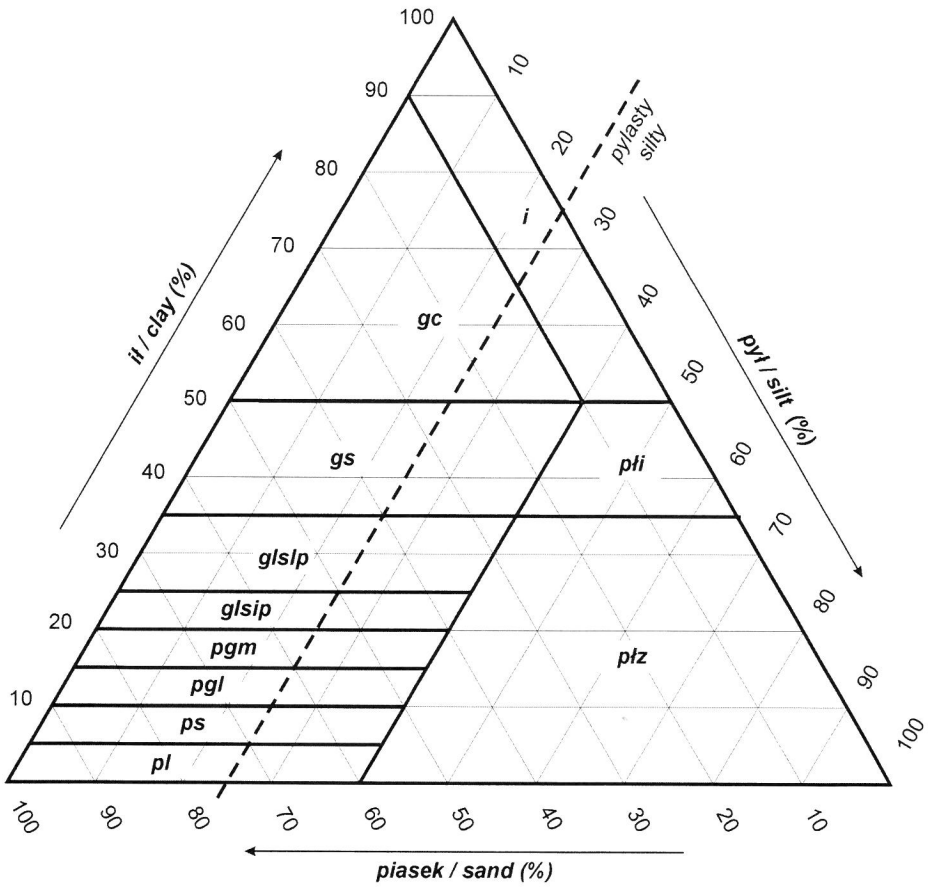
Tabela 5. Wykaz podstawowych grup granulometrycznych w różnych klasyfikacjach
Table 5. List of basic textural groups in different classifications

PTG (2008) PSSS (2008)	FAO/WRB (2006)	USDA (2006)
Piasek luźny Loose sand	Piasek Sand	Piasek Sand
Piasek słabogliniasty Weakly loamy sand		
Piasek gliniasty Loamy sand	Piasek gliniasty Loamy sand	Piasek gliniasty Loamy sand
Glina piaszczysta Sandy loam	Glina piaszczysta Sandy loam	Glina piaszczysta Sandy loam
Glina lekka Light loam		
Glina piaszczysto-ilasta Sandy clay loam	Glina piaszczysto-ilasta Sandy clay loam	Glina piaszczysto-ilasta Sandy clay loam
Glina zwykła Loam	Glina Loam	Glina Loam
Glina ilasta Clay loam	Glina ilasta Clay loam	Glina ilasta Clay loam
Glina pylasto-ilasta Silt clay loam	Glina pylasto-ilasta Silt clay loam	Glina pylasto-ilasta Silt clay loam
Pył zwykły Silt	Pył Silt	Pył Silt
Pył gliniasty Loamy silt	Glina pylasta Silty loam	Glina pylasta Silty loam
Pył ilasty Clayey silt		
Ił piaszczysty Sandy clay	Ił piaszczysty Sandy clay	Ił piaszczysty Sandy clay
Ił pylasty Silty clay	Ił pylasty Silty clay	Ił pylasty Silty clay
Ił zwykły Clay	Ił Clay	Ił Clay
Ił ciężki Heavy clay	Ił ciężki Heavy clay	

Warto zwrócić uwagę, że w wielu laboratoriach w Polsce nadal stosowany jest dawny podział gleb na grupy granulometryczne według Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego (rys. 1), który nie przystaje do przedstawionych poniżej klasyfikacji, nie tylko ze względu na odmienne kryteria procentowego udziału poszczególnych frakcji granulometrycznych w glebie, ale przede wszystkim z uwagi na inne zakresy wielkości cząstek poszczególnych frakcji. Przejście ze starej klasyfikacji na nową może być trudne, gdyż wartość graniczna odróżniająca części ziemiste od szkieletowych uległa zmianie z 1 na 2 mm, zmieniły się także zakresy wielkości frakcji piasku, pyłu i części spławianych (Kabała i Marzec 2007). Niemniej jednak, w przypadku posiadania danych dotyczących „pełnego" rozkładu granulometrycznego (obejmującego wszystkie frakcje i podfrakcje), możliwe jest odpowiednie przeliczenie i ponowne sklasyfikowanie danej gleby. W przypadku kiedy badacz dysponuje jedynie uproszczonym wynikiem (posiada dane określające jedynie główne frakcje granulometryczne), lub też istnieje potrzeba aktualizacji gatunku gleby określonego w oparciu o dawne kryteria, konieczne jest wykorzystanie odpowiednich algorytmów przeliczeniowych (Prusinkiewicz 1994), które dają możliwość wtórnego uzyskania niezbędnego do klasyfikacji parametru – udziału części ilastych. Do rozstrzygnięcia pozostaje kwestia frakcji 0,1-0,05 mm, zaliczanej do piasku lub pyłu, w zależności od systemu klasyfikacyjnego. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę, że klasyfikacja USDA w przypadku utworów pylastych dopuszcza możliwość zaliczenia frakcji piasku bardzo drobnego do frakcji pyłowej (Soil Survey Staff 1999). Może to prowadzić do problemów z jednoznacznym zakwalifikowaniem badanych gleb.

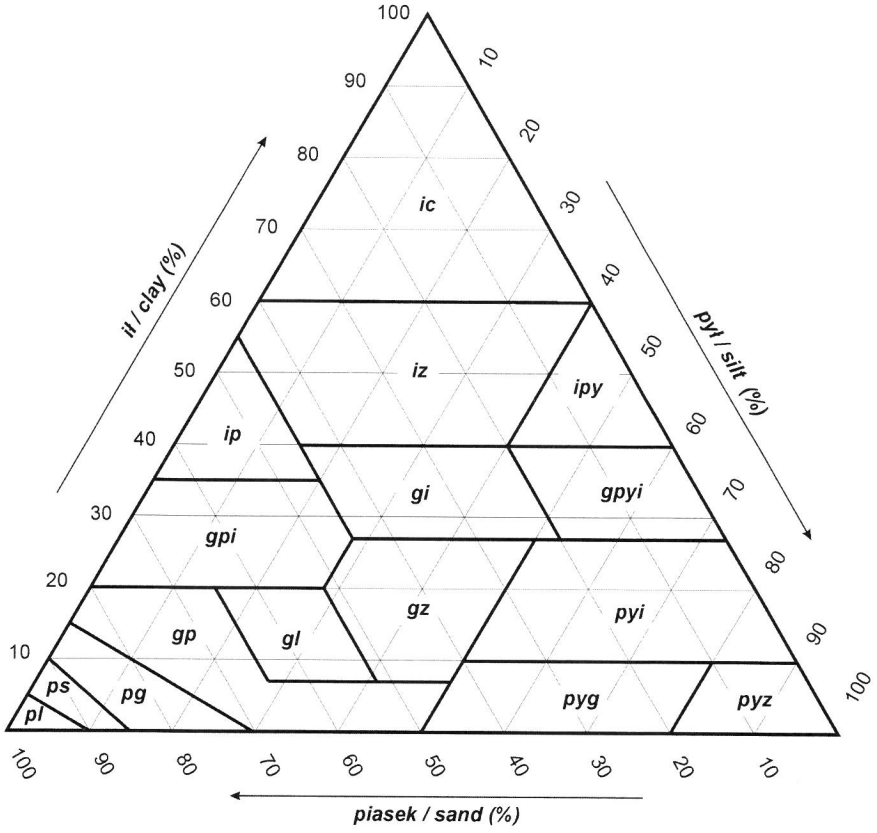
Niezgodność poszczególnych klasyfikacji w zakresie wielkości cząstek poszczególnych frakcji granulometrycznych skutkuje możliwymi różnicami w klasyfikacji, choć zwrócić należy uwagę, że istotny wpływ na przyporządkowanie gatunkowe gleby ma jedynie różnica w rozgraniczeniu pomiędzy frakcją piasku i frakcją pyłu.

Niżej przedstawione trójkąty Fereta (rys. 1 do 4) pozwalają na porównanie podziałów gleb na grupy granulometryczne według różnych klasyfikacji.

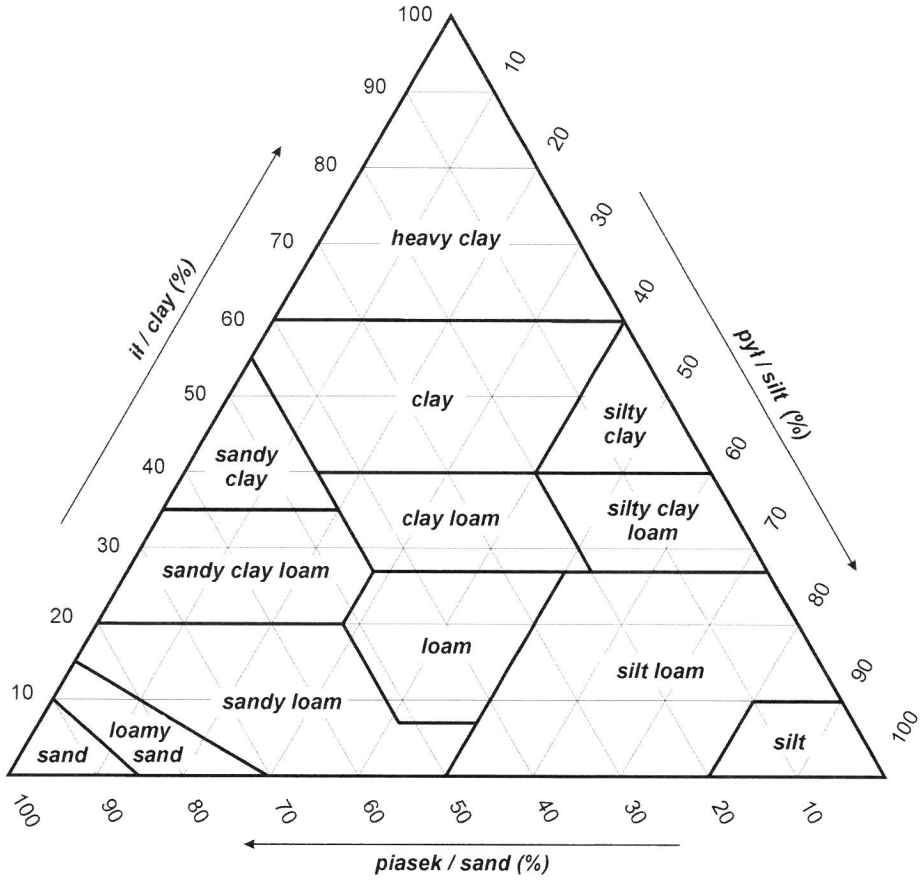


Rys. 1. Podział gleb na grupy granulometryczne (PTG do 2008). Objaśnienia: i – ił, gc – glina ciężka, gs – glina średnia, glslp – glina lekka słabo spiaszczona, glsip – glina lekka silnie spiaszczona, płz – pył zwykły, płi – pył ilasty, pgm – piasek gliniasty mocny, pgl – piasek gliniasty lekki, ps – piasek słabogliniasty, pl – piasek luźny

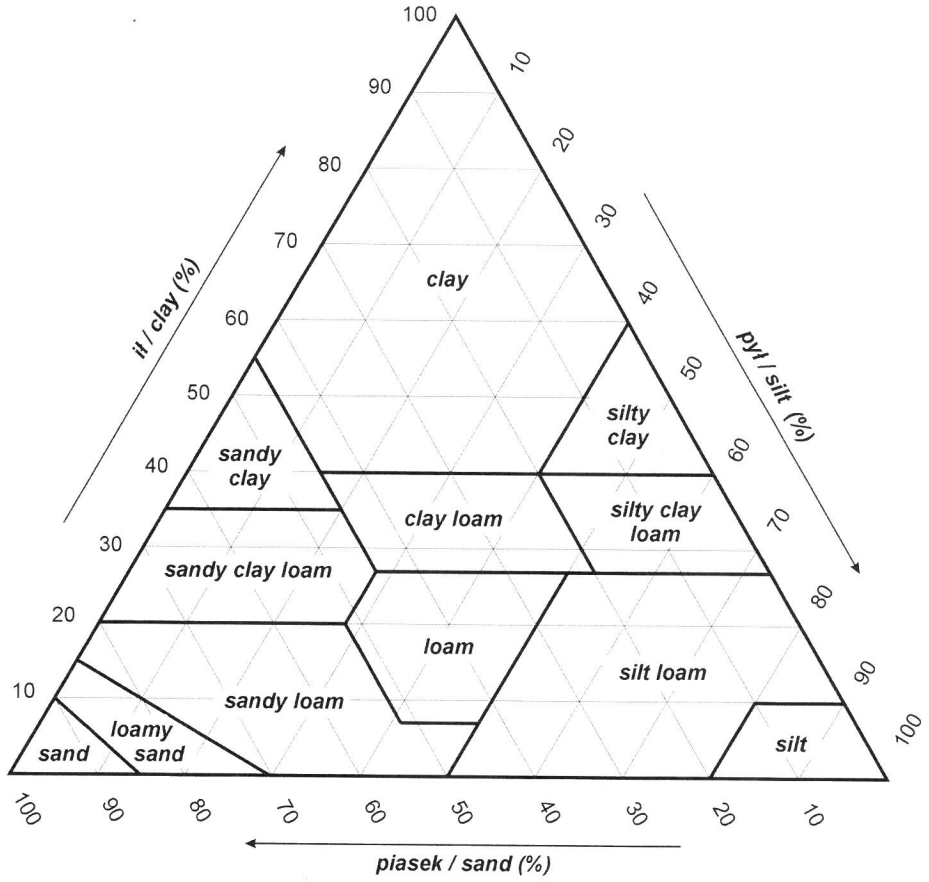
Fig. 1. Division of soils into particle size groups (PSSS until 2008). Descriptions: i – clay, gc – heavy loam, gs – medium loam, glslp – weakly sandy light loam, glsip – strongly sandy light loam, płz – proper silt, płi – clay silt, pgm – heavy loamy sand, pgl – light loamy sand, ps – weakly loamy sand, pl – loose sand



Rys. 2. Podział gleb na grupy granulometryczne (PTG 2008). Objaśnienia: ic – ił ciężki, iz – ił zwykły, ipy – ił pylasty, ip – ił piaszczysty, gi – glina ilasta, gpi – glina piaszczysto-ilasta, gpyi – glina pylasto-ilasta, gz – glina zwykła, gl – glina lekka, gp – glina piaszczysta, pg – piasek gliniasty, ps – piasek słabogliniasty, pl – piasek luźny, pyi – pył ilasty, pyg – pył gliniasty, pyz – pył zwykły
Fig. 2. Division of soils into particle size groups (PSSS from 2008). Descriptions: ic – heavy clay, iz – proper clay, ipy – silty clay, ip – sandy clay, gi – clay loam, gpi – sandy clay loam, gpyi – silty clay loam, gz – loam, gl – light loam, gp – sandy loam, pg – loamy sand, ps – weakly loamy sand, pl – loose sand, pyi – clay silt, pyg – loamy silt, pyz – proper silt

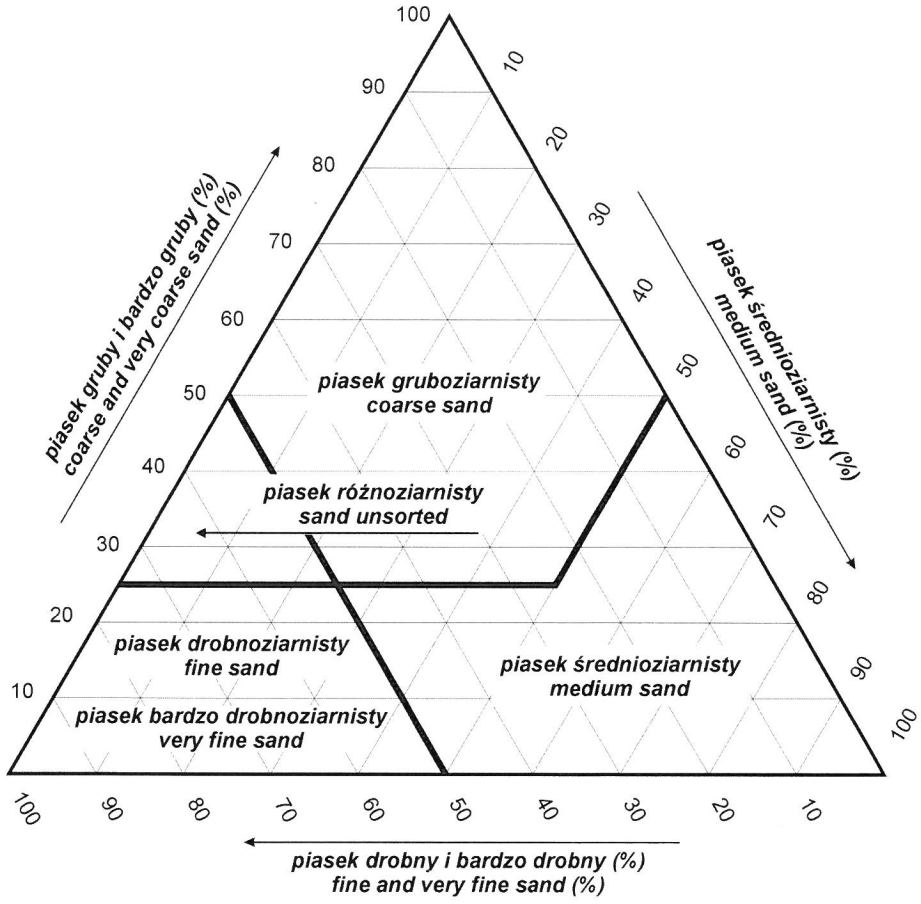


Rys. 3. Podział gleb na grupy granulometryczne (FAO/WRB)
Fig. 3. Division of soils into particle size groups (FAO/WRB)



Rys. 4. Podział gleb na grupy granulometryczne (USDA)
Fig. 4. Division of soils into particle size groups (USDA)

Klasyfikacje FAO/WRB oraz PTG (2008) wprowadzają pogłębioną klasyfikację utworów piaszczystych i glin, poprzez wskazanie dominującej w utworze podfrakcji piasku (rys. 5). Przy opisie dodać należy wtedy odpowiedni przymiotnik *~piaszczysta* w odniesieniu do glin lub *~ziarnisty,* w przypadku piasków, oraz określenie ziarnistości frakcji piasku (np. glina grubopiaszczysta, piasek słabogliniasty drobnoziarnisty, tab. 6). Analogiczne podziały wprowadza klasyfikacja USDA (Soil Survey Division Staff 1993).



Rys 5. Kategorie ziarnistości piasków i glin piaszczystych (PTG 2008)
Fig. 5. Granulation categories of sands and sandy loams (PTG 2008)

Tabela 6. Grupy granulometryczne utworów piaszczystych i glin piaszczystych wyróżniane w oparciu o dominującą frakcję piasku
Table 6. Grain size groups in sandy formations and sandy loams distinguished basing on the dominant sand fraction

Piasek luźny – loose sand
Piasek luźny gruboziarnisty – Loose sand, coarse-grained
Piasek luźny średnioziarnisty – Loose sand, medium-grained
Piasek luźny drobnoziarnisty – Loose sand, fine-grained
Piasek luźny bardzo drobnoziarnisty – Loose sand, very fine-grained
Piasek luźny różnoziarnisty – Loose sand, anisomerous
Piasek słabogliniasty – weakly loamy sand
Piasek słabogliniasty gruboziarnisty – Weakly loamy sand, coarse-grained
Piasek słabogliniasty średnioziarnisty – Weakly loamy sand, medium-grained
Piasek słabogliniasty drobnoziarnisty – Weakly loamy sand, fine-grained
Piasek słabogliniasty bardzo drobnoziarnisty – Weakly loamy sand, very fine-grained
Piasek słabogliniasty różnoziarnisty – Weakly loamy sand, anisomerous
Piasek gliniasty – loamy sand
Piasek gliniasty gruboziarnisty – Loamy sand, coarse-grained
Piasek gliniasty średnioziarnisty – Loamy sand, medium-grained
Piasek gliniasty drobnoziarnisty – Loamy sand, fine-grained
Piasek gliniasty bardzo drobnoziarnisty – Loamy sand, very fine-grained
Piasek gliniasty różnoziarnisty – Loamy sand, anisomerous
Glina piaszczysta – sandy loam
Glina grubopiaszczysta – Coarse-sandy loam
Glina piaszczysta średnioziarnista – Medium-grained sandy loam
Glina drobnopiaszczysta – Fine-sandy loam
Glina bardzo drobnopiaszczysta – Very fine-sandy loam
Glina różnopiaszczysta – Varisandy loam

Problem, jaki może pojawić się przy pogłębionej klasyfikacji utworów piaszczystych wynika z faktu, że różne są zakresy wielkości cząstek przy podziałach frakcji piasku według wspomnianych systemów klasyfikacyjnych (por. tab. 1-4).

Tabela 7. Szkieletowość gleby według PTG (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2008)
Table 7. Share of rock fragments according to PSSS (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2008)

Określenie gleb Soil description	Udział cząstek > 2 mm Share of particles > 2 mm	Utwory Formations
Bezszkieletowe i bardzo słabo szkieletowe Non-skeletal and very weakly skeletal	<5%	—
Słabo szkieletowe Weakly skeletal	5-15%	słabo żwirowe słabo kamieniste słabo głazowe słabo blokowe
Średnio szkieletowe Medium skeletal	15-35%	średnio żwirowe średnio kamieniste średnio głazowe średnio blokowe
Silnie szkieletowe Strongly skeletal	35-60%	silnie żwirowe silnie kamieniste silnie głazowe silnie blokowe
Bardzo silnie szkieletowe Extremely skeletal	60-90%	szkieletowo-piaszczyste szkieletowe-pyłowe szkieletowo-gliniaste szkieletowo-ilaste
Szkieletowe właściwe Proper skeletal	>90%	blokowe głazowe kamieniste żwirowe

Wszystkie z omawianych klasyfikacji odnoszą się do szkieletowości gleby, rozumianej jako udział cząstek o średnicy większej niż 2 mm. W przypadku klasyfikacji PTG oraz USDA przy określonej ich zawartości wprowadza się dodatkowy opis grupy granulometrycznej, po wcześniejszym określeniu stopnia szkieletowości. W klasyfikacji FAO/WRB stosuje się odpowiedni kwalifikator przy nazwie głównej grupy. Istotną kwestią jest określenie udziału cząstek szkieletowych w procentach objętościowych, a nie wagowych, choć klasyfikacja PTG dopuszcza warunkowo taką możliwość.

W przypadku kwalifikacji gleby (według PTG) jako bezszkieletowej lub słabo szkieletowej nie przyjmuje się dodatkowego określenia grupy granulometrycznej.

Dla utworów słabo, średnio lub silnie szkieletowych dodaje się określenie słabo-, średnio- lub silnie-, i podaje się dominującą frakcję części szkieletowych, np. glina lekka słabo żwirowa, piasek gliniasty silnie kamienisty (frakcja dominująca stanowi ponad dwie trzecie objętości części szkieletowych). W przypadku braku dominacji jednej z frakcji, stosuje się określenia mieszane, złożone z nazw dwóch frakcji, na pierwszym miejscu wymieniając frakcję o wyższym udziale (np. piasek gliniasty średnio żwirowo-kamienisty).

Utwory bardzo silnie szkieletowe określa się na podstawie dominującej frakcji szkieletowej oraz uziarnienia części ziemistych. Wyróżnia się więc np. utwory żwirowo-piaszczyste, kamienisto-gliniaste itd. W przypadku utworów szkieletowych właściwych dokonuje się rozróżnienia w oparciu jedynie o frakcje części szkieletowych, z pominięciem części ziemistych.

Analogicznych podziałów dokonuje się według klasyfikacji USDA. Wartościami granicznymi udziału części szkieletowych jest 15, 35, 60 i 90%. Przy udziale szkieletu poniżej 15% nie używa się dodatkowych określeń. Przy udziale od 15 do 30% dodaje się przymiotnik odnoszący się do dominującej, największej frakcji (np. gravelly, stony itp.). Zawartość pomiędzy 35 a 60% sygnalizuje się przymiotnikiem „very" w połączeniu z dominującą frakcją. Udział od 60 do 90% należy opisywać jako „extremely". Jeżeli części spławialnych jest mniej niż 10%, nazwę utworu buduje się wyłącznie w oparciu o dominującą frakcję szkieletową.

Podwyższony udział frakcji szkieletowej w klasyfikacji FAO/WRB sygnalizuje się poprzez dodanie do nazwy głównej grupy odpowiedniego kwalifikatora – „skeletic", przy czym szczególnie duży udział szkieletu należy opisać jako „hyperskeletic".

5. PRZYGOTOWANIE GLEBY DO POMIARÓW ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO

Omawiając zagadnienie przygotowania gleb do pomiarów rozkładu granulometrycznego na wstępie należy zwrócić uwagę na problem reprezentatywności próbki. Truizmem jest stwierdzenie, że gleba jest tworem niejednorodnym i zmiennym w czasie. Dlatego w większości pomiarów, w których gleba jest badanym obiektem, niepewność wynikająca z poboru próbek jest zwykle największą, często dominującą pozycją w budżecie niepewności.

Ze względu na fakt, że: (i) niepewność wynikająca ze zmienności czasowo-przestrzennej gleby dotyczy wszystkich pomiarów samej gleby i pomiarów prowadzonych w środowisku glebowym; (ii) problem ten był szeroko dyskutowany

w literaturze (Bieganowski i Walczak 2003); (iii) istnieje norma opisująca pobór próbek glebowych (PN-ISO 10381-1: 2008, PN-ISO 10381-2: 2007, PN-ISO 10381-3: 2007, PN-ISO 10381-4: 2007, PN-ISO 10381-5: 2009, PN-ISO 10381-6: 1998), dlatego w niniejszej monografii zagadnienie to nie będzie dyskutowane.

Próbka glebowa pobrana w terenie wymaga wstępnego przygotowania przed przystąpieniem do zasadniczej analizy rozkładu granulometrycznego. Pobraną w terenie próbkę glebową o określonej wilgotności należy wysuszyć w laboratorium. Standardowo przyjętą metodą suszenia jest pozostawienie próbki na wolnym powietrzu, w temperaturze pokojowej, bez dostępu promieni słonecznych. W początkowej fazie suszenia próbkę należy oczyścić z wszelkich domieszek, przede wszystkim szczątków roślinnych i pozostałych korzeni żywych roślin. Czas suszenia próbki jest zależny od jej wilgotności. Nie należy stosować podwyższonych temperatur (np. suszarki). W trakcie suszenia można delikatnie rozcierać palcami tworzące się agregaty, co ułatwia dalszą preparatykę próbki.

Po wysuszeniu próbki należy rozetrzeć agregaty glebowe, powstałe z połączenia pojedynczych ziaren gleby. W tym celu stosuje się moździerz porcelanowy, w którym umieszcza się glebę i rozciera delikatnie porcelanowym pistlem, następnie wykorzystując pistel z gumową okładziną, aby nie naruszyć naturalnej wielkości ziaren gleby.

Przy wykorzystaniu sita o określonej wielkości oczka (2 mm), należy odseparować frakcje części szkieletowych od frakcji części ziemistych. W przypadku większej zawartości szkieletu o dużych rozmiarach, separację można rozpocząć w trakcie suszenia. Analizę uziarnienia przeprowadza się odrębnie dla obu głównych grup frakcji.

Wysuszone i przesiane przez sito próbki należy poddać odpowiedniej preparatyce chemicznej. Wśród zalecanych procedur wymienia się najczęściej usunięcie soli rozpuszczalnych, utlenienie substancji organicznej, usunięcie węglanów oraz tlenków żelaza. Chemiczne przygotowanie próbek ma na celu usunięcie z gleby wszelkich czynników, które mogą mieć niekorzystny wpływ na odpowiednią dyspersję próbki, stanowiąc spoiwo agregujących się pojedynczych cząstek. Usuwane są także substancje, które, w zależności od stosowanej metody analizy, mogą mieć bezpośredni wpływ na uzyskiwane rezultaty.

Zarówno konieczność stosowania odpowiednich zabiegów, jak też ich zakres, są postrzegane w zróżnicowany sposób. Dla wybranych zagadnień sugeruje się wręcz odstąpienie od jakiegokolwiek chemicznego przygotowania próbki z uwagi na „nienaturalność" tak przygotowanego preparatu.

Zakres stosowanych procedur i ich obligatoryjność podano w tabeli 8.

Tabela 8. Wykaz procedur zalecanych przez różne dokumenty
Table 8. List of procedures recommended by different documents

Procedura Procedure	PN-R-04032:1998	ISRIC	USDA	PN-ISO 11277:2005
Usuwanie soli rozpuszczalnych Removal of soluble salts	–	opcjonalnie optional	obowiązkowo obligatory	obowiązkowo obligatory
Usuwanie substancji organicznej Removal of organic matter	–	opcjonalnie optional	obowiązkowo obligatory	obowiązkowo obligatory
Usuwanie węglanów Removal of carbonates	–	opcjonalnie optional	opcjonalnie obligatory	opcjonalnie obligatory
Usuwanie tlenków żelaza Removal of iron oxides	–	opcjonalnie optional	opcjonalnie obligatory	opcjonalnie obligatory

W podrozdziałach od 5.1 do 5.5 zostały ogólnie omówione zagadnienia związane z usuwaniem poszczególnych substancji w trakcie przygotowania próbek glebowych do analizy rozkładu granulometrycznego. Szczegółowe procedury dotyczące usuwania soli, substancji organicznej oraz węglanów zamieszczone zostały w załączniku nr 1.

5.1. Usuwanie soli rozpuszczalnych

Procedura usuwania soli rozpuszczalnych traktowana jest w sposób niejednorodny. Część prac metodycznych zaleca ją obligatoryjnie (Burt 2004, PN-ISO 11277: 2005), inne opcjonalnie (Van Reeuwijk 2002), w niektórych jest ona w ogóle pominięta (Bednarek i in. 2004, Lityński i in. 1976). Zasada metody opiera się na płukaniu próbki gleby wodą destylowaną aż do uzyskania odpowiednio niskiej przewodności elektrolitycznej. Próbkę umieszcza się w butelce wirówkowej, zalewa odpowiednią ilością wody, wytrząsa, odwirowuje i mierzy przewodność supernatanta. Procedurę powtarza się do skutku.

5.2. Usuwanie substancji organicznej

Usunięcie substancji organicznej stanowi kolejny krok w chemicznym przygotowaniu próbki glebowej do analizy, choć należy zwrócić uwagę, że wybrane opracowania metodyczne i normatywne w ogóle nie odnoszą się do zagadnienia substancji organicznej (Lityński i in. 1976, Myślińska 2001, PN-R-04032: 1998). Niektórzy autorzy sugerują natomiast, że etapu usuwania substancji organicznej nie należy traktować obligatoryjnie, lecz zależy to od przewidywanego sposobu wykorzystania zebranych w trakcie analizy danych czy też od

charakteru i przede wszystkim, ilości substancji organicznej zawartej w glebie (Van Reeuwijk 2002). W literaturze brak jednak wyraźnie wyznaczonych wartości granicznych ilości substancji organicznej, przy której stosowanie procedury usuwania staje się konieczne, określenia „powyżej kilku procent" nie wydają się zbyt precyzyjne. Jednocześnie zwrócić należy uwagę, że rozważna ocena konieczności (lub nie) usunięcia substancji organicznej może radykalnie wpłynąć na czas wykonania analizy, gdyż etap ten jest bez wątpienia żmudny i pracochłonny.

Choć w literaturze metodycznej odnaleźć można wzmianki o rozmaitych związkach chemicznych (Bednarek i in. 2004, Burt 2004, Gee i Bauder 1986, Van Reeuwijk 2002), które mogą być wykorzystane w charakterze utleniaczy glebowej substancji organicznej, to zasadniczo istnieje pełna zgodność co do zasadności stosowania perhydrolu (30%).

Usunięcie substancji organicznej przy użyciu perhydrolu polega na traktowaniu próbki gleby niewielkimi porcjami utleniacza. Próbkę należy początkowo równomiernie zwilżyć niewielką ilością wody destylowanej, a następnie umieścić w naczyniu o odpowiednio wysokich ściankach, z uwagi na burzliwość zachodzącej reakcji. W przypadku większych odważek lub podwyższonej zawartości substancji organicznej, konieczne jest rozdzielenie próbki na kilka lub nawet kilkanaście porcji dla zapewnienia właściwego przeprowadzenia tego etapu analizy. Zastosowanie podwyższonej temperatury przyspiesza reakcję utlenienia substancji organicznej. W tym celu wykorzystuje się płyty grzejne, łaźnie piaskowe lub łaźnie wodne. Należy zachować szczególną ostrożność przy podgrzewaniu próbek z podwyższoną zawartością próchnicy, gdyż reakcja może zachodzić w sposób nagły i bardzo burzliwy. Istotne jest zachowanie właściwej temperatury, gdyż stosowany w analizie perhydrol ulega rozkładowi w temperaturze 90°C. W trakcie analizy należy od czasu do czasu spłukiwać wodą destylowaną ścianki naczynia, na których osadzają się wynoszone przez pianę cząstki gleby; zabieg ten ułatwia zastosowanie specjalnych końcówek na bagietki szklane, tzw. „wycieraczek". „Burzenie" mieszaniny można ograniczyć stosując odpowiedni środek, który ogranicza ilość tworzącej się piany. Wśród zalecanych w tym celu środków wymienia się metanol, etanol i oktanol. Nie zaleca się natomiast stosowania popularnego w polskich laboratoriach pentanolu (alkoholu amylowego) (Gee i Bauder 1986).

Zasadniczy problem związany z procedurą usuwania substancji organicznej wiąże się z zastosowaniem w analizie rozkładu granulometrycznego „tradycyjnej" metody areometrycznej Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego. Wspomniana metoda wymaga zastosowania ściśle określonej odważki gleby (40 g), co generuje istotny problem. Odważenie próbki przed usunięciem substancji organicznej jest

w sposób oczywisty błędne, natomiast wykonanie odważki po usunięciu substancji wymaga wysuszenia próbki w wytarowanej uprzednio parownicy lub zlewce. Może to z kolei powodować dodatkowe błędy pomiarowe.

5.3. Usuwanie węglanów

Podobnie jak w przypadku usuwania substancji organicznej, część autorów jest zdania, że procedura usunięcia węglanów nie jest obligatoryjna, skłaniając się do przyjęcia wartości 2% zawartości węglanów w glebie, powyżej której związki te powinny zostać usunięte. Według niektórych autorów dla ujednolicenia procedury należy stosować usuwanie węglanów w sposób rutynowy dla wszystkich próbek glebowych (Van Reeuwijk 2002), inne z kolei sugerują odstąpienie w rutynowych badaniach od usuwania węglanów ze względu na czasochłonność procedury. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że usuwanie węglanów może być dyskusyjne w przypadku gleb o naturalnie wysokiej ich zawartości, takich, jak np. rędziny. Zakładając kilkudziesięcioprocentową zawartość węglanu wapnia w glebie, stosując procedurę zakwaszenia próbki, nie tylko usuwa się substancję stanowiącą potencjalne spoiwo tworzących się agregatów glebowych, ale kreuje się nową jakość, całkowicie odbiegającą od pierwotnego utworu glebowego. Wobec powyższego należy rozważyć w takiej sytuacji całkowite odstąpienie od procedury usuwania węglanów. W każdym przypadku istotne jest rozważenie celu badania.

Do usunięcia węglanów w próbce zaleca się użycie dwóch odczynników: kwasu solnego i buforu sodowo-octanowego.

Z punktu widzenia praktyki łatwiejsze w wykonaniu jest użycie 1 M kwasu solnego. Należy zachować ostrożność przy próbkach zawierających podwyższoną ilość węglanów, gdyż reakcja może zachodzić burzliwie. Po zalaniu próbki kwasem, można dodatkowo zastosować podwyższoną temperaturę, co dodatkowo przyspiesza reakcję. Zawiesina powinna flokulować, wtedy należy odciągnąć lub zdekantować roztwór znad osadu (jeśli jest klarowny), a próbkę kilkukrotnie przepłukać wodą. W przypadku słabej flokulacji, może istnieć konieczność odwirowania próbki. Zastosowanie kwasu solnego uważane jest przez niektórych autorów za niewłaściwe, gdyż może naruszać sieć krystaliczną minerałów ilastych, przede wszystkim zeolitu, chlorytu i alofanu (Gee i Bauder 1986).

Drugim odczynnikiem wykorzystywanym w procedurze usuwania węglanów jest bufor sodowo-octanowy 1M (pH = 5), przy czym postępowanie jest analogiczne jak w przypadku kwasu solnego.

Przyjmuje się, że przepłukiwanie próbki po zastosowaniu procedury usuwania węglanów jest zakończone, jeśli przewodność supernatanta jest niższa niż 0,4 dS/m.

5.4. Usuwanie tlenków żelaza

Usunięcie tlenków żelaza z próbki nie jest traktowane jako zabieg obligatoryjny. Ewentualne podjęcie procedury wymaga rozważenia zasobności gleb we wspomniane związki i określenia potencjalnego wpływu na agregowanie ziaren glebowych w trakcie analizy. W przypadku gleb bogatych w półtoratlenki ich usunięcie ułatwia odpowiednią dyspersję próbki, w szczególności części krzemionkowej. Istotne jest wskazanie, że w glebach, których tlenki żelaza stanowią dominujący element mineralogiczny, ich usunięcie może spowodować zniszczenie minerałów pierwotnych frakcji ilastej.

Tlenki żelaza mogą być usunięte poprzez zbuforowanie gleby cytrynianem sodu i wodorowęglanem sodu oraz zastosowanie ditionitu (Burt 2004, Van Reeuwijk 2002).

5.5. Usuwanie krzemionki

Amerykańska metodyka dotycząca analityki gleby (Burt, 2004) opisuje także procedurę usunięcia krzemionki, ale nie zostało to uznane za procedurę standardową i jest stosowane w wyjątkowych przypadkach.

6. METODY DYSPERGOWANIA GLEBY W POMIARACH ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO

Dokonując analizy rozkładu granulometrycznego należy pamiętać o tym, że odzwierciedla on pierwotne własności gleby tylko wtedy, gdy w trakcie pomiaru są analizowane tzw. „elementarne" cząstki (czyli takie, które nie rozpadają się pod wpływem różnych czynników dyspergujących), a nie ich agregaty (w takim przypadku należałoby mówić raczej o rozkładzie agregatowym, a nie rozkładzie granulometrycznym). Każda gleba w warunkach naturalnych charakteryzuje się określoną agregacją (Walczak i Witkowska 1976, Witkowska-Walczak 2000), stąd przez wiele lat w pomiarach rozkładu granulometrycznego poszukiwano efektywnych sposobów dyspergowania próbki.

Z powodu dużego zróżnicowania gleb nie ma jednej standardowej procedury dyspersji (Chappell 1998). Ogólnie sposoby dyspergowania można podzielić na chemiczne i fizyczne.

Stosując różnego rodzaju środki chemiczne (np. calgon) wykorzystuje się fakt występowania ładunku dodatniego na znajdujących się w glebie tlenkach żelaza i glinu oraz ładunku ujemnego na minerałach glebowych (poza ich powierzchniami bocznymi i ostrymi krawędziami) oraz na materii organicznej.

Występowanie ładunków elektrycznych powoduje przyciąganie się tych składników glebowych (elektrostatyczne „sklejanie się" cząstek). W przypadku zastosowania wyżej wymienionego calgonu jony fosforanowe sorbują się na powierzchni powodując zmianę znaku. Ponadto sam wzrost pH powyżej 8 może powodować przeładowanie bocznych powierzchni minerałów również na ładunek ujemny, a przy bardzo wysokim pH może nastąpić wytrącanie fosforanu wapnia i magnezu. Wszystkie te procesy powodują rozpadanie się agregatów glebowych.

Według Borowca i in. (1967) przygotowanie próbki do analizy metodą Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego wymagało odważenia 40 g części ziemistych gleby oraz dodanie 1,5-2 g bezwodnego węglanu sodu. Próbkę taką należało umieścić w emaliowanej misce o pojemności ok. 1,5 dm^3, dodać do niej 700 cm^3 wody destylowanej i gotować przez 30 min (licząc od chwili wrzenia). Próbkę należało cały czas mieszać i pilnować aby nie wykipiała. Następnie po wystygnięciu próbka była przenoszona do cylindra i uzupełniana wodą do litra. W przypadku próbek gleb ciężkich zalecane było dodanie 1 g gumy arabskiej rozpuszczonej w niewielkiej ilości wody jeszcze przed uzupełnieniem próbki wodą. Dodatek gumy arabskiej miał utrzymywać cząstki ilaste w stanie zdyspergowanym w czasie pomiaru.

Według Turskiego i in. (1977) do 40 g gleby (powietrznie suchej i przesianej przez sito o średnicy oczek 1 mm) należy dolać ok. 500 cm^3 wody destylowanej, a następnie dodać odpowiednią ilość calgonu (25 cm^3 w przypadku próbek bezwęglanowych oraz 50 cm^3 w przypadku próbek zawierających węglany). Calgon sporządza się z 7,94 g bezwodnego węglanu sodu i 35,7 g heksametafosforanu sodu rozpuszczonych w 1 dm^3 wody destylowanej*. Tak przygotowaną zawiesinę glebową należy mieszać mieszadłem rotacyjnym przed 10 – 30 minut (10 minut w przypadku gleb piaszczystych, 20 minut w przypadku glin i utworów pyłowych, zaś 30 minut w przypadku iłów).

Zgodnie z Polską Normą (PN-R-04032: 1998) zalecane jest również stosowanie jako peptyzatora calgonu. Roztwór ten uzyskuje się identycznie jak w metodzie opisanej powyżej według Turskiego i in. (1977). Zmianie ulegają jednak naważki próbek, ilość dodawanego peptyzatora oraz czas mieszania. Według Normy PN-R-04032 (1998) odważkę wymaganą do przeprowadzenia analizy należy odczytać z tabeli 9.

*Niektórzy autorzy wykorzystują jedynie heksametafosforan jako środek dyspergujący.

Tabela 9. Masa próbki do analizy sitowej na podstawie PN-R-04032
Table 9. Mass of sample to sieve analysis on the basis of PN-R-04032

Lp. No.	Gleba – Soil	Odważka w przeliczeniu na absolutnie suchą masę Weighted sample adjusted to an absolutely dry mass (g)
1	gleby ilaste – clayey soils	20
2	gleby gliniaste zawierające do 60% frakcji piasku loamy soils containing up to 60% of sand fraction	40
3	gleby gliniaste i piaszczyste zawierające od 61% do 80% frakcji piasku loamy and sandy soils containing from 61% to 80% of sand fraction	80
4	piaski zawierające powyżej 80% frakcji piasku sands containing above 80% of sand fraction	120

Należy zwrócić uwagę, że norma ta zaleca wysuszenie próbek glebowych do stanu powietrznie suchego za wyjątkiem gleb ilastych, które według normy nie powinny być suszone. W celu określenia odpowiedniej odważki gleb ilastych będących w stanie wilgotności aktualnej w należy wyznaczyć procentową zawartość wody według wzoru (PN-R-04032, 1998):

$$w = \frac{M_w - M_s}{M_s} \cdot 100, \tag{1}$$

gdzie: w – wilgotność aktualna (%), M_w – masa gleby wilgotnej (g), M_s – masa gleby wysuszonej w suszarce laboratoryjnej w 105°C do stałej masy (g).

Wielkość odważki gleb ilastych wilgotnych wyznacza się ze wzoru:

$$N_w = N_s + \frac{w \cdot N_s}{100}, \tag{2}$$

gdzie: N_w – odważka gleby wilgotnej, zawierająca 20 g gleby absolutnie suchej, w – wilgotność aktualna (%), N_s – odważka standardowa według tabeli 9.

W celu zdyspergowania gleby odpowiednią odważkę gleby należy wsypać do zlewki o pojemności około 800 cm^3, zalać wodą destylowaną do około 600 cm^3, a następnie dodać pipetą 20 cm^3 peptyzatora i mieszać mieszadłem elektrycznym o szybkości 2800 obrotów na minutę. Czas mieszania dla gleb piaszczystych wynosi 5 minut, dla gleb gliniastych 10 minut, zaś dla gleb ilastych 15 minut (PN-R-04032, 1998).

Według ISRIC (Van Reeuwijk 2002) czynnik dyspergujący to 40 g heksametafosforanu sodu i 10 g węglanu sodu, rozpuszczone w wodzie do 1 dm^3. Jeżeli próbka w wyniku wcześniejszych procedur jest w postaci zawiesiny należy przenieść ją ilościowo do litrowej butelki. Jeżeli próbki znajdują się w stanie suchym należy odważyć około 20 g części ziemistych gleby i wsypać do butelki plastikowej, dodać 20 cm^3 środka dyspergującego i uzupełnić wodą do 400 cm^3, zatkać butelkę i umieścić ją na wytrząsarce obrotowej (end-over-end shaker) i wytrząsać przez 16 godzin z szybkością 30 obrotów na minutę.

W metodzie USDA (Soil Survey Staff 2006) czynnikiem dyspergującym jest roztwór 35,7 g heksametafosforanu sodu i 7,94 g węglanu sodu, uzupełnionych wodą do 1 dm^3. Do próbki, poddanej procedurom wstępnego przygotowania do analizy, należy dodać odpowiednią ilość roztworu dyspergującego, odpowiadającą 0,4408 g heksametafosforanu (dokonuje się odpowiedniej standaryzacji roztworu). Próbki nie wytrząsa się; po zalaniu peptyzatorem stosuje się ultradźwięki. Należy zaznaczyć, że omawiana metodyka opisuje także metodę dyspersji próbki tylko z wodą, bez użycia środków chemicznych. Próbkę 10 g gleby zalewa się wodą i wytrząsa na mieszadle horyzontalnym przez 15 godzin z częstotliwością 120 drgań na minutę.

Zgodnie z Polską Normą PN-ISO 11277: 2005 do dyspersji gleby stosuje się roztwór uzyskany przez rozpuszczenie w wodzie 33 g heksametafosforanu sodu i 7 g węglanu sodu uzupełnionych wodą do 1 dm^3. Jednocześnie zaleca się, aby roztwór ten przechowywać z dala od światła, najlepiej w ciemnej butli nie dłużej niż miesiąc. Norma dopuszcza stosowanie innych środków dyspergujących, np. zastąpienie węglanu sodu 20% roztworem amonu w stosunku 5 cm^3 roztworu amonu na 150 cm^3 roztworu heksametafosforanu sodu. Wybór konkretnego środka dyspergującego uzależniony jest od jego efektywności dla konkretnej próbki glebowej, zaś informacja o zastosowanym środku dyspergującym powinna znaleźć się protokole badania. W celu uzyskania dyspersji próbki glebowej norma zaleca dodanie 25 cm^3 dyspergatora oraz wytrząsanie tak przygotowanej próbki przez 18 godzin na wytrząsarce obrotowej.

Najczęściej stosowaną metodą fizyczną są ultradźwięki (Buurman i in. 1997, Mayer i in. 2002, Sperazza i in. 2004, Tippkötter 1994, Wasterhof i in. 1999).

Stosując ultradźwięki doprowadza się do dyspersji próbki glebowej, gdyż energia dostarczana do układu przez fale może powodować:

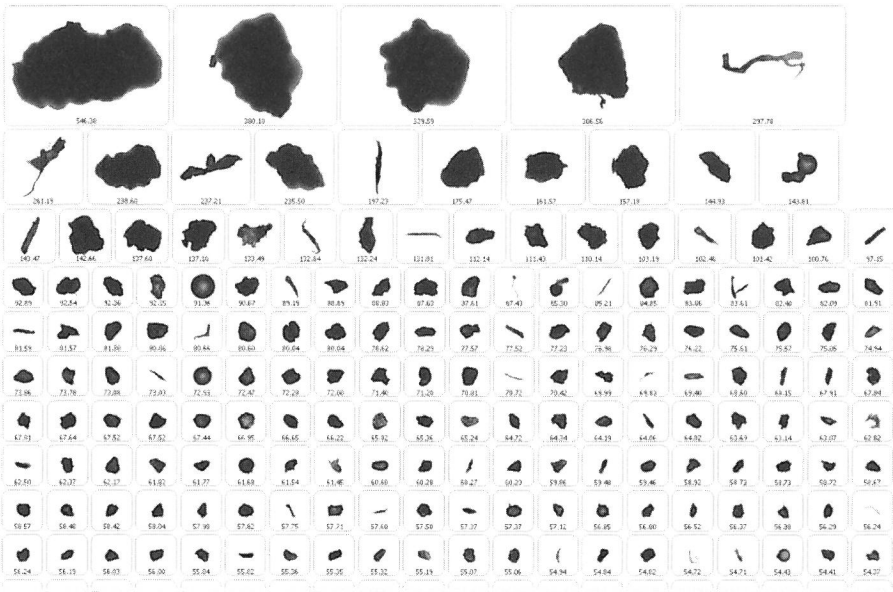
- drgania sieci krystalicznej, w wyniku czego nastąpić mogą naprężenia, powodujące rozpadanie się agregatów,
- przyspieszony ruch cząstek i zwiększone tarcie o ciecz, prowadzące do odrywania cząstek od agregatów,
- zaistnienie warunków, w których zajdzie zjawisko kawitacji.

7. METODY POMIARU ROZKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO CZĄSTEK

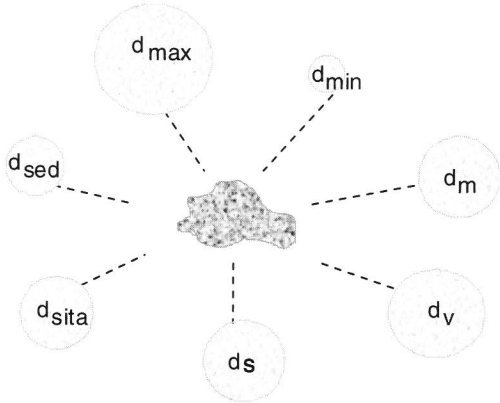
Jednymi z najstarszych metod służącą do oddzielania substancji o różnych wielkościach cząstek, są stosowane już w czasach starożytnej Grecji, metody dekantacji oraz metoda sitowa. Jednak udokumentowane źródła datują pierwsze użycie tej metody dekantacji do podziału cząstek gleby dopiero na 1692 rok. Przyjmuje się, że pierwsze opisane użycie sita do oddzielenia frakcji piasku nastąpiło w 1704 roku, zaś sam termin „analiza mechaniczna" wprowadzono w 1800 roku. Sformułowanie prawa Stokesa w 1851 roku oraz późniejsze zastosowanie go do analizy gleby (w 1857 roku) zapoczątkowało rozwój nowych metod pomiaru rozkładu granulometrycznego gleby (Krumbein 1932). W oparciu o podstawowe prawa fizyki powstawały kolejne metody pomiarowe służące do określania wielkości cząstek, obecnie znanych jest ich około 400 (Loveland i Whalley 2001).

Cząstki w glebie mają różne kształty oraz różne wielkości, co przedstawiono na rysunku 6.

W celu opisywania i porównywania wielkości cząstek wygodnie byłoby wprowadzić jedną liczbę charakteryzującą wielkość cząstki. W przypadku sfery wystarczy podać jeden parametr – średnicę (lub promień), by dokładnie opisać jej wielkość (Rawle 2002). Aby umożliwić porównywanie rozmiarów cząstek, rzeczywiste cząstki opisuje się definiując kule o: identycznym wymiarze maksymalnym d_{max}, identycznym wymiarze minimalnym d_{min}, identycznej masie d_m, identycznej objętości d_v, o identycznej powierzchni d_S, przechodzącą przez to samo oczko sita d_{sita}, o tej samej szybkości sedymentacji d_{sed} (Allen 1975, Rawle, 2002) (rys. 7).



Rys. 6. Mikroskopowy obraz cząstek w glebie z aparatu Morphology G3 firmy Malvern
Fig. 6. Microscopic image of soil samples from Morphology G3 apparatus by Malvern Instruments



Rys. 7. Schemat kul o średnicach równoważnych
Fig. 7. Diagram of spheres with equivalent diameters

Poniżej przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych metod wyznaczania rozkładu granulometrycznego, bez uwzględniania procedury przygotowywania próbki do pomiaru.

Metody pomiaru rozkładu granulometrycznego można ogólnie podzielić na polowe i laboratoryjne. Do metod polowych należą: organoleptyczna oraz metoda wykorzystująca przyrząd Kruedenera. Pozostałe metody omówione w tym rozdziale zaliczyć należy do metod laboratoryjnych.

7.1. Metoda organoleptyczna

Organoleptyczne określenie gatunku gleby jest bardzo przydatne w pracach polowych, kiedy zachodzi konieczność orientacyjnego określenia zawartości poszczególnych frakcji cząstek glebowych. Najprostszą metodą jest tak zwana metoda palcowa. Metoda ta pozwala na rozpoznanie składu gleby na podstawie analizy zachowania się jej przy rozcieraniu w palcach w stanie suchym i po nawilżeniu (zestawienie 1 i 2). Przy badaniu gleby w stanie suchym ocenia się sypkość, mączystość, szorstkość, twardość i śliskość. W stanie wilgotnym ocenie podlega lepkość, zwięzłość i zdolność do wałkowania (Turski i Słowińska-Jurkiewicz 1998).

Zestawienie 1. Cechy pomocnicze do określania składu granulometrycznego gleb w terenie (wg E. Barańskiego) (Turski i in. 1977, Turski i Słowińska-Jurkiewicz 1998)

Grupa mechaniczna	Określanie na podstawie obserwacji	Zachowanie się gleby w stanie	
		suchym	wilgotnym
1	2	3	4
Żwir piaszczysty	przewaga części żwirowych nad innymi frakcjami; części spławialnych brak lub bardzo mało	utwór sypki	utwór niepylasty
Żwir gliniasty	przewaga części żwirowych nad innymi frakcjami; znaczna domieszka części spławialnych	tworzy bryły żwiru scementowanego częściami spławialnymi; trzeba pewnego wysiłku, aby je złamać w ręku	części żwirowe zlepione częściami spławialnymi; części ziemiste wykazują dużą plastyczność

1	2	3	4
Piasek luźny	widoczne tylko cząstki piasku	utwór sypki; przy rozcieraniu w palcach szorstki	tworzy drobne agregaty, rozpadające się przy bardzo lekkim nacisku oraz przy wysychaniu; nie brudzi ręki
Piasek słabo gliniasty	widoczne części piaszczyste z małą ilością części drobniejszych	sypki, przy rozcieraniu szorstki; pozostaje niewielka ilość części spławialnych na palcach	nieplastyczny, tworzy agregaty ostrokrawędziste, rozpadające się przy lekkim nacisku mechanicznym; lekko brudzi palce przy rozcieraniu
Piasek gliniasty lekki	widoczne części piaszczyste, a także części spławialne	przy rozcieraniu wyczuwalny w przewadze piasek, lecz występują agregaty, które przy niewielkim nacisku mechanicznym rozpadają się; w porach skóry pozostają części spławiane	utwór nieplastyczny, tworzy agregaty ostrokrawędziste, które przy bardzo mały nacisku mechanicznym rozpadają się; brudzi wyraźnie palce przy rozcieraniu
Piasek gliniasty mocny	widoczna przewaga części piaszczystych, lecz dość dużo części drobniejszych	przy rozcieraniu wyczuwa się przewagę piasku, a także części spławialne; w porach skóry pozostaje znaczna ilość części spławialnych; tworzy drobne agregaty, które przy lekkim nacisku mechanicznym rozpadają się	tworzy agregaty ostrokrawędziste różnej wielkości, rozpadające się przy słabym nacisku na drobniejsze; przy rozcieraniu szorstki, brudzi palce i ma małą plastyczność, zlepia się, lecz jeszcze nie można wałkować sznureczka
Glina lekka	wyraźnie widoczne są ziarenka piasku na tle drobnego proszku	przy rozcieraniu wyczuwa się cząstki piasku; agregaty wymagają małego wysiłku, aby je skruszyć, rozpadają się na drobniejsze ostrokrawędziste	tworzy agregaty; w dotyku wyczuwa się wyraźną szorstkość; brudzi palce; plastyczność i lepkość niewielka; przy wałkowaniu nie otrzymuje się długiego sznurka

1	2	3	4
Glina średnia	widoczne są jeszcze ziarenka piasku na tle drobnego proszku	tworzy twarde agregaty ostrokrawędziste, rozpadające się na drobniejsze przy dość silnym nacisku mechanicznym; przy rozcieraniu wyczuwa się szorstkość; brudzi palce	tworzy agregaty umiarkowanie miękkie, nie rozpadające się przy nacisku mechanicznym; plastyczność i lepkość wyraźna; przy wałkowaniu otrzymuje się dość długi sznureczek; brudzi palce; daje się wygładzać do słabego połysku
Glina ciężka	na tle gliniastej masy widoczne nieliczne ziarenka piasku	tworzy agregaty bardzo twarde i zbite, ostrokrawędziste; silny nacisk mechaniczny kruszy je na odłamki drobniejsze; brudzi palce	tworzy twarde agregaty, przy nacisku mechanicznym kuleczka uformowana pęka na obwodzie; przy wałkowaniu można otrzymać długie i cienki sznureczki; brudzi silnie palce
Iły	jednolita drobnoziarnista masa	bardzo twardy i zbity, rozpada się pod bardzo silnym naciskiem mechanicznym na agregaty ostrokrawędziste; przy rozcieraniu w palcach jest śliski; nie wyczuwa się ziarenek piasku; brudzi palce, daje rysę polerowaną	tworzy agregaty ostrokrawędziste, różnej wielkości; bardzo plastyczny i lepki; w stanie wilgotnym przy rozcieraniu nie wyczuwa się piasku; przy wałkowaniu sznureczek jest długi i cienki; paznokciem wygładza się do połysku; silnie brudzi palce
Utwór pyłowy zwykły	jednolita drobnoziarnista masa; ziarenka piasku	może występować w stanie sypkim w postaci agregatów, które łatwo się kruszą przy nacisku mechanicznym na drobne agregaty; przy rozcieraniu słabo wyczuwalne ziarenka piasku; wrażenie suchej mąki	tworzy drobne agregaty, rozsypujące się przy lekkim nacisku mechanicznym, miękki w dotyku; przy rozcieraniu matowy, nie śliski, ale raczej nieco szorstki

1	2	3	4
Utwór pyłowy ilasty	jednolita drobnoziarnista masa; powierzchnia przełamu matowa	tworzy agregaty, które przy niewielkim nacisku mechanicznym rozsypują się na drobniejsze, przy rozcieraniu w palcach nie wyczuwa się piasku; pozostawia wrażenie suchej mąki, bardziej śliskiej niż przy utworze pyłowym zwykłym	jest plastyczny, lecz nie można wywałkować długiego i cienkiego sznureczka, gdyż kruszy się

Zestawienie 2. Cechy pomocnicze do określania składu granulometrycznego gleb w terenie na podstawie PTG (Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2008)

Opis ogólny	Cecha	Nazwa utworu
Nie można formować wałeczków lub tylko formują się wałeczki o średnicy ołówka (ok. 7 mm) i grubsze, wyraźnie wyczuwalna szorstkość ziaren piasku	nie brudzi palców, nie mączysty	piasek luźny
	słabo brudzi palce, nie plastyczny, tworzy nietrwałe agregaty, łatwo rozpadające się, nie mączysty	piasek słabogliniasty
	dość wyraźnie brudzi palce, słabo plastyczny, tworzy nietrwałe agregaty, niekiedy mączysty; formują się grube wałeczki i kulki	piasek gliniasty
	brudzi palce, słabo plastyczny, tworzy dość trwałe agregaty, niekiedy mączysty; formują się wałeczki grubości ołówka i cieńsze, ale łamliwe pod słabym naciskiem	glina piaszczysta
Można formować wałeczki o średnicy 3-7 mm (pół	silnie mączysty i słabo spoisty - wyczuwalne ziarna piasku	pył gliniasty

grubości ołówka), łamliwe przy próbie skręcania w pierścień średnicy 2-3 cm; dość wyraźnie spoisty, przywiera do palców	silnie mączysty i słabo spoisty - nie wyczuwalne ziarna piasku	pył zwykły
	średnio spoisty, przywiera do palców, przy rozcieraniu w palcach daje powierzchnie szorstką i matową, nie śliską, bardzo wyraźnie wyczuwalne szorstkie ziarna piasku, słabo przywiera do palców	glina lekka
	średnio spoisty, przywiera do palców, przy rozcieraniu w palcach daje powierzchnie szorstką i matową, nie śliską, wyraźnie wyczuwalne szorstkie ziarna piasku	glina zwykła
	średnio spoisty, przywiera do palców, przy rozcieraniu w palcach daje powierzchnie szorstką i matową, nie śliską, nie wyczuwalne ziarna piasku, za to wyraźnie mączysty i dość wyraźnie lepki	pył ilasty
	przy rozcieraniu w palcach utwór matowy lub nieco błyszczący, wyraźnie przywiera do palców, wyraźnie wyczuwalne ziarna piasku	glina piaszczysto-ilasta
Można formować wałeczki o średnicy 3 mm (mniej niż połowy grubości ołówka) i skręcać w pierścień o średnicy 2-3 cm; spoisty, silnie przywiera do palców, przy rozcieraniu w palcach daje powierzchnie średnio lub silnie błyszcząca	wyraźnie widoczne i wyczuwalne ziarna piasku	ił piaszczysty
	pojedyncze widoczne i w dotyku niekiedy wyczuwalne ziarna piasku; plastyczny, po roztarciu powierzchnia średnio błyszcząca	glina ilasta
	pojedyncze widoczne i w dotyku niekiedy wyczuwalne ziarna piasku; bardzo plastyczny, po roztarciu powierzchnia wyraźnie błyszcząca	ił zwykły
	ziarna piasku nie widoczne i nie wyczuwalne; średnio plastyczny	glina pylasto-ilasta

ziarna piasku nie widoczne i nie wyczuwalne bardzo plastyczny, po roztarciu powierzchnia średnio błyszcząca	ił pylasty
ziarna piasku nie widoczne i nie wyczuwalne; bardzo plastyczny, po roztarciu powierzchnia wyraźnie błyszcząca	ił ciężki

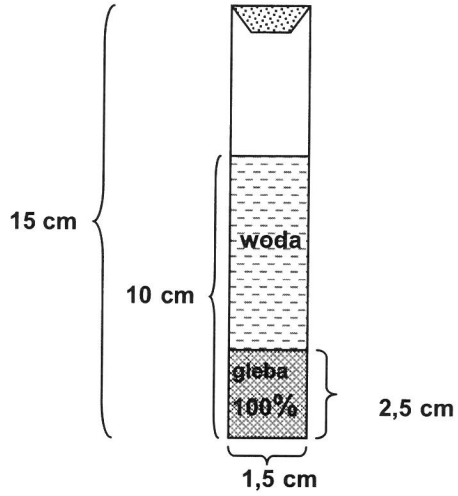
Poprawne określenie gatunku gleby metodą palcową wymaga dużego doświadczenia.

7. 2. Metoda wykorzystująca przyrząd Kruedenera

Przyrząd Kruedenera to specjalna probówka pozwalająca w przybliżeniu określić w terenie zawartość trzech głównych frakcji (w nawiązaniu do podziału PTG sprzed 2008 r.):

- piasku > 0,1 mm;
- pyły 0,1-0,02 mm;
- części spławialnych < 0,02 mm.

Probówka ta, o płaskim dnie, ma wysokość 15 cm i średnicę 1,5 cm, jest wyposażona na dole w 2,5 cm skalę podzieloną na 100 równych części (Borowiec i in. 1967) (rys. 8). Aby przeprowadzić taką uproszczoną analizę należy do próbówki wsypać glebę do wysokości 2,5 cm, uzupełnić wodą do wysokości 10 cm, a na-stępnie po zatkaniu korkiem wytrząsać przez 5 minut. Potem próbówkę należy postawić na płaskim podłożu i zacząć mierzyć czas opadania cząstek. Po 5 sekundach opadną cząstki najgrubsze (> 0,1 mm) – odczytana ilość kresek na podziałce odpowiadać będzie frakcji piasku. Kolejny odczyt należy dokonać po 7,5 min. Różnica ilości kresek z drugiego i pierwszego odczytu da informację o procentowej zawartości frakcji pyłu (0,1-0,02 mm). Zawartość frakcji spławialnej oblicza się odejmując od 100% zawartość frakcji piasku i pyłu (Borowiec i in. 1967).



Rys. 8. Schemat rurki Kruedenera (za Borowiec i in. 1967 – zmodyfikowany)
Fig. 8. Diagram of the Kruedener tube (after Borowiec i in. 1967 – modified)

Metody opisane w punktach 7.1 i 7.2 należą do metod przybliżonych, które można z łatwością zastosować w warunkach polowych, zaś metody opisane poniżej są metodami laboratoryjnymi.

7.3. Metoda sitowa

Metoda sitowa służy do oddzielenia frakcji szkieletowych (cząstek o średnicach >1mm wg klasyfikacji PTG sprzed 2008 r.) od części ziemistych gleby oraz do oznaczania zawartości poszczególnych frakcji piasku w częściach ziemistych gleby (Mocek i in. 2000). Jest najprostszą i najbardziej popularną metodą analizy wielkości cząstek (Allen 2003). W celu rozdzielenia frakcji szkieletowych od ziemistych próbkę powietrznie suchej gleby o określonej masie rozciera się delikatnie pistlem w moździerzu porcelanowym, a następnie przesiewa się przez sito o średnicy oczek 1 mm. Na sicie pozostają części szkieletowe, zaś przez sito przechodzą części ziemiste. Procentową zawartość części szkieletowych wylicza się ze wzoru (Mocek i in. 2000):

$$\% \text{ części szkieletowych} = \frac{\text{masa}}{\text{masa przesiewanej próbki}} \qquad (3)$$

Części ziemiste, które przeszły przez sita można dalej rozdzielić na poszczególne frakcje przesiewając próbkę przez sita o odpowiednich średnicach oczek.

Zgodnie z Normą PN-R-04032 do analizy metodą sitową stosuje się zestaw sit o średnicach oczek 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,1, 0,06 (0,063) lub 0,071 mm (0,074 mm) z podkładką i przykrywką. Na górne sito zadaje się określoną ilość gleby, zaś całość umieszcza się w wytrząsarce i wytrząsa przez 5 minut. Na poszczególnych sitach uzyskuje się rozdzielone frakcje. Ważąc każdą z frakcji pozostałych na sitach można określić jej procentowy udział w badanej glebie według wzoru (Mocek i in. 2000):

$$F = \frac{M_f}{s} \cdot 100\%, \qquad (4)$$

gdzie: F – procentowa zawartość danej frakcji w glebie, M_f – masa frakcji (g), s – naważka gleby (g).

Porównując wyniki uzyskane z metody sitowej należy pamiętać, że wynik zależy od kształtu otworów w sicie; wyniki uzyskane z sit o oczkach kwadratowych nie będą równoważne z wynikami uzyskanymi z sita o okrągłych oczkach (Skopp 2002).

Według Day'a (1965) prawdopodobieństwo przejścia cząstki przez dane sito w określonym czasie wytrząsania zależy zarówno od właściwości cząstek jak i właściwości sita, zaś Allen (1975) podkreśla, że prawdopodobieństwo przejścia cząstki przez oczko sita zależy od: rozkładu wielkości cząstek na sicie, ilości cząstek na sicie, właściwości fizycznych cząstek (kształtu i powierzchni cząstek), sposobu wytrząsania sitem. Przykładowo cząstka, której kształt pozwala na przejście przez dane oczko sita tylko przy określonej orientacji względem sita ma mniejsze szanse na przejście przez sito, chyba że przedłuży się czas wytrząsania. Ponadto oczka w sicie nie są zazwyczaj jednakowych rozmiarów dlatego konieczne jest wydłużenie czasu wytrząsania tak, by wszystkie cząstki mogły mieć szansę przejścia przez największe otwory w sicie. Wyniki uzyskane przy użyciu metod sitowych dają przeważnie zaniżone wyniki pomiaru wielkości cząstek, ze względu na możliwość przejścia przez oczko sita większych cząstek. Dzieje się tak w przypadku, gdy jeden z wymiarów cząstki jest mniejszy od średnicy oczka sita. W wyniku wytrząsania sitem cząstka może ustawić się swoim najmniejszym wymiarem w stosunku do sita i przejść przez sito mimo większego rozmiaru w przypadku innej orientacji w stosunku do sita, co obrazuje rysunek 9.

Norma PN-ISO 11277 określa minimalną masę próbki jaką należy wziąć do analizy, w zależności od wielkości cząstek (tab. 9), oraz maksymalną masę materiału zatrzymywanego na danym sicie (tab. 10) w zależności od wielkości otworów sita oraz jego średnicy.

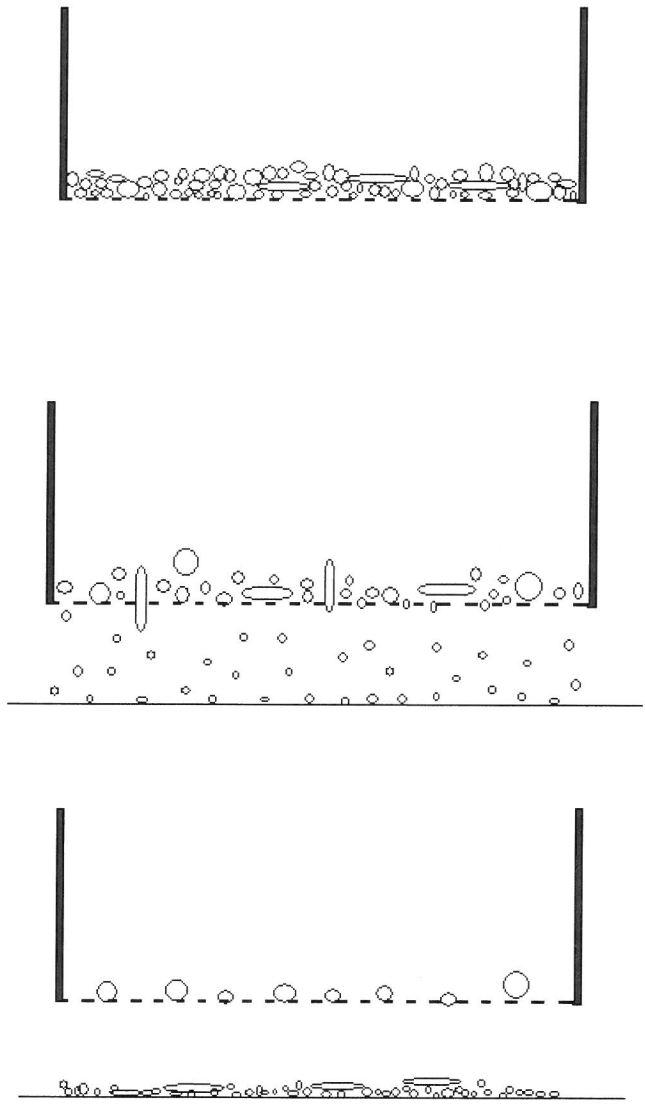
Dokładne wymagania dotyczące sit stosowanych do analiz zawarto w normach (ISO 565 1990, ISO 3310-1 1990, ISO 3310-2 1990).

Metody sitowe są nieskuteczne dla cząstek poniżej 50 μm. Dlatego dla tych cząstek alternatywnie stosuje się metody sedymentacyjne (Skopp 2002).

a

b

c



Rys. 9. Przebieg wytrząsania próbki na sicie: a) próbka przed wytrząsaniem, b) w trakcie wytrząsania, c) po wytrząsaniu

Fig. 9. Course of sample shaking on the sieve a) sample before shaking, b) during shaking, c) after shaking

Tabela 9. Masa próbki glebowej potrzebna do analizy sitowej wg PN-ISO 11277
Table 9. Mass of soil sample necessary for sieve analysis according to PN-ISO 11277

Maksymalna wielkość materiału stanowiącego > 10% gleby (podana jako wielkość otworów sita do analiz) Maximal size of material making > 10% of soil (mentioned as a size of sieve mesh for analysis) (mm)	Minimalna masa próbki, którą bierze się do przesiewania Minimal mass of sample which is taken for screening (kg)
63	50
50	35
37,5	15
28	6
20	2
14	1
10	0,5
6,3	0,2
5	0,2
≥ 2	0,1

Tabela 10. Maksymalna masa materiału zatrzymywanego na każdym z sit po zakończeniu przesiewania wg PN-ISO 11277
Table 10. Maximal mass of material remaining on each sieve after sieving according to PN-ISO 11277

Wymiary otworów sit do analiz Dimensions of sieve mesh for analysis (mm)	Maksymalna masa – Maximal mass (kg) Średnica sita - Sieve diameter (mm)		
	450	300	200
50	10	4,5	
37,5	8	3,5	
28	6	2,5	
20	4	2,0	
14	3	1,5	
10	2	1,0	
6,3	1,5	0,75	
5	1,0	0,5	
3,35			0,3
2			0,2
1,18			0,1
0,600			0,075
0,425			0,075
0,300			0,050
0,212			0,050
0,150			0,040
0,063			0,025

7.4. Metody sedymentacyjne

Metody sedymentacyjne opierają się na pomiarze prędkości opadania cząstek glebowych różnej wielkości w wodzie stojącej (Borowiec i in. 1967, Turski i in. 1977). Podstawą metod sedymentacyjnych jest fakt równoważenia się sił działających na cząstkę będącą w cieczy, co sprawia, że opada ona na dno ruchem jednostajnym. Rozważając siły działające na cząstkę: do dołu siła grawitacji F_g, do góry siła wyporu F_w (wynikająca z prawa Archimedesa) oraz siła tarcia F_t (wynikająca z lepkości ośrodka, wyrażona wzorem Stokesa), można zapisać :

$$F_g = F_w + F_t, \tag{5}$$

gdzie : F_g = mg, F_w = m_{cw}g, F_t = $6\pi\eta r \upsilon$, m – masa cząstki, g – przyspieszenie ziemskie, m_{cw} – masa cieczy wypartej przez cząstkę, η – lepkość cieczy, r – promień cząstki zanurzonej w cieczy, υ – prędkość opadania cząstki w cieczy.

Ponieważ nie jest znana masa pojedynczej cząstki znajdującej się w cieczy, masę cząstki m można uzależnić od jej promienia r, zakładając że wszystkie cząstki są kuliste. Masę cząstki można zapisać jako :

$$m = \rho v = \rho \frac{4}{3} \pi r^3, \tag{6}$$

gdzie: v – objętość cząstki kulistej, ρ – gęstość substancji, z której jest zbudowana cząstka.

Wstawiając zależność (6) do równania (5) oraz uwzględniając wzory definiujące F_g, F_w i F_t otrzymamy:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{cw} + 6 \pi \eta r \upsilon, \tag{7}$$

gdzie : ρ_{cw} – gęstość cieczy, w której jest zanurzona cząstka.

Wyliczając szybkość opadania cząstki ze wzoru (7) otrzymamy:

$$\upsilon = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_g - \rho_{cw}}{\eta}, \tag{8}$$

Prędkość w ruchu jednostajnym wyraża się wzorem:

$$v = \frac{h}{t}, \tag{9}$$

gdzie: h – droga jaką przebywa cząstka podczas opadania, t – czas opadania.

Porównując wzory (8) i (9) można wyprowadzić zależność między czasem opadania cząstki a jej promieniem:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2gt(\rho_g - \rho_{cw})}}, \tag{10}$$

lub między jej średnicą ($d = 2r$) :

$$d = \sqrt{\frac{18\eta h}{gt(\rho_g - \rho_{cw})}}. \tag{11}$$

Mierząc czas opadania cząstek można wyliczyć ich promienie lub średnice. Zgodnie z równaniem (11) najszybciej opadają cząstki o największych średnicach, zaś najwolniej cząstki najmniejsze.

W pomiarach metodami sedymentacyjnymi zakłada się, że spełnione są następujące założenia (PN-ISO 11277, 2005):

a) cząstki gleby są twardymi, gładkimi kuleczkami,
b) zawiesina ma liczbę Reynoldsa mniejszą niż około 0,2 tzn. jest cieczą, w której cząstki osiadają ruchem laminarnym,
c) cząstki gleby w zawiesinie są w takim rozcieńczeniu, że żadna cząstka nie zakłóca osiadania innej cząstki,
d) nie występują interakcje pomiędzy cząstkami a cieczą,
e) średnica kolumny zawiesiny, w porównaniu ze średnicą cząstki, jest duża, tzn. ciecz jest „nieskończenie wielka",
f) cząstki gleby osiągnęły prędkość końcową,
g) cząstki gleby mają tę samą gęstość właściwą.

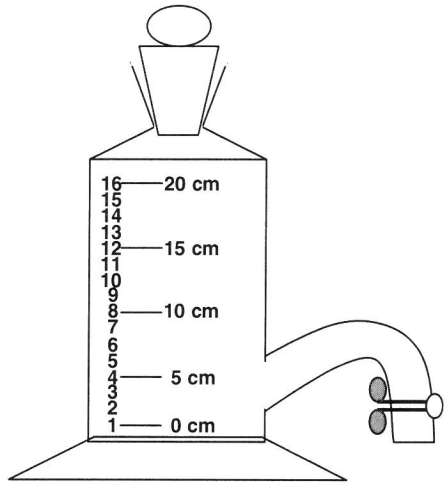
Istnieje wiele metod pozwalających wyznaczyć rozkład granulometryczny cząstek w oparciu o zjawisko sedymentacji. Do najważniejszych metod sedymentacyjnych należą:

a) metoda Atterberga,
b) metoda pipetowa Kohna,
c) metoda pipetowa w modyfikacji Rząsy,
d) metoda areometryczna Casagrande'a i metoda Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego,
e) metoda fotosedymentacji,
f) metoda wykorzystująca promienie gamma,
g) metoda wykorzystująca promienie X,
h) waga sedymentacyjna.

7.4.1. Metoda Atterberga

Do pomiaru rozkładu granulometrycznego metodą Atterberga stosuje się specjalne cylindry. Posiadają one podziałki wskazujące wysokość słupa cieczy i liczby godzin, po upływie których z danej wysokości opadają cząstki o większe

od 0,002 mm. U dołu cylindra jest odpływ zakończony rurką gumową ze ściskaczem umożliwiający zlewanie zawiesiny znad osadu na dnie naczynia (Borowiec i in. 1967) (rys. 10).



Rys. 10. Schemat aparatu Atterberga (za (Uggla 1979) – schemat zmodyfikowany)
Fig. 10. Diagram of Atterberg apparatus (after (Uggla 1979) – modified diagram)

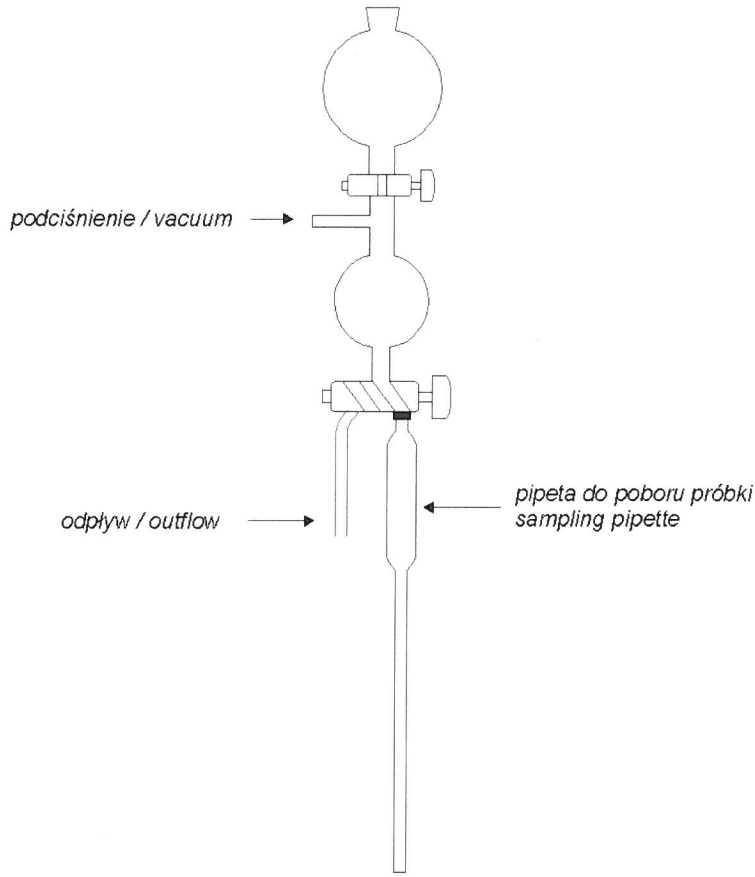
Po wymieszaniu zawiesiny i odczekaniu określonego czasu zawiesinę glebową zlewa się do odpowiedniego naczynia. Czynność tę powtarza się tak długo, aż roztwór nad osadem w cylindrze będzie klarowny. Następnie zebrane w naczyniach zawiesiny należy odparować, zważyć i obliczyć procentową zawartość danej frakcji (Uggla 1979). Mierząc rozkład cząstek metodą Atterberga można oznaczyć zawartość następujących frakcji: 0,25-0,10; 0,10-0,05; 0,05-0,02; 0,02-0,005; 0,005-0,002 mm; < 0,002 mm (Borowiec i in. 1967).

7.4.2. Metoda pipetowa

Metoda pipetowa polega na pobieraniu z górnej warstwy zawiesiny wody i gleby pewnej objętości cieczy przy pomocy pipety (rys. 11). Zgodnie z równaniem (10) po czasie t w zawiesinie na danej głębokości h znajdują się cząstki o promieniu r.

Próbki, przygotowane w odpowiedni sposób (por. rozdział 5) i właściwie zdyspergowane (por. rozdział 6), umieszczane są w cylindrze miarowym objętości 0,5 dm^3 lub 1 dm^3. Na podstawie odpowiednich tabel wyznacza się czasy pobierania próbek zawiesiny, odpowiadające czasom opadania kolejnych frakcji granulometrycznych. Po dokładnym wymieszaniu zawartości cylindra, na

zadanej głębokości (10 cm), przy użyciu pipety o znanej objętości pobierane są próbki zawiesiny. Próbki umieszczane w wytarowanych zlewkach są następnie odparowywane i suszone. Na podstawie masy próbki po wysuszeniu określa się zawartość cząstek o danej średnicy w całej badanej próbce gleby. Zalecana objętość pipety to około 20 cm^3, wymagana jest odpowiednia kalibracja każdej używanej pipety – konstrukcja zakłada podciśnieniowe zaciąganie zawiesiny nie „do kreski" ale do maksymalnej objętości pipety.



Rys. 11. Pipeta stosowana w metodzie pipetowej (za PN-ISO 11277: 2005, zmodyfikowane)
Fig. 11. Pipette used in the pipette method (after PN-ISO 11277: 2005, modified)

Metoda Atterberga i metoda pipetowa są uważane za bardzo dokładne, zaś ich wadą jest to, że są pracochłonne i czasochłonne (Borowiec i in. 1967, Turski i in. 1977). Niemniej jednak metoda pipetowa jest w chwili obecnej najczęściej wykorzystywaną w świecie metodą sedymentacyjną (Beuselinck i in. 1998, Buurman i in. 2001, Konert i Vandenberghe 1997, Ramaswamy i Rao 2006).

7.4.3. Metoda pipetowa w modyfikacji Rząsy

W niektórych metodach sedymentacyjnych, np. metodzie Atterberga pomiar rozkładu granulometrycznego polega na separacji określonej frakcji, zaś cały rozkład otrzymuje się odejmując od 100% wyznaczone oddzielnie frakcje.

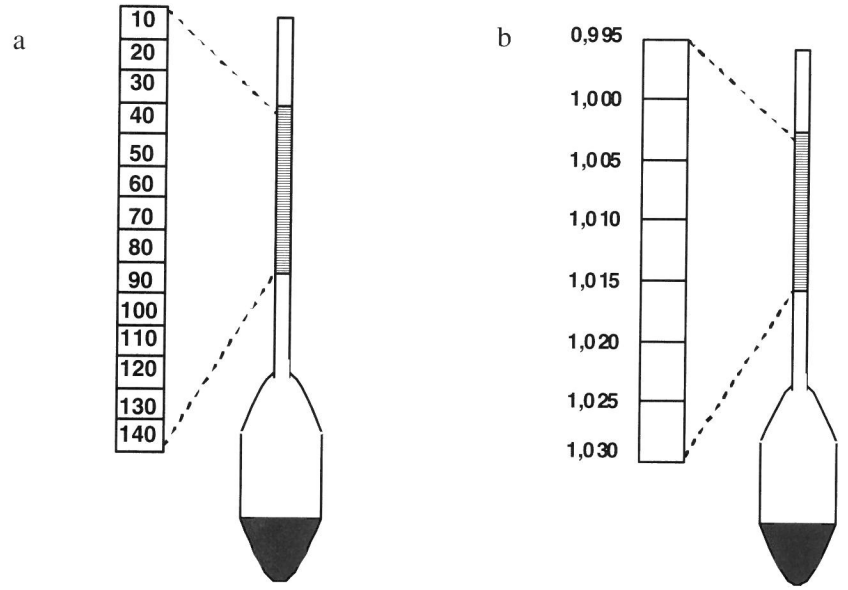
Metodę zaproponowana przez Rząsę można określić jako pewnego rodzaju połączenie metody pipetowej Köhna oraz cylindra Atterberga. Metoda ta dzięki aparatowi specjalnej konstrukcji pozwala na przeprowadzanie analiz znacznie szybciej i z większą precyzją, niż to miało miejsce w przypadku metody Atterberga. Dodatkową zaletą tej metody jest możliwość całościowego analizowania próbki, tzn. można uzyskać informacje o zawartości procentowej następujących frakcji: <0,002, 0,002-0,005, 0,005-0,02, 0,02-0,05, 0,05-0,1 mm oraz 0,01-0,25, 0,25-0,5 i 0,05-2,0 mm. Przy czym frakcja 0,05-0,1 mm pozostaje na dnie cylindra i na koniec analizy jest przenoszona do odpowiedniego naczynia i odparowywana. Frakcje 0,1-0,25, 0,25-0,5 mm oraz 0,5-2,0 mm określa się z materiału pozostałego na sicie, gdyż po odpowiednim zdyspergowaniu próbka przed przeniesieniem do cylindra jest przesiewana na mokro przez sito o średnicy oczek 0,1 mm. Procentową zawartość frakcji piasku określa się po jej wysuszeniu i ponownym przesianiu na sucho. Metoda ta zastosowana w praktyce przez Rząsę do analizy próbek glebowych dawała po zsumowaniu wszystkich frakcji wartości w zakresie 99,6-100,4% co potwierdzało jej dużą dokładność (Rząsa 1983, Rząsa i Kokowski 1983).

7.4.4. Metoda areometryczna

Najczęściej stosowaną w Polsce metodą sedymentacyjną jest metoda areometryczna Casagrande'a. W klasycznej postaci metoda ta polega na pomiarze areometrem gęstości zawiesiny glebowej w takich odstępach czasu, w jakich z tej zawiesiny opadają kolejno frakcje cząstek glebowych o określonej (coraz mniejszej) średnicy (PN-ISO 11277: 2005, Turski i Słowińska-Jurkiewicz 1998, Uggla 1979). Uzyskanie wyników pomiarów przeprowadzonych tą metodą wymagało wykonywania wielu obliczeń i wykresów. Modyfikacja tej metody wprowadzona przez Prószyńskiego polegała na zastosowaniu areometru własnej konstrukcji

oraz opracowaniu tablic sedymentacji, co pozwoliło na bezpośrednie określanie procentowej zawartości cząstek pozostających w zawiesinie w momencie pomiaru.

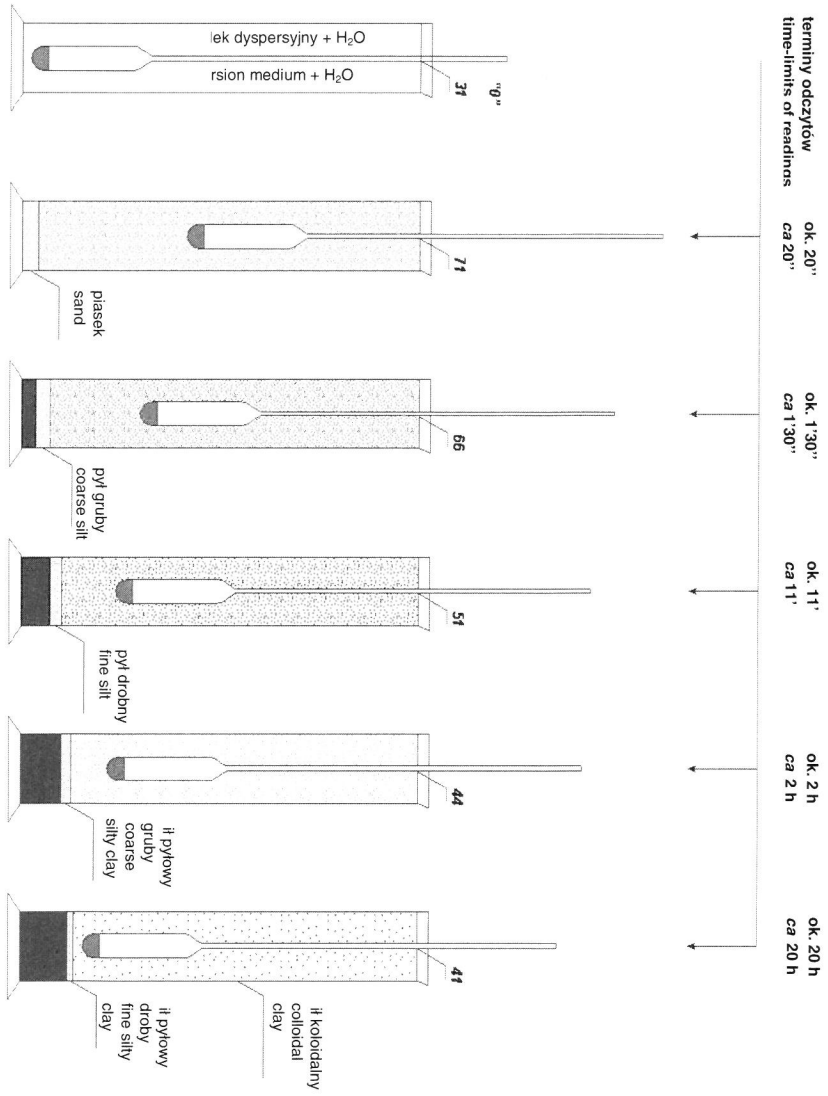
Głębokość zanurzenia areometru w zawiesinie zależy od gęstości zawiesiny, która zmienia się w czasie, gdyż na dno naczynia z badaną zawiesiną opadają kolejne frakcje cząstek o coraz mniejszych średnicach.



Rys. 12. a) Schemat areometru Prószyńskiego, b) schemat areometru wg normy PN-ISO 11277
Fig. 12. a) Diagram of Prószyński areometer, b) diagram of areometer according to PN-ISO 11277

Oznaczenie rozkładu granulometrycznego gleby metodą Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego wymaga wykonania wstępnego pomiaru po około 10 minutach od wymieszania zawiesiny. Pomiar ten pozwala określić przybliżoną zawartość frakcji <0.02 mm a tym samym umożliwia dobór odpowiedniej tablicy sedymentacji, z której w zależności od temperatury otoczenia znajduje się czasy, po upływie których należy dokonać odczytu na areometrze by wyliczyć udział danej frakcji cząstek w badanej glebie.

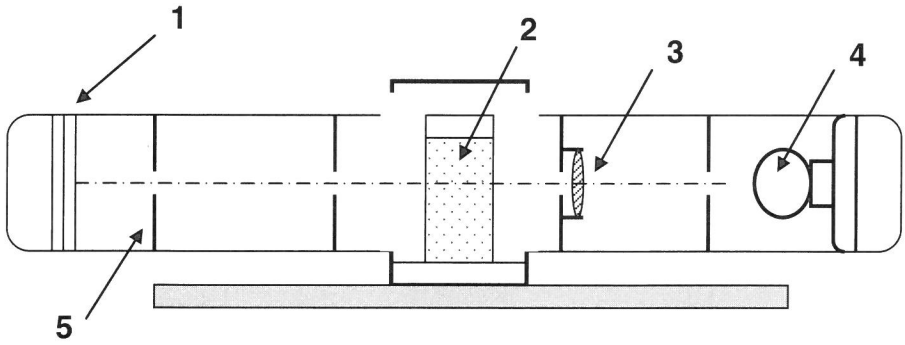
Pomiar trwa około 24 godziny (tyle czasu może upłynąć zanim na dno cylindra opadną cząstki o średnicy 0,002 mm – czas trwania pomiaru zależy od temperatury w jakiej jest wykonywany pomiar oraz od zawartości w glebie cząstek o średnicach poniżej 0,002 mm). Szczegółowy opis postępowania przy pomiarze tą metodą znaleźć można w literaturze (Domżał i in. 1976, Turski i in. 1977, Turski i Słowińska-Jurkiewicz 1998).



Rys. 13. Przebieg analizy metodą areometryczną Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego
Fig. 13. Run of analysis using the Casagrande areometer method in Prószyński modification

7.4.5. Metoda fotosedymentacyjna

Metoda fotosedymentacyjnego pomiaru rozkładu wielkości cząstek jest metodą łączącą zjawisko grawitacyjnego osiadania cząstek w zawiesinie z pomiarem fotoelektrycznym (Allen, 1975). W trakcie pomiaru wąska wiązka równoległego światła przechodzi przez zawiesinę na określonej wysokości *h*, licząc od poziomu zawiesiny. Zakładając początkowo jednorodność zawiesiny, przyjmuje się, że koncentracja cząstek znajdujących się na drodze wiązki padającego światła jest taka sama jak koncentracja cząstek w całej zawiesinie, mierzy się natężenie światła padającego na fotokomórkę. Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek:



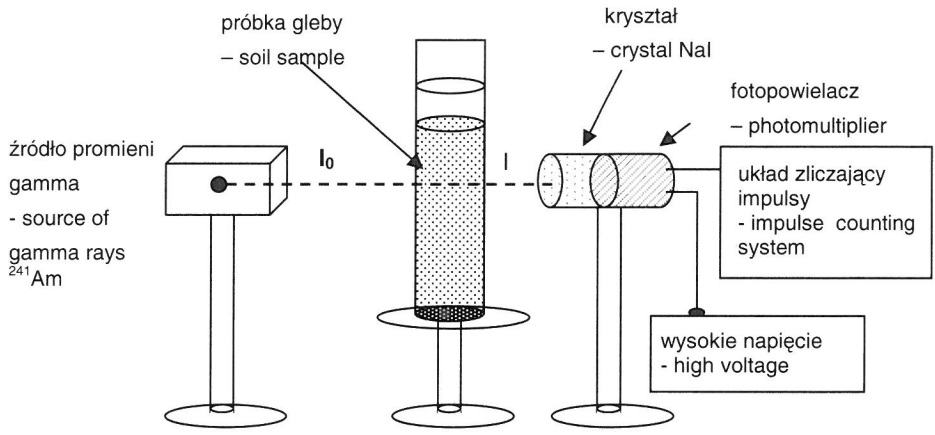
Rys. 14. Schemat aparatu do metody fotosedymentacyjnej: 1 – fotokomórka, 2 – cela pomiarowa, 3 – soczewka, 4 – źródło światła (żarówka), 5 – przesłona.
Fig. 14. Diagram of apparatus for the photosedimentation method: 1 – photocell, 2 – measuring cell, 3 – lens, 4 – source of light (bulb), 5 – diaphragm

Koncentracja cząstek w zawiesinie nie jest stała i zmienia się z upływem czasu trwania pomiaru. Na podstawie pomiaru intensywności światła padającego na fotokomórkę można, stosując komputerowe przeliczenia, określić rozkład wielkości cząstek w badanej próbce.

Pomiary przeprowadzone na aparacie Analysette 20 mierzącym wielkość cząstek na zasadzie fotosedymentacji przedstawia Issmer (2000). Aparat ten pozwala na pomiar cząstek z zakresie 0,- 500 μm. Cramp i in. (1997) podkreślają, że aparaty typu Sedigraph nie mają ograniczeń co do koncentracji próbki, ale zalecana jest koncentracja wynosząca około 5% objętości. Jako główną przyczynę niedokładności pomiarów wymieniają niedokładne określenie gęstości badanego materiału, co może spowodować dominację frakcji, która nie ma znaczącego udziału w badanej próbce. Dla cząstek powyżej 63 μm zalecają przeprowadzanie pomiarów w cieczy o większej lepkości niż woda, aby duże cząstki nie opadały zbyt szybko.

7.4.6. Metody wykorzystujące promienie gamma

Zastosowanie promieniowania gamma do pomiaru rozkładu granulometrycznego cząstek w glebie przedstawiają w swoich pracach Vaz i in. (1992, 1999) oraz Oliveira i in. (1997). Zaprezentowana przez nich metoda pomiaru opiera się na zjawisku sedymentacji. Pomiar nie powoduje zakłóceń tego procesu przez, jak to ma miejsce w metodzie pipetowej (podczas pobierania zawiesiny pipetą) lub w metodzie areometrycznej (podczas umieszczania areometru w zawiesinie). W trakcie pomiaru wykorzystuje się zjawisko tłumienia promieni gamma przez materię (zawiesinę glebową). Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 15.



Rys. 15. Schemat aparatu do analizy z wykorzystaniem promieni gamma
Fig. 15. Diagram of apparatus for analysis using gamma radiation

Przed pomiarem z próbki gleby sporządza się zawiesinę poprzez dodanie do gleby wody destylowanej z dodatkiem NaOH, następnie zawiesinę umieszcza się w plastikowym cylindrze pomiarowym. Źródło promieni gamma stanowi ^{241}Am, który umieszcza się naprzeciwko fotopowielacza wyposażonego w kryształ scyntylacyjny NaI, który służy jako detektor promieniowania. Fotopowielacz jest podłączony do układu zliczającego zarejestrowane przez detektor promieniowanie. Na podstawie pomiaru, korzystając ze wzoru (12) wylicza się koncentrację cząstek w zawiesinie:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{X\left(\frac{\mu_p - \mu_w}{D_p}\right)}, \qquad (12)$$

gdzie : C – koncentracja zawiesiny,
I_0 – natężenie promieniowania gamma po przejściu przez układ pomiarowy bez gleby,
I – natężenie promieniowania gamma po przejściu przez układ pomiarowy z badaną glebą,
X – wewnętrzna grubość pojemnika, w którym przeprowadzany jest pomiar,
μ_p – współczynnik pochłaniania promieni gamma przez glebę,
μ_w – współczynnik pochłaniania promieni gamma przez wodę,
D_p – gęstość gleby.

W metodzie opisanej przez Vaza i in. (1999) natężenie promieniowania I (wyrażone liczbą zliczeń na sekundę) mierzone jest w dwóch położeniach detektora na ściance zbiornika. Pierwsze położenie znajduje się w pobliżu dna naczynia (mierzone tam natężenie I_1 pozwala wyznaczyć koncentracja cząstek o średnicach $\leq$50 μm), zaś drugie w pobliży powierzchni badanej zawiesiny (mierzone tam natężenie I_2 pozwala wyliczyć koncentrację cząstek o średnicach $\leq$2 μm). Czas w jakim należy wykonać pomiar w danym położeniu detektora jest wyliczony z prawa Stokesa. Wyniki uzyskane tą metodą nie dają pełnej krzywej rozkładu granulometrycznego, a jedynie określają procentową zawartość frakcji iłu, pyłu i piasku.

Zastosowanie opisanej metody dla 10 gleb pozwoliło uzyskać prawie liniową korelację z tradycyjną metodą pipetową ($r^2 = 0.976$) dla wszystkich frakcji (Vaz i in. 1999). Uzyskanie dokładniejszych informacji o krzywej rozkładu jest możliwe, ale wymaga przeprowadzenia dodatkowych pomiarów na różnych wysokościach słupa zawiesiny.

7.4.7. Metody wykorzystujące promienie Roentgena

Podobnie jak promienie gamma, również promienie Roentgena mogą być stosowane do pomiaru rozkładu granulometrycznego cząstek. Pochłanianie promieni X przez materię opisuje wzór:

$$I = I_0 e^{(-B C)}, \qquad (13)$$

gdzie : I_0 – natężenie promieniowania X,
I – natężenie promieniowania X po przejściu przez materię,
B – stała,
C – koncentracja cząstek, na które pada wiązka promieniowania X.

Zastosowanie promieni X do metod sedymentacyjnych zasugerowali w 1954 r. Brown i Skrebowski (Allen 1975). W aparatach wykorzystujących promienie X układ pomiarowy składa się ze źródła promieniowania rentgenowskiego, naczynia z mierzoną zawiesiną oraz z licznika scyntylacyjnego który pełni rolę detektora promieniowania. W trakcie pomiaru rejestruje się intensywność promieniowania po przejściu przez pojemnik zawierający mierzoną zawiesiną i porównuje się ją z intensywnością promieniowania zarejestrowaną po przejściu promieni X przez jednakowy pojemnik wypełniony taką samą cieczą, lecz nie zawierającą mierzonych cząstek. Na podstawie różnicy między intensywnością promieniowania wylicza się koncentrację cząstek na danej wysokości od powierzchni zawiesiny, co daje informacje o zawartości poszczególnych frakcji w badanej próbce. Z wykorzystaniem promieni X mierzy się wielkości cząstek w zakresie 0,2-50 μm.

7.4.8. Waga sedymentacyjna

Waga sedymentacyjna jest urządzeniem służącym do przeprowadzenia analizy wielkości cząstek fazy stałej. Zasadniczym elementem wag sedymentacyjnych jest cylinder z zawieszoną w nim swobodnie nad dnem szalką urządzenia ważącego, na którą opadają cząstki podczas pomiaru. Waga rejestruje masę próbki osiadającej na szalce w trakcie trwania pomiaru. Dokonując odpowiednich obliczeń można wyznaczyć procentową zawartość cząstek o określonych średnicach w badanej próbce (Andrzejewski i Gutowski 1968, Gliński i Konstankiewicz 1991).

7.4.9. Metody odwirowywania

Metody sedymentacyjne oparte na grawitacyjnym opadaniu cząstek są bardzo czasochłonne. Dla cząstek poniżej 5 μm, ze względu na długi czas opadania tak małych cząstek metody są mało dokładne, ponieważ opadanie cząstek jest zakłócone ruchami Browna (Allen 1975). Proces opadania cząstek można przyspieszyć stosując odwirowywanie badanej zawiesiny w specjalnych wirówkach. Podczas odwirowywania prędkość opadania cząstek zależy nie tylko od ich średnicy, ale również od odległości cząstek od osi obrotu. Podczas pomiaru średnicę cząstki wyznacza się ze wzoru:

$$d_m = \sqrt{\frac{18\,\eta \ln\left(\frac{r}{S}\right)}{(\rho_g - \rho_{cw})\omega^2 t}}, \qquad (14)$$

gdzie: d_m – średnica cząstek, które po czasie t, znajdą się w odległości r,
η - lepkość cieczy, w której znajdują się cząstki,
r – odległość cząstki od osi obrotu po upływie czasu t,
S - początkowa odległość cząstki od osi obrotu, liczona od powierzchni zawiesiny,
ρ_g – gęstość badanych cząstek,
ρ_{cw} – gęstość zawiesiny,
ω – prędkość kątowa, z jaką jest odwirowywana zawiesina,
t – czas trwania odwirowywania.

Metody odwirowywania stosowane są głównie do oddzielenia frakcji najdrobniejszych.

Ze stosowaniem metod sedymentacyjnych wiąże się wiele kłopotów (Cooper i in. 1984):

- są one bardzo czasochłonne, szczególnie gdy trzeba wykonać pomiary wielu próbek,
- sposób przygotowywania próbek przed pomiarem może zmienić sedymentacyjną charakterystykę badanej próbki,
- rezultat pomiaru zależy od stosowanej techniki.

Według badań przeprowadzonych przez Allena i in. (1996) wynika, że: cienkie blaszkowate cząstki opadają znacznie wolniej niż przyjęte dla nich kule równoważne, co jest przyczyną uzyskiwania zawyżonych wyników pomiarów dla tych cząstek. Dla cząstek, których średnica kuli równoważnej wynosi poniżej 1 μm ruchy Browna zakłócają opadanie cząstek pod wpływem sił grawitacji i mogą być głównym czynnikiem wpływającym na ruch cząstek.

Podsumowując metody sedymentacyjne należy wskazać ich ograniczenia, które wymienia Rawle (2002):

- metody sedymentacyjne dają zaniżone wyniki w przypadku cząstek, których kształt odbiega od sferycznego,
- dobrze mierzą wielkość cząstek w zakresie 2-50 μm (w przypadku mniejszych cząstek występują zakłócenia opadania spowodowane ruchami Browna; zaś większe cząstki opadają zbyt szybko i niejednostajnie, co jest sprzeczne z prawami opisującymi sedymentację),
- nie nadają się do pomiaru cząstek emulsji, bo cząstki te nie opadają,

- drobne materiały opadają zbyt wolno z prędkością kilku milimetrów na godzinę, co bardzo wydłuża czas pomiaru, chcąc przyspieszyć opadanie stosuje się wirówki, co ogranicza górny zakres pomiaru, bo duże cząstki poruszają się zbyt szybko,
- nie można jednocześnie mierzyć cząstek o różnych gęstościach,
- w przypadku stosowania promieni gamma lub X konieczna jest kontrola promieniowania w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy osobom przeprowadzającym pomiary.

7.5. Metody sitowo-sedymentacyjne

a) Metoda sitowo-areometryczna – PN-R-04032: 1998

Przeprowadzanie analizy rozkładu granulometrycznego tą metodą jest czasami nazywane w gleboznawstwie jako „poprawka piaskowa" do metody areometrycznej. Po wykonaniu pomiarów metodą areometryczną zawiesinę z cylindra należy przenieść ilościowo (łącznie z osadem) na zestaw sit o średnicy oczek: 0,1; 0,25; 0,5 mm i 1 mm z podkładką i przykrywką. Po przemyciu frakcji 1 mm sito górne należy zdjąć z zestawu, a zgromadzony na nim piasek spłukać do naczynia, w którym ma być odparowany. Tak samo należy postępować z sitami o oczkach 0,25 i 0,5 mm. Sito dolne, gdzie gromadzi się piasek bardzo drobny należy przemywać bardzo starannie i długo, gdyż odmywanie tej frakcji przez tak małe średnice oczek jest bardzo powolne. Po zakończonym odmywaniu zawartość sita należy odparować, a następnie zważyć poszczególne frakcje piasku i obliczyć ich procentowy udział w całej masie próbki.

Metodę tą zaleca się stosować do próbek zawierających powyżej 50% frakcji piasku.

b) Metoda sitowo-pipetowa – PN- ISO 11277: 2005

Norma PN-ISO 11277 zaleca wykonanie oznaczenia składu granulometrycznego próbek powietrznie suchej gleby w następujący sposób. Cząstki nie przechodzące przez sito o średnicy oczek 2 mm oznaczyć metodą przesiewania na sucho. Cząstki przechodzące przez sito o średnicy oczek 2 mm, a zatrzymane na sicie o średnicy oczek 0,063 mm oznaczyć metodą przesiewania na mokro, zaś cząstki, które przeszły przez ostatnie sito oznaczyć metodą sedymentacyjną. Metodą zalecaną jest metoda pipetowa, której opis zamieszczono w paragrafie 7.4.2.

7.6. Metody przepływowe

Zasadniczym elementem przy metodach przepływowych jest strumień wody o znanej prędkości, który płynie od dołu ku górze przez szereg naczyń połączonych o różnych średnicach. Szybkość prądu wody przepływającego przez naczynie jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy naczynia (Borowiec i in. 1967).

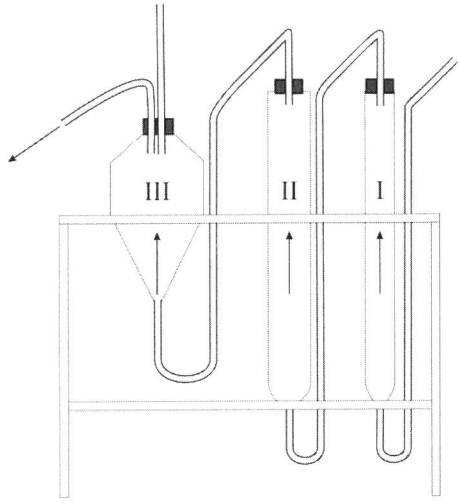
W zależności od szybkości strumienia wody oraz wielkości cząstek, a tym samym szybkości ich opadania, cząstki są:

- unoszone przez strumień wody, gdy prędkość ich opadania jest mniejsza od prędkości przepływającej wody;
- pozostają nieruchome, gdy prędkość ich opadania jest równa prędkości przepływającego strumienia wody;
- opadają na dno naczynie, gdy prędkość ich opadania jest większa od prędkości przepływającej wody.

Do najbardziej znanych metod przepływowych należą:

- metoda Kopecky'ego,
- metoda Puławska (przepływowo – lewarowa).

W metodzie Kopecky'ego strumień wody przepływa przez 3 połączone ze sobą naczynia o coraz większej średnicy (rys. 16):



Rys. 16. Schemat aparatury Kopecky'ego (Borowiec i in. 1967, zmodyfikowany)
Fig. 16. Diagram of Kopecky apparatus (Borowiec i in. 1967, modified)

W pierwszym cylindrze, przez który woda przepływa z największą prędkością, osadzają się cząstki o największych średnicach 1- 0,1 mm, w drugim cząstki mniejsze o średnicy 0,1-0,05 mm, zaś w trzecim cylindrze cząstki najmniejsze o średnicy 0,05-0,01 mm (Borowiec i in. 1967).

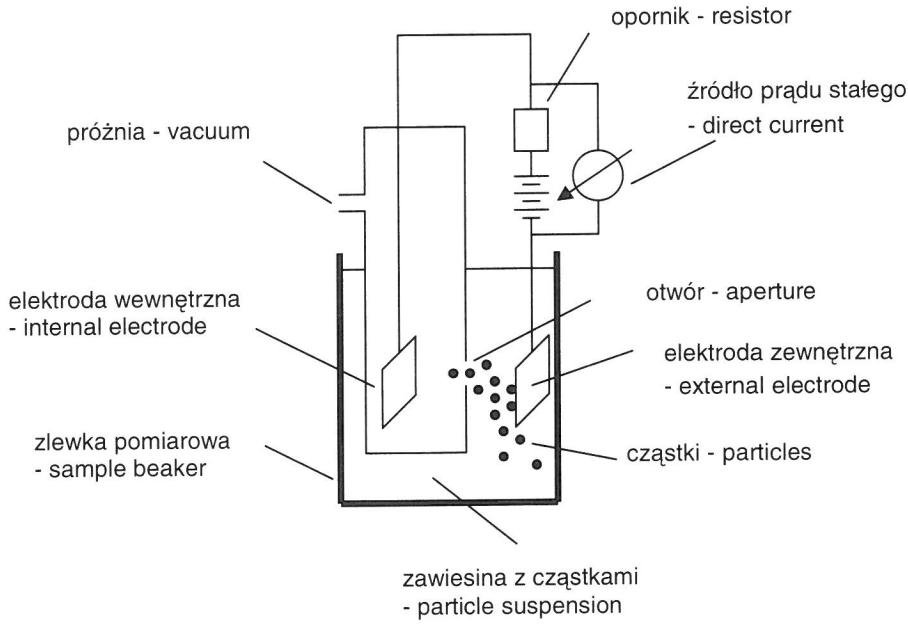
Metoda przepływowo-lewarowa oparta jest na podobnej zasadzie co metoda Kopecky'ego, zaś podstawową różnica dotyczy budowy aparatu. Próbkę badanej gleby umieszcza się w zatkanym lejku umieszczonym na statywie, z góry lejka doprowadzona jest woda, która umożliwia powstanie zawiesiny glebowej. Tak powstałą zawiesinę odciąga się lewarem na zasadzie różnicy poziomów (Borowiec i in. 1967). Dobierając odpowiednio średnicę lewaru (od największej do najmniejszej) można rozdzielić badaną glebę na cztery frakcje (trzy frakcje uzyskujemy z lewarów, zaś czwartą na lejku), przy czym cząstki o największych średnicach zastają na lejku. Następnie rozdzielone frakcje suszy się i waży. Znając masę całej próbki i masę poszczególnych frakcji można wyliczyć zawartość poszczególnych frakcji.

7.7. Metoda licznika Coultera (Electrical Sensing Zone – ESZ)

Opracowanie metody ESZ było możliwe dzięki zastosowaniu zjawiska, które zaobserwował Coulter. Stwierdził on, że opór mierzony pomiędzy dwoma elektrodami w elektrolicie, które są oddzielone przegrodą z otworem kołowym o znanej średnicy zmienia się proporcjonalnie do objętości cząstek przechodzących przez ten otwór (Loveland i Whalley 2001). Precyzyjne pomiary objętości zawiesiny przepływającej przez otwór i zmian oporu rejestrowanych jako zmiany napięcia, pozwalają określić wielkość cząstek przepływających przez dany otwór. Metodę ESZ służącą do pomiaru wielkości cząstek opisują między innymi: Allen (1975) oraz Loveland i Whalley (2001).

Metoda ESZ jest stosowana do pomiaru rozkładu granulometrycznego w aparatach Coulter Counter. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na aparacie Coulter Counter przedstawiają między innymi: Pennington i Lewis (1979), Lewis i in. (1984), Xu i Di Guida (2003).

Dla gleb metoda ESZ pozwala na pomiar wielkości cząstek w zakresie 0,5 μm – 1,5 mm, konieczne jest jednak stosowanie kilku przegród z otworami o różnych średnicach (Loveland i Whalley 2001).



Rys. 17. Schemat aparatu do pomiaru metodą licznika Coultera
Fig. 17. Diagram of apparatus for measurement using Coulter counter method

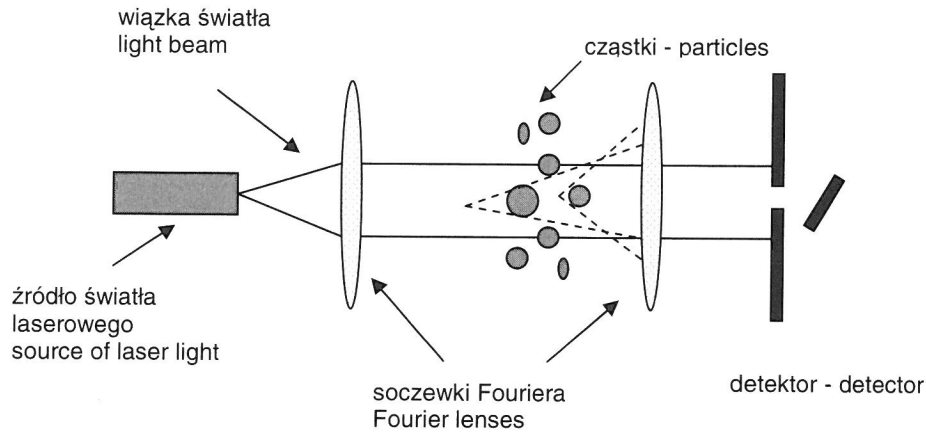
Ograniczenia metody ESZ (Rawle 2002):

- trudno zmierzyć emulsje, nie nadaje się do pomiaru sprayów;
- pomiar musi być przeprowadzany w elektrolicie;
- metoda pomiaru wymaga częstej kalibracji;
- wymaga odpowiedniego dobrania elektrolitu, by uniknąć flokulacji;
- należy zadbać o odpowiednią ilość próbki w elektrolicie, tak by mierzone były pojedyncze cząstki;
- pomiar jest powolny, zaś dla szerokiego zakresu wielkości cząstek konieczna jest zmiana otworu, duże cząstki mogą zablokować szczelinę;
- pomiar małych cząstek jest ograniczony średnicą otworu, według Crampa i współpracowników (Cramp i in. 1997) zakres pomiaru wynosi 2-40% średnicy otworu;
- duże cząstki mogą sedymentować zanim przejdą przez szczelinę i zostaną zmierzone.

W związku z tym zastosowanie tej metody ogranicza się w praktyce do pomiaru komórek krwi.

7. 8. Metoda wykorzystująca zjawisko dyfrakcji laserowej

Dyfrakcja jest to zjawisko polegające na uginaniu się promieni świetlnych przechodzących w pobliżu przeszkody, takiej jak np. brzeg szczeliny. Zjawisko dyfrakcji występuje wtedy, gdy czoło fali jest częściowo zatrzymywane przez nieprzezroczysty obiekt (Halliday i Resnick 1996). Takim nieprzezroczystym obiektem może być cząstka, która znajdzie się na drodze wiązki światła. Światło padając na cząstkę ulega ugięciu. Mierząc kąt, pod jakim nastąpiło ugięcie światła oraz intensywność ugiętego światła można uzyskać informację o wielkości cząstki, która spowodowała dyfrakcję. Kąt, pod jakim światło lasera zostaje ugięte/rozproszone na cząstce, jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstki. Małe cząstki uginają/rozpraszają światło pod dużymi kątami, zaś duże cząstki pod małymi kątami (rys. 18). Na podstawie kątów ugięcia/rozproszenia wiązki światła laserowego obliczana jest wielkość cząstek w oparciu o teorię Fraunhofera lub teorię Mie (ISO 13320 1999).



Rys. 18. Schemat dyfrakcji światła lasera na cząstkach
Fig. 18. Diagram of laser light diffraction on particles

Zjawisko dyfrakcji światła laserowego na cząstkach o różnej wielkości może być podstawą metody wyznaczania rozkładu granulometrycznego. Konstruując pierwsze aparaty do wyznaczania rozkładu wielkości cząstek z analizy natężenia światła rozproszonego padającego na odpowiednio umieszczone detektory wykorzystano dyfrakcję Fraunhofera (nazywaną również teorią lub przybliżeniem Fraunhofera), którą można opisać wzorami (Weiss i Frock 1976):

$$\sin\theta = \frac{1{,}22\lambda}{d}, \tag{15}$$

gdzie: θ – połowa kąta pomiędzy prążkami pierwszego rzędu w obrazie dyfrakcyjnym,
λ - długość fali źródła światła (m),
d – średnica cząstki (m).

Całkowite natężenie rozproszonego światła:

$$I \sim \mathrm{K}d^2, \tag{16}$$

gdzie: I – całkowite natężenie światła rozproszonego (lx),
K – stała wynikająca z kalibracji instrumentu,
d – średnica cząstki (m).

W oparciu o powyższe równania powstały pierwsze aparaty mierzące rozkład wielkości cząstek w określonym, stosunkowo wąskim zakresie, np. 2-120 μm (Weiss i Frock 1976), 1,9-176 μm (Cooper i in. 1984). Trwały również prace nad udoskonaleniem tej metody i poszerzeniem jej zakresu pomiarowego. Bardziej złożony opis kątowego rozkładu ugiętego/rozproszonego światła pozwolił na zwiększenie zakresu pomiarowego do przedziału od 0,5 do 560 μm (Agrawal i in. 1991). Największy postęp w rozwoju aparatów wyznaczających rozkład wielkości cząstek nastąpił pod koniec lat 90-tych i był związany z dy-namicznym rozwojem możliwości obliczeniowych komputerów. Pozwoliło to na zwiększenie zakresu pomiarowego aparatów do: 0,02-2000 μm (Malvern Instruments Mastersizer 2000, Horiba LA-920), 0,04-2000 μm (Beckman Coulter LS 230) i 0,02-3000 μm (Microtrac S3000) (Allen 2003).

Współczesne aparaty wyznaczające rozkład wielkości cząstek metodą popularnie zwaną metodą dyfrakcji laserowej uwzględniają cztery typy oddziaływań pomiędzy falą elektromagnetyczną (padającym światłem) i cząstką (Born i Wolf, 1980). Są to:

- dyfrakcja na zewnętrznej powierzchni (obrysie) cząstki – dyfrakcja Fraunhofera,
- odbicie od powierzchni cząstki (zarówno wewnętrznej jak i zewnętrznej),
- załamanie światła na granicy faz ośrodek-cząstka i cząstka-ośrodek,
- absorpcja wewnątrz cząstki.

Uwzględniając te oddziaływania, rozpraszanie światła na pojedynczej sferycznej cząstce można wyrazić wzorem (ISO 13320 1999):

$$I(\theta) = \frac{I_0}{2k^2a^2}\left\{[S_1(\theta)]^2 + [S_2(\theta)]^2\right\}, \tag{17}$$

gdzie: $I(\theta)$ – całkowite natężenie rozproszonego światła w funkcji kąta θ,

I_0 – natężenie padającego światła,
k – liczba falowa równa $2\pi/\lambda$,
λ – długość fali światła padającego (w przypadku lasera czerwonego - 633 nm),
a – odległość pomiędzy miejscem, gdzie zachodzi rozproszenie a detektorem,
$S_1(\theta)$ i $S_2(\theta)$ - bezwymiarowe, złożone funkcje zdefiniowane w ogólnej teorii rozpraszania światła.

Uzyskanie informacji o rozkładzie wielkości cząstek na podstawie analizy natężenia światła ugiętego/rozproszonego padającego na detektory wymaga wykonania dwóch kroków. Pierwszy z nich to wybór modelu matematycznego opisującego ugięcie/rozproszenie światła przez cząstki (do wyboru dostępne są dwie możliwości: przybliżenie Fraunhofera lub teoria Mie) (de Boer i in. 1987). Kolejnym krokiem jest przełożenie informacji z kątowego rozkładu natężenia ugiętego/rozproszonego światła na wielkość analizowanych cząstek zgodnie z wybranym modelem matematycznym. Krok ten jest realizowany automatycznie przez program komputerowy dostarczony przez producenta aparatu.

Przybliżenie Fraunhofera stosowano w pierwszych aparatach służących do wyznaczania rozkładu granulometrycznego cząstek, ponieważ zawiera łatwiej-sze do rozwiązania równania matematyczne. W przybliżeniu tym zakłada się, że wszystkie cząstki są sferyczne i znacznie większe od długości fali padającej oraz występuje jedynie rozproszenie światła do przodu (ISO 13320 1999). Dla powyższych założeń przyjmuje się, że funkcje S_1 i S_2 występujące we wzorze (17) są sobie równe i wynoszą:

$$(S_1)^2 = (S_2)^2 = \alpha^4 \left[\frac{J_1(\alpha \sin\theta)}{\alpha \sin\theta} \right]^2, \tag{18}$$

gdzie: α – bezwymiarowy parametr wielkości $\alpha = \frac{\pi x}{\lambda}$,

J_1 – funkcja Bessela pierwszego rodzaju,
x – wielkość cząstki (μm).

Uwzględniając to przybliżenie równanie (17) przyjmie postać:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{k^2 a^2} \alpha^4 \left[\frac{J_1(\alpha \sin\theta)}{\alpha \sin\theta} \right]^2. \tag{19}$$

Stosowanie przybliżenia Fraunhofera nie wymaga znajomości optycznych właściwości badanych materiałów. Jego użycie jest zalecane w przypadkach, gdy badana próbka składa się z wielu materiałów o różnych właściwościach

optycznych. W praktyce przybliżenie to jest stosowane dla dużych cząstek (o średnicach co najmniej około 40-krotnie większych od długości fali światła, czyli powyżej 50 μm) (ISO 13320 1999).

Rozwój możliwości obliczeniowych komputerów, jaki dokonał się w ostatnich latach pozwolił na zastosowanie do wyznaczania wielkości cząstek teorii Mie, która wymaga rozwiązania znacznie bardziej złożonych równań. Teoria Mie traktuje pole elektromagnetyczne w otaczającej cząstkę przestrzeni jako superpozycję pola padającego i pola rozproszonego (Bazan 2004) :

$$E = E_i + E_s , \tag{20}$$

$$H = H_i + H_s , \tag{21}$$

gdzie: E – natężenie pola elektrycznego,
E_i – składowa natężenia pola elektrycznego pochodząca od pola padającego,
E_s – składowa natężenia pola elektrycznego pochodząca od pola rozproszonego,
H – natężenie pola magnetycznego,
H_i – składowa natężenia pola magnetycznego pochodząca od pola padającego,
H_s – składowa natężenia pola magnetycznego pochodząca od pola rozproszonego.

Wykonując szereg obliczeń matematycznych można uzyskać następujące wzory opisujące rozkład pól elektrycznego i magnetycznego rozproszonej fali świetlnej (Bazan 2004):

$$E_s = \sum_{n=1}^{\infty} i^n E_0 \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left[a_n M_{on} - i b_n N_{en} \right], \tag{22}$$

$$H_s = -\left(\frac{k}{\omega} \right) \sum_{n=1}^{\infty} i^n E_0 \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left[b_n M_{en} + i a_n N_{on} \right], \tag{23}$$

gdzie: E_0 – amplituda pola elektrycznego padającego światła,
M_{on}, M_{en}, N_{en}, N_{on} – funkcje wektorowe,
k – wartość bezwzględna wektora falowego,
$\omega = 2\pi f$, gdzie: f – częstość padającej fali,
i – jednostka urojona, $i^2 = -1$,
a_n, b_n – współczynniki Mie, które można opisać wzorami:

$$a_n = -\frac{j_n(mx)\left[xj_n(x)\right]' - \left[mxj_n(mx)\right]' j_n(x)}{j_n(mx)\left[xh_n^{(1)}(x)\right]' - \left[mxj_n(mx)\right]' h_n^{(1)}(x)}, \tag{24}$$

$$b_n = -\frac{m^2 j_n(mx)\left[xj_n(x)\right]' - \left[mxj_n(mx)\right]' j_n(x)}{m^2 j_n(mx)\left[xh_n^{(1)}(x)\right]' - \left[mxj_n(mx)\right]' h_n^{(1)}(x)}, \tag{25}$$

gdzie: j_n – funkcja sferyczna Bessela pierwszego rodzaju,

m – względny współczynnik załamania równy stosunkowi współczynnika załamania cząstki do współczynnika załamania otoczenia cząstki,

x – parametr dyfrakcji, $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$, gdzie: a – promień cząstki,

λ – długość fali światła w próżni,

$h_n^{(1)}$ – funkcja sferyczna Hankela pierwszego rodzaju rzędu n.

Zastosowanie teorii Mie do wyznaczania rozkładu granulometrycznego cząstek wymaga zdefiniowania parametrów optycznych cząstek, tzn. współczynnika załamania światła i współczynnika absorpcji światła.

Wykorzystanie teorii Mie jest zalecane do wyznaczania rozkładu wielkości cząstek o wymiarach poniżej 50 μm (ISO 13320 1999). Jednakże zastosowanie teorii Mie do materiału niejednorodnego jakim jest gleba, którego właściwości optyczne (współczynniki załamania i absorpcji światła) dla poszczególnych cząstek są różne powoduje, że trudno z góry uznać, która teoria jest lepsza. Zwłaszcza, że określenie właściwości optycznych badanego materiału może nie tylko być czasochłonne i kosztowne, ale i stanowić znaczące źródło niepewności wyznaczania rozkładu granulometrycznego. Wszystko to może doprowadzić do sytuacji, że teoretycznie mniej precyzyjna teoria Fraunhofera może mieć większe zastosowanie praktyczne dla materiału glebowego, nawet mimo obecności mniejszych cząstek w próbce (Ryżak 2008).

Pomiar wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej opiera się na następujących założeniach (Konert i Vandenberghe 1997):

a) mierzone cząstki są sferyczne,
b) orientacja cząstek względem wiązki lasera jest przypadkowa (założenie to nie zawsze jest spełnione, bo cząstki unoszone są prądem płynącej cieczy i ustawiają się zależnie od swoich kształtów w stosunku unoszącej je cieczy).

7.9. Metoda spektroskopii z korelacją fotonową (Photon Correlation Spectroscopy – PCS)

Metoda dyfrakcji laserowej może być stosowana do pomiaru wielkości cząstek mikronowych. Pojawia się jednak problem jak zmierzyć cząstki, których wielkość wyraża się w nanometrach.

Metoda PCS lub jak jest również nazywana DLS (Dynamic Light Scattering – dynamicznego rozpraszanie światła) pozwala na pomiar wielkości cząstek o średnicach poniżej 1 μm. Metoda ta opiera się na pomiarze ruchów Browna i odnosi je do wielkości cząstek (Pecora 1985, Xu 2000). Ruchy Browna są to przypadkowe ruchy cząstek spowodowane zderzeniami obserwowanych cząstek z cząstkami cieczy lub gazu, które je otaczają. Już podczas obserwacji ruchów Browna w XIX wieku stwierdzono, że szybkość ruchów cząstek zależy od ich wielkości – większe cząstki poruszają się wolniej. Na początku XX wieku Albert Einstein badając ruchy Browna podał równanie (nazywane równaniem Stokesa – Einsteina) opisujące zaobserwowane prawidłowości:

$$d(H)=\frac{k_B T}{3\pi\eta D}, \tag{26}$$

gdzie: D – współczynnik dyfuzji,
k_B – stała Boltzmana,
T – temperatura,
η - lepkość cieczy,
$d(H)$ – średnica hydrodynamiczna cząstki poruszającej się ruchami Browna.

Pomiar wielkości cząstek metodą PCS przeprowadza się oświetlając analizowane cząstki laserem i mierząc intensywność zmian natężenia rozpraszanego światła (Zetasizer Nano Series User Manual 2004). Gdyby badane cząstki nie poruszały się, to rozproszone światło padające na ekran dawałoby cętkowany obraz składający się z plam jaśniejszych i ciemniejszych. Jaśniejsze plamy występują w miejscach, gdzie następuje interferencja konstruktywna rozproszonego światła, zaś ciemne plamy w miejscach interferencji destruktywnej. Jeżeli cząstki nie poruszałyby się, to obraz cętek na ekranie byłby niezmienny w czasie. W rzeczywistości cząstki są w nieustannym ruchu spowodowanym ruchami Browna. Również obraz cząstek na ekranie w postaci plam jaśniejszych i ciemniejszych będzie ulegał nieustannym zmianom spowodowanym ruchem cząstek. Analizy szybkości zmian intensywności rozproszonego światła dokonuje urządzenie zwane korelatorem. Korelator porównuje dochodzący do niego w określonych odstępach czasu (t, $t+\delta t$, $t+2\delta t$,...) sygnał. Przedziały czasu δt muszą być odpowiednio małe, by zarejestrować szybko zmieniające się obrazy pochodzące

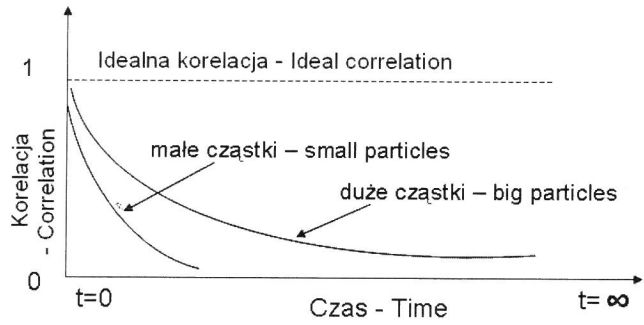
od małych cząstek. Jeżeli sygnał jest niezmienny w czasie (idealnie ze sobą skorelowany) funkcji korelacji przypisuje się wartość 1. Przy szybkich zmianach sygnału (braku korelacji) funkcja przyjmuje wartość 0. Funkcja korelacji G(τ) może być zdefiniowana następująco (Pecora, 1985; Xu, 2000):

$$G(\tau) = \sum_{i=1}^{n} c_i \exp(-T\tau) \ , \tag{27}$$

gdzie: $G(\tau)$ – funkcja korelacji,
c_i – waga intensywności cząstki,
τ – odstęp czasowy korelatora,
$T = Dq^2$, gdzie: D – współczynnik translacyjny dyfuzji,
$q = \left(\frac{4\pi n}{\lambda_0}\right) \sin\frac{\theta}{2}$, gdzie: n – współczynnik odbicia światła dla cieczy,

λ_0 – długość fali światła laserowego,
θ – kąt rozproszenia.

W przypadku dużych cząstek, które poruszają się powoli, funkcja korelacji zanika wolniej, zaś w przypadku małych cząstek – szybko (rys. 19).



Rys. 19. Zależność funkcji korelacji od czasu dla małych i dużych cząstek
Fig. 19. Relationship of correlation function and time for small and big particles

Więcej informacji o dynamicznym rozpraszaniu światła można uzyskać z publikacji (Kruppa i Straub 1994, Pecora 1985, Xu 2000).

Jednym z przykładów praktycznego zastosowania metody PCS jest aparat Zetasizer Nano ZS firmy Malvern, UK, który pozwala mierzyć wielkość cząstek w zakresie 0,6 nm – 6 μm. Aparat ten używa odpowiednich algorytmów, które pozwalają na podstawie szybkości zmian funkcji korelacji uzyskać informację o wielkości analizowanych cząstek.

8. SPOSOBY PREZENTOWANIA DANYCH O ROZKŁADZIE GRANULOMETRYCZNYM GLEB

Wyniki pomiaru rozkładu granulometrycznego cząstek glebowych można przedstawić w sposób liczbowy lub graficzny. Poniżej przedstawione zostaną w różny sposób wyniki analiz wykonane dla dwóch próbek:

- próbka 1 – zawierająca drobniejsze frakcje granulometryczne,
- próbka 2 – próbka o przewadze frakcji piaszczystej.

8.1. Liczbowe przedstawienie wyników

W publikacjach naukowych najczęściej spotyka się wyniki wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb przedstawione w postaci liczbowej, najczęściej w postaci tabeli, w której umieszcza się liczbowe zakresy frakcji granulometrycznych według wybranej klasyfikacji oraz procentowy udział cząstek należących do danej frakcji. Przykład takiej prezentacji wyników przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Skład procentowy poszczególnych frakcji
Table 11. Percentage of particular fractions

Numer próbki Sample number	Procentowa zawartość frakcji o średnicach Percentage of fraction with particle diameter (mm)		
	< 0,002	0,002-0,05	0,05-2,0
1	13	82	5
2	0	12	88

Warto zwrócić uwagę, że taki zapis nie daje możliwości odpowiedzi na pytanie, czy dany rozkład jest masowy czy objętościowy (patrz podrozdział 8.5). Biorąc pod uwagę, że do tej pory większość pomiarów prowadzona była metodami sitowymi i/lub sedymentacyjnymi, można założyć, że jest to pomiar masowy. Jednakże rozwój nowoczesnych metod instrumentalnych (np. metoda dyfrakcji laserowej lub PCS) powoduje konieczność uściślenia tej informacji.

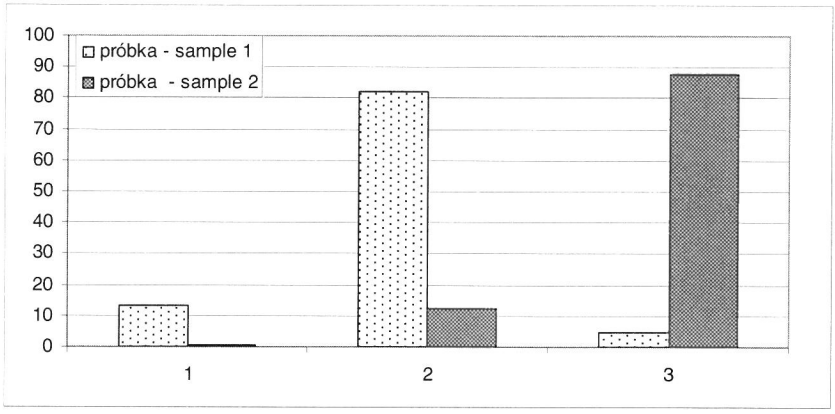
W gleboznawstwie przyjęło się, że wielkość frakcji wyraża się w milimetrach (patrz rozdział 3). Jednakże w innych naukach, np. geologii lub sedymentologii można również spotkać prezentowanie wyników uziarnienia próbki w jednostkach phi (φ). Zależność pomiędzy wielkością cząstek wyrażoną w milimetrach, a wielkością cząstki w jednostkach phi (φ) opisuje się wzorem (Racinowski i in. 2001):

$$\varphi = -\lg_2 d \,, \tag{28}$$

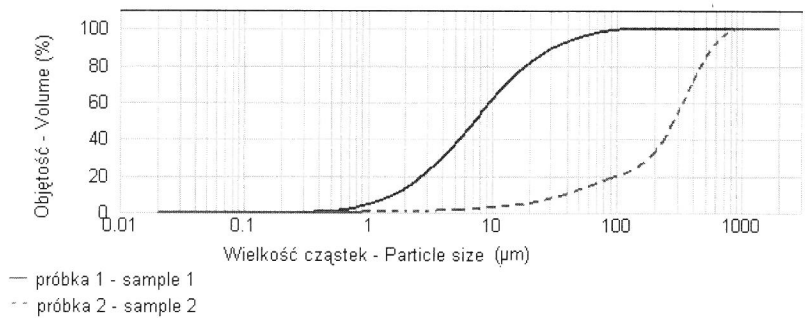
gdzie: d – jest średnicą cząstki (mm).

8.2. Graficzne przedstawienie wyników

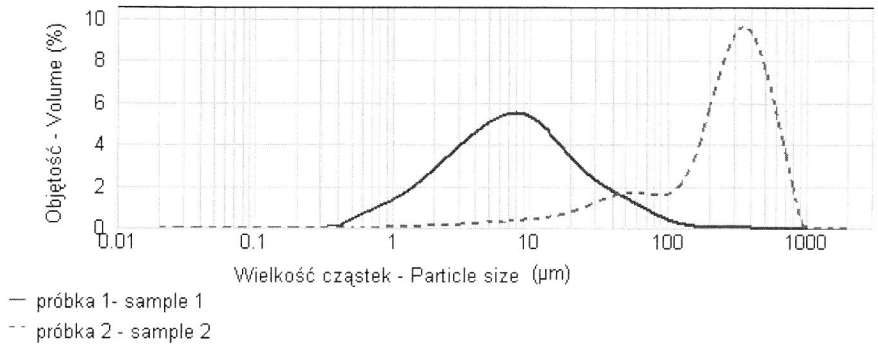
W celu porównania rozkładu granulometrycznego dwóch lub więcej próbek wyniki analizy granulometrycznej cząstek można przedstawić w sposób graficzny, który dla niektórych osób jest wygodniejszy do interpretacji. Najczęściej stosowanymi sposobami graficznej prezentacji wyników są: histogram (rys. 20), krzywa skumulowana (rys. 21) lub krzywa w postaci ciągłego rozkładu wielkości cząstek (rys. 22). Poniżej na rysunkach 20-22 przedstawiono wyniki pomiaru rozkładu granulometrycznego dla dwóch próbek glebowych, których wyniki zaprezentowano wcześniej w postaci liczbowej w tabeli 10.



Rys. 20. Wyniki pomiaru rozkładu w postaci histogramu
Fig. 20. Results of particle size distribution in histogram form



Rys. 21. Wyniki pomiaru w postaci krzywej kumulacyjnej ciągłej
Fig. 21. Results of measurement in constant cumulation curve form



Rys. 22. Wyniki pomiaru w postaci rozkładu
Fig. 22. Results of measurement in distribution form

8.3. Parametryczny opis wyników rozkładu

W raporcie końcowym zawierającym wyniki pomiaru rozkładu granulometrycznego cząstek, szczególnie tych wyznaczonych w sposób ciągły z dużą precyzją można wprowadzać różne średnice opisujące za pomocą jednej wartości liczbowej cały rozkład. W tym celu używa się najczęściej decyli:

a) średnicy $d(0,1)$ – jest to taka wartość średnicy, dla której 10% cząstek ma średnicę mniejszą niż ta wartość,
b) średnicy $d(0,5)$, czyli mediany – jest to taka wartość która dzieli rozkład na dwie równe części, 50% cząstek ma średnicę większą od tej wartości, zaś 50% cząstek ma średnicę mniejszą od tej wartości,
c) średnicy $d(0,9)$ – jest to taka wartość średnicy, która krzywą rozkładu dzieli w ten sposób, że 90% cząstek ma średnicę mniejszą niż ta liczba,

Ponadto określić można:

- średnicę D(3,2) – jest to średnica odniesiona do pola powierzchni, zwana średnią średnicą Sautera zdefiniowana wzorem:

$$D[3,2] = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_i^3}{\sum_{i=1}^{N} d_i^2}, \tag{29}$$

gdzie: N – jest liczbą wszystkich cząstek,

- średnicę D(4,3) – jest to średnica odniesiona do objętości zdefiniowana wzorem:

$$D[4,3] = \frac{\sum_{i=1}^{N} d_i^4}{\sum_{i=1}^{N} d_i^3}, \tag{30}$$

gdzie: N – jest liczbą wszystkich cząstek;

- średnią statystycznie średnicę cząstek zdefiniowaną wzorem (Walczak 1984):

$$D_{cz} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{D}_i P_i}{100\%}, \tag{31}$$

gdzie: P_i – procentowa zawartość *i-tej* frakcji (%),
n – ilość frakcji,
D_i – jest średnią średnicą cząstek *i-tej* frakcji (mm), zdefiniowaną wzorem:

$$\overline{D}_i = \frac{D_{i,\max} + D_{i,\min}}{2}, \tag{32}$$

gdzie: $D_{i,\max}$ – maksymalna średnica *i-tej* frakcji (mm),
$D_{i,\min}$ – minimalna średnica *i-tej* frakcji (mm).

8.4. Parametry konieczne do pełnego opisu wyników

Najczęściej w praktyce stosowane są cztery metody pomiarowe: metoda sitowa, metoda areometryczna, metoda pipetowa oraz metoda dyfrakcji laserowej. Aby móc porównywać wyniki uzyskane w różnych laboratoriach konieczne jest podanie dokładnych parametrów opisujących warunki w jakich były przeprowadzone te pomiary. Przed tym jednak w protokole z badań należy opisać sposób poboru, transportu i przygotowywania próbek.

W przypadku metody sitowej należy podać informację o tym:

a) czy próbka była przesiewana na sucho czy na mokro,
b) jakiego rodzaju sita użyto do analiz (jaka była średnica oraz kształt oczek),
c) ile wynosił czas wytrząsania,

a w przypadku przesiewania na mokro:

d) w jakiej cieczy prowadzona była procedura,
e) w jakiej temperaturze,
f) jaką metodą wytrząsano układ.

W przypadku metody areometrycznej:

a) jaką metodę lub jej modyfikację zastosowano (z tym wiąże się opis areometru, czasy odczytu oraz stosowane tablice),
b) temperaturę w jakiej prowadzono badania,
c) czy stosowano tzw. poprawkę piaskową,
d) wartość gęstości właściwej cząstek gleby,
e) wartość gęstości właściwej cieczy,
f) lepkość dynamiczną wody w temperaturze pomiaru,
g) numer referencyjny użytego areometru.

W przypadku metody pipetowej:

a) objętość zastosowanej pipety;
b) temperaturę w jakiej prowadzono badania;
c) czas, jaki upłynął od momentu zaprzestania mieszania do momentu poboru próbki.

W przypadku metody dyfrakcji laserowej należy podać informacje o:

a) aparacie użytym do analizy (w tym, jeśli ma to zastosowanie o przystawce),
b) teorii zastosowanej do obliczeń, zaś w przypadku teorii Mie informację o zastosowanych parametrach optycznych,
c) o sposobie dyspergowania próbki (w przypadku ultradźwięków ich moc i czas stosowanie),
d) parametry prowadzenia pomiaru (prędkość mieszadła oraz pompy),
e) inne charakterystyczne dla aparatury poszczególnych producentów.

8.5. Rozkład masowy i rozkład objętościowy

Istotnym zagadnieniem, które czasami umyka uwadze gleboznawców jest problem czy wykorzystywana w badaniach metoda wyznaczania rozkładu pozwala na uzyskanie rozkładu masowego czy objętościowego.

Rozkład masowy informuje jaki jest udział masy cząstek określonej frakcji granulometrycznej w całkowitej masie badanej próbki. Rozkłady masowe uzyskiwane są m.in. w metodzie sitowej i metodach sedymentacyjnych.

Rozkład objętościowy informuje jaki jest udział objętości cząstek określonej frakcji granulometrycznej w całkowitej objętości badanej próbki. Rozkłady objętościowe uzyskiwane są m.in. przy wykorzystaniu metod dyfrakcji laserowej i PCS.

Występowanie dwóch wyżej zdefiniowanych rodzajów rozkładu granulometrycznego powoduje, że zasadnym staje się pytanie czy wyniki rozkładu masowego można porównywać z wynikami rozkładu objętościowego.

W przypadku gdyby cząstki gleby były idealnymi kulkami oraz wszystkie posiadały tę samą gęstość to rozkład masowy w pełni pokrywałby się z rozkładem objętościowym. Oczywistym jest, że oba powyższe założenia nie są praktyce spełnione. Dlatego należy sobie uświadomić, że porównywanie obydwu rodzajów rozkładu jest obarczone błędem. Jednakże z doświadczenia można stwierdzić, że dla ogromnej większości zastosowań praktycznych błąd ten można pominąć.

9. PIŚMIENNICTWO

Agrawal Y.C., McCave I.N., Riley J.B., 1991. Laser diffraction size analysis. In: Pronciples, methods and application of particle size analysis (Ed. J.P.M. Syvitski). Cambridge University Press, New York, 119-128.

Allen T., 1975. Particle size measurement. Powder Technology Series, London, Chapman and Hall.

Allen T., 2003. Powder Sampling and Particle Size Determination (First Edition), Elsevier.

Allen T., Davies R. and Scarlett B. (Eds), 1996. Particle size measurement (2 vol.) London, Chapman and Hall.

Andrzejewski R, Gutowski W., 1968. Fizyczne własności pyłów. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.

Bazhan W., 2004. Rozpraszanie światła laserowego na pojedynczych cząstach. Rozprawa doktorska, Instytut Fizyki PAN, Warszawa.

Bednarek R., Charzyński P., Pokojska U. (red.), 2003. Klasyfikacja zasobów glebowych świata. World reference base for soil resources. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 1-106.

Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojska U., Prusinkiewicz Z., 2004. Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 1-243.

Beuselinck L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with sieve-pipette method. Catena 32, 193-208.

Biały K., Brożek S., Chojnicki J., Czępińska-Kamińska D., Januszek K., Kowalkowski A., Krzyżanowski A., Okołowicz M, Sienkiewicz A., Skiba S., Wójcik J., Zielony R., 2000. Klasyfikacja Gleb Leśnych Polski, CILP Warszawa, 1-123.

Bieganowski A., Walczak R.T., 2003. "Specificity of agrophysical measurements. Problem of standardization and validation of methods". Materials of training course for young research workers: Physicochemical and physical methods of studies of soil and plant materials. Theory and practice. Centre of excellence for applied physics in sustainable agriculture. Agrophysics. Institute of Agrophysics of Polish Academy of Sciences, Lublin.

BN-178/9180-11: 1978. Gleby i utwory mineralne.

Born M., Wolf E., 1980. Principles of optics. Pergamon Press.

Borowiec J., Gliński J., Turski R., Wondrausch J., (Red.) Dobrzański B., 1967. Analiza gleby w laboratorium i w polu, Lublin.

Buurman P., Pape Th., Muggler C.C., 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. Soil Sci., 162(3), 211-218.

Buurman P., Pape Th., Reijneveld J.A., de Jong F., van Gelder E., 2001. Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial, and loess samples. Netherlands J. Geosciences, 80(2), 49-57.

Burt R. (Ed.), 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 1-700.

Carter M.R. (Red.), 1993. Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, 1-823.

Chappell A., 1998 Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distribution using optical laser diffraction. Catena, 31, 271-281.

Cooper L.R., Haverland R.L., Hendricks M., Knisel W.G., 1984. Microtrac particle-size analyzer: An alternative particle-size determination method for sediment and soil. Soil Sci., 138(2), 138-146.

Cramp A., Lee S.V., Herniman J., Hiscott, R.N., Manley P.L., Piper D.J.W., Deptuck M., Johnston S.K., Black K.S., 1997. 11. Data Report: Interlaboratory comparison of sediment grain-sizing techniques: Data from Amazon far upper levee complex sediments in Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, (Eds R.D. Flood, D.J.W. Piper, A. Klaus, L.C. Peterson), 155.

Day P.R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. (Ed. C.A. Black *et al.*) In: Methods of soil analysis. Part I. Agronomy, 9, 545-567.

de Boer G.B.J., De Weerd C., Thoenes D., Goossens W.H.J., 1987. Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer diffraction versus Mie scattering. Particle Characterization, 4, 14-19.

Dechnik I., Lipiec J., 1975. Zwięzłość gleby jako czynnik środowiska rozwoju roślin. Problemy Agrofizyki, 17.

Dechnik I., Lipiec J., 1980. Przewodnictwo wodne gleby w strefie nienasyconej i metody jego pomiaru. Problemy Agrofizyki, 32.

Dębicki R., Rejman J., 1990. Przewidywanie strat gleby w wyniku zjawisk erozji wodnej. Problemy Agrofizyki, 59.

Domżał H, Słowińska-Jurkiewicz A., (Red.) Turski R., 1976. Przewodnik do ćwiczeń z gleboznawstwa z elementami geologii i mechaniki gleb. Lublin.

Drzymała S., 2000. Comparison of soil texture classification according to the new Polish standard, PTG and International Classifications (FAO and USDA). Acta Agrophysica, 35, 49-53.

Drzymała S., Mocek A., 2004. Uziarnienie różnych gleb Polski w świetle klasyfikacji PTG, PN-R-04033 i USDA. Roczn. Glebozn., 55(1), 107-115.

FAO, 1988. FAO/UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections and updates. World Soil Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted with updates as Technical Paper, 20, ISRIC, Wageningen, 1997.

FAO, 2006. Guidelines for soil description. Fourth edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1-97.

Gee G.W., Bauder J.W., 1986. Particle size analysis. (Ed. A. Klute). In: Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Agronomy Series, 9, ASA, SSSA, Madison, 383-411.

Gliński J., Konstankiewicz K., 1991. Metody i aparatura do badań agrofizycznych. I. Gleba. Problemy Agrofizyki, 64.

Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., 1976. Sedymentologia. Wyd. Geologiczne, Warszawa.

Halliday D., Resnick R., 1996. Fizyka. t. II. PWN, Warszawa.

ISO 565, 1990. Test sieves – Metal wire cloth, perforated metal plate and electroformed sheet – Nominal sizes of openings.

ISO 13320, 1999. Particle size analysis – laser diffraction methods. Part 1.

ISO 3310-1, 1990. Test sieves – Technical requirements and testing. Part 1. Test sieves of metal wire cloth.

ISO 3310-2, 1990. Test sieves – Technical requirements and testing. Part 2. Test sieves of perforated metal plate.

Issmer K., 2000. Optical methods in the grain-size analysis of fine-grained sediments. Geological Quarterly, 44(2), 205-210.

Kabała C., Marzec M., 2007. Niektóre konsekwencje zmiany klasyfikacji uziarnienia gleb. Roczn. Glebozn., 58, ½, 33-44,

Konert 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.

Konstankiewicz K., 1985. Porowatość gleby, definicje i metody. Problemy Agrofizyki, 47.

Kossowski J., Sikora E., 1978. Cieplne właściwości gleb i metody ich wyznaczania. Problemy Agrofizyki, 27.

Krumbein W.C., 1932. A history of the principles and methods of mechanical analysis. J. Sedimentary Petrology, 2(2), 89-124.

Kruppa B., Straub J., 1994. Dynamic light scattering. In: Optical measurements techniques and applications (Ed. F. Mayinger). Springer – Verlag.

Lewis G.C., Fosberg M.A., Falen A.L., Miller B.J., 1984. Identification of loess by particle size distribution using the Coulter Counter TA II. Soil Sci., 137(3), 172-176.

Lipiec J., 1983. Możliwości oceny przewodnictwa wodnego gleb na podstawie ich niektórych właściwości. Problemy Agrofizyki, 40.

Lityński T., Jurkowska H., Gorlach E., 1976. Analiza chemiczno-rolnicza. Wyd. PWN, Warszawa, 1-330.

Loveland P.J., Whalley W.R., 2001. Particle size analysis. In: Soil and environmental analysis physical method (Eds K.A. Smith, Ch.E. Mullins). Marcel Dekker, Inc.

Mayer H., Mentler A., Papakyriacou M., Rampazzo N., Merxer Y., Blum W.E.H., 2002. Influence of vibration amplitude of ultrasonic dispersion of soils. Int. Agrophysics, 16, 53-60.

Mocek A., Drzymała S., Maszner P., 2000. Geneza, analiza i klasyfikacja gleb. AR Poznań.

Myślińska E., 2001. Laboratoryjne badania gruntów. PWN, Warszawa.

Oliveira J.M.C., Vaz C.M.P., Reichardt K., Swartzendruber D., 1997. Improved soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. SSSAJ, 61, 23-26.

Pecora R. (Ed.), 1985. Dynamic light scattering. Application of photon correlation spectroscopy. Plenum Press, New York and London.

Pennnington K.L., Lewis G.C., 1979. A comparison of electric and pipette methods for mechanical analysis of soils. Soil Sci., 128(5), 280-284.

Polska Norma PN-R-04032: 1998. Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego. PKN.

Polska Norma PN-R-04033: 1998. Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne. PKN.

PN-ISO 11277: 2005. Jakość gleby. Oznaczanie składu granulometrycznego w mineralnym materiale glebowym. Metoda sitowa i sedymentacyjna.

PN-ISO 10381-1: 2008. Jakość gleby – Pobieranie próbek. Część 1: Zasady opracowywania programów pobierania próbek.

PN-ISO 10381-2: 2007 Jakość gleby – Pobieranie próbek. Część 2: Zasady dotyczące technik pobierania.

PN-ISO 10381-3: 2007. Jakość gleby – Pobieranie próbek. Część 3: Zasady dotyczące bezpieczeństwa.

PN-ISO 10381-4: 2007. Jakość gleby – Pobieranie próbek. Część 4: Zasady dotyczące postępowania podczas badań terenów naturalnych, zbliżonych do naturalnych oraz uprawnych.

PN-ISO 10381-5: 2009. Jakość gleby – Pobieranie próbek. Część 5: Zasady postępowania podczas badań terenów miejskich oraz przemysłowych pod kątem zanieczyszczenia gleby.

PN-ISO 10381-6: 1998. Jakość gleby – Pobieranie próbek – Zasady dotyczące pobierania, postępowania z próbkami i przechowywania próbek gleby przeznaczonych do badania tlenowych (aerobowych) procesów mikrobiologicznych w warunkach laboratoryjnych.

Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 1959. Genetyczna klasyfikacja gleb Polski. Roczn. Glebozn., 7, 2, 1-108.

Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 1989. Systematyka Gleb Polski. Roczn. Glebozn., 40, 3/4, 1-148.

Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, 2008. Klasyfikacja uziarnienia gleb PTG 2008. http://www.ptg.sggw.pl/uziarnienie.html

Prusinkiewicz Z., Konys L., Kwiatkowska A., 1994. Klasyfikacja uziarnienia gleb i problemy z nią związane. Roczn. Glebozn., 45(3-4), 5-20.

Racinowski R., Szczypek T., Wach J., 2001. Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, 1-146.

Ramaswamy V., Rao P.S., 2006. Grain size analysis of sediments from the northern Andaman Sea: comparison of laser diffraction and sieve-pipette techniques. J. Coastal Research, 22(4), 1000-1009.

Rawle A., 2002. The importance of particle sizing to the coatings industry. Part 1: Particle size measurements. Advances in Colour Science and Technology, 5, 1-12.

Ryżak M., 2008. Metodyczne aspekty wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb mineralnych z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej. Praca doktorska, IA PAN, Lublin.

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.

Rząsa S., 1983. A sedimentative apparatus for a total analysis of the mechanical composition of the soil. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 220, 517-524.

Rząsa S., Kokowski I.: A pipette method for analyzing the mechanical composition of the soil. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 220, 525-539, 1983

Skopp J.M., 2002. Physical properties of primary particles. In: Soil physics companion (Ed. A.W. Warrick). CRC PRESS.

Sławiński C., 2003. Wpływ fizycznych parametrów gleby na wartości współczynnika przewodnictwa wodnego (Badania modelowe). Acta Agrophysica, 90.

Soil Survey Division Staff, 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook, 18.

Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Agric. Handbook, 436, 1-871.

Soil Survey Staff, 2006. Keys to Soil Taxonomy. Tenth Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 1-332.

Sokołowska Z., Hajnos M., Aleksejewa T.W., Aleksejew A.O., 2002. Wpływ składu mineralnego frakcji koloidalnej na wybrane właściwości powierzchniowe gleby. Acta Agrophysica, 63, 87-98.

Sperazza M., Moore J.N., Hendrix M.S., 2004. High-resolution particle size analysis of naturally occurring very fine-grained sediment through laser diffractometry. J. Sedimentary Research, 74(5), 736-743.

Stępniewski W., Gliński J., 1983. Procesy transportu gazów w glebie i skład powietrza glebowego. Problemy Agrofizyki, 42.

Szmańda J.B., Krzemień K., 2008. Uwagi na temat wybranych klasyfikacji frakcjonalnych osadów klastycznych – problem różnic w przedziałach klasowych i nazewnictwie. Landform Analysis, 9, 381-384.

Tippkötter R., 1994. The effect of ultrasound on the stability of mezoaggregates (60-2000 μm). Z. Pflanz. Bodenkunde, 157, 99-104.

Turski R., Domżał H., Borowiec J., Flis-Bujak M., Misztal M., 1977. Gleboznawstwo. Lublin.

Turski R., Słowińska-Jurkiewicz A., 1998. Przewodnik do ćwiczeń z gleboznawstwa. Lublin.

Uggla H., 1979. Gleboznawstwo rolnicze. Gleboznawstwo rolnicze. Wyd. PWN, Warszawa.

Uziak S., Brogowski Z., Komornicki T., 2005. Właściwości frakcji granulometrycznych gleb wyworzonych z różnych utworów macierzystych. Acta Agrophysica, 124, 1-159.

Van Reeuwijk L.P. (Ed.), 2002. Procedures for soil analysis. Technical Paper 9. International Soil Reference and Information Centre, Food and Agriculture Organization, USA, 1-21/1+zał.

Vaz C.M.P., de Mendonca Naime J., Macedo A., 1999. Soil particle size fraction determined by gamma – ray attenuation. Soil Sci., 164(6), 403-410.

Vaz C.M.P., Oliveira J.C.M., Reichardt K., Crestana S., Cruvinel P.E., Bacchi O.O.S., 1992. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. Soil Technology, 5, 319-325.

Walczak R.T., 1984. Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby. Problemy Agrofizyki, 41.

Walczak R.T., Witkowska B., 1976. Metody badania i sposoby opisywania agregacji gleby. Problemy Agrofizyki, 19.

Wasterhof R., Buurman P., van Griethuysen C., Ayarza M., Vilela L., Zech W., 1999. Aggregation studied by laser diffraction in relation to plowing and liming in the Cerrado region in Brazil. Geoderma, 90, 277-290.

Weiss E.L., Frock H.N., 1976. Rapid analysis of particle-size distributions by laser light scattering. Powder Technology, 14, 287-293.

Witkowska-Walczak B., 2000. Wpływ struktury gleb mineralnych na ich hydrofizyczne charakterystyki. Badania modelowe. Acta Agrophysica, 30.

World Reference Base For Soil Resources, 2006. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1-128.

Xu R., 2000. Particle Characterization: Light scattering methods. Kluwer Academic Publishers.

Xu R., Di Guida O.A., 2003. Comparison of sizing small particles using different technologies. Powder Technology, 132, 145-153.

Zawadzki S. (Red.), 1999. Gleboznawstwo. PWRiL, Warszawa, wyd. IV.

Zetasizer Nano Series User Manual, 2004. Mano 317, Issue 1, February 1, 2004. Malvern Instruments Ltd.

10. STRESZCZENIE

Podstawowym celem niniejszej monografii jest przegląd metod wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb. Szerokie spektrum omawianych metod obejmuje m.in.:

- metodę organoleptyczną (metodę placową) – powalającą wstępnie ocenić rozkład granulometryczny na podstawie analizy zachowania się gleby rozcieranej w palcach w stanie suchym oraz formowanej w palcach w stanie wilgotnym,
- metody sitowe – służące przede wszystkim do oddzielenia frakcji szkieletowych od ziemistych oraz wyznaczania zawartości frakcji grubszych (piasek i pył),
- metody sedymentacyjne, których realizacja oparta jest o prawo Stokesa, a wśród nich m.in.:
  a) metodę areometryczną – najczęściej stosowaną w Polsce pod nazwą metody Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego,
  b) metodę pipetową – popularną w świecie metodę, uchodzącą za najbardziej precyzyjną aplikację metod sedymentacyjnych,
  c) metody wykorzystujące promieniowanie gamma i rentgenowskie oraz metodę fotosedymentacyjną – metody wymagające specjalistycznego wyposażenia i stosunkowo rzadziej wykorzystywane w praktyce,
- metody sitowo-sedymentacyjne – będące kombinacją metod sitowych (wykorzystywanych do oznaczeń grubszych frakcji) oraz metod sedymentacyjnych (do oznaczeń frakcji drobniejszych),
- metody, które można nazwać instrumentalnymi, a w tym m.in.:
  a) metodę dyfrakcji laserowej – w chwili obecnej coraz częściej wykorzystywaną w laboratoriach gleboznawczych, jako rutynową metodę wyznaczania rozkładu granulometrycznego,
  b) metodę spektroskopii z korelacją fotonową – metoda wykorzystywana do wyznaczania rozkładu granulometrycznego cząstek bardzo małych (do 6 μm).

Istotnym elementem monografii jest zaprezentowanie metod przygotowania próbek glebowych do pomiarów rozkładu granulometrycznego. Elementami tego przygotowania są m.in. usuwanie: soli rozpuszczonych, substancji organicznych, węglanów, tlenków żelaza oraz krzemionki. Końcowym i ważnym etapem jest dyspergowanie próbki – chemiczne lub fizyczne.

Ponadto przedstawiono klasyfikacje odnoszące się do poszczególnych frakcji granulometrycznych jak i klasyfikacje gleb w oparciu zdefiniowane wcześniej frakcje granulometryczne.

Słowa kluczowe: metody wyznaczania rozkładu granulometrycznego, rozkład granulometryczny gleb, klasyfikacja gleb mineralnych

11. SUMMARY

METHODS FOR DETERMINATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF MINERAL SOILS

The primary objective of this monograph is a review of methods used in the determination of particle size distribution of soils. The broad spectrum of methods under analysis comprises, among other, the following:

- sensory method (fingertip method) – permitting preliminary estimation of the particle size distribution based on analysis of the behaviour of soil rubbed between fingers in dry state and formed by fingers in wet state,
- sieve methods – used primarily for the separation and determination of the content of coarse fractions (sand and silt),
- sedimentation methods, the realization of which is based on the Stoke's Law and that comprise, among others:
  a) areometric method – in Poland most frequently used under the name of the Casagrande method in Prószyński's modification,
  b) pipette method – a method highly popular worldwide, considered to be the most accurate application among the sedimentation methods,
  c) methods based on the application of gamma and X-ray radiation and the photosedimentation method – methods the require specialised equipment and are relatively less frequently used in practice,
- sieve-sedimentation methods – combining the sieve methods (used for the determination of coarser fractions) and the sedimentation methods (for the determination of finer fractions),
- methods that can be termed instrumental methods, including e.g.:
  a) laser diffraction method – currently more and more frequently used in soil science laboratories as a routine method for the determination of particle size distribution,
  b) photon correlation spectroscopy method – used for particle size distribution with relation to very fine particles (up to 6 μm).

An important element of the monograph is the presentation of soil sample preparation for measurements of particle size distribution. The preparation process includes such elements as, among others, removal of dissolved salts, organic matter, carbonates, iron oxides, and silica. The final and also very important stage is the dispersion of the sample – chemical of physical.

Additionally, the monograph presents classifications related to the particular particle size fractions and classifications of soils based on the particle size fractions defined earlier.

Keywords: particle size distribution measurement methods, soil texture, classification of mineral soils

12. ZAŁĄCZNIK

PN-ISO 11277

1. Odważyć od 10 do 30 g próbki do zlewki 650 cm^3.
2. Równomiernie nawilżyć próbkę, dodając 30 cm^3 wody destylowanej;
3. dodać 30 cm^3 perhydrolu 30%, ostrożnie wymieszać, ewentualne burzenie ograniczyć dodając kilka kropel oktan-2-olu.
4. Zlewkę przykryć szkiełkiem zegarkowym, zostawić na noc, następnego dnia podgrzewać, aż do zaniku burzenia; jeśli w próbce pozostaje nierozłożona materia organiczna, czynności powtórzyć.
5. Zawartość zlewki przenieść ilościowo do butelki wirówkowej, objętość końcowa powinna wynosić 150-200 cm^3, wirować butelki aż do uzyskania przezroczystego roztworu (15 minut, 400 g, gdzie g jest wartością przyspieszenia ziemskiego), roztwór znad osadu zdekantować lub odciągnąć, czynności powtarzać do uzyskania bezbarwnego (lub prawie bezbarwnego) roztworu;

   lub

   przeprowadzić flokulację pozostałości dodając 25 cm^3 1M chlorku wapnia, uzupełnić wodą destylowaną do objętości 250 cm^3, odstawić do sklarowania, następnie odciągnąć lub zdekantować roztwór; czynności powtarzać do uzyskania bezbarwnego (lub prawie bezbarwnego) roztworu;

   lub

   przesączyć pozostałość w zlewce przez twardy sączek i dokładnie przemyć wodą destylowaną.
6. Pozostałość próbki przenieść ilościowo do butelki wirówkowej.
7. Dodać tyle wody destylowanej, aby stosunek objętościowy gleby do wody wynosił od 1:4 do 1:6, wstrząsnąć zawartość, następnie wytrząsać przez 1 h na wytrząsarce obrotowej.
8. Wirować do uzyskania klarownego roztworu i zmierzyć jego przewodność elektrolityczną. Jeśli EC<0,4 dS/m, przejść do następnego etapu. Jeśli EC>0,4 dS/m, roztwór odrzucić, dodać 250 cm^3 wody destylowanej, wytrząsać przez 1 h na wytrząsarce obrotowej, procedurę powtarzać do momentu aż EC<0,4 dS/m.
9. Usunąć tlenki żelaza i glinu, wytrząsając przez noc glebę z roztworem ditionitu sodu, przyjmując stosunek objętościowy gleby do roztworu 1:40 (ditionit sodu 40g/l, w ok. 0,3 M octanie sodu, zbuforowany kwasem octowym do pH 3,8). W razie potrzeby procedurę powtórzyć.
10. Do odwirowanej próbki dodać 4 cm^3 1M kwasu chlorowodorowego na każdy procent węglanów zawarty w glebie oraz dodatkowo 25 cm^3 tego kwasu.

Dopełnić wodą do ok. 250 cm^3, podgrzać przez 15 minut na łaźni wodnej, od czasu do czasu mieszając, odstawić na noc, roztwór zdekantować lub odciągnąć, w razie potrzeby odwirować. Roztwór powinien wykazywać EC<0,4 dS/m.

Soil Survey Laboratory Methods Manual – procedura standardowa

1. Odważyć do wytarowanej zlewki 300 cm^3 odważkę 10 g gleby*.
2. Dodać ok. 50 cm^3 wody destylowanej** oraz 5-7,5 cm^3 perhydrolu 30% do próbki, przykryć szkiełkiem zegarkowym, odczekać aż zakończy się wstępna reakcji utlenienia, następnie postawić na płycie grzejnej.
3. Utrzymywać temperaturę 90°C, czterokrotnie dodać do próbki porcje 5-7,5 cm^3 perhydrolu, w 30-minutowych odstępach. Jeśli to konieczne, dodać kolejne porcje perhydrolu. Jeśli reakcja jest zbyt burzliwa, dodać małą porcję etanolu, zdjąć próbkę z płyty, przenieść próbkę do większego naczynia lub zmniejszyć porcje stosowanego odczynnika.
4. Zagotować próbkę aby rozłożyć pozostały perhydrol, odciągnąć roztwór z próbki w wykorzystaniem systemu świecy filtracyjnej***, czterokrotnie przepłukać próbkę z użyciem ok. 150 cm^3 wody destylowanej.
5. Jeżeli próbka zawiera 1-5% gipsu (uwodnionego siarczanu wapnia), wymieszać próbkę z użyciem mieszadła magnetycznego przez 5 minut i pięciokrotnie przepłukać używając ok. 250 cm^3 wody destylowanej za każdym razem; Jeśli próbka zawiera ponad 5% gipsu, przenieść ją do zlewki 1000 cm^3, mieszać użyciem mieszadła magnetycznego przez 5 minut i pięciokrotnie przepłukać używając każdorazowo ok. 750 cm^3 wody destylowanej.
6. Wysuszyć próbkę w suszarce (110°C) przez noc, umieścić w eksykatorze, dokładnie zważyć.

---

*Metodyka USDA w szczególnych przypadkach dopuszcza wykonanie analizy gleby w stanie wilgotności polowej. Dotyczy to ciężkich utworów glebowych, których wysuszenie może skutkować obniżeniem mierzonej zawartości iłu ze względu na nieodwracalną agregację najdrobniejszych cząstek. Szczegółowa procedura opisana jest w literaturze źródłowej (Burt, 2004). Także w normie ISO 11277 pojawia się możliwość wykonania analizy na próbce gleby wilgotnej, ale norma, w odróżnieniu od USDA, nie przewiduje w tym wypadku wstępnego przygotowania próbki do analizy (PN-ISO 11277, 2005).

**Opisywana metoda nie wymaga zastosowania wody destylowanej. W oryginalnym przepisie występuje woda oczyszczona poprzez proces odwrotnej osmozy (*RO water*). Ze względu na powszechność zastosowania wody destylowanej w polskich laboratoriach, autorzy dokonali w tym zakresie niewielkiej modyfikacji metody.

***Systemy świec filtracyjnych nie są rutynowo stosowane w polskich laboratoriach, ale są dostępne komercyjnie na rynku analitycznym. Carter (1993) sugeruje, że można zastąpić system świec filtracyjnych płukaniem i wirowaniem próbki glebowej, z użyciem wody destylowanej.

Soil Survey Laboratory Methods Manual – procedura usunięcia węglanów

1. Odważyć do wytarowanej zlewki 300 cm^3 taką odważkę, aby po usunięciu węglanów uzyskać 10 g gleby.
2. Dodać ok. 200 cm^3 1M roztworu buforu octanowo-sodowego, wymieszać mieszadłem typu 'blender' (ang. *stirring rod*), przykryć szkiełkiem zegarkowym, odstawić na noc.
3. Następnego dnia podgrzać do ok. 90°C, i utrzymywać w tej temperaturze, aż przestaną pojawiać się pęcherzyki, nie gotować.
4. Zdekantować zawiesinę, dodać kolejna porcję buforu, procedurę powtarzać aż do usunięcia węglanów.
5. Osuszyć próbkę przy użyciu ceramicznej świecy filtracyjnej, jednokrotnie przepłukać wodą destylowaną.
6. Kontynuować analizę według procedury standardowej.

Soil Survey Laboratory Methods Manual – procedura usunięcia żelaza

1. Odważyć próbkę gleby do 300 cm^3 wytarowanej zlewki. Dostosować próbkę w taki sposób, aby po zakończeniu procedury masa wynosiła ok. 10 g. W pojedynczej zlewce powinna znaleźć się taka ilość gleby, żeby zawarte w niej tlenki żelaza nie przekraczały masy 0,5 g – w razie konieczności próbkę podzielić na kilka zlewek.
2. Dodać ok. 50 cm^3 wody destylowanej oraz 5 cm^3 perhydrolu 30% do próbki, przykryć szkiełkiem zegarkowym, odczekać aż zakończy się wstępna reakcji utlenienia, następnie postawić na płycie grzejnej. W razie konieczności przenieść próbkę do większego naczynia.
3. Podgrzać próbkę do 90°C i utrzymywać zadaną temperaturę. Dodawać 5 ml porcje perhydrolu w odstępach 45-minutowych aż do zakończenia reakcji utlenienia lub do osiągnięcia 30 cm^3 objętości dodanego odczynnika. Podgrzewać próbkę dodatkowe 45 minut aby rozłożyć nadmiar perhydrolu. Jeśli reakcja jest zbyt burzliwa, dodać małą porcję etanolu lub zdjąć próbkę z płyty;
4. Dodać 40 cm^3 roztworu cytrynianu i 5 cm^3 dwuwęglanu sodu. Podgrzać do 80°C na łaźni wodnej, nie przekraczając zadanej temperatury.
5. Dodać 1 g ditionitu sodu skalibrowaną łyżeczką, wymieszać delikatnie szklaną bagietką, następnie mieszać sporadycznie przez 15 minut. Dodać 10 cm^3 nasyconego roztworu NaCl i wymieszać.
6. Odwirować i osuszyć próbkę przy użyciu świecy filtracyjnej aby usunąć rozpuszczony tlenek żelaza. Połączyć podzielone wcześniej próbki.

7. Jeśli próbka zawiera mniej niż 0,5 g Fe_2O_3, powtórzyć jednokrotnie procedurę. Jeśli próbka zawiera więcej niż 0,5 g Fe_2O_3, procedurę powtórzyć dwukrotnie.
8. Kontynuować analizę według procedury standardowej.

Procedures for soil analysis ISRIC/FAO – usunięcie substancji organicznej

1. Odważyć próbkę ok. 20 gleby do 1 dm^3 zlewki (w przypadku podwyższonej zawartości węglanów należy proporcjonalnie zwiększyć odważkę, jeśli planuje się ich usunięcie).
2. Dodać 15 cm^3 wody i 15 cm^3 perhydrolu 30%, przykryć szkiełkiem zegarkowym. W przypadku bardzo burzliwej reakcji zlewkę ochłodzić w zimnej wodzie; dodatkowo można ograniczyć „burzenie" dodając kilka kropel etanolu. Odstawić próbkę na noc.
3. Następnego dnia, umieścić zlewkę na łaźni wodnej (80°C) i regularnie dodawać 5-10 cm^3 porcje perhydrolu aż do całkowitego rozkładu substancji organicznej (zazwyczaj supernatant staje się klarowny).
4. Uzupełnić zlewkę wodą do ok. 300 cm^3; umieścić na płycie i ostrożnie gotować, aby usunąć pozostały perhydrol; następnie zdjąć z płyty i ostudzić.
5. Odwirować i zdekantować próbkę lub pozwolić zawiesinie osiąść na dnie i odciągnąć roztwór. (Flokulację można przyspieszyć dodając 25 cm^3 1M chlorku wapnia. Płukanie próbki powtarzać aż do zaniku ciemnych pozostałości substancji organicznej. EC supernatanta powinno być niższe niż 0,4 m S/cm).
6. W przypadku możliwości występowania soli rozpuszczalnych lub gipsu zmierzyć EC supernatanta. Jeśli EC>0,4mS/cm, umieścić próbkę w butelce, dodać 250 cm^3 wody, mieszać na mieszadle horyzontalnym przez godzinę. Czynności w razie konieczności powtarzać aż EC<0,4mS/cm.

Procedures for soil analysis ISRIC/FAO – usunięcie węglanów

1. Do próbki, z której usunięto substancję organiczną dodać 25 cm^3 HCl oraz dodatkowo 4 cm^3 tego kwasu na każdy procent węglanów w glebie.
2. Do odwirowanej próbki dodać 4 cm^3 1M kwasu chlorowodorowego na każdy procent węglanów zawarty w glebie oraz dodatkowo 25 cm^3 1M kwasu chlorowodorowego.
3. Dopełnić wodą do ok. 250 cm^3, podgrzać przez 15 minut na łaźni wodnej, od czasu do czasu mieszając, odstawić na noc.
4. Roztwór zdekantować lub odciągnąć, w razie potrzeby odwirować. Roztwór powinien wykazywać EC<0,4 mS/cm – w razie potrzeby powtarzać płukanie

próbki wodą aż do osiągnięcia poprawnej wartości przewodności elektrolitycznej.

W przypadku obecności w istotnej ilości minerałów, które mogą zostać rozpuszczone w trakcie procedury, zaleca się następujące czynności:

- pominięcie podgrzewania próbki
  lub
- użycie 10% roztworu kwasu octowego zamiast kwasu solnego
  lub
- użycie 1M buforu sodowo-octanowego o pH 5.

Adresy autorów:

Magdalena Ryżak
Andrzej Bieganowski
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin
e-mail: m.ryzak@ipan.lublin.pl, a.bieganoswki@ipan.lublin.pl

Piotr Bartmiński
Piotr Bartmiński Zakład Gleboznawstwa
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
ul. Akademicka 19/243
20-033 Lublin
e-mail: pbartminski@gmail.com

Address of Authors:

Magdalena Ryżak
Andrzej Bieganowski
Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences
ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin
e-mail: m.ryzak@ipan.lublin.pl, a.bieganoswki@ipan.lublin.pl

Piotr Bartmiński
Department of Soil Science
Maria Curie-Sklodowska University
Akademicka 19/243
20-033 Lublin
e-mail: pbartminski@gmail.com