

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 142–151
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 142–151
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.14

Aleksandra GORĄCZKO, Szymon TOPOLIŃSKI

Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture, UTP University of Science and Technology

Wpływ kształtu cząstek ilastych na wyniki analiz granulometrycznych gruntów spoistych*

Influence of shape anisotropy on the results of grain size analysis of the clayey soils

Słowa kluczowe: analiza granulometryczna, analiza areometryczna, prawo Stokesa, metoda dyfrakcji laserowej, LDA, grunty spoiste, anizotropia kształtu

Key words: grain size analysis, hydrometric method, Stokes equation, laser diffraction analysis, LDA, clay soils, shape anisotropy

Wprowadzenie

Analiza granulometryczna jest podstawowym badaniem ustalającym udział poszczególnych frakcji w gruntach, przeprowadzanym w celu klasyfikacji oraz prognozowania właściwości inżynierskich. W przypadku gruntów spoistych najczęściej zalecane są badania sedy-

mentacyjne (hydrometryczne), tj. analiza areometryczna lub pipetowa (PN-B-04481:1988, PN-EN 1997-2:2009, PN-EN ISO 17892-4:2017-01E, ASTM D7928-17). Według PN-EN 1997-2:2009 wyniki uzyskane innymi metodami mogą być wykorzystywane pod warunkiem wcześniejszego ustalenia związków korelacyjnych do wymienionych wcześniej oznaczeń sedymentacyjnych.

Jedną z alternatywnych metod do analiz granulometrycznych gruntów jest stosowany od ponad 20 lat laserowy pomiar wielkości cząstek (ang. *laser diffraction analysis* – LDA). Metoda ta uwzględnia zależność między obrazem dyfrakcyjnym przechodzącego przez

*Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej w wyniku projektu „Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności” współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007–2013.

zawiesinę gruntową światła laserowego a wielkością zawartych w niej cząstek i ziaren. Wykorzystanie analizatorów laserowych wykazuje wiele zalet, przede wszystkim dużą powtarzalność oznaczeń oraz ich małą pracochłonność. Niemniej odmienna, oparta na zasadach optycznych, metoda pomiaru może skutkować znaczącymi różnicami w uzyskiwanych wynikach w stosunku do oznaczeń sedymentacyjnych, zwłaszcza, że na sposób rozpraszania wiązki laserowej mogą wpływać także własności optyczne cząstek, głównie współczynnik absorpcji światła oraz ich kształt.

W artykule przedstawiono analizę wpływu kształtu cząstek gruntu, zwłaszcza najdrobniejszej frakcji ilowej, na uzyskiwane rezultaty oznaczeń granulometrycznych. Minerale ilaste stanowiące główny składnik tej frakcji charakteryzują się silną anizotropią, ponieważ grubość cząstki jest wielokrotnie mniejsza od jej rozmiarów poprzecznych. W tej sytuacji podstawowe założenie o kulistości cząstek przyjmowane do opracowania rozkładów ich wielkości zarówno w metodach sedymentacyjnych, jak i analizie laserowej powoduje istotne trudności w korelacji wyników i uzyskaniu jednoznacznych związków między nimi.

Teoretyczne aspekty wpływu kształtu cząstek na wyniki analiz granulometrycznych

Analizy hydrometryczne (HM)

Analizy sedymentacyjne (hydrometryczne, HM), stosowane do badań składu granulometrycznego gruntów drobnoziarnistych, wykorzystują prawo Stokesa, które opisuje siłę oporu cia-

ła poruszającego się w płynie (Lamb, 1975). Możliwość wykorzystania równań Stokesa do określenia wielkości cząstek jest uwarunkowana spełnieniem podstawowych założeń:

- wzajemne oddziaływanie między cząstkami gruntu oraz oddziaływanie między cząstkami i ściankami cylindra pomiarowego są pomijalne;
- wielkość badanych cząstek pozwala na założenie, że cząstki opadają w przedziale lepkościowym (ruchem laminarnym);
- rzeczywisty kształt cząstek można aproksymować do kuli.

Dla oznaczeń stosowanych w gruntoznawstwie dwa pierwsze założenia uznaje się za spełnione po zastosowaniu pewnych ograniczeń. Przyjmuje się więc, że wzajemne oddziaływanie cząstek gruntu nie będzie zachodzić, jeżeli ilość suchego gruntu nie będzie przekraczać 50 g w 1 l zawiesiny. Ruch laminarny jest natomiast zapewniony poprzez ograniczenie zakresu wielkości cząstek gruntu badanych metodami sedymentacyjnymi. Oznaczenia wykonuje się dla materiału, który został przemyty z próbki, przechodząc przez sito o wielkości oczka rzędu kilkudziesięciu mikrometrów (zwykle 75 μm). W tym zakresie wielkości cząstek liczba Reynoldsa wynosi poniżej jedności, co wskazuje że cząstki będą sedymentować w przedziale lepkościowym (Lu, Ristow i Likos, 2000).

Z kolei przyjęcie kulistego kształtu cząstek do wyznaczenia średnic zastępczych musi prowadzić do istotnych różnic w stosunku do wyników uwzględniających ich rzeczywistą anizotropię, występującą zwłaszcza w przypadku cząstek frakcji ilowej (Nadeau, 1985; Środoń, Andreoli, Elsass i Robert, 1990).

W celu wyznaczenia wpływu kształtu na rezultaty oznaczeń sedymentacyjnych płytkowy kształt minerałów ilastych najczęściej jest opisywany elipsoidą, aproksymującą przekrój poprzeczny, powstałą poprzez obrót elipsy wokół krótszej osi cząstki (Jennings i Parslow, 1988; Jennings, 1993; Lu i in., 2000). Dla tak powstałej bryły wprowadza się współczynnik kształtu (E) jako relację krótszej osi cząstki (b) do dłuższej osi (a), czyli $E = b/a$.

Relację między równoważną średnicą kuli, opadającą z tą samą prędkością co elipsoidalna opisująca cząstkę o kształcie płytki, wyraża się wzorem:

$$d = a \cdot \frac{\sqrt{\arccos E}}{\sqrt{1 - E^2}} gE \quad (1)$$

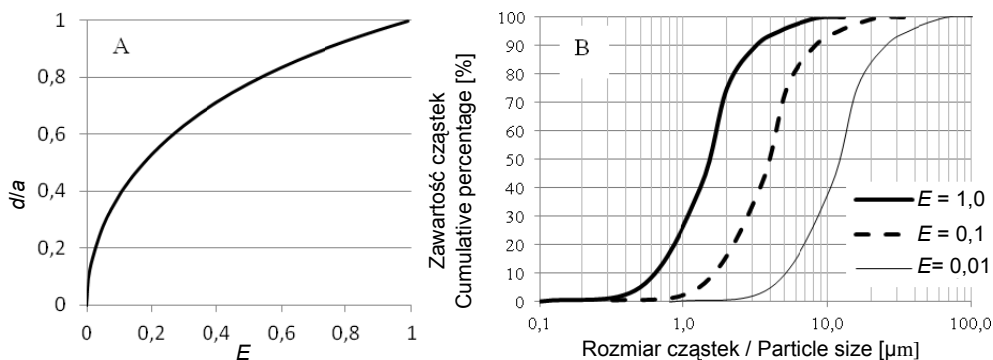
gdzie:

d – średnica równoważna (zastępcza),
 a – dłuższa oś elipsoidy,
 E – współczynnik kształtu ($E = b/a$),

g – przyspieszenie ziemskie,
 b – krótsza oś elipsoidy.

Na rysunku 1 przedstawiono wpływ anizotropii wymiarów badanych cząstek ($E = b/a$) na średnicę zastępczą według równań Stokesa (d).

W zależności od wartości współczynnika kształtu (E) średnica zastępcza cząstki kulistej, wyznaczana z równań Stokesa (d), będzie stanowić część wymiaru dłuższej osi elipsoidy (a): np. dla $E = 0,1$ stosunek ten według rysunku 1A wynosi $d/a = 0,38$. Na wykresie rozkładu wielkości cząstek oznacza to przesunięcie krzywej granulometrycznej w stronę większych średnic (rys. 1B). W przypadku gruntu przedstawionego na rysunku 1B oznaczenie areometryczne (dla $E = 1,0$) wykazało zawartość 75% cząstek frakcji ilowej ($d < 2 \mu\text{m}$), natomiast po przekształceniu wzorem (1) udział tych cząstek przy współczynniku kształtu $E = 0,1$ wynosi niespełna 20%, a odpowiadająca 75% zawartości cząstka



RYSUNEK 1. A – stosunek średnicy zastępczej (d), uzyskanej w badaniach hydrometrycznych za pomocą równań Stokesa, do dłuższej osi cząstki elipsoidalnej (a) w zależności od współczynnika kształtu (E) (za: Lu i in., 2000); B – przykładowy rozkład wielkości cząstek według zależności (1) dla różnych wartości współczynnika kształtu

FIGURE 1. A – relation of the Stokes' diameter (d) to the longer axis of elipsoid (a) in relation to the aspect ratio E (after: Lu et al., 2000); B – The exemplary cumulative percentage of particles after transformation (1) for different values of aspect ratio

ma średnicę $d = 5,2 \mu\text{m}$. Różnice te rosną wraz ze wzrostem anizotropowości kształtu (spadkiem wartości współczynnika kształtu).

Różnice między obliczanymi wartościami średnic zastępczych i rzeczywistymi wymiarami cząstek anizotropowych stają się szczególnie istotne, gdy otrzymane wyniki stosuje się do celów klasyfikacji gruntów, zamiennie z wynikami uzyskanymi według metody opartej na innych zasadach pomiaru, np. metodą dyfrakcji laserowej (LDA).

Analizy metodą dyfrakcji laserowej (LDA)

Metoda dyfrakcji laserowej (LDA) jest alternatywą dla metod sedymentacyjnych od niemal 30 lat. Dyskusja dotycząca zastosowania LDA w gruntoznawstwie, podejmowana intensywnie od lat 90. XX wieku, dotyczy między innymi ujednoczenia metodyki preparowania próbek i wykonania oznaczeń oraz interpretacji wyników (Buurman, Pape, i Muggler, 1997; ISO 13320-1:1999; Eshel, Levy, Mingelgrin i Singer, 2004; Bieganowski, Ryzak i Witkowska-Walczak, 2010; Ryzak i Bieganowski, 2011; Kelly i Etzler, 2013; Gorączko i Topoliński, 2017).

Zasadniczym jednak aspektem, będącym przedmiotem dyskusji jest wpływ anizotropii kształtu na rozkłady wielkości cząstek gruntu, uzyskanych metodą LDA oraz ich porównywalność z oznaczeniami hydrometrycznymi. Największe rozbieżności obserwuje się, gdy badane grunty zawierają frakcję ilową (Konert i Vandenberghe, 1997; Beuselinck, Govers, Poesen, Degraer

i Froyen, 1998; Frankowski i Smagała, 2000; Jonkers, Prins, Brummer, Konert i Lougheed, 2009; Traubner, Roth i Tippkotter, 2009; Di Stefano, Ferro i Mirabile, 2010). Zważywszy na różnice obu technik pomiarowych rejestrowane różnice uzyskiwanych wyników nie są zaskakujące. Jak przedstawiono w dyskusji w poprzednim rozdziale, założenie o kulistości cząstek w przypadku metod sedymentacyjnych wpływa na uzyskanie zaniżonych ich rozmiarów. Takie samo założenie przy interpretacji obrazu dyfrakcyjnego promieni wiązki laserowej, przechodzących przez zawieszinę gruntową, może działać odmiennie. Średnice przekroju cząstek ilu, mających kształt cienkich płytek, będą podstawą wyznaczenia ich objętości i masy jak dla obiektów kulistych, wpływając na procentowy rozkład ich wielkości. Błąd metody, związany z założeniem kulistości cząstek, ściśle zależy od cech morfometrycznych badanego gruntu i jest trudny do wyeliminowania wstecznie w algorytmie obliczeń. Błąd ten zależy od stopnia anizotropii cząstek gruntu, który, jak należy oczekiwać, jest zmienny dla poszczególnych jego frakcji.

Analiza porównawcza wielkości cząstek anizotropowych wyznaczonych metodą LDA i obserwacji bezpośrednich obrazów uzyskiwanych za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego – TEM (Bowen, Sheng i Jongen, 2002; Dur, Elsass, Chaplain i Tessier, 2004; Kelly i Kazanjian, 2006) wykazuje wyraźnie zawyżenie udziału procentowego cząstek o większych średnicach w rozkładach uzyskiwanych techniką dyfrakcyjną, w których są one obliczane na podstawie relacji objętości (masy). W pracach tych znacznie lepszą adekwat-

ność obu metod uzyskano dla rozkładów utworzonych na podstawie relacji powierzchni badanych cząstek, co zwykle jest opcją obliczeniową oprogramowania analizatorów laserowych. Dotyczy to jednak przypadków gruntów stosunkowo jednorodnych, w których większość cząstek ma kształt bardzo cienkich płytek, o zbliżonej pomijalnej grubości.

Podejściem mającym największe praktyczne zastosowanie jest ustalenie zależności transformacyjnych na podstawie badań LDA i rezultatów oznaczeń sedymentacyjnych procentowych zawartości wielkości cząstek, rozgraniczających iłową i pyłową frakcję (2 μm), dla określonych typów genetycznych gruntów (tab. 1).

Material i metody

Analizy granulometryczne przeprowadzono dla neogeńskich iłów montmorillonitowo-illitowych pobranych z terenu Bydgoszczy. Są to twory występujące na znacznym obszarze kraju, o istotnym zróżnicowaniu litologicznym, charakteryzujące się dużą zawartością frakcji iłowej (Kaczyński i Grabowska-Olszewska, 1997; Gorączko i Kumor, 2011).

Oznaczenia areometryczne iłów wykonano zgodnie z normą PN-B-04481:1988.

Badania metodą LDA przeprowadzono za pomocą urządzenia Fritsch Analysette 22 MicroTec, wyposażonego w laser zielony (o długości fali $\lambda = 532 \text{ nm}$) oraz

TABELA 1. Wybrane wzory transformacyjne dla wyników analiz hydrometrycznych (HM) i laserowych (LDA) dla udziału frakcji iłowej o cząstkach o rozmiarze mniejszym od 2 μm

TABLE 1. Exemplary transfer function for HM and LDA content of particle below 2 μm

Źródło Source	Rodzaj utworów Sediments	Wzory transformacyjne Transfer functions
Di Stefano i inni (2010)	228 próbek, Morze Sycylijskie	$Cl_{HM} = 1,91Cl_{LDA}$
Konert i Vandenberghe (1997)	próbki BCR	$Cl_{LDA} = 0,316Cl_{HM} - 0,232$
Traubner i inni (2009)	16 próbek, Dolna Saksonia	$Cl_{HM} = 3,089Cl_{LDA} - 2,899$
Frankowski i Smagała (2000)	233 próbki, Polska	$Cl_{LDA} = 0,453Cl_{HM} + 5,898$
Makó i inni (2017)	400 próbek, z terenu Europy	$Cl_{HM} = 0,92Cl_{LDA} + 0,69$

Cl_{HM} – zawartość frakcji iłowej ($d < 2 \mu\text{m}$) określona metodą hydrometryczną (HM), Cl_{LDA} – zawartość frakcji iłowej ($d < 2 \mu\text{m}$) określona metodą dyfraktometryczną (LDA).

Innym rozwiązaniem stosowanym do porównywania wyników obu metod jest określenie optycznego odpowiednika wartości granicznych poszczególnych frakcji. Wartości proponowane w literaturze dla frakcji iłowej wynoszą od 3,5 do 8 μm (Buurman i in., 1997; Konert i Vandenberghe, 1997; Makó, Tóth, Weynants, Rajkai, Hermann i Tóth, 2017).

laser podczerwony ($\lambda = 940 \text{ nm}$). Pełen zakres pomiarowy przyrządu wynosi 0,08–2000 μm . Po wykonaniu wstępnej serii badań składu uziarnienia w pełnym zakresie pomiarowym, z uwagi na brak większych cząstek i ziaren w badanych gruntach, pomiar zawężono do zakresu 0,08–45 μm (wykorzystując jedynie laser zielony).

Dyspersję agregatów cząstek gruntu przeprowadzano za pomocą wbudowanego modułu ultradźwiękowego o maksymalnej mocy 60 W i częstotliwości fali 36 kHz. Oznaczenia zostały wykonane po dyspergowaniu ultradźwiękowym trwającym 10 min dla każdej z badanych próbek. Do wyznaczenia składu granulometrycznego gruntów zastosowano teorię Fraunhofera. Dyskusję dotyczącą szczegółów metodyki oznaczeń stosowanej dla ilów serii poznańskiej przedstawiono w pracy Gorączki i Topolińskiego (2017).

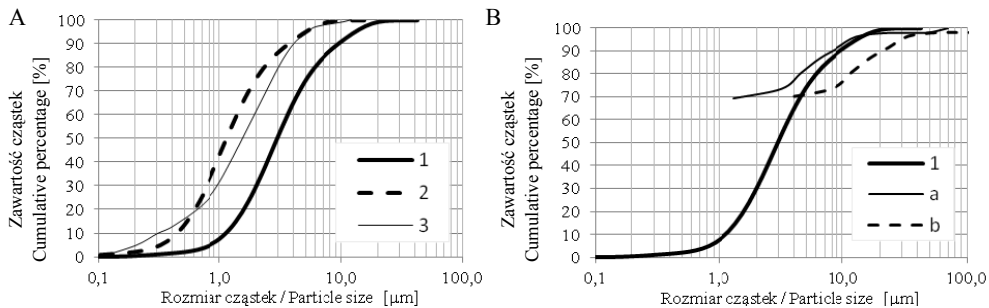
Badania porównawcze przeprowadzono dla 10 losowo wybranych próbek ilu, wykonując oznaczenie składu granulometrycznego metodą LDA i metodą HM.

Wyniki badań

Dotychczasowe badania składu granulometrycznego ilów poznańskich metodą LDA wykazały jej przydatność do badania zmienności litologicznej tego kompleksu osadów (Gorączko i Topoliński, 2017). Stwierdzono jednak występowanie istotnych różnic rezultatów uzyskiwanych metodą LDA w stosunku do wyników uzyskiwanych metodą areometryczną. Dla poszczególnych próbek wykonano obliczenia uwzględniające anizotropię cząstek z zastosowaniem wzoru (1), przyjmując współczynnik kształtu $E = 0,1$. Ilustrację graficzną transformacji rozkładów wielkości cząstek przykładowej próbki ilu (próbka 2, tab. 2) z Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 2.

TABELA 2. Wyniki badań zawartości frakcji ilowej metodą areometryczną (HM) i i laserową (LDA)
TABLE 2. Results of clay content from HM and LDA

Próbka Sample	Metoda areometryczna HM results	Metoda dyfrakcji laserowej / LDA results		
	zawartość cząstek iłowych clay content $d_{HM} < 2 \mu\text{m}$ [%]	zawartość cząstek particle content $d_{LDA} < 2 \mu\text{m}$ [%]	zawartość cząstek particle content $d_{LDA} < 5,2 \mu\text{m}$ [%]	zawartość cząstek particle content $d_{LDA} < 4,6 \mu\text{m}$ [%]
1	55,3	21,8	57,6	53,6
2	71,4	29,0	75,9	71,4
3	67,8	32,1	79,1	75,6
4	60,5	24,7	68,8	64,5
5	54,5	18,6	57,9	50,3
6	48,7	17,4	49,5	45,1
7	72,1	36,3	77,7	72,3
8	65,6	28,3	65,1	60,8
9	61,2	27,7	64,8	62,1
10	62,8	25,4	64,6	59,5



RYSUNEK 2. Krzywe granulometryczne: 1 – LDA, 2 – LDA po transformacji z zastosowaniem wzoru (1), 3 – uzyskana na podstawie relacji powierzchni cząstek; a – areometryczna, b – areometryczna po transformacji według wzoru (1)

FIGURE 2. Particle size distribution curve: 1 – LDA, 2 – LDA after transformation equation (1), 3 – based on area relation; a – hydrometric, b – hydrometric after transformation equation (1)

Teoretyczna wartość średnicy zastępczej cząstki równej $d = 2 \mu\text{m}$ po przeliczeniu według wzoru (1) dla $E = 0,1$ wynosi $d = 5,2 \mu\text{m}$. Na wykresie położenie krzywej LDA po transformacji odwrotnej (krzywa 2 na rys. 2A) ma zbliżone położenie do krzywej LDA uzyskanej z przeliczenia udziału procentowego powierzchni cząstek (krzywa 3 na rys. 2A), lecz ma nieco inny kształt.

W tabeli 2 zestawiono wyniki oznaczeń zawartości cząstek ilowych metodą hydrometryczną $d_{HM} < 2 \mu\text{m}$ oraz wyniki uzyskane techniką dyfrakcyjną dla $d_{LDA} < 2 \mu\text{m}$, $d_{LDA} < 5,2 \mu\text{m}$ i $d_{LDA} < 4,6 \mu\text{m}$, dla 10 próbek iłu.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 dla iłów z Bydgoszczy określono zależność między udziałem frakcji ilowej, wyznaczonej metodą areometryczną (Cl_{HM}) i laserową (Cl_{LDA}), a rozkładem wielkości cząstek:

$$Cl_{HM} = 1,21Cl_{LDA} + 30,30 \quad (2)$$

gdzie:

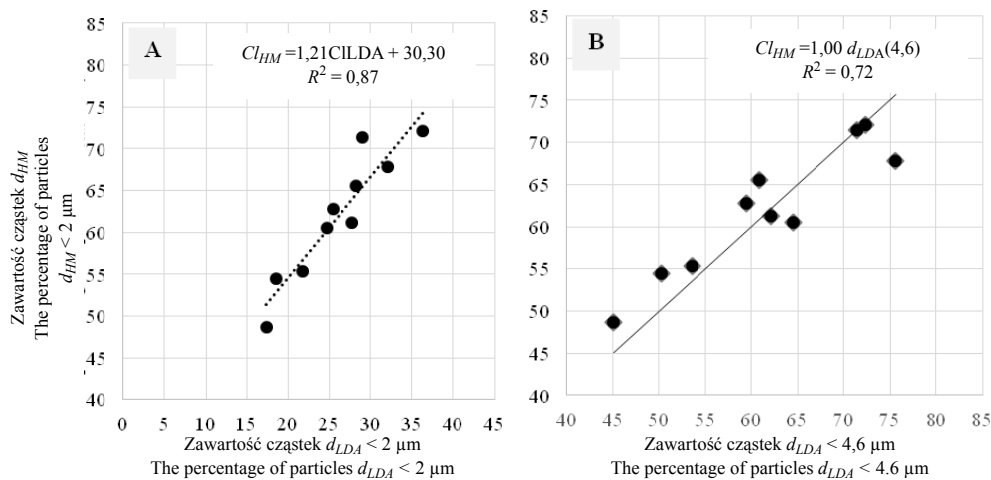
Cl_{HM} – zawartość frakcji ilowej ($d < 2 \mu\text{m}$) określona metodą areometryczną (HM) [%].

Cl_{LDA} – zawartość frakcji ilowej ($d < 2 \mu\text{m}$) określona metodą dyfraktyczną (LDA) [%].

Badając relację między zawartością frakcji ilowej, oznaczoną metodą areometryczną (Cl_{HM}), i rozkładem wielkości cząstek, uzyskanym metodą LDA, stwierdzono, że najlepszą zbieżność wyników uzyskano dla średnicy $d_{LDA} = 4,6 \mu\text{m}$ (rys. 3B), co jest wartością nieco mniejszą od wyznaczonej teoretycznie według wzoru (1), wynoszącej $d = 5,2 \mu\text{m}$. Nie uzyskano natomiast związku korelacyjnego między udziałem frakcji ilowej (Cl_{HM}), wyznaczonym metodą areometryczną, a udziałem tej frakcji wyliczonym na podstawie powierzchni cząstek (w badaniu LDA).

Podsumowanie

Rezultaty oznaczeń wielkości cząstek frakcji ilowej zależą od zastosowanej metody badawczej. W przypadku metod hydrometrycznych anizotropowy (płytkowy) kształt minerałów ilastych



RYСУNEK 3. Zależność zawartości cząstek frakcji iłowej $d_{HM} < 2 \mu\text{m}$ uzyskanych metodą HM i metodą LDA odpowiednio dla średnic cząstek: A – $d_{LDA} < 2 \mu\text{m}$, B – $d_{LDA} < 4,6 \mu\text{m}$

FIGURE 3. Correlation of clay content from HM and LDA methods ($d_{HM} < 2 \mu\text{m}$) and results obtained by diffraction method: A – particles $d_{LDA} < 2 \mu\text{m}$, B – particles $d_{LDA} < 4,6 \mu\text{m}$

wpływa na zaniżenie wielkości wyznaczonych średnic zastępczych w stosunku do rzeczywistych wymiarów przekroju poprzecznego. Średnice cząstek uzyskane metodą LDA, w którym to badaniu udział poszczególnych frakcji jest wyznaczany objętościowo (masowo) na podstawie optycznego obrazu ugięcia (dyfrakcji), są zależne od stopnia anizotropii, przy czym z reguły ich wymiary wychodzą zawyżone. Jako rozwiązanie pozwalające na uzyskanie porównywalnych wyników proponuje się dla poszczególnych gruntów funkcje transformujące dla granicznych wartości frakcji iłowych ($2 \mu\text{m}$) bądź przesunięcie tej granicy do większej wartości dla metody LDA ($d_{LDA} = 4,6 \mu\text{m}$). Jak wskazują wyniki badań iłow serii poznańskiej oraz dyskusja literatury, z powodu między innymi anizotropii kształtu cząstek ılastych nie ma możliwości ustalenia wspólnych, obowiązujących dla wszystkich gruntów wzorów transformacyjnych.

Literatura

- ASTM D7928-17. Standard test method for particle size distribution (gradation) of fine grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G. i Froyen, L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, 32(3), 193-208.
- Bieganowski, A., Ryzak, M. i Witkowska-Walczak, B. (2010). Determination of soil aggregate disintegration dynamics using laser diffraction. *Clay Minerals*, 45(1), 23-34.
- Bowen, P., Sheng, J. i Jongen, N. (2002). Particle size distribution measurement of anisotropic particles cylinders and platelets – practical examples. *Powder Technology*, 128(2), 256-261.
- Buurman, P., Pape, T. i Muggler, C.C. (1997). Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. *Soil Science*, 162(3), 211-218.
- Di Stefano, C., Ferro, V. i Mirabile, S. (2010). Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*, 106(2), 205-215.

- Dur, J.C., Elsass, F., Chaplain, V. i Tessier, D. (2004). The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction. *European Journal of Soil Science*, 55(2), 265-270.
- Eshel, G., Levy, G.J., Mingelgrin, U. i Singer, M.J. (2004). Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 736-743.
- Frankowski, Z. i Smagała, S. (2000). Przydatność metody laserowej w badaniach uziarnienia gruntów spoistych. W *XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania „Problemy geotechniczne obszarów przy morskich”* (strony 163-171). Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej.
- Gorączko, A. i Kumor, M.K. (2011). Pęcznienie mioplioceniowych ilów serii poznańskiej z rejonu Bydgoszczy na tle ich litologii. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 446(2), 305-314.
- Gorączko, A., i Topoliński, S. (2017). Zastosowanie oznaczeń uziarnienia metodą dyfrakcji laserowej (LDA) do oceny zróżnicowania ilów neogenkich z Bydgoszczy. *Przegląd Geologiczny*, 65(4), 243-250.
- ISO 13320-1:1999. Particle size analysis. Laser diffraction methods. Part 1: General Principles.
- Jennings, B.R. (1993). Size and thickness measurement of polydisperse clay samples. *Clay Minerals*, 28(4), 485-494.
- Jennings, B.R. i Parslow, K. (1988). Particle size measurement: the equivalent spherical diameter. W *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 419, No 1856 (strony 137-149). London: The Royal Society.
- Jonkers, L., Prins, M.A., Brummer, G.J.A., Konert, M. i Loughed, B.C. (2009). Experimental insights into laser diffraction particle sizing of fine-grained sediments for use in palaeoceanography. *Sedimentology*, 56(7), 2192-2206.
- Kaczyński, R. i Grabowska-Olszewska, B. (1997). Soil mechanics of the potentially expansive clays in Poland. *Applied Clay Science*, 11(5-6), 337-355.
- Kelly, R.N. i Etzler, F.M. (2013). What is wrong with laser diffraction. A critical review of current laser diffraction methods for particle size analysis. Pobrano z lokalizacji: Donner Technologies, www.donner-tech.com/whats_wrong_with_ld.pdf.
- Kelly, R.N. i Kazanjian, J. (2006). Commercial reference shape standards use in the study of particle shape effect on laser diffraction particle size analysis. *AAPS PharmSciTech*, 7(2), E126-E137.
- Konert, M. i Vandenberghe, J. (1997). Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solutions for the underestimation of clay fraction. *Sedimentology*, 44, 523-535.
- Lamb, H. (1975) *Hydrodynamics*. 6th edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lu, N., Ristow, G.H. i Likos, W.J. (2000). The accuracy of hydrometer analysis for fine-grained clay particles. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 23(4), 487-495.
- Makó, A., Tóth, G., Weynants, M., Rajkai, K., Hermann, T. i Tóth, B. (2017). Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. *European Journal of Soil Science*, 68(5), 769-782.
- Nadeau, P.H. (1985). The physical dimensions of fundamental clay particles. *Clay Minerals*, 20(4), 499-514.
- PN-B-04481:1988. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 17892-4:2017-01E. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Badanie uziarnienia gruntów.
- Ryzak, M., i Bieganski, A. (2011). Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(4), 624-633.
- Środoń, J., Andreoli, C., Elsass, F. i Robert, M. (1990). Direct high-resolution transmission electron microscopic measurement of expandability of mixed-layer illite/smectite in bentonite rock. *Clays and Clay Minerals*, 38(4), 373-379.

Traubner, H., Roth, B. & Tippkotter, R. (2009). Determination of soil texture: Comparison of sedimentation method and laser-diffraction analysis. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 161-171.

Streszczenie

Wpływ kształtu cząstek ilastych na wyniki analiz granulometrycznych gruntów spoistych. Pomiar wielkości cząstek za pomocą dyfrakcji laserowej (LDA) jest alternatywną analizą hydrometrycznych (HM) metodą oznaczania składu granulometrycznego gruntów. Przy oznaczaniu frakcji najdrobniejszych, o znacznej zawartości minerałów ilastych, zasadnicze problemy wynikają ze znacznej anizotropii kształtu cząstek. W pracy zawarto porównanie wyników oznaczeń wielkości cząstek iłów neogeńskich z Bydgoszczy. Zaproponowano formuły służące do transformacji wyników metody areometrycznej i metody dyfrakcji laserowej dla badanych gruntów.

alternative method to determine grain size analysis in soils. However, for particle with high shape anisotropy LDA measurements usually produce different results than traditional hydrometric methods (HM), based on Stokes equation. The article contains the results of analyzes of Neogene clays characterized by significant lithological differentiation in regard to participation the clay fraction particles. The research was conducted for the clay samples taken in Bydgoszcz. A set of equations to transform LDM results to hydrometric results was proposed.

Authors' address:

Aleksandra Gorączko, Szymon Topoliński
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska
85-796 Bydgoszcz, al. Prof. Kaliskiego 7
Poland
e-mail: agora@utp.edu.pl
szymont@utp.edu.pl

Summary

Influence of shape anisotropy on the results of grain size analysis of the clayey soils. Laser diffraction particle sizing is an