

Niepewność wyniku analizy areometrycznej

Dr inż. Anna Gołębiewska – Geoteko sp. z o.o. Projekty i Konsultacje Geotechniczne
Dr Wojciech Hyb – SGGW w Warszawie, Wydział Zastosowań Informatyki i Matematyki

Pomiar każdej wielkości jest procesem złożonym. Wiele czynników wpływa na wynik pomiaru. Są to między innymi: dokładność i odpowiednia rozdzielczość aparatury pomiarowej, jednorodność i reprezentatywność badanej próbki, warunki środowiskowe, dokładność oznaczenia wartości wielkości pośrednich i miarodajność wartości stałych, od których zależy badana wielkość oraz inne czynniki.

Laboratoria aspirujące do wykonywania badań zgodnie z systemem jakości ISO muszą spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN ISO/IEC 17025[8]. Jednym z tych wymagań jest konieczność szacowania niepewności pomiaru. W rozdziale 5.10.3.1 pkt. c powyższej normy, precyzującym co powinno zawierać sprawozdanie z badań, jest następujący zapis: „stwierdzenie, gdy ma to zastosowanie, dotyczące oszacowanej niepewności pomiaru; informacja dotycząca niepewności jest niezbędna w sprawozdaniach z badań, wówczas gdy ma to znaczenie dla miarodajności wyników badania lub ich zastosowania, gdy takie wymaganie jest w wytycznych klienta lub gdy niepewność ma znaczenie dla zgodności z wyspecyfikowanymi wartościami granicznymi”.

Z powyższego zapisu wynika, że nie zawsze jest konieczne podawanie niepewności pomiaru.

W przypadku badania uziarnienia gruntu oszacowanie niepewności może być konieczne na przykład w przypadku, gdy określony w badaniu rodzaj gruntu sytuuje go na pograniczu dwóch rodzajów gruntu, o wyraźnie różnych właściwościach mechanicznych.

W artykule stosuje się podwójne oznaczenie rodzaju gruntu: według normy [11] i obok w nawiasie według [12].

DEFINICJA I METODY OBLICZANIA NIEPEWNOŚCI

Według Przewodnika GUM [2] słowo „niepewność” oznacza wątpliwość i stąd w szerokim znaczeniu „niepewność pomiaru” oznacza wątpliwość co do wartości wyniku pomiaru, a definicja formalna jest następująca: „niepewność (pomiaru) – parametr, związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej.”

Przewodnik GUM [2] wyróżnia dwie metody obliczania niepewności:

- metoda A, to jest metoda obliczania niepewności drogą analizy statystycznej serii pojedynczych obserwacji,

- metoda B, to jest metoda obliczania niepewności sposobami innymi niż analiza serii obserwacji.

W metodzie A wymaga się wykonania serii pomiarów tej samej wielkości, w warunkach powtarzalności pomiaru. Średnia arytmetyczna, czyli wartość przeciętna z „ n ” obserwacji, jest najlepszym osiągalnym oszacowaniem wartości oczekiwanej mierzonej wielkości. Odchylenie standardowe określone dla tych wyników wyraża niepewność standardową. Metoda A jest dość kosztowna, gdyż wymaga odpowiedniej liczby powtórzeń pomiarów; powszechnie przyjmuje się jako minimalną liczbę 5 pomiarów. W Przewodniku GUM [2] wskazano, że liczba obserwacji powinna być na tyle duża, aby zapewnić, że średnia arytmetyczna jest wiarygodnym oszacowaniem wartości oczekiwanej.

W takich przypadkach, gdy nie jest możliwe obliczenie niepewności metodą A, Przewodnik GUM [2] przewiduje zastosowanie metody B, w której „niepewność standardową określa się na drodze analizy naukowej opartej na wszystkich dostępnych informacjach o możliwej zmienności wielkości mierzonej.”

W normach amerykańskich (np. [5]) podawane są przykładowe wartości błędu pomiaru danej wielkości mierzonej.

W artykule będą przedstawione wyniki oszacowania niepewności standardowej metodą B oraz metodą A. Jako pierwsza będzie przedstawiona metoda B, ponieważ w badaniach geotechnicznych będzie to metoda podstawowa; w badaniach komercyjnych nie jest możliwe stosowanie metody A, wymagającej wykonywania wielokrotnych powtarzalnych oznaczeń danej cechy gruntu – ze względu na ich kosztowność. Na potrzeby artykułu wykonano jednak powtarzalne badania uziarnienia, aby oszacować niepewność metodą A i porównać uzyskane wartości z oszacowanymi metodą B.

ANALIZA AREOMETRYCZNA WEDŁUG NORMY [7]

Analiza areometryczna służy do określenia uziarnienia gruntów spoistych (drobnoziarnistych). Badanie polega na pomiarze gęstości zawiesiny gruntowej, odpowiednio przygotowanej, w różnych czasach od chwili jej wzburzenia. Do pomiaru gęstości służy areometr. Zanurzając areometr w danym czasie – licząc od momentu wzburzenia zawiesiny – wykonuje się pomiar jej gęstości i na tej podstawie określa się zawartość cząstek o określonej średnicy i drobniejszych, będących w zawieszeniu w chwili pomiaru. Czas, liczony od momentu wzburzenia zawiesiny, w którym wykonuje się pomiar, determinuje średnicę największych cząstek będących w danym momencie w zawieszeniu na poziomie nurnika areometru.

Średnicę (d_T) i zawartość (Z_T) tych cząstek wyznacza się ze wzorów (1) i (2).

$$d_T = \sqrt{\frac{18}{(\rho_s - \rho_w)} \cdot \frac{\eta}{g} \cdot \frac{H_R}{T}} \quad (1)$$

$$Z_T = \left[\frac{100 \cdot \rho_s}{m_s (\rho_s - \rho_w)} \right] \cdot (R_T + c + \Delta R + a) \quad (2)$$

$$H_R = \frac{30 - R_T}{30} \cdot l + h_o + h_i - \frac{V_H}{2A} \quad (3)$$

$$V_H = \frac{m_a}{\rho_w} - P(l + h_o) \quad (4)$$

gdzie:

d_T – średnica największych cząstek znajdujących się w zawieszynie gruntu w poziomie nurnika areometru zanurzonego w zawieszynie po czasie T od momentu wzburzenia zawiesziny [mm],

ρ_s – gęstość właściwa szkieletu gruntu [g/cm³],

ρ_w – gęstość wody w danej temperaturze t , [g/cm³],

η – lepkość wody w danej temperaturze t , [N·s/m²],

g – przyspieszenie ziemskie, $g = 9,81$ [m/s²],

H_R – głębokość zanurzenia środka wyporu nurnika areometru, określona według wzoru (3) [cm],

T – czas pomiaru liczony od momentu wzburzenia zawiesziny [s],

Z_T – zawartość cząstek zawieszonych w zawieszynie gruntu po czasie T od momentu jej wzburzenia [%],

m_s – masa gruntu w zawieszynie [g],

R_T – odczyt poziomu zanurzenia areometru po czasie T od momentu wzburzenia zawiesziny [–],

c – poprawka na menisk [–],

ΔR – poprawka skali areometru [–],

a – poprawka na temperaturę [–],

30 – maksymalna wartość na skali areometru [–],

l – długość skali areometru od $R = 30$ do $R = 0$ [cm],

h_o – odległość górnego końca nurnika od podziałki $R = 30$ [cm],

h_i – odległość środka wyporu nurnika areometru od górnego końca nurnika [cm],

V_H – objętość nurnika areometru, określona według wzoru (4) [cm³],

A – powierzchnia przekroju cylindra używanego w badaniu [cm²],

m_a – masa areometru [g],

P – pole przekroju rurki areometru [cm²].

ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO OSZACOWANIA NIEPEWNOŚCI

W artykule będą przedstawione wyniki oszacowania niepewności standardowej metodą B oraz metodą A.

W przypadku metody B parametrem charakterystycznym będzie estymata odchylenia standardowego u zwana niepewnością standardową B.

Ze względu na to, że wielkości określane w analizie areometrycznej (średnice cząstek – d_T , zawieszonych w zawieszynie gruntu i ich zawartość – Z_T) są zależne od innych wielkości mierzonych w trakcie procedury pomiarowej, zwanych dalej wielkościami wejściowymi, będzie szacowana złożona niepewność standardowa. Przyjęto, że wielkości wejściowe są zmiennymi niezależnymi.

W przypadku wielkości nieskorelowanych złożoną niepewność standardową określa się ze wzoru (5) lub (6):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum u_i^2(y)} \quad (5)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} u^2(x_i) \quad (6)$$

gdzie:

$u_i(y)$ – niepewność standardowa wielkości wyjściowej,

(y) – wielkość wyjściowa,

$u_c(y)$ – złożona niepewność standardowa,

$\partial f / \partial x_i$ – pochodna cząstkowa funkcji f względem zmiennej niezależnej x_i ,

$u(x_i)$ – niepewność standardowa zmiennej niezależnej x_i .

Jeśli poszukiwany parametr liczbowy (tutaj d_T lub Z_T) jest obliczany jako funkcja niezależnych parametrów $b_o, b_1, \dots, b_N$ [(tutaj dla d_T ($\rho_s, \rho_w, \eta, H_R, T$) i dla Z_T ($\rho_s, \rho_w, m_s, R_T, \Delta R, a$)] wyznaczanych bezpośrednio, czyli $y = F(b_o, b_1, \dots, b_N)$, to wartość niepewności wyznaczanego parametru y należy obliczyć ze wzoru (7):

$$u_c(y) = s_y = \sqrt{\sum_{j=0}^N \left(\frac{\partial F}{\partial b_j} \right)^2 (s_{b_j})^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial b_0} \right)^2 (s_{b_0})^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial b_1} \right)^2 (s_{b_1})^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial b_N} \right)^2 (s_{b_N})^2} \quad (7)$$

gdzie:

s_y – dopuszczalna wartość średniego błędu kwadratowego danego parametru; taki symbol i takie jego określenie jest podane w normie [7] w odniesieniu do wzoru (7),

s_{b_j} – odchylenie standardowe parametru b_j .

W przypadku metody A parametrem charakterystycznym będzie estymata odchylenia standardowego określona na podstawie wielokrotnych powtórzeń pomiaru.

OSZACOWANIE NIEPEWNOŚCI METODĄ B

W metodzie B, przy obliczaniu niepewności średnicy cząstek według wzoru (1), parametry $\rho_s, \rho_w, \eta, T, H_R$ potraktowano jako zmienne niezależne. Parametr g jest wartością stałą. Przy obliczaniu niepewności zawartości cząstek według wzoru (2), parametry $\rho_s, \rho_w, m_s, R_T, \Delta R, a$ potraktowano jako zmienne niezależne. Parametr c jest wartością stałą.

Zgodnie ze wzorem (7) wyprowadzono wzory na niepewność średnicy cząstek (8) i zawartości cząstek (9) [3].

$$s_{d_T} = \frac{d_T}{2} \left(\left(\frac{s_\eta}{\eta} \right)^2 + \left(\frac{s_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{s_{H_R}}{H_R} \right)^2 + \frac{(s_{\rho_s})^2 + (s_{\rho_w})^2}{(\rho_s - \rho_w)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$s_{Z_T} = \frac{100 \rho_s}{m_s (\rho_s - \rho_w)} \cdot \left[(R_T + c + \Delta R + a)^2 \cdot \left(\left(\frac{s_{m_s}}{m_s} \right)^2 + \left(\frac{s_{\rho_w}}{\rho_s - \rho_w} \right)^2 + \left(\frac{s_{\rho_s}}{\rho_s} \right)^2 \cdot \frac{(\rho_w)^2}{(\rho_s - \rho_w)^2} \right) + s_{R_T}^2 + s_{\Delta R}^2 + s_a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

gdzie:

s_{d_T} – niepewność złożona średnicy cząstek gruntu,

s_{Z_T} – niepewność złożona zawartości cząstek gruntu,

$s_\eta, s_T, s_{H_R}, s_{\rho_s}, s_{\rho_w}, s_{m_s}, s_{R_T}, s_{\Delta R}, s_a$ – estymaty odchylen standardowych wielkości: s_η – lepkości, s_T – czasu odczytu, s_{H_R} – głębokości zanurzenia nurnika areometru, s_{ρ_s} – gęstości właściwej szkieletu gruntu, s_{ρ_w} – gęstości wody, s_{m_s} – masy gruntu, s_{R_T} – odczytu areometru, $s_{\Delta R}$ – poprawki odczytu areometru, s_a – poprawki temperatury,

pozostałe oznaczenia jak we wzorach (1) i (2).

Tabl. 1. Dane do krzywych uziarnienia przedstawionych na rys. 1

Krzywa średnia			Krzywa minimalna		Krzywa maksymalna	
d_{Tsr} [mm]	Z_{Tsr} [%]	R_T	$d_{Tmax} = 1,03d_T$ [mm]	$Z_{Tmin} = 0,92 Z_T$ [%]	$d_{Tmin} = 0,97 d_T$ [mm]	$Z_{Tmax} = 1,08Z_T$ [%]
0,001	28	≤ 5	0,001	27	0,001	29
0,0013	29	≤ 5	0,00134	28	0,00126	30,2
0,0025	32	≤ 5	0,00258	30,4	0,00242	33
0,0044	34	≤ 5	0,00453	32,2	0,00427	36
0,0062	37	≤ 5	0,00639	35	0,00601	38,9
0,0087	40	≤ 5	0,00869	38	0,00844	43,2
			$d_{Tmax} = 1,03d_T$	$Z_{Tmin} = 0,97Z_T$	$d_{Tmin} = 0,97 d_T$	$Z_{Tmax} = 1,03Z_T$
0,012	45	> 5	0,0124	43	0,0116	48
0,021	53	> 5	0,0216	51,4	0,0204	56
0,034	71	> 5	0,0350	68,9	0,0330	73,1
0,046	83	> 5	0,0474	80,5	0,0446	85,5
0,064	89	> 5	0,0659	86,3	0,0621	91,7
Wyniki z analizy sitowej*						
0,1	94		0,1	92	0,1	96
0,25	99		0,25	98	0,25	100
0,3	100		0,4	100		

* Niepewność wyników z analizy sitowej oszacowano orientacyjnie; niepewność średnicy d_T przyjęto równą zero (sita wzorcowane), a niepewność Z_T przyjęto tak, aby zachować płynność krzywej uziarnienia wynikającą z analizy areometrycznej.

Analizę prowadzącą do ustalenia wartości estymat odchyłeń standardowych w przypadku poszczególnych wielkości pośrednich (wielkości wejściowych) i wyniki obliczeń niepewności metodą B przedstawiono w artykule [3]. Tutaj będą przytoczone jedynie wnioski wynikające z tej analizy, uzupełnione o rozszerzoną ich interpretację. Głównym wnioskiem sformułowanym w artykule [3] była oszacowana wielkość niepewności wyników analizy areometrycznej. W każdej analizie areometrycznej wykonywanej według [7] można przyjmować następujące niepewności: niepewność średnicy równą 3% jej wartości ($\pm 3\% d_T$) oraz niepewność zawartości cząstek równą 8% wielkości zawartości cząstek ($\pm 8\% Z_T$) przy odczytach areometru $R_T \leq 5$, a przy większych odczytach ($R_T > 5$) równą 3% wielkości średnicy cząstek ($\pm 3\% d_T$) i zawartości cząstek ($\pm 3\% Z_T$).

Można również obliczać – w każdym badaniu – niepewności wartości d_T i Z_T według (8) i (9), szacując indywidualnie estymaty odchyłeń standardowych wielkości wejściowych.

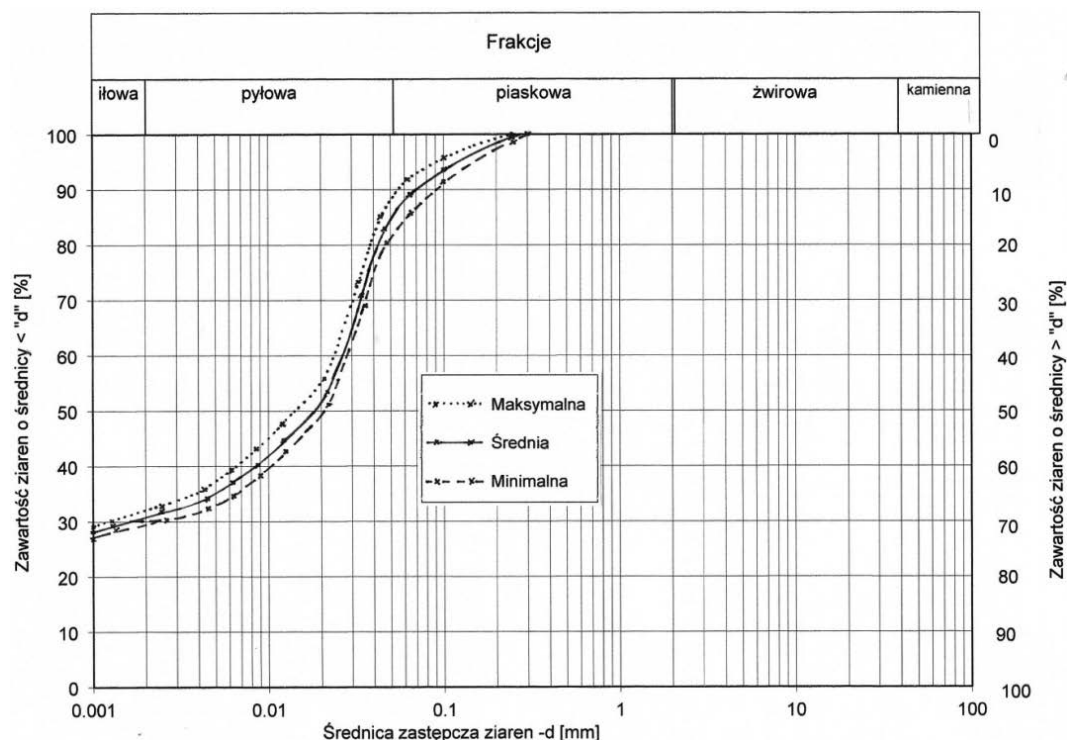
Celem finalnym analizy areometrycznej jest wykreślenie krzywej uziarnienia i określenie zawartości frakcji klasyfikacyjnych w badanym gruncie. Należy zwrócić uwagę, że spośród analizowanych parametrów te, które wpływają na powiększenie wartości średnicy cząstek d_T , równocześnie wpływają na zmniejszenie wartości Z_T . Rysując zatem dwie krzywe uziarnienia, z uwzględnieniem wyżej oszacowanych niepewności pomiaru, należy tworzyć krzywą minimalną (położoną niżej względem średniej) na podstawie współrzędnych d_{Tmax} , Z_{Tmin} , a krzywą maksymalną (położoną wyżej względem średniej) na podstawie współrzędnych d_{Tmin} , Z_{Tmax} . Przykładowy wykres

Tabl. 2. Zawartość frakcji klasyfikacyjnych z uwzględnieniem niepewności pomiaru

Cechy	Zawartość frakcji klasyfikacyjnych Z_T [%] według [11]		
	f_p	f_π	f_i
Krzywa uziarnienia maksymalna Z_{Tmax}	11,5	56,5	32,0
Różnice zawartości frakcji klasyfikacyjnych $\Delta_g = Z_{Tmax} - Z_{Tsr}$	3,0	2,0	1,0
Krzywa uziarnienia średnia Z_{Tsr}	14,5	54,5	31,0
Różnice zawartości frakcji klasyfikacyjnych $\Delta_d = Z_{Tsr} - Z_{Tmin}$	3,5	2,0	1,5
Krzywa uziarnienia minimalna Z_{Tmin}	18,0	52,5	29,5
Wartość średnia różnic $\Delta = (\Delta_g + \Delta_d):2$ (niepewność pomiaru)	3,2	2,0	1,2
Względne wartości różnic zawartości frakcji klasyfikacyjnych (Δ/Z_T)	22,1% Z_T	3,7% Z_T	3,9% Z_T

krzywych uziarnienia tak skonstruowanych przedstawiono na rys. 1 (próbka iltu pylastego – nr 6/2013/PKN/A). Dane do wykresu zawarto w tabl. 1, a zawartość frakcji klasyfikacyjnych gruntów z rys. 1 zestawiono w tabl. 2.

Jak wynika z tabl. 2 średnie wartości niepewności frakcji klasyfikacyjnych zawierają się w przedziale od 1,2% do 3,2%, a względne od 3,7% Z_T do 22,1% Z_T .



Rys. 1. Krzywe uziarnienia z uwzględnieniem niepewności pomiaru

Dodatkowym istotnym wnioskiem z artykułu [3] było stwierdzenie, że gęstość właściwa szkieletu gruntowego ma znikomy wpływ na niepewność zarówno średnicy cząstek, jak i zawartości cząstek. Wydaje się, że uzasadnione powinno być przyjmowanie do obliczeń wyników analizy areometrycznej normatywnych wartości gęstości właściwej we wszystkich gruntach (z wyjątkiem gruntów nietypowych, np. zanieczyszczonych chemicznie lub mechanicznie), a nie tylko w gruntach mało spoiowych, jak dopuszcza się w normie [7]. Oznaczenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego jest pracochłonne i trudne, a ponadto obciążone ukrytym błędem wynikającym z tego, że do badania przyjmuje się cały grunt, a do analizy areometrycznej przeznaczają się jego część, przechodzącą przez sito 0,063 mm.

OSZACOWANIE NIEPEWNOŚCI METODĄ A

W celu określenia niepewności metodą A wykonano wielokrotne badania areometryczne – według [7] – tego samego gruntu w dwóch seriach. W I serii (2010 rok) badaniu poddano dwa grunty: glinę piaszczystą (*clSa*) i il pylasty/il (*siCl/Cl*). W II serii (2014 rok) badano glinę piaszczystą zwięzłą/glinę (*sasiCl/saCl*).

Grunty były wstępnie starannie, ręcznie wymieszane, po uprzednim doprowadzeniu ich do stanu plastycznego. Należy zaznaczyć, że mieszanie ilu, nawet w stanie dobrze uplastycznionym, poprzez ręczne ugniatanie jest trudne i wymaga odpowiedniego czasu przeznaczanego na tę procedurę (około 1 godziny).

W I serii badania wykonywało 6 operatorów: trzech z laboratorium Geoteko i trzech z innych laboratoriów biorących udział w badaniach między laboratoryjnych. Wyniki badań przedstawiono w tabl. 3.

W II serii badania wykonywało siedmiu operatorów z siedmiu laboratoriów biorących udział w badaniach między laboratoryjnych. Pięciu operatorów wykonało badanie według [7], jeden według [6 i 7], jeden według [9], jeden według [10]. Wszystkie te normy dotyczą analizy granulometrycznej gruntów spoiowych (plastycznych) metodą sedymentacyjną z zastosowaniem areometru; różnią się nieznacznie techniką badania. Badanie według [10] jest uproszczoną – przez Prószyńskiego [1, 4] – metodą areometryczną, która daje nieco niższe zawartości frakcji ilowej w stosunku do tych określonych według [7]. Wyniki badań przedstawiono w tabl. 4.

Dodatkowo, w serii III wykonano oznaczenia zawartości frakcji ilowej przy zastosowaniu różnych areometrów, aby wykazać wpływ przyrządu na niepewność wyniku pomiaru. W tym celu wykorzystano zawiesiny gruntowe przygotowane do analizy według Prószyńskiego [10]. Operator wykonał odczyty czterema areometrami po około 5 i 24 godzinach (zawiesina stabilna). Odczyt po około 5 godzinach odpowiadał średnicy $25 \div 28 \mu$, a odczyt po około 24 godzinach odpowiadał średnicy $12 \div 13 \mu$. Na podstawie tych dwóch odczytów określono zawartość frakcji ilowej. Wyniki porównania przedstawiono w tabl. 5.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badania powtarzalne uziarnienia gruntu wykazały, że niepewność wyniku pomiaru zwiększa się wraz ze spoiowością gruntu; średnio podwaja się wraz z grupą spoiowości. (por. tabl. 7) Zestawienie niepewności oznaczenia zawartości frakcji klasyfikacyjnych gruntu, określonych metodą A, przedstawiono w tabl. 7.

Rozrzut wyników pomiarów w badaniach między laboratoryjnych jest większy (o około 50%) od rozrzutu wyników po-

Tabl. 3. Wyniki analizy areometrycznej według [7] (I seria 2010 rok)

Lp	Obiekt	Cecha	Zawartość frakcji Z_T [%]			Grunt	Wykonawca – Laboratorium (symbol operatora)
			f_p	f_π	f_i		
1	Rezydencja Słoneczna P2 (próbka 24) GRUNT ŚREDNIO SPOISTY (średnio plastyczny)		65	19	16	G_p (clSa)	Laboratorium 1 (GW)
			64	19	17	G_p (clSa)	Laboratorium 1 (JK)
			67	18	15	G_p (clSa)	Laboratorium 1 (MK)
			65	17	18	G_p (clSa)	Laboratorium 2
			65	16	19	G_p (clSa)	Laboratorium 2
			70	14	16	G_p (clSa)	Laboratorium 3
			64	19	16	G_p (clSa)	Laboratorium 4
		Max Δ	6	5	4		
		$\bar{x}$ [%]	65,7	17,4	16,7		
		σ [%]	2,0	1,8	1,3		
		$\nu = \sigma / \bar{x}$ [%]	3,0	10,1	7,7		
2	Aleje Jerozolimskie OW 2P gł. 9 m (próbka 25) GRUNT BARDZO SPOISTY (bardzo plastyczny)		5	55	40	I_π (siCl/Cl)	Laboratorium 1 (GW)
			5	56	39	I_π (siCl)	Laboratorium 1 (GW)
			9	42	49	I (Cl)	Laboratorium 1 (JK)
			10	42	48	I (Cl)	Laboratorium 1 (JK)
			10	53	37	I_π (siCl)	Laboratorium 1 (MK)
			10	48	42	I (Cl)	Laboratorium 1 (MK)
			19	32	49	I (clSi)	Laboratorium 2
			11	36	53	I_π (Cl)	Laboratorium 2
			6	46	48	I (Cl)	Laboratorium 3
			13	39	48	I (Cl)	Laboratorium 4
		Max Δ	8	24	19		
		$\bar{x}$ [%]	9,8	44,9	45,3		
		σ [%]	4,0	7,7	5,1		
		$\nu = \sigma / \bar{x}$ [%]	40,5	17,2	11,2		
3	Aleje Jerozolimskie OW 2P gł. 9 m (próbka 25) GRUNT BARDZO SPOISTY (bardzo plastyczny)		5	55	40	I_π (siCl/Cl)	Laboratorium 1 (GW)
			5	56	39	I_π (siCl)	Laboratorium 1 (GW)
			9	42	49	I (Cl)	Laboratorium 1 (JK)
			10	42	48	I (Cl)	Laboratorium 1 (JK)
			10	53	37	I_π (siCl)	Laboratorium 1 (MK)
			10	48	42	I (Cl)	Laboratorium 1 (MK)
		Max Δ	10	14	11		
		$\bar{x}$ [%]	8,1	49,3	42,5		
		σ [%]	2,3	5,8	4,5		
		$\nu = \sigma / \bar{x}$ [%]	28,0	11,7	10,6		

Objaśnienia symboli w tabl. 6.

Tabl. 4. Wyniki analizy areometrycznej według [7] (II seria 2014 rok)

GRUNT SPOISTY ZWIĘZŁY (średnio plastyczny) [Próbka z obiektu: GAZ OW 606/4 gł. 1,0-2,0 m]

Numer laboratorium	Cecha	Zawartość frakcji Z_T [%]			Rodzaj gruntu	Technika badania – numer normy
		f_p	f_π	f_l		
I		53	27	20	G_{pz}/G_p (saClSi/saCl)	PN-B-04481:1988 [7]
II		52	24	24	G_{pz} (saCl)	PN-B-04481:1988 [7] i ISO/TS 17892-4:2004 [6]
III		53	24	25	G_{pz} (saCl)	PN-B-04481:1988 [7]
IV		50	26	24	G_{pz}/G_p (saCl)	PN-B-04481:1988 [7]
V		58	23	19	G_p (saCl)	PN-B-04481:1988 [7]
VI		49	30	21	G_z (saCl)	PN-ISO 11277:2005 [9]
VIII		48	34	18	G (sasiCl)	PN-R-04032:1998 [10]
	Max Δ	10	11	7		
	$\bar{x}$ [%]	51,8	26,6	21,6		
	σ [%]	3,1	3,9	2,8		
	$v = \sigma / \bar{x}$ [%]	6,0	14,6	13,0		

Objaśnienia symboli w tabl. 6.

miarów w badaniach wewnątrz laboratoryjnych. W przypadku powtarzania badań gruntów bardzo spoistych (bardzo plastycznych), w tym samym laboratorium przez różnych operatorów, wartość odchylenia standardowego frakcji klasyfikacyjnych zmieniała się w granicach od 2,3% do 5,8% (w badaniach między laboratoryjnych od 4,0% do 7,7%), a wartość współczynnika zmienności od 10,6% Z_T do 28% Z_T (w badaniach między laboratoryjnych od 11,2% Z_T do 40,5 Z_T).

W celu porównania wyników określonych różnymi areometrami z wynikami różnych laboratoriów i różnych operatorów zestawiono w tabl. 8 maksymalne różnice zawartości frakcji ilowej, jakie wystąpiły w poszczególnych badaniach. Nie są to niepewności, ponieważ liczba areometrów była mniejsza od pięciu i nie uzasadniała obliczenia odchylenia standardowego. Dlatego z badań między laboratoryjnych i wewnątrz laboratoryjnych przyjęto do porównania maksymalne różnice, a nie wartości odchylenia standardowego zawartości frakcji ilowej.

Jak wynika z powyższego zestawienia stosunkowo duży wpływ na wynik oznaczenia może mieć areometr użyty do pomiaru. Porównanie wyników określonych różnymi areometrami może być podstawą do wyeliminowania z użycia areometru dającego wyniki znacząco różniące się od innych lub podjęcia decyzji o powtórnym skalowaniu tego areometru.

Tak duże zróżnicowanie wyników badań wystąpiło przy badaniu gruntów sztucznie ujednorodnionych. Można przypuszczać, że w gruncie naturalnym różnice mogłyby być jeszcze większe.

W przedstawionych powyżej analizach pominięto wpływ niereprezentatywności badanego gruntu wynikający z niewłaściwie pobranej próbki lub niejednorodności gruntu, wpływ drgań wywołanych czynnikami zewnętrznymi i wpływ stabilizatora zawiesziny gruntowej na wartość niepewności wyznaczonego parametru.

WNIOSKI

Wielokrotne badanie tej samej cechy gruntu, na tej samej próbce gruntu umożliwiło określenie niepewności pomiaru metodą A. Oszacowane niepewności są przykładowe i dotyczą tylko tych konkretnych badań. Stosowanie metody A do oszacowania niepewności wyniku pomiaru wymaga każdorazowo wykonania badania danej cechy gruntu co najmniej pięciokrotnie, ale poprawniej dziesięciokrotnie, aby miarodajnie określić odchylenie standardowe, czyli niepewność wyniku pomiaru.

Wartość niepewności określona metodą A rośnie wraz z wzrostem spoistości (plastyczności) gruntu. Określone w przytoczonych przykładach wartości niepewności zawierały się w przedziałach:

- w gruntach średnio spoistych (średnio plastycznych): 1,3% ÷ 2,0%,
- w gruntach spoistych zwięzłych (średnio plastycznych): 2,8% ÷ 3,9%,
- w gruntach bardzo spoistych (bardzo plastycznych): 4,0% ÷ 7,7%.

Duży wpływ na wynik oznaczenia może mieć areometr użyty do pomiaru.

Rozrzut wyników pomiarów w badaniach między laboratoryjnych jest o około 50% większy od rozrzutu wyników pomiarów w badaniach wewnątrz laboratoryjnych.

Niepewność oszacowana metodą B, pomimo przyjęcia bardzo ostrych założeń dotyczących możliwej zmienności parametrów wejściowych, jest mniejsza od niepewności określonej metodą A. W przytoczonym powyżej przykładzie niepewność oznaczenia zawartości frakcji w ile metodą A wynosi 4,0 ÷ 7,7%, a metodą B 1,2 ÷ 3,2%.

Tabl. 5. Porównanie zawartości frakcji ilowej określonej różnymi areometrami

Grunt	Obiekt	Numer otworu	Głębokość [m]	Rodzaj gruntu*	Numer areometru	f_i [%]		Maksymalna Δ [%]
						określona	po zaokrągleniu	
średnio spoisty (średnio plastyczny))	GAZ	241	3,2	Π_p/G (saclSi)	35	19,7	20	4
					68	19,8	20	
					430	16,5	16	
					137673	19,4	19	
średnio spoisty (średnio plastyczny)	GAZ	243	3,6	Π_p/G (saclSi)	35	20,2	20	3
					68	19,8	20	
					430	16,8	17	
					137673	18,8	19	
średnio spoisty (średnio plastyczny)	GAZ	255	1,0	Π_p/G (clSa)	35	19,7	20	4
					68	20,6	21	
					430	17,3	17	
					137673	18,9	19	
średnio spoisty (średnio plastyczny)	GAZ	277	3,7	P_p/G (clSa)	35	19,7	20	4
					68	19,8	20	
					430	16,5	16	
					137673	18,8	19	
średnio spoisty (średnio plastyczny)	GAZ	209	3,8	G_p (clSa)	35	21,2	21	3
					68	20,4	20	
					430	17,8	18	
					137673	20,2	20	
mało spoisty (mało plastyczny)	GAZ	287	2,0	P_{gr}^{eg} (grSa)	35	12,1	12	4
					68	13,7	14	
					430	10,2	10	
					137673	11,6	12	
średnio spoisty (średnio plastyczny)	Karwice	EW 19	3,3	G_p (clSa)	35	14,1	14	4
					68	15,7	16	
					430	11,6	12	
					137673	12,2	12	
bardzo spoisty (bardzo plastyczny)	I-TOWER	BH 2	30,0	I (siCl)	35	49,9	50	10
					68	39,8	40	
					430	42	42	
					137673	47,2	47	

* Rodzaj gruntu określony na podstawie analizy według [10]

Tabl. 6. Objasnienia symboli występujących w tabl. 1 ÷ 5

Max Δ	Maksymalna różnica wyników	f_z	Zawartość frakcji żwirowej 2 ÷ 40 mm
$\bar{x}$	Wartość średnia	f_p	Zawartość frakcji piaskowej 0,05 ÷ 2 mm
σ	Odchylenie standardowe	f_π	Zawartość frakcji pyłowej 0,002 ÷ 0,05 mm
$v = \sigma / \bar{x}$	Współczynnik zmienności	f_i	Zawartość frakcji ilowej < 0,002 mm
d_T	Średnica cząstek (ziaren) gruntu	Z_T	Zawartość dowolnej frakcji

Tabl. 7. Zestawienie niepewności oznaczenia zawartości frakcji klasyfikacyjnych gruntu (Badania między laboratoryjne)

Grunty	Niepewność oznaczenia zawartości frakcji (wartość odchylenia standardowego)	Względna niepewność oznaczenia zawartości frakcji (wartość współczynnika zmienności)	Liczba powtórzeń
średnio spoiste (średnio plastyczne)	1,3% ÷ 2,0%	3,0% Z_T ÷ 10,1% Z_T	7
zwięzłe spoiste (średnio plastyczne)	2,8% ÷ 3,9%	6,0% Z_T ÷ 14,6% Z_T	7
bardzo spoiste (bardzo plastyczne)	4,0% ÷ 7,7%	11,2% Z_T ÷ 40,5% Z_T	10

Tabl. 8. Zestawienie maksymalnych różnic oznaczenia zawartości frakcji ilowej

Grunty	Maksymalne różnice oznaczenia zawartości frakcji ilowej [%]		
	w badaniach międzylaboratoryjnych	w badaniach wewnątrz laboratoryjnych	
		różni operatorzy	różne areometry
średnio spoiste (średnio plastyczne)	4	–	4
zwięzłe spoiste (średnio plastyczne)	7	–	–
bardzo spoiste (bardzo plastyczne)	19	11	10

W praktyce każde laboratorium powinno oszacować wartości niepewności pośrednie między metodą A i B, kierując się własnym doświadczeniem.

LITERATURA

1. Brogowski Z., Czerwiński Z.: Materiały do ćwiczeń z geotechniki. Część II. Wydawnictwo SGGW Warszawa, 1983

- Główny Urząd Miar (GUM): Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, 1999
- Gołębiowska A., Hyb W.: Ocena niepewności wyników pomiarów w analizie areometrycznej gruntu. Geoinżynieria 04/2008
- Korabiewski B.: Ćwiczenia laboratoryjne z geotechniki. Wersja 10. Uniwersytet Wrocławski, 2013
- ASTM D 4318-84 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4. Oznaczanie składu granulometrycznego.
- PN-B-04481:1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntów.
- PN-EN ISO/IEC 17025 – 2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorujących.
- PN-ISO 11277:2005 Jakość gleby. Oznaczanie składu granulometrycznego w mineralnym materiale glebowym. Metoda sitowa i sedymentacyjna.
- PN-R-04032:1998 Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego.
- PN-B-02480:1988 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.