

## Ocena możliwości oznaczenia granicy plastyczności metodą penetrometru stożkowego

Krystyna Jaśkiewicz<sup>1</sup>, Małgorzata Wszędyrówny-Nast<sup>1</sup>



K. Jaśkiewicz



M. Wszędyrówny-Nast

**Possibility of application of fall cone method for plastic limit determination.** Prz. Geol., 62: 588–593.

*A b s t r a c t.* The plastic limit of soils was first described by Atterberg in 1911. The thread-rolling test became one of the standard tests of soil mechanics. In recent years this method has been the subject of much criticism. This paper reviews the original method of plastic limit determination as proposed by Atterberg and the fall cone methods for determining at the same time both the liquid and the plastic limits of soils. The tests were performed on 748 samples representing a wide range of soil type with different clay content ranging from 4 to 79%.

**Keywords:** plastic limit, fall cone test, plastic factor, laboratory tests

W 1911 r. Albert Atterberg zdefiniował siedem granic konsystencji służących do klasyfikacji gruntów drobnoziarnistych (Karlsson, 1981). Obecnie tylko trzy z nich są powszechnie stosowane: granica plastyczności ( $w_p$ , PL) i granica płynności ( $w_L$ , LL), określające zakres wilgotności, w których grunt ma właściwości plastyczne, oraz granica skurczalności ( $w_s$ , SL).

W oparciu o granicę plastyczności i granicę płynności skorelowane są wybrane parametry geotechniczne gruntów drobnoziarnistych, w tym m.in. wskaźnik ścisłości, współczynnik konsolidacji, wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wytrzymałość gruntu na ścinanie bez odplywu czy efektywny kąt tarcia wewnętrznego (Dysli & Steiner, 2011).

Swoje próby oznaczenia granicy plastyczności Atterberg zaczynał na próbkach o konsystencji plastycznej. Na kartce papieru wałeczkoał grunt dłonią do cienkich wałeczków, następnie ugniatł je razem i ponownie wałeczkoał. Czynność tę powtarzał tak długo, aż wałeczek się rozsypał i nie mógł być ponownie wałeczkoał. Następnie oznaczał wilgotność gruntu po wałeczkoałaniu i nazwał ją „granicą rozwałkowania” – obecnie znaną jako granica plastyczności (Karlsson, 1981).

Wintenmeyer i Terzaghi (1926) znormalizowali oznaczenie granicy plastyczności, proponując wałeczkoałanie do średnicy wałeczka równej 3 mm. Powołując się na Terzagiego, Cassagrande (1932) również sugerował, że średnica, przy której pęka wałeczek, jest ważna. Prace ich nie zawierają konkretnych danych, natomiast późniejsze publikacje, w tym Prakasha i in. (2009), pokazują, że średnica wałeczka, przy której dochodzi do jego spękania, nie ma statystycznie istotnego wpływu na wartość granicy plastyczności.

Metoda oznaczania granicy plastyczności zapoczątkowana przez Atterberga prawie w niezmięnionej formie przetrwała do dzisiejszych czasów i jest najczęściej stosowaną normową metodą oznaczania granicy plastyczności

na świecie. Specyfikacja Techniczna PKN-CEN ISO/TS 17892-12 (w dalszej części tekstu nazywana ST12) definiuje granicę plastyczności jako ustaloną doświadczalnie wilgotność, przy której grunt staje się zbyt suchy, by być plastycznym.

### CEL PRACY

Jak wykazują badania, wiarygodność oznaczania granicy plastyczności metodą wałeczkoałania nie jest zadowalająca. Sherwood (1970) wykazał, że dla identycznej próbki wysłanej do 45 niezależnych laboratoriów w Wielkiej Brytanii odchylenie standardowe wyniosło 3% (dopuszczalna różnica zgodnie z ST12 wynosi 0,5%). W raporcie NPRA (Norweskiej Administracji Dróg Publicznych) z 2013 r. (Tefera, 2013), podsumowującym pracę badawczo-rozwojową dotyczącą oznaczania granicy plastyczności, przedstawione zostały wyniki oznaczenia granicy plastyczności uzyskane dla próbki kaolinu Speswhite przez 6 laboratoriów norweskich. Wyniki te (rozzrut od 29,7 do 36,1 %, odchylenie standardowe 2,3 %) również potwierdzają, że dokładność oznaczenia granicy plastyczności jest dyskusyjna.

W ostatnich latach metoda ta krytykowana jest ze względu na zależność od oceny własnej wykonującego badanie (zostało to podkreślone w ST12), czasochłonność, a także trudności w zastosowaniu jej do gruntów pylastych i gruntów o dużej zawartości frakcji piaskowej (Rashid i in., 2008). Ma ona wiele wad głównie związanych z subiektywną oceną uzyskiwanych wyników. Według Whyte'a (1982) granica plastyczności jest funkcją wielu parametrów, których nie można w sposób łatwy kontrolować:

- nacisku wywieranego na grunt;
- powierzchni kontaktu pomiędzy gruntem a ręką;
- tarcia pomiędzy gruntem, ręką a szklaną płytką;
- szybkości wałeczkoałania.

Starając się poprawić dokładność oznaczania granicy plastyczności badacze proponują nowe, alternatywne

<sup>1</sup> Zakład Geotechniki i Fundamentowania, Instytut Techniki Budowlanej, ul. Ksawerów 21, 02-256 Warszawa; k.jaskiewicz@itb.pl, m.wszedyrowny@itb.pl.

**Tab. 1.** Zestawienie parametrów stożków stosowanych w różnych krajach  
**Table 1.** Standards of fall cone test in various countries

	Kąt wierzchołkowy <i>Apex angle of cone</i> [°]	Masa stożka <i>Mass of cone</i> [g]	Głębokość zagłębienia odpowiadająca <i>Cone penetration</i>	
			granicy płynności <i>at liquid limit</i> d [mm]	granicy plastyczności <i>at plastic limit</i> d [mm]
Szwecja <i>Sweden</i> SS027120	60	60	10	–
Francja <i>France</i> NF P94-052.1	30	80	17	–
Wielka Brytania <i>UK</i> BS1377:Part 2:1990	30	80	20	–
Polska <i>Poland</i> PN-88/B-04481	30	80	18	–
Australia <i>Australia</i> AS 1289	30	80	20	–
Norwegia <i>Norway</i> NS 8002	60	60	10	–
Chiny <i>China</i> SD128-007-84	30	76	17	2
Eurokod 7 <i>Eurocode 7</i> PKN-CEN ISO/TS 17892-12	30	80	20	–
	60	60	10	–

metody. Głównym założeniem tych metod jest powtarzalność uzyskiwanych wyników. Alternatywne metody bazują na metodzie penetrometru stożkowego (stosowanego w wielu krajach do oznaczania granicy płynności – tab. 1) lub wykorzystują innowacyjne aparaty do waleczkowania gruntów (Barnes, 2009). Wśród pierwszych metod wyróżnić można takie, w których granica plastyczności interpretowana jest z wykresu zależności zagłębienia stożka od wilgotności pasty gruntowej, jak również metody oparte na zmodyfikowanej geometrii stożka, zmodyfikowanej wadze stożka lub wymiarze pierścienia, w którym przeprowadza się oznaczenie (Rashid i in., 2008).

W artykule przedstawiona została weryfikacja dwóch metod prezentowanych w literaturze, które do oznaczenia granicy plastyczności wykorzystują metodę penetrometru stożkowego opisaną w ST12. Z punktu widzenia auterek są to metody najbardziej praktyczne, ponieważ umożliwiają jednoczesne oznaczenie granicy plastyczności oraz płynności, tak jak proponuje to norma stosowana w Chinach (tab. 1).

## MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono na próbkach gruntów drobnoziarnistych pochodzących z obszaru Polski. Łącznie badaniom poddano 784 próbki gruntu zróżnicowane pod względem parametrów fizycznych oraz genezy.

Dla każdej próbki wykonano oznaczenie uziarnienia zgodnie z procedurą PKN-CEN ISO/TS 17892-4 oraz oznaczenie granic konsystencji zgodnie z procedurą opisaną w ST12. Granicę plastyczności oznaczono na paście

gruntowej metodą waleczkowania, natomiast granicę płynności oznaczono metodą penetrometru stożkowego przy użyciu stożka 30°–80g (zasięg zagłębienia stożka 15–20 mm). Zawartość frakcji ilowej badanych próbek gruntu wahała się od 4 do 79 %, pyłowej od 7 do 82 %, a piaskowej od 0 do 80 %.

## WYNIKI BADAŃ

Pierwsza przeanalizowana metoda oznaczania granicy plastyczności to metoda, która umożliwia odczytanie wartości granicy plastyczności bezpośrednio z wykresu zależności zagłębienia stożka od wilgotności pasty gruntowej. W literaturze opublikowano co najmniej kilka propozycji interpretacyjnych (Allbrook, 1980; Campos i in., 1999; Brown & Downing, 2001; Muntohar & Hashim, 2005), nie dających zbieżnych wyników. Każdy z autorów definiuje granicę plastyczności jako wilgotność gruntu przy różnym zagłębieniu stożka 30°–80g zazwyczaj w granicach 2–3 mm. W tabeli 2 przedstawione zostały liniowe zależności funkcyjne wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą waleczkowania ( $w_p$ ) od wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą penetrometru stożkowego ( $w_{pc}$ ), proponowane przez różnych autorów. Na podstawie przeprowadzonych badań podjęto próbę wyznaczenia zależności funkcyjnych dla gruntów polskich. Na rycinie 1 przedstawiono porównanie wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą waleczkowania i wartości granicy plastyczności ekstrapolowanej z wykresu zależności zagłębienia stożka od wilgotności pasty gruntowej dla zagłębienia stożka  $d = 2$  mm. Stosując metodę najmniejszych kwadratów, zna-

**Tab. 2.** Zależności funkcyjne wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą walczkowania ( $w_p$ ) od wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą penetrometru stożkowego ( $w_{pc}$ )**Table 2.** Correlation equations between plastic limits by thread rolling and fall cone methods

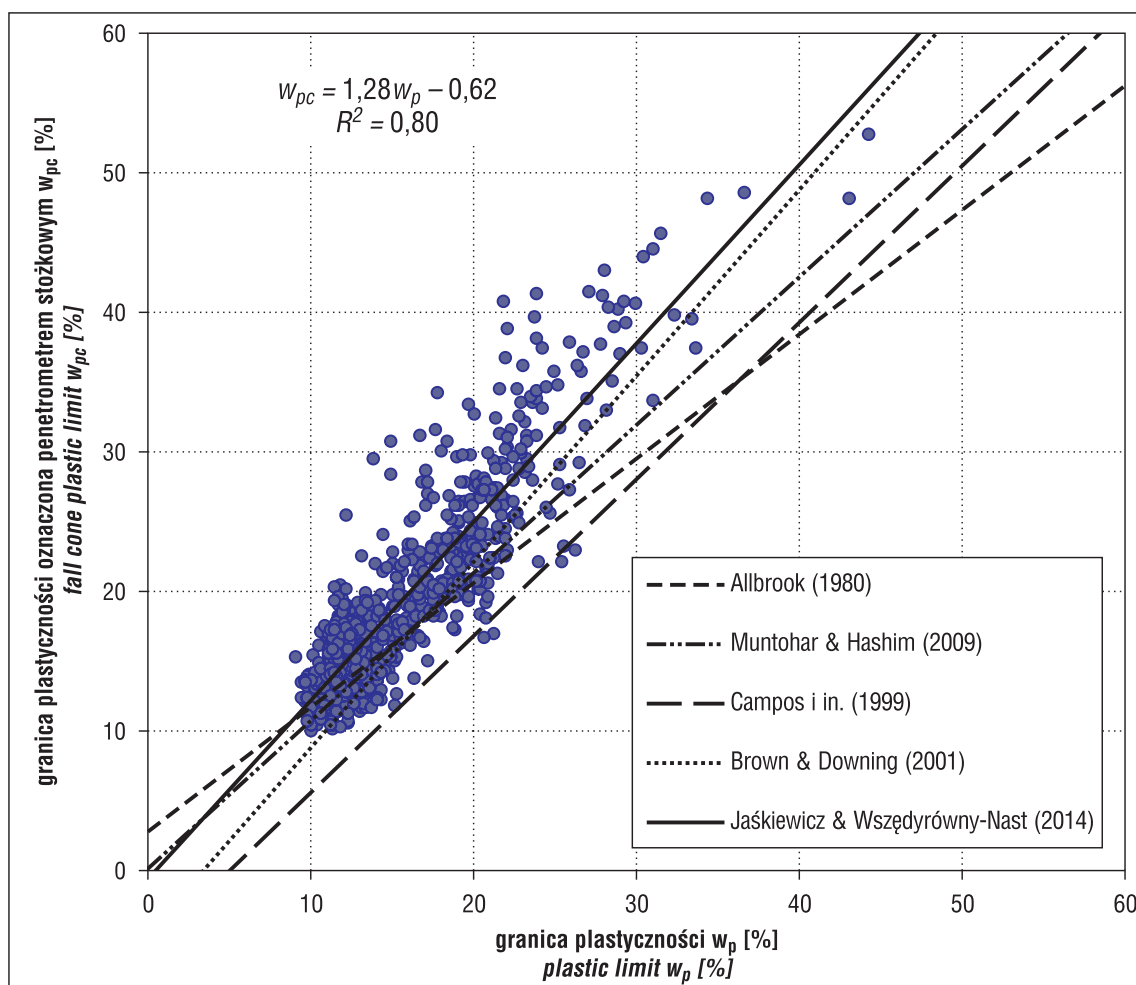
Autor Author	Zależność funkcyjna Correlation equation	Zagłębienie stożka d [mm] Cone penetration d [mm]
Allbrook (1980)	$w_{pc} = 0,89w_p + 2,8$	2,8
Muntohar & Hashim (2005)	$w_{pc} = 1,06w_p$ ( $R^2 = 0,85$ )	2,2
Campos i in. (1999)	$w_{pc} = 1,12w_p - 5,66$ ( $R^2 = 0,65$ )	–
Brown & Downing (2001)	$w_{pc} = 1,33w_p - 4,54$	–
Jaśkiewicz & Wszędyrówny-Nast (2014)	$w_{pc} = 1,28w_p - 0,62$ ( $R^2 = 0,80$ )	2,0

leżono zależność liniową o wzorze:  $w_{pc} = 1,28 w_p - 0,62$  (współczynnik korelacji dla badanej zależności wynosi  $R^2 = 0,80$ ). Pokazano ją na rycinie 1 na tle zależności uzyskanych przez innych autorów. Zależność ta najbardziej zbliżona jest do zależności otrzymanej przez Browna i Downinga (2001). Autorki nie uważają, aby metoda ta mogła być stosowana jako metoda alternatywna dla klasycznej normowej metody.

Druga metoda, która została poddana ocenie, to metoda Al-Dahlakiego & Al-Sharify'ego (2008), która do oznaczenia granicy plastyczności również wykorzystuje wykres otrzymany w czasie oznaczania granicy płynności penetrometrem stożkowym. Oparta jest ona na obliczeniu współczynnika plastyczności (*plastic factor*). Współczynnik plastyczności zdefiniowany został przez autorów tej metody jako wartość bezwzględna różnicy wilgotności odpowiadającej zagłębieniu stożka na 20 mm (tzn. granicy płynności) i wilgotności odpowiadającej innemu dowolnemu zagłębieniu stożka, podzielona przez wskaźnik plastyczności  $I_p$ .

metrem stożkowym. Oparta jest ona na obliczeniu współczynnika plastyczności (*plastic factor*). Współczynnik plastyczności zdefiniowany został przez autorów tej metody jako wartość bezwzględna różnicy wilgotności odpowiadającej zagłębieniu stożka na 20 mm (tzn. granicy płynności) i wilgotności odpowiadającej innemu dowolnemu zagłębieniu stożka, podzielona przez wskaźnik plastyczności  $I_p$ .

$$P_f = \frac{|w_L - w_c|}{I_p} \quad (1)$$

**Ryc. 1.** Porównanie wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą walczkowania ( $w_p$ ) i wartości granicy płynności zinterpretowanej dla zagłębienia stożka  $d = 2$  mm ( $w_{pc}$ )**Fig. 1.** Comparison of plastic limits by thread rolling ( $w_p$ ) and fall cone methods ( $w_{pc}$ ) by penetration  $d = 2$  mm

gdzie:

$P_f$  – współczynnik plastyczności,

$w_L$  – granica płynności,

$w_c$  – poziom wilgotności odpowiadającej dowolnemu zagłębieniu stożka,

$I_p$  – wskaźnik plastyczności.

Autorzy zaproponowali sześć wzorów umożliwiających obliczenie współczynnika plastyczności w zależności od wartości granicy płynności gruntu oraz od wartości zagłębienia stożka odpowiadającej wartości  $w_c$  (tab. 3).

Granica plastyczności obliczana jest według wzoru:

$$w_p = w_L - \left( \frac{w_L - w_c}{P_f} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$w_L$  – granica płynności,

$w_c$  – poziom wilgotności odpowiadającej dowolnemu zagłębieniu stożka,

$P_f$  – współczynnik plastyczności.

Zastosowanie wzorów przedstawionych w tabeli 3 do oznaczenia granicy plastyczności, dla analizowanych przez autorki gruntów, nie dało satysfakcjonujących rezultatów. Współczynnik korelacji dla zależności granicy plastyczności uzyskanej metodą wałeczkania ( $w_p$ ) od wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą penetrometru stożkowego ( $w_{pf}$ ) wyniósł:

– dla gruntów o granicy płynności  $w_L < 35\%$   $R^2 = 0,37$ ;

– dla gruntów o granicy płynności  $w_L = 35\% - 50\%$   $R^2 = 0,69$ ;

– dla gruntów o granicy płynności  $w_L > 50\%$   $R^2 = 0,50$ .

W związku z tym wyprowadzona została zależność umożliwiająca obliczenie współczynnika plastyczności na podstawie badań własnych:  $P_f = -0,686 \ln(P) + 3,6459$  (ryc. 2). Zależność ta może być stosowana niezależnie od wartości granicy płynności, dla wartości zagłębienia stożka  $P$  poniżej 20 mm.

Korzystając z tej zależności, obliczono wartości granicy plastyczności ( $w_{pf}$ ) i porównano je z wartościami granicy plastyczności uzyskanymi metodą wałeczkania ( $w_p$ )

(ryc.3). Stosując metodę najmniejszych kwadratów, znaleziono zależność liniową o wzorze  $w_{pc} = 1,00w_p + 0,10$  (współczynnik korelacji dla badanej zależności wynosi  $R^2 = 0,82$ ).

## WNIOSKI

Pomimo wprowadzenia Eurokodu 7 i wycofania normy PN-B-03020:1981, w której znajdowały się powszechnie stosowane nomogramy służące do odczytywania parametrów wytrzymałościowych na podstawie stopnia plastyczności (będącego stosunkiem różnicy pomiędzy wilgotnością a granicą plastyczności gruntu do wskaźnika plastyczności), oznaczanie granicy plastyczności jest wciąż żywym zagadnieniem dyskutowanym w najnowszych światowych publikacjach (Sivakumar i in., 2011; Haigh i in., 2013).

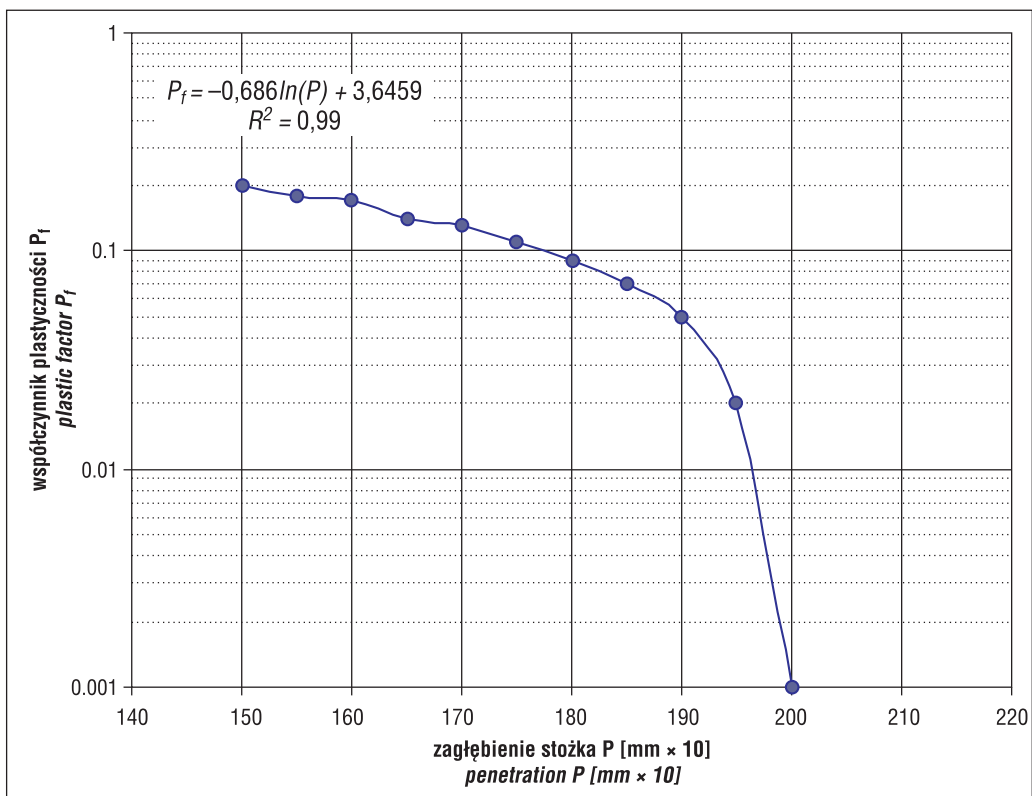
Problematyczna wydaje się weryfikacja nowych metod oznaczania granicy plastyczności. W tabeli 4 przedstawione zostały wyniki zaprezentowane we wspomnianym już wcześniej raporcie NPRA (Norweskiej Administracji Dróg Publicznych). Ponieważ wykonane na tych samych gruntach oznaczenia granicy plastyczności metodą wałeczkania (metoda normowa) wykazują znaczne różnice, weryfikowanie przy jej pomocy metody penetrometru stożkowego do oznaczenia granicy plastyczności wzbudza wątpliwości. Do przedstawionych w tabeli 4 wyników autorzy zamieścili następujący komentarz: „Badania pokazują możliwość zastosowania metody penetrometru stożkowego do pomiaru granicy plastyczności gruntów drobnoziarnistych”. Dane te potwierdzają powtarzalność wyników granicy plastyczności uzyskanych przy zastosowaniu penetrometru stożkowego, lecz ze względu na rozrzut wartości granicy plastyczności uzyskanych metodą wałeczkania trudno jednoznacznie stwierdzić, że oznaczana w ten sposób wilgotność odpowiada wartości granicy plastyczności zdefiniowanej przez Atterberga.

Według autorek, w przypadku oznaczania granicy plastyczności uzyskane z badań własnych wartości współczynnika korelacji  $R^2$  na poziomie 0,80 dla zależności granicy plastyczności uzyskanej metodą wałeczkania ( $w_p$ ) i wartości granicy płynności zinterpretowanej na podstawie badań penetrometrem stożkowym ( $w_{pc}$ ), zarówno dla jednej, jak i dla drugiej analizowanej metody świadczą o dobrym, ale niezadowalającym dopasowaniu. Dyskusyjne

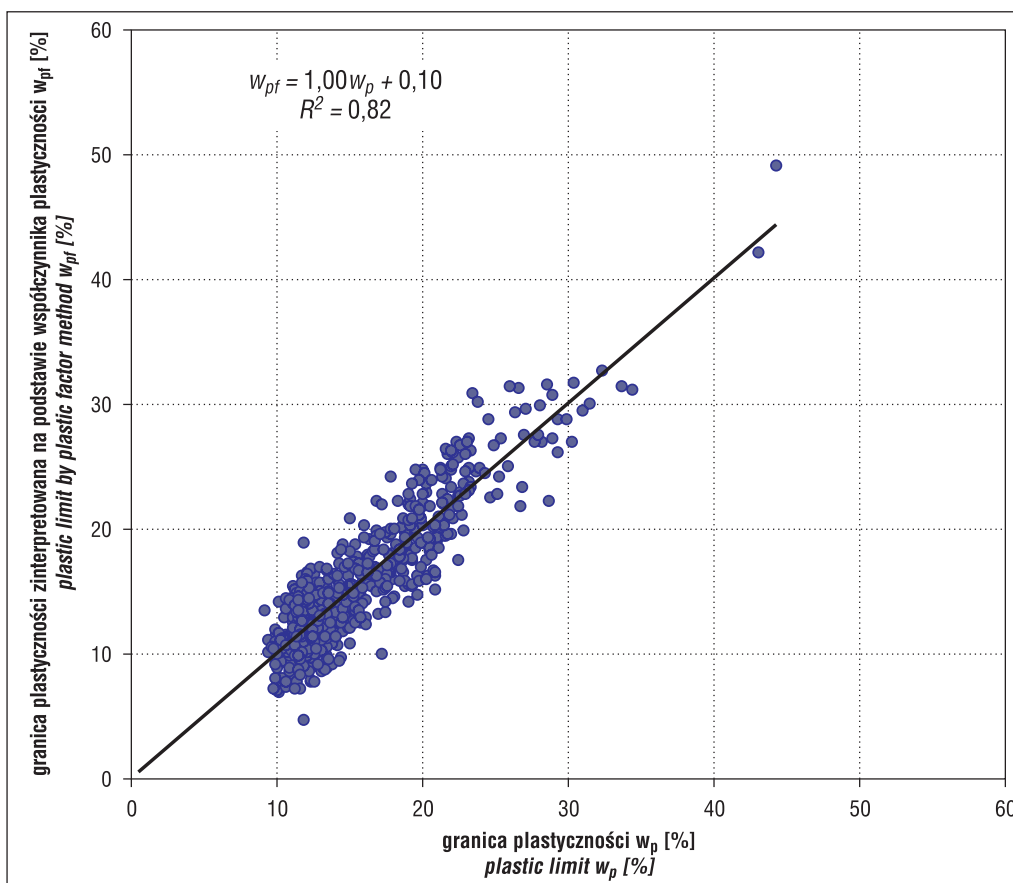
**Tab. 3.** Równania umożliwiające obliczenie współczynnika plastyczności w zależności od wartości granicy płynności i zagłębienia stożka (Al-Dahlaki & Al-Sharify, 2008)

**Table 3.** Plastic factor equation corresponding to liquid limit value and penetration (Al-Dahlaki & Al-Sharify, 2008)

	Zagłębienie Penetration P [mm × 10]	Równanie Equation	Współczynnik korelacji R Correction factor R
Grunt o niskiej plastyczności <i>Soil of Low Plasticity</i> $w_L < 35\%$	< 200	$P_f = -0,489802 \ln(P) + 0,259569$	0,974922
	> 200	$P_f = 0,765571 \ln(P) - 4,05707$	0,952370
Grunt o średniej plastyczności <i>Soil of Moderate Plasticity</i> $w_L = 35 - 50\%$	< 200	$P_f = -0,580719 \ln(P) + 3,08374$	0,948379
	> 200	$P_f = 0,646245 \ln(P) - 3,42452$	0,955632
Grunt o wysokiej plastyczności <i>Soil of High Plasticity</i> $w_L > 50\%$	< 200	$P_f = -0,491875 \ln(P) + 2,61027$	0,981389
	> 200	$P_f = 0,733705 \ln(P) - 3,89492$	0,972702



Ryc. 2. Wykres współczynnika plastyczności w funkcji zagłębienia stożka  
 Fig. 2. Plots of plastic factor as a function of penetration using fall cone method



Ryc. 3. Porównanie wartości granicy plastyczności uzyskanej metodą walczkowania ( $w_p$ ) i wartości granicy płynności zinterpretowanej na podstawie współczynnika plastyczności ( $w_{pf}$ )  
 Fig. 3. Comparison of plastic limits by thread rolling ( $w_p$ ) and plastic factor method ( $w_{pf}$ )

**Tab. 4.** Oznaczone wartości granicy plastyczności  $w_p$  dla kaolinu Speswhite  
**Table 4.** Reported  $w_p$  values of Speswhite kaolin

Próbka Sample	Metoda Method	Granica plastyczności $w_p$ uzyskana przez 6 laboratoriów $w_p$ obtained from six laboratories [%]						Średnia Average
		1	2	3	4	5	6	
kaolin Speswhite Speswhite kaolin	penetrometr stożkowy <i>falling cone</i>	27,9	29,3	27,9	29,0	28,8	29,2	28,7
	normowa standard	36,1	29,7	34,5	31,5	31,8	29,9	32,3
Różnica <i>Difference</i>		8,2	0,4	6,6	2,5	3,0	0,7	3,6

wyduje się być nazywanie takich korelacji bardzo satysfakcjonującymi (Muntohar & Hashim, 2005). Ustalone granice stanów gruntów są przyjęte arbitralnie, jednak ze względu na powszechność ich stosowania powinny bez względu na metodę oznaczenia „umiejscawiać” grunt w obrębie tej samej konsystencji.

### LITERATURA

- AL-DAHLAKI H. & AL-SHARIFY G.A. 2008 – A proposed approach for plastic limit determination using the drop-cone penetrometer device. *J. Eng. Dev.*, 12 (1):107–117.
- ALLBROOK R.F. 1980 – The drop cone penetrometer method for determining Atterberg limits. *New Zealand J. Sci.*: 93–98.
- AS 1289 Section 3 Australian Standard methods of testing soils for civil engineering purposes. Soil Classification tests.
- BARNES G.E. 2009 – An apparatus for the plastic limit and workability of soils. *Proceedings of the ICE – Geotech. Eng.*, 162 (3): 175–185.
- BROWN P.J. & DOWNING M.C. 2001 – Discussion of fall-cone penetration and water content relationship of clays. *Géotechnique*, 51 (2): 181–187.
- BS 1377-2:1990 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests.
- CAMPOS L.F.A., DE MACEDO R.S., KIYOHARA P.K. & FERREIRA H.C. 1999 – Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. *Cerâmica*, 45 (295): 140–145.
- CASAGRANDE A. 1932 – Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13 (8): 121–136.
- DYSLI M. & STEINER W. 2011 – Correlations en mécanique des sols. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- HAIGH S. K., VARDANEGA P.J. & BOLTON M.D. 2013 – The plastic limit of clays. *Géotechnique*, 63 (6): 435–440.
- KARLSSON R. 1981 – Consistency Limits, Performance and Interpretation of laboratory investigations, part 6., Swedish Council of Building Research, Stockholm. Sweden.
- MUNTOHAR A.S. & HASHIM R. 2005 – Determination of Plastic Limits of Soils Using Cone Penetrometer: Re-Appraisal, *J.Teknik Sipil*, Vol.11, No 2.
- NF P94-052-1:1995 Soil: investigation and testing. Atterberg limit determination. Part 1: liquid limit. Cone penetrometer method.
- NS 8002-1982 Geotechnical testing Laboratory methods. Fall cone liquid limit.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-12 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczanie granic Atterberga PN- B-03020: 1981P Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.
- PN-B-04481:1988P Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PRAKASH K., SRIDHARAN A. & PRASANNA H. S. 2009 – A note on the determination of plastic limit of fine-grained soils. *Geotech. Test. J.*, 32 (4): 372–374.
- RASHID A.S.A., KASSIM, K.A., KATIMON A. & NOOR M.N. 2008 – Determination of plastic limit of soil using modified methods. *Malaysian J. Civil Eng.*, 20(2): 295–305.
- SD128-007-84 PRC Soil Testing Standard. Liquid and plastic limit test procedures. Balance cone penetrometer.
- SHERWOOD P.T. 1970 – The reproducibility of the results of soil classification and compaction tests. TRRL (Transport and Road Research Laboratory) Report LR339. Crowthorne.
- SIVAKUMAR V., GLYNN D., CAIRNS P. & BLACK J.A. 2011 – A new method of measuring plastic limit of fine materials. *Discussion. Géotechnique*, 61 (1): 88–92.
- SS 027120:1990 Geotechnical tests – cone liquid limit. Swedish Standard Commission, Stockholm.
- TEFERA T.H. 2013 – Measurement of plastic limit of cohesive soils. R&D Project Status Report No. 208. Norwegian Public Roads Administration.
- TERZAGHI K. 1926 – Simplified soil tests for subgrades and their physical significance. *Public Roads*, 7 (8): 153–170.
- WHYTE I.L. 1982 – Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion. *Ground Eng.*, 15 (1): 16–24.
- WINTENMEYER A.M. 1926 – Adaption of Atterberg plasticity tests for subgrade soils. *Public Roads*, 7 (6): 119–122.