

## WYBRANE ASPEKTY METODYCZNE WYKORZYSTANIA APARATU PROCTORA W BADANIACH ZAGĘSZCZALNOŚCI GLEB\*

*Dariusz Błażejczak, Jan B. Dawidowski, Michał Malinowski, Kinga Śnieg  
Katedra Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

**Streszczenie.** Celem pracy było poszukiwanie funkcji opisującej przebieg zależności gęstości objętościowej szkieletu gleby od jej wilgotności na podstawie aproksymacji punktów Proctora. Znajomość tej zależności umożliwia przewidywanie skutków oddziaływania na glebę kół pojazdów rolniczych. Poszukiwania ograniczono do czterech wielomianów – od drugiego do piątego stopnia. Materiał badawczy pochodził z warstwy podornej pięciu profili glebowych. W materiale oznaczono: skład granulometryczny, gęstość fazy stałej, zawartość próchnicy, odczyn gleby oraz granice plastyczności i płynności gleby. Zagęszczanie próbek metodą Proctora wykonano zgodnie z PN-88/B-04481. Wartości gęstości maksymalnej i wilgotności optymalnej obliczano w miejscu, gdzie uzyskane wielomiany opisujące dane doświadczalne przyjmowały wartość maksymalną. Stwierdzono, że do wyznaczania wartości wilgotności optymalnej i gęstości maksymalnej, najbardziej nadaje się wielomian stopnia czwartego.

**Słowa kluczowe:** gleba, gęstość maksymalna, wilgotność optymalna, wielomian

### Wprowadzenie

Jednym z problemów współczesnego rolnictwa jest nadmierne zagęszczanie gleb przez maszyny i ciągniki. Szczególnie niebezpieczne jest nadmierne zagęszczanie warstwy podornej, ponieważ skutki ugniecenia tej warstwy są długotrwałe, zaś jego likwidacja poprzez głębokie spulchnienie jest energochłonna i często bywa nieskuteczna, a w niektórych warunkach glebowych i atmosferycznych może powodować większe szkody niż pożytki (Szeptycki, 2003). Racjonalne podejście do przeciwdziałania temu zjawisku wymaga oceny poziomu aktualnego zagęszczenia gleby oraz identyfikacji warunków w jakich ono występuje.

---

\* Publikacja zrealizowana w ramach projektu finansowanego ze środków NCN nr 7808/B/P01/2011/40)

Ocena stanu zagęszczenia gleby za pomocą jej gęstości objętościowej w kontekście oddziaływania na warunki rozwoju roślin sprawia wiele trudności (Pabin, 2004; Pabin, 2007; Błażejczak i Dawidowski, 2013). Trudności z bezpośrednim wykorzystaniem wyników oznaczeń gęstości objętościowej gleby powodują, że jako wskaźnika oceny warunków rozwoju roślin próbuje się stosować względne miary zagęszczenia gleby (Hakansson i Lipiec 2000).

Identyfikacja warunków, w jakich występuje nadmierne zagęszczenie, polega przede wszystkim na określeniu wartości wilgotności gleby, przy której podatność gleby na zagęszczanie jest największa, co wyraża się jej maksymalnym zagęszczeniem. Stosowanymi powszechnie w geotechnice gruntów parametrami, które mogą z jednej strony stanowić punkt odniesienia w ocenie stanu zagęszczenia gruntu, a z drugiej charakteryzują warunki maksymalnej podatności na jego zagęszczanie, są wyniki badań uzyskiwane za pomocą aparatu Proctor'a w postaci gęstości maksymalnej i wilgotności optymalnej. W przeszłości próbowano także stosować test Proctora do charakteryzowania podatności na zagęszczanie gleb rolniczych (Wagner i in., 1994, Aragon i in., 2000; Nhantumbo i Cambule, 2006).

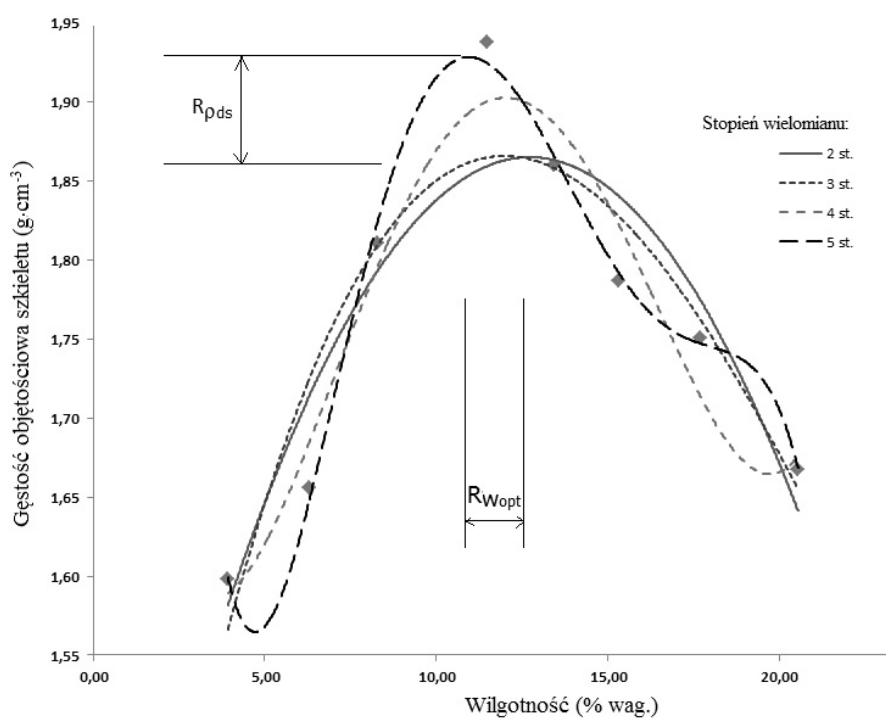
Sposób przeprowadzenia pomiarów metodą Proctora precyzuje norma PN-88/B-04481, która nie podaje jednak szczegółów sporządzenia wymaganego wykresu, służącego do odczytania wilgotności optymalnej i gęstości maksymalnej. Ze względu na charakter zależności pomiędzy wilgotnością gruntu i gęstością objętościową szkieletu gruntowego, zbliżony do parabolicznego, podejmuje się próby zautomatyzowania szacowania tych parametrów za pomocą wybranej krzywej wielomianowej (Ćwiakala, 2007). Należy przy tym zauważyć, że bezpośrednie zastosowanie zarówno procedur, opracowanych na potrzeby badań geotechnicznych, wyznaczania tych parametrów, jak i wartości uzyskiwanych rezultatów wydaje się niemożliwe z powodu częstej odmienności składów gleby i gruntu. Grunty, rozumiane jako podłoże budowli, zazwyczaj nie zawierają znaczącej zawartości próchnicy. Cechą charakterystyczną gleby jest zaś określona zawartość materii organicznej, która ma wpływ na podatność na zagęszczanie gleby metodą Proctora (Tarkiewicz i Nosalewicz, 2005). Nie bez znaczenia jest także fakt, że wyniki oznaczeń metodą Proctora zależą od sposobu gospodarowania glebą (Archetti i in., 1988).

## Cel i zakres oraz metody badań

Celem niniejszej pracy było poszukiwanie najlepiej dopasowanej funkcji opisującej przebieg zależności gęstości objętościowej szkieletu gleby od jej wilgotności na podstawie aproksymacji punktów Proctora. Ze względu na paraboliczny charakter zależności gęstości objętościowej szkieletu gleby od jej wilgotności poszukiwania ograniczono do czterech wielomianów – od drugiego do piątego stopnia.

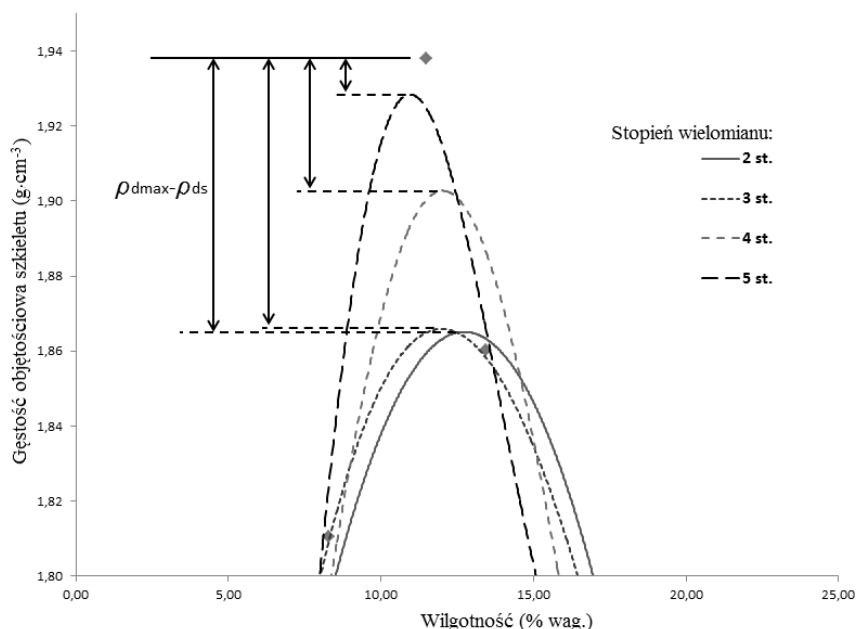
Realizując cel pracy określano rozstęp wartości gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ) i wilgotności optymalnej ( $W_{opt}$ ) gleby dla różnych stopni wielomianu (rys. 1), wykorzystanego do szacowania tych parametrów. Analizowano także różnice wartości maksymalnej gęstości ( $\rho_{dmax}$ ), zaobserwowanej w otoczeniu optymalnej wilgotności i gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ) oznaczonej metodą Proctora (rys. 2), dla poszczególnych stopni wielomianu opisującego linię trendu.

Badania prowadzono na materiale glebowym (próbkach) pobranym z pięciu obiektów – profili (Obojno, Skarbmierzyce, Nowy Przylep, Ostoja i Reńsko) z warstw leżących na głębokościach: 25-30, 35-40, 45-50, 55 cm; czyli tej części nieuprawianej warstwy gleby, nazywanej warstwą podorną, która jest szczególnie narażona na nadmierne zagęszczanie i zazwyczaj zawiera znaczącą zawartość próchnicy. Skład granulometryczny oznaczono metodą Bouyoucosa-Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego (frakcje piasku obmywano na sicie o wymiarach oczek 0,1 mm). Do określenia gęstości fazy stałej użyto metody piknometrycznej. Zawartość próchnicy określono metodą Tiurina, a odczyn gleby – metodą elektrometryczną. Granicę plastyczności określono metodą waleczkowania a płynności za pomocą aparatu Cassagrande'a. Badania zagęszczalności gleby metodą Proctora wykonano zgodnie z PN-88/B-04481, stosując tzw. metodę normalną.



Rysunek 1. Rozstępy wartości gęstości maksymalnej ( $R_{pds}$ ) i wilgotności optymalnej gleby ( $R_{Wopt}$ ) w zależności od stopnia wielomianu opisującego linię trendu (Obiekt Obojno: warstwa 45–50 cm)

Figure 1. Ranges of the maximum density value ( $R_{pds}$ ) and optimal moisture of soil ( $R_{Wopt}$ ) in relation to the degree of polynomial describing the trend line (Obojno object: layer 45-50 cm)



Rysunek 2. Różnica wartości maksymalnej gęstości ( $\rho_{dmax}$ ) zaobserwowanej w otoczeniu optymalnej wilgotności i gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ) oznaczonej metodą Proctora dla różnych stopni wielomianu opisującego linię trendu (Obiekt Obojno: warstwa 45–50 cm)  
 Figure 2. Difference of the maximum density value ( $\rho_{dmax}$ ) reported in the surrounding of optimal moisture and the maximum density ( $\rho_{ds}$ ) described with Proctor method for different degrees of polynomial, which describes the trend line (Obojno object: layer 45–50 cm)

Oznaczenia gęstości maksymalnej i wilgotności optymalnej wykonywano w jednym powtórzeniu dla poszczególnej warstwy (próbki) danego obiektu. Przy czym na jedno oznaczenie składało się 8 pomiarów gęstości objętościowej, każdy przy innej wilgotności. Uzyskano to zmniejszając postępowanie ilości dodawanej wody do próbki gleby do 70-80  $\text{cm}^3$ , zamiast zalecanej w normie 100-150  $\text{cm}^3$ . Łącznie dla wszystkich obiektów, warstw i poziomów wilgotności próbek wykonano zatem 160 pomiarów gęstości objętościowej gleby metodą Proctora. Wartości gęstości maksymalnej i wilgotności optymalnej obliczano w miejscu gdzie uzyskane wielomiany opisujące dane doświadczalne przyjmowały wartość maksymalną, w badanym zakresie zmian wilgotności próbek gleby. Niezbędne obliczenia wykonano za pomocą programów Microsoft Excel oraz Statistica StatSoft, Inc.

## Wyniki i ich analiza

W tabeli 1 zamieszczono wyniki oznaczeń cech własnych badanych gleb. Można zauważyć, że materiał badawczy stanowiły próbki pochodzące z gleb, które ugniatane w stanie wysokiej wilgotności są narażone na trwałą i silną deformację. Materiał badawczy był przede wszystkim zróżnicowany pod względem składu granulometrycznego i zawartości próchnicy, co znalazło prawdopodobnie odzwierciedlenie w wartościach granic plastyczności i płynności, których wartości mieściły się odpowiednio w szerokich przedziałach 14,1-31,4% wag. i 17,0-73,0% wag. W mniejszym stopniu były zróżnicowane gęstość właściwa i odczyn gleby, których wartości zawierały się odpowiednio w przedziałach 2,39-2,67 g·cm<sup>-3</sup> i pH 5,08-6,86.

Tabela 1

*Uśrednione wyniki pomiarów cech własnych gleby dla poszczególnych odkrywek i warstw pomiarowych*

Table 1

*Mean results of soil properties measures for the selected soil pits and measure layers*

Obiekt	Warstwa (cm)	Grupa granulometryczna (PTG 2008)	Gęstość właściwa (g·cm <sup>-3</sup> )	Odczyn (w KCl) (pH)	Zawartość próchnicy (%)	Granica plastyczności (% wag.)	Granica płynności (% wag.)
Nowy Przylep	25-30	<i>pyg</i>	2,45	6,32	3,10	22,0	29,5
	35-40	<i>pyg</i>	2,46	6,34	2,02	21,3	31,2
	45-50	<i>pyg</i>	2,45	6,29	2,30	23,7	32,0
	55-60	<i>gz</i>	2,47	6,21	1,09	20,3	31,3
Obojno	25-30	<i>gz</i>	2,45	6,86	4,17	25,9	44,2
	35-40	<i>gz</i>	2,49	6,84	3,77	28,0	47,9
	45-50	<i>gpyi</i>	2,52	6,78	2,34	30,4	58,7
	55-60	<i>ipy</i>	2,40	6,52	1,70	31,4	73,0
Ostoja	25-30	<i>gl</i>	2,52	5,08	1,03	14,1	17,0
	35-40	<i>gz</i>	2,66	5,13	0,61	18,4	27,6
	45-50	<i>gz</i>	2,67	5,23	0,69	19,8	30,3
	55-60	<i>gz</i>	2,55	5,63	0,57	18,0	28,8
Reńsko	25-30	<i>pyg</i>	2,43	6,21	3,32	23,5	32,2
	35-40	<i>gz</i>	2,41	6,45	3,17	22,4	31,9
	45-50	<i>gz</i>	2,39	6,50	4,00	25,9	37,0
	55-60	<i>gz</i>	2,44	6,43	2,91	22,0	31,8
Skarbimierz	25-30	<i>gpi</i>	2,50	6,23	1,78	21,8	39,2
	35-40	<i>gpi</i>	2,64	6,25	1,05	17,9	27,5
	45-50	<i>gi</i>	2,60	6,21	0,75	24,9	61,0
	55-60	<i>pyi</i>	2,53	6,22	0,68	27,4	52,5

Oznaczenia grup granulometrycznych: *pyg* – pył gliniasty, *gz* – glina zwykła, *gpyi* – glina pylasto-ilasta, *ipy* – il pylasty, *gl* – glina lekka, *gpi* – glina piaszczysto-ilasta, *gi* – glina ilasta, *pyi* – pył ilasty

Symbols of grain size groups: *pyg* – silt loam, *gz* – loam, *gpyi* – silty clay loam, *ipy* – silty clay, *gl* – sandy loam, *gpi* – sandy clay loam, *gi* – clay loam, *pyi* – silt loam

W tabeli 2 zamieszczono wyniki określające dopasowanie zastosowanych wielomianów do uzyskanych punktów pomiarowych za pomocą współczynnika determinacji ( $R^2$ ) oraz rozstępy wartości gęstości maksymalnej ( $R_{\rho_{ds}}$ ) i wilgotności optymalnej ( $R_{W_{opt}}$ ). Można zauważyć, że  $R^2$  przyjmował wysokie wartości (0,849-0,960), które zwiększały się, czego można było oczekiwać, wraz ze wzrostem stopnia zastosowanego modelu. Na podstawie uzyskanych zakresów zmian  $R_{\rho_{ds}}$  i  $R_{W_{opt}}$  można stwierdzić, że stopień wielomianu ma znaczący wpływ na oznaczaną wartość tych parametrów gleby. Wynika, to stąd, że uzyskany rozstęp  $R_{\rho_{ds}}$  przekracza  $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , czyli wartość, którą Komornicki i Zasoński (1965) uważają za graniczną dla potrzeb praktycznego interpretowania różnicy gęstości objętościowej gleby. W przypadku  $R_{W_{opt}}$  rozstęp wartości przekraczał przeciętny rozstęp wilgotności aktualnej gleby obserwowany podczas pomiarów tego parametru dla warunków polowych w określonej warstwie tj. do około 2% wag. (Błażejczak i in., 2008).

Tabela 2

*Ocena dopasowania wielomianu ( $R^2$ ) i rozstępy wartości gęstości maksymalnej ( $R_{\rho_{ds}}$ ) i wilgotności optymalnej ( $R_{W_{opt}}$ ) oraz różnice wartości maksymalnej gęstości ( $\rho_{dmax}$ ) zaobserwowanej w otoczeniu optymalnej wilgotności i gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ) oznaczonej metodą Proctora*

Table 2

*Assessment of adjusting a polynomial ( $R^2$ ) and ranges of the maximum density values ranges ( $R_{\rho_{ds}}$ ) and optimal moisture ( $R_{W_{opt}}$ ) and differences of the maximum density values ( $\rho_{dmax}$ ) reported in the surrounding of the optimum moisture and the maximum density ( $\rho_{ds}$ ) determined with the Proctor method*

Stopień zastosowanego wielomianu	$R^2$	$R_{\rho_{ds}}$	$R_{W_{opt}}$	Maksymalna wartość	Minimalna wartość
		( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	(% wag.)	$\rho_{dmax} - \rho_{ds}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\rho_{dmax} - \rho_{ds}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
5	0,960			0,052	-0,016 (12)
4	0,939			0,055	-0,015 (9)
3	0,935	0,00–0,11	0,04–2,50	0,085	-0,013 (4)
2	0,849			0,085	-0,003 (1)

Oznaczenia:  $R^2$  – wartość współczynnika determinacji; pozostałe oznaczenia zob. rys. 1 i 2

Uwaga: w nawiasie podano liczbę próbek gleby, dla których stwierdzono różnicę ujemną

Symbols:  $R^2$  – value of the coefficient of determination; the remaining symbols see fig. 1 and 2

Note: number of soil samples, for which a negative difference was determined, was given in the brackets

W tabeli 2 zamieszczono także wyniki analizy wartości różnic pomiędzy maksymalną gęstością ( $\rho_{dmax}$ ), zaobserwowaną w otoczeniu optymalnej wilgotności, a gęstością maksymalną ( $\rho_{ds}$ ), oznaczoną metodą Proctora w punkcie krzywej, w którym wielomian przyjmował wartość maksymalną (zob. rys. 2). Dodatkowo lub ujemne wartości różnic  $\rho_{dmax} - \rho_{ds}$  (tab. 2) oznaczają, że punkt  $\rho_{dmax}$  leży nad lub pod krzywą aproksymującą uzyskane wyniki. Podana zaś w nawiasie liczba oznacza liczbę próbek gleby, dla których stwierdzono różnicę ujemną. Realizując cel pracy poszukiwano funkcji, której stosowaniu towarzyszy minimalna odległość  $\rho_{dmax}$  od krzywej aproksymującej. Założono także, że liczba przypad-

ków (próbek), dla których stwierdzono różnicę ujemną  $\rho_{dmax} - \rho_{ds}$  powinna być zbliżona do liczby różnic dodatnich, co świadczyłoby o tym, że wartości  $\rho_{dmax}$  oscylują równomiernie wokół krzywej aproksymującej. Analiza (tab. 2) wyników upoważnia do stwierdzenia, że kryteria te spełnia wielomian stopnia czwartego. Dla tej krzywej maksymalna wartość  $\rho_{dmax} - \rho_{ds}$  wynosiła  $0,055 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i była nieznacznie wyższa od wartości różnicy otrzymanej dla wielomianu stopnia piątego tj.  $0,052 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Ponadto minimalna wartość różnicy  $\rho_{dmax} - \rho_{ds}$  dla krzywej czwartego stopnia była nieco niższa niż dla wielomianu stopnia piątego a liczba przypadków, dla których stwierdzono różnicę ujemną  $\rho_{dmax} - \rho_{ds}$  wynosiła 9 na 20 zbadanych próbek. Nie bez znaczenia jest też fakt, że w przypadku wielomianu piątego stopnia obserwowano tendencję do „falowania” krzywej i przesuwania się w bok maksimum funkcji w porównaniu do pozostałych krzywych (zob. rys. 1). Powodowało to, że wyznaczona wartość wilgotności optymalnej różniła się przeciętnie o około 11% w stosunku do średniej uzyskanej dla wszystkich testowanych wielomianów.

Testowano także wpływ dokładności wartości oszacowanych współczynników funkcji wielomianowej na wynik obliczeń gęstości maksymalnej i wilgotności optymalnej. Stwierdzono, że dla wielomianów czwartego lub piątego stopnia wartości współczynników powinny być podawane minimum z dokładnością do ósmego miejsca po przecinku. Dalsze zwiększanie tej dokładności nie powodowało znaczącej zmiany wyznaczanych parametrów gleby. Dla wielomianów niższego stopnia (2-go i 3-go) uzyskano, że wystarczające jest stosowanie wartości współczynników z dokładnością do czterech miejsc po przecinku, co jest zgodne z wynikami Cwiąkały (2007).

## Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

1. Na wyznaczone wartości wilgotności optymalnej i gęstości maksymalnej, na podstawie krzywej doświadczalnej opisanej wielomianem, wpływa stopień zastosowanej funkcji.
2. Spośród przetestowanych funkcji, do wyznaczenia wartości wilgotności optymalnej i gęstości maksymalnej, najbardziej nadaje się wielomian stopnia czwartego.
3. Wykorzystanie funkcji wielomianowej czwartego stopnia do wyznaczenia wilgotności optymalnej i gęstości maksymalnej wymaga stosowania wartości współczynników z dokładnością minimum do 8-miu miejsc po przecinku.

## Literatura

- Aragón, A.; García, M.G.; Filgueira, R.R.; Pachepsky, Ya.A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research*, 56: 197-204.
- Archetti, R.; Bonciarelli, F.; Farima, G.; (1988). Results of Tillage Trials Carried Out in 1981-1987 In Central Italy. In: *Tillage and Traffic in Crop Production, 11th International Conference of ISTRO*, Edinburgh, Scotland, 11-15th July, Proceedings volume 2, 549-554.
- Błażejczak, D.; Dawidowski, J. B.; Śnieg, M.; Tomaszewicz, T. (2008). Oddziaływanie gęstości i składu gleby na ocenę stanu jej zagęszczenia. *Inżynieria Rolnicza*, 4(102). 127-132.
- Błażejczak, D.; Dawidowski, J.B. (2013). Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 58(1), 17-20.

- Ćwiąkała, M. (2007). Badania zagęszczalności kruszyw używanych w budownictwie drogowym. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego 133*, Inżynieria Środowiska nr 13, 76-83.
- Hakansson, I.; Lipiec, J. (2000). A reviv of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research 53*, 71-85.
- Komornicki, T.; Zasoński, S. (1965). Powtarzalność wyników oznaczeń niektórych właściwości fizycznych gleb. *Roczniki Gleboznawcze*, T. XV. Zeszyt 2. PWN Warszawa, 315-330.
- Nhantumbo, A. B. J. C.; Cambule, A. H. (2006). Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil and Tillage Research*, 87, 231-239.
- Pabin, J. (2004). Przyczyny powstawania i sposoby zapobiegania fizycznej degradacji gleb. *Postępy Nauk Rolniczych*, 4, 17-32.
- Pabin, J. (2007). Uprawa roli a właściwości fizyczne gleby i plonowanie roślin. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Zeszyt 8, 161-176.
- Szeptycki, A. (2003). Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, 48(2), 38-42.
- Tarkiewicz, S.; Nosalewicz, A. (2005). Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. *Int. Agrophysics 19*, 345-350.
- Wagner, L. E.; Ambe, N. M.; Ding D. (1994). Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties. *Transactions of the ASAE*, 37(4), 1121-1125.

## THE SELECTED METHODOLOGICAL ASPECTS OF USING THE PROCTOR APPARATUS IN TESTS OF SOILS CONCENTRATION ABILITY

**Abstract.** The objective of the paper was to search for a function which describes relations of the bulk intensity of the soil skeleton to its moisture based on approximation of the Proctor points. Knowledge on this relation enables prediction of the influence of agricultural vehicles wheels on soil. Searching was limited to four polynomials – from the second to the fifth degree. Material for research originated from the subsoil of five soil profiles. The following were determined in material: grain size distribution, density of a solid phase, humus content, soil reaction and limits of elasticity and soil liquidity. Concentration of samples with the Proctor method was carried out according to PN-88/B-04481. Values of the maximum density and optimal moisture were calculated in the place, where the obtained polynomials describing experimental data accepted the maximum value. It was found out that for determination of the value of optimal moisture and the maximum density, polynomial of the fourth degree is the most suitable.

**Key words:** soil, maximum density, optimal moisture, polynomial

### Adres do korespondencji:

Dariusz Błażejczak, e-mail: [dariusz.blazejczak@zut.edu.pl](mailto:dariusz.blazejczak@zut.edu.pl)  
Katedra Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
ul. Papieża Pawła VI/3  
71-459 Szczecin