

## THE PROBLEM OF THE USE OF BULK DENSITY OF THE SOIL IN ASSESSING ITS COMPACTION

### Summary

The aim of this study was to analyze the problem of soil bulk density used in the evaluation of conditions for plant growth and the assessment of the impact of vehicle wheels and machinery on the ground. Attention was paid to the fact that applying of the bulk density of the soil for such goals, carries a lot of unknowns, hampering the interpretation of the results of determinations. The problem of soil compaction assessment was discussed by: optimum bulk density, critical bulk density and natural bulk density. It was found that the bulk density of the soil is entangled with various relationships that modify its use as the criterion of the assessment of soil condition. Therefore soil compaction assessment should also include at least the following information: name of the plant, soil water content, name of soil textural group and description of soil sampling.

**Key words:** soil, assessment, compaction, bulk density

## PROBLEM WYKORZYSTANIA GĘSTOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ GLEBY W OCENIE JEJ ZAGĘSZCZENIA

### Streszczenie

Celem pracy było dokonanie analizy problemu wykorzystywania gęstości objętościowej gleby w ocenie warunków rozwoju roślin i oddziaływania kół pojazdów i maszyn rolniczych na glebę. Zwrócono uwagę na fakt, że stosowanie gęstości objętościowej gleby do tych celów niesie za sobą wiele niewiadomych, utrudniających interpretację otrzymanych wyników oznaczeń. Omówiono problem oceny zagęszczenia gleby za pomocą: optymalnej gęstości objętościowej, krytycznej gęstości objętościowej i naturalnej gęstości objętościowej. Stwierdzono, że gęstość objętościowa gleby jest wskaźnikiem uwikłanym różnymi zależnościami, które modyfikują jej znaczenie jako kryterium różnego rodzaju ocen stanu gleby. W takich uwarunkowaniach ocena zagęszczenia gleby powinna także zawierać co najmniej następujące informacje: gatunek rośliny, wilgotność gleby, grupa granulometryczna gleby oraz sposób pobierania próbek gleby.

**Słowa kluczowe:** gleba, ocena, zagęszczenie, gęstość objętościowa

### 1. Wprowadzenie

Jednym z problemów współczesnego rolnictwa jest nadmierne zagęszczanie gleb przez maszyny i ciągniki. Ocenia się, że w Polsce wysoką i średnią podatność na zagęszczanie wykazuje odpowiednio około 15,4 i 21,9% gleb. Do gleb szczególnie podatnych na zagęszczenie należą gliny ciężkie, ily oraz gliny lekkie [1]. Problem ten nie jest nowy, bo już w 1972 roku ukazał się opracowany przez Daviesa i in. poradnik dla farmerów, w którym zamieszczono informacje dotyczące sposobów zapobiegania tym zagrożeniom [2]. Jednak temat ciągle znajduje się w kręgu zainteresowania nauki i praktyki rolniczej [3]. Jedną z ważniejszych przyczyn jest wzrost masy maszyn i pojazdów rolniczych, zwiększający ryzyko nadmiernego zagęszczania gleb. Obecnie, według niektórych badaczy [4], ryzyko to jest szczególnie wysokie.

Do najczęściej badanych właściwości gleby, która związana jest ze zmianą jej zagęszczenia, należy gęstość objętościowa szkieletu glebowego. Ocena stanu zagęszczenia gleby za pomocą jej gęstości objętościowej w kontekście oddziaływania na warunki rozwoju roślin sprawia wiele trudności. Zagęszczenie gleby nie jest bowiem bezpośrednio związane z wegetacją roślin, ale oddziałuje pośrednio na inne właściwości fizyczne, od których zależy życie roślin w środowisku glebowym [5, 6]. Podjęto próbę przedstawienia problemu bezpośredniego wykorzystania wyników oznaczeń gęstości objętościowej gleby, jako kryterium

w ocenie jej stanu zagęszczenia w kontekście warunków rozwoju roślin i skutków oddziaływania kół pojazdów i maszyn rolniczych.

### 2. Czynniki oddziałujące na wynik oznaczania gęstości objętościowej

Oznaczanie gęstości objętościowej gleby metodą pobierania prób niesie za sobą wiele niewiadomych, utrudniających interpretację otrzymanych wyników oznaczeń. Związane jest to przede wszystkim z dynamiką zjawisk zachodzących w glebie oraz naturalną zmiennością jej właściwości. Na wynik pomiaru gęstości objętościowej mogą wpływać m.in.:

- zmienność tego parametru w ciągu sezonu agrotechnicznego, która rozumiana jako różnica pomiędzy stanami ekstremalnymi może dochodzić do  $0,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  [7],
- zmienność budowy profilu gleby w obrębie badanej powierzchni [8, 9],
- rozmiary zastosowanego cylindra pomiarowego, co przekłada się na niepewność oznaczenia [10],
- tendencja do omijania oznaczenia przez badaczy miejsc poboru prób, w których występują różnorakie przeszkody (np. kamienie lub większe pozostałości organiczne), co związane jest z rozmiarem zastosowanego cylindra pomiarowego,
- przyjęta liczba powtórzeń, która zwykle wynosi od 4 do 6 próbek, a minimalna ich liczba wynosi 3 szt. [11, 12],

- brak należytej staranności podczas pobierania próbek lub oceny aktualnego stanu fizycznego gleby, co powoduje np. dogęszczanie się gleby w cylindrze lub ubytki jej masy [13];
- zjawiska pęcznienia lub kurczenia się gleby pod wpływem zmian jej wilgotności, które mogą powodować zmiany objętości gleby do 32%, zależnie od rodzaju utworu glebowego [14].

Stąd też pozyskiwanie wyników oznaczeń gęstości objętościowej, dla celów interpretacji skutków zagęszczania gleby kołami pojazdów i maszyn rolniczych i ich oddziaływania na rozwój korzeni roślin, wymaga dużej wiedzy i doświadczenia badaczy zajmujących się tą problematyką.

### 3. Sposoby oznaczania gęstości objętościowej gleby

Podstawowym działaniem związanym z interpretacją wyników oznaczeń gęstości objętościowej gleby jest ich porównanie z przytaczanymi w literaturze wartościami progowymi (granicznymi). Problemem, na jaki się często napotyka, jest duża rozbieżność wartości progowych. Niejednorodność gleby i mnogość zjawisk w niej zachodzących oraz inne wymienione wcześniej czynniki powodują bowiem, że opracowanie wartości gęstości objętościowej gleby, którą można uznać za referencyjną dla potrzeb oceny warunków rozwoju roślin, stwarza wiele trudności. Z tego względu podejmowane są próby określenia progowych wartości zagęszczenia gleby w powiązaniu z reakcją roślin i właściwościami gleby. Należą do nich m. in.:

- optymalna gęstość objętościowa,
- krytyczna gęstość objętościowa,
- naturalna gęstość objętościowa.

Gęstość objętościowa optymalna jest definiowana jako wartość, przy której uzyskiwany jest maksymalny plon. W badaniach stwierdzono, że wartość tej gęstości położona jest w otoczeniu punktu, w którym krzywa paraboliczna przedstawiająca zależność wielkości plonu od gęstości objętościowej przyjmuje wartość maksymalną [15-17]. Należy jednak podkreślić, że dotychczasowe wyniki badań nad określeniem optymalnej gęstości objętościowej są fragmentaryczne i niejednoznaczne [18, 19]. Wartość gęstości optymalnej ma charakter rozmyty. Dlatego najczęściej podawany jest przedział wartości, w którym powinna się ona zawierać. Powszechnie wiadomo, że gęstość optymalna bywa różna dla poszczególnych gatunków roślin uprawnych [20]. Może się ona jednak znacznie różnić dla tego samego gatunku rośliny uprawianej na różnych glebach, a nawet wykazywać znaczące różnice dla tego samego uziarnienia gleby, co na przykładzie jęczmienia jarego przedstawiono w tab. 1. Z powyższych stwierdzeń wynika, że ocena warunków rozwoju danej

rośliny za pomocą gęstości optymalnej bez podania uziarnienia gleby jest niepełna.

Tab. 1. Optymalne stany zagęszczenia dla jęczmienia jarego w zależności od uziarnienia gleby według różnych autorów  
*Table 1. Optimum soil compaction for spring barley depending on the soil texture by various authors*

Uziarnienie gleby /Soil texture	Gęstość gleby [g cm <sup>-3</sup> ] /Soil bulk density	Źródło
Piasek gliniasty mocny (piasek gliniasty)	1,57	[21]
	1,62	
Less (pył zwykły)	1,35 – 1,45	[22]
Mada ilasta bardzo ciężka (ił zwykły)	1,30 – 1,35	
Gлина piaszczysta (głina piaszczysta)	1,51 – 1,63	[23]
	1,40 – 1,50	[24]

*Uwaga:* w nawiasach podano przybliżone odpowiedniki uziarnienia gleby wg klasyfikacji PTG 2008

Należy dodać, że znajomość gęstości optymalnej ma i tak ograniczone praktyczne zastosowanie. Trudno bowiem zmieniać co roku i utrzymywać na wymaganym poziomie zagęszczenie gleby na danym polu, stosownie do wymagań gatunku uprawianej rośliny. Dlatego proponuje się utrzymywać wartość gęstości optymalnej w odniesieniu do konkretnego gatunku gleby [17]. Przy tym podkreśla się, że należy uwzględniać również zawartość w glebie materii organicznej [15]. W literaturze przedmiotu można znaleźć także przykłady badań, w których stwierdzono, iż zwiększone zagęszczenie poprawia warunki rozwoju roślin i prowadzi do wzrostu ich plonowania [25-27].

Problem opracowania wartości optymalnych gęstości objętościowych dla poszczególnych roślin polega również na tym, że plonowanie roślin zależy od wielu czynników, a zagęszczenie gleby jest tylko jednym z nich. Stąd podejmuje się także próby określenia gęstości krytycznej, rozumianej jako wartość, po przekroczeniu której następuje hamowanie wzrostu korzeni roślin [6, 21]. Wyniki tego typu badań nie są jednak również jednoznaczne. Zamieszczone w tab. 2 wartości krytyczne gęstości gleby ze względu na ich duże wartości wydają się niepodważalne. Zauważa się jednak, że w niektórych warunkach duża wartość gęstości gleby nie hamuje wzrostu korzeni roślin. W przypadku uprawy zerowej, podane wartości (tab. 2) mogą być przekraczane, ponieważ wyższa zawartość materii organicznej w wierzchniej warstwie i duża aktywność biologiczna gleb nie uprawianych mogą stwarzać lepsze warunki dla rozwoju korzeni niż gleby uprawiane, pomimo wyższej gęstości objętościowej [28].

Tab. 2. Krytyczne wartości gęstości objętościowej gleby dla wzrostu korzeni roślin [29]

*Table 2. Critical values of soil bulk density for the growth of plant roots [29]*

Gatunek gleby Soil texture	Gęstość, przy której może wystąpić ograniczenie wzrostu korzeni <i>Bulk densities that may straiten root growth</i>	Gęstość krytyczna (hamowania rozwoju korzeni) <i>Bulk densities that inhibit root growth</i>
	[g·cm <sup>-3</sup> ]	
Piasek, piasek gliniasty	1,69	>1,80
Głina piaszczysta, glina	1,63	>1,80
Głina piaszczysto-ilasta, glina ilasta	1,60	>1,75
Pył, glina pylasta	1,60	>1,75
Głina pylasto-ilasta	1,55	>1,65
Ił piaszczysty, ił pylasty	1,49	>1,58
Ił	1,39	>1,48

*Uwaga:* nazwy gatunków gleb przytoczono za Słownikiem Agrofizycznym PAN 1986

Tab. 3. Wartości krytyczne gęstości w warstwie ornej dla gleb o różnej zawartości cząstek spławalnych i węgla organicznego [6]

Table 3. Critical values of the density in the arable layer for soils containing different amounts of fine particles [6]

Zawartość cząstek spławalnych <i>The content of fine particles</i>	Zawartość węgla organicznego <i>The content of organic carbon</i>	Gęstość krytyczna gleby przy uwilgotnieniu <i>The critical soil density at the soil moisture</i> [g·cm <sup>-3</sup> ]	
		50% PPW	90% PPW
10	0,7	1,42	1,70
20	1,0	1,44	1,72
30	1,2	1,40	1,68
40	1,5	1,42	1,70

PPW – połowa pojemność wodna

Tab. 4. Progowe wartości fizycznych właściwości gleb dla warstwy uprawnej [31]

Table 4. The threshold values of the physical properties of the layer of arable soil [31]

Rodzaj właściwości <i>Type of property</i>	Uziarnienie gleby / <i>Soil texture</i>					
	II	Gлина ilasta	Gлина	Gлина piaszczysta	Piasek gliniasty	Piasek
Gęstość objętościowa [g·cm <sup>-3</sup> ]	>1,35	>1,40	>1,45	>1,55	>1,60	>1,70
Zwięzłość [MPa] * przy wilgotności [% wag.]	2,8 -3,2 28 -24	3,2 -3,7 24 -20	3,7 -4,2 18 -16	4,5 -5,0 15 -13	5,5 12	6 10
Porowatość [% obj.]**	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Minimalna porowatość powietrzna [% obj.]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Maksymalna porowatość kapilarna [% obj.]	>35	>35	>35	-	-	-
Udział części spławalnych [%] (< 0,001 mm)	>30	>30	-	-	-	-
Wskaźnik plastyczności	>25	>25	>25	-	-	-

\* jeżeli aktualna wilgotność różni się od podanej w tabeli, do każdego 1% różnicy należy dodać 0,25 MPa do zmierzonej wartości zwięzłości (w przypadku, kiedy jest wyższa) lub odjąć 0,25 MPa (w przypadku kiedy jest niższa)

\*\* 10% objętości jest wartością średnią, okopowe – 12% objętości; zbożowe – 10% objętości; zielonki – 8% objętości

Uwaga: nazwy gatunków gleby przytoczono za Słownikiem Agrofizycznym PAN 1986

Pabin [6] zwraca uwagę na fakt, że wzrost gęstości do stanu krytycznego może być krótkotrwały, ponieważ jest on ściśle związany z wilgotnością gleby (tab. 3). Z analizy danych zamieszczonych w tab. 3 wynika, że wraz ze zwiększeniem lub zmniejszeniem wilgotności gleby należałoby przewartościowywać ocenę zagęszczenia od optymalnego do krytycznego i odwrotnie. Utrudnia to ocenę czy zahamowanie wzrostu lub rozwoju roślin jest spowodowane nadmiernym zagęszczeniem, czy brakiem dostatecznej ilości wody.

Problemy z wyznaczeniem optymalnych czy krytycznych gęstości objętościowych gleb, ważnych dla rozwoju roślin, powodują, że praktykuje się określanie innych czynników, od których zależy rozwój roślin [30]. W tab. 4 zamieszczono przykład zestawienia krytycznych wartości niektórych istotnych fizycznych właściwości gleb, których przekroczenie świadczyć może o pojawieniu się ryzyka pogorszenia funkcji gleby, spowodowane nadmiernym jej zagęszczeniem.

Omówione powyżej zagadnienia dotyczyły przede wszystkim warstwy ornej. Wzrost i plonowanie roślin zależy natomiast również od zagęszczenia warstwy podornej gleby. Jednak wpływ właściwości warstwy podornej na rośliny jest, w stosunku do warstwy ornej, mało rozpoznany [5, 32]. Rozpatrywanie tych zagadnień wiąże się ściśle z rozwojem korzeni. Według Pabina [6], podobnie jak dla warstwy ornej, zasadnicze znaczenie dla określenia gęstości krytycznej w warstwie podornej gleby ma cały szereg czynników, w tym zawartość cząstek spławalnych i wilgotność gleby (tab. 5).

Tab. 5. Wartości krytyczne gęstości w warstwie podornej dla różnych zawartości cząstek spławalnych [6]

Table 5. Critical values of the soil density in the subsoil layer for different content of fine particles [6]

Zawartość cząstek spławalnych <i>The content of fine particles</i>	Gęstość krytyczna gleby przy uwilgotnieniu <i>The critical soil density at the soil moisture</i> [g·cm <sup>-3</sup> ]	
	50% PPW	80% PPW
10	1,82	-
20	1,72	1,97
30	1,61	1,87
40	1,51	1,76

PPW – połowa pojemność wodna

Różnice w ocenie zagęszczenia gleby pomiędzy warstwami orną a podorną oraz mnogość zjawisk w nich zachodzących powodują, że poszukuje się uniwersalnej, niezależnej od głębokości, wartości referencyjnej dla gęstości objętościowej, którą można by stosunkowo łatwo wyznaczyć.

Próbę taką podjął Wojtasik [7], który wprowadził pojęcie gęstości naturalnej gleby. Gęstość naturalna jest to wielkość zależna od wskaźnika uziarnienia, zawartości węgla organicznego i węglanu wapnia oraz głębokości w profilu, do której gleba samoczynnie dąży ze stanu spulchnienia lub zagęszczenia. Zainteresowanie tym parametrem gleby wynika m.in. z tego, że Wojtasik uzyskał paraboliczną zależność retencji wody użytecznej dla roślin i plonów roślin od gęstości gleby z wierzchołkiem odpowiadającym wielkości równej lub bliskiej gęstości naturalnej. Po-

wszechne zastosowanie gęstości naturalnej gleby w ocenie jej zagęszczenia, ze względu na zakres przeprowadzonych badań – częściowo poletkowe i wazonowe, wymaga jednak szerszego potwierdzenia.

Opisane trudności z bezpośrednim wykorzystaniem wyników oznaczeń gęstości objętościowej gleby powodują, że jako wskaźnika oceny warunków rozwoju roślin próbuje się stosować względne miary zagęszczenia gleby [33].

#### 4. Podsumowanie

Gęstość objętościowa gleby jest wskaźnikiem powiązanym różnymi zależnościami, które modyfikują jej znaczenie dla wzrostu i rozwoju roślin.

Dla oceny skutków oddziaływania kół pojazdów i maszyn rolniczych na fizyczne warunki rozwoju roślin za pomocą gęstości objętościowej niezbędne jest określenie oraz wyszczególnienie wszystkich możliwych czynników, od których zależy wyznaczana wartość gęstości objętościowej, a w szczególności:

- gatunek rośliny,
- wilgotność gleby,
- charakterystyka składu gleby, w tym przede wszystkim skład granulometryczny (nazwa grupy granulometrycznej) i zawartość próchnicy.

#### 5. Bibliografia

- [1] Krasowicz S., Oleszek W., Horabik J., Dębicki R., Jankowiak J., Stuczynski T., Jadczyzyn J.: Racionalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. Polish Journal of Agronomy, 2011, nr 7, 43-58.
- [2] Raper R. L., Kirby J. M.: Soil Compaction: How to Do It, Undo It, or Avoid Doing It. W: ASABE Publication nr 916C0106, Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA, 12-14 February 2006.
- [3] Batey T., McKenzie D.C.: Soil compaction: identification directly in the field. Soil Use and Management, 2006, 22, 123-131.
- [4] Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. and Horn, R.: Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. Soil and Tillage Res., 2003, 73: 1-8.
- [5] Pabin J.: Przyczyny powstawania i sposoby zapobiegania fizycznej degradacji gleb. Postępy Nauk Rolniczych, 2004, nr 4, 17-32.
- [6] Pabin J.: Uprawa roli a właściwości fizyczne gleby i plonowanie roślin. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, Zeszyt 8, 161-176.
- [7] Wojtasik M.: Gęstość naturalna gleb mineralnych. WSP Bydgoszcz, 1995.
- [8] Walczykova M., Zagórda M., Aboud Z.: Zmienność przestrzenna gleby w aspekcie jej wybranych właściwości fizycznych. Inżynieria Rolnicza, 2005, Nr 10 (70), s. 385-394.
- [9] Błażejczak D., Dawidowski J. B., Śnieg M., Tomaszewicz T.: Oddziaływanie gęstości i składu gleby na ocenę stanu jej zagęszczenia. Inżynieria Rolnicza, 2008, 4(102), 127-132.
- [10] Dawidowski B.: Proces ugniatania gleby i metoda prognozowania jej zagęszczenia w zmechanizowanych technologiach prac polowych. Wyd. AR Szczecin, Rozprawy, 1995, nr 163, 119 s.
- [11] Komornicki T., Zasoński S.: Powtarzalność wyników oznaczeń niektórych właściwości fizycznych gleb. Roczniki Gleboznawcze, T. XV. Zeszyt 2. PWN Warszawa. 1965, s. 315-330.
- [12] Mocek A., Drzymala S., Maszer P.: Geneza, analiza i klasyfikacja gleb. AR Poznań, 1997.
- [13] Powalka M., Buliński J.: Metody pomiaru parametrów gleby w warunkach polowych. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 2003, 10, 14-16.
- [14] Dobrzański B. Zawadzki S. (red.): Gleboznawstwo. Warszawa: PWRiL, 1993. ISBN 83-09-00083-9.
- [15] Kobyłarz J.: Nadmierne ugniatanie i zagęszczanie gleby – przyczyny, skutki, środki zaradcze. Biuletyn informacyjny PIMR, 1991, XXXVI, nr 3-4, 15-20.
- [16] Czyż E.A.: Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. Soil & Tillage Res., 2004, 79, s. 153-166.
- [17] Kaufmann M.: Multi Criteria Evaluation of Land Restoration for Agricultural Use. Diss. ETH No. 17744 A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2008, 130 s.
- [18] Tomaszewska J.: Wyznaczenie optymalnej gęstości objętościowej gleb na podstawie reakcji jęczmienia jarego. Fragmenta Agronomica, 2002, XIX, nr 3 (75), 46-59.
- [19] Poniatowska J.: Gęstość objętościowa gleb mineralnych i jej znaczenie dla warunków rozwoju roślin. Roczniki Gleboznawcze, 2003, LIV, nr 4, 103-113.
- [20] Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Turski R.: Gleboznawstwo z elementami geologii i mechaniki gleby. Akademia Rolnicza w Lublinie, 1978., 160 s.
- [21] Paluszek J.: Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych Polski. Acta Agrophysica, 2011, nr 2, Rozprawy i Monografie, 191, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie. ISSN 1234-4125, ISBN 978-83-89969-51-4.
- [22] Ślusarczyk E.: Optymalna gęstość trzech gleb dla wzrostu i plonowania jęczmienia jarego. Międzynarodowe seminarium RWPg, IUNG Puławy, 1990, K/2, 116-118.
- [23] Czyż E., Tomaszewska J.: Wpływ zagęszczenia gliny piaszczystej na masę korzeniową i plonowanie jęczmienia jarego. Pamiętnik Puławski – Materiały Seminarium, 1998, z. 112, 51-58.
- [24] Roszak W., Radecki A., Opic J., Witkowski F.: Próba określenia optymalnego zagęszczenia gleby gliniastej dla wzrostu i plonowania roślin uprawnych. Modelowanie i optymalizacja parametrów żyzności gleb. Międzynarodowe seminarium RWPg, Puławy, 1990, 106-115.
- [25] Droese H., Radecki A., Śmierchalski L.: Reakcja roślin uprawnych na stopień zagęszczenia gleby. Roczniki Nauk Rolniczych, 1982, seria A, t. 105, z. 3, 43-55.
- [26] Dzieńka S., Sosnowski A.: Możliwości zastosowania siewu bezpośredniego na glebie kompleksu żytniego dobrego w warunkach klimatycznych Pomorza Zachodniego. Roczniki Nauk Rolniczych, 1991, A 109, 2: 157-173.
- [27] Buczyński G., Marks M., Nowicki J.: Reakcja roślin na sposoby przeciwdziałania zagęszczeniu gleby. Pamiętnik Puławski, 2002, z. 130, 73-79.
- [28] Duiker W.: Effects of soil compaction. The Pennsylvania State University, 2004. [dostęp 10-03-2012]. Dostępny w Internecie: <http://pubs.cas.psu.edu/freepubs/pdfs/uc188.pdf>
- [29] USDA. Soil quality test kit guide. USDA Soil Quality Institute. Washington, D.C., 1999.
- [30] Iancu M.: Technique for Reducing Subsoil Compaction of Pedogenetic Origin. Proceedings of the 3rd INCO Copernicus Workshop on Subsoil Compaction, Busteni-Romania, June 14-18, 2001: 437-451.
- [31] Houskova B.: Soil compaction as a driving force for changes in soil functions. 2nd European Summer School on Soil Survey 12-16 June 2004, Soil & Waste Unit Institute of Environment & Sustainability JRC Ispra. [dostęp: 11-03-2012]. Dostępny w Internecie: [http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/events/summer-school\\_2004/files%5CBeat\\_Com.pdf](http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/events/summer-school_2004/files%5CBeat_Com.pdf)
- [32] Miatkowski Z.: Zagęszczenie podglebia jako element procesu fizycznej degradacji gleb. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Roln., 1998, z. 460, 431-443.
- [33] Hakansson I., Lipiec J.: A revive of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil & Tillage Research 2000, 53, 71-85.

Publikacja powstała w ramach projektu finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki (Umowa nr 7808/B/P01/2011/40).