

MAREK SPYCHALSKI, CEZARY KAŻMIEROWSKI

DEGRADACJA GLEB UPRAWNYCH POŁOŻONYCH
W STREFIE LINIOWYCH ROBÓT ZIEMNYCHDEGRADATION OF SOILS IN ARABLE LANDS
LOCATED IN THE ZONE OF PIPELINE CONSTRUCTION

Katedra Gleboznawstwa i Rekultywacji AR im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu

Abstract: The paper presents a comprehensive analysis of the degrading effect of increasing bulk density of soil on its physical properties. The study has shown that the use of heavy machines in the zone of pipeline construction resulted in a substantial increase in the soil density down to a depth of about 50 cm. The bulk density in this zone exceeded the critical value allowing root development – $1.8 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for sandy loams, the content of macro- and mezopores did not exceed 10% volume and the saturated hydraulic conductivity was practically no higher than $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. In such conditions the water penetration and gas exchange in soil are drastically limited. It has been evidenced that poorer aeration conditions and increased mechanical resistance being a result of increased bulk density of soil lead to a significant decrease in the least limiting water range (LLWR). In the horizons with increased bulk density the value of LLWR makes only from 0 to 31% of the traditionally calculated plant available water ($\text{PAW} = Q_{10 \text{ kPa}} - Q_{1500 \text{ kPa}}$).

Słowa kluczowe: degradacja gleb uprawnych, liniowe roboty ziemne.

Key words: degradation of soils in arable lands, zone of pipeline construction.

WSTĘP

Intensywny rozwój infrastruktury obserwowany w Polsce w ostatniej dekadzie spowodował nasilenie się problematyki degradacji i rekultywacji gleb położonych w strefie robót liniowych. Roboty te związane są najczęściej z budową ropociągów i gazociągów, energetycznych linii przesyłowych, a także z budową sieci wodociągowych i kanalizacyjnych. W trakcie tych prac często wykonywane są głębokie wykopy naruszające pierwotny układ warstw i poziomów glebowych. Ponadto częste przejazdy maszyn i środków transportu powodują znaczne zagęszczenie gleby w pasie transportu. Czynniki te niejednokrotnie nakładają się na siebie i powodują degradację gleb położonych na trasie robót. Gleba jako porowaty ośrodek przepływu materii i energii

stanowi strefę rozwoju korzeni roślin. Deformacja stanu fizycznego oraz naruszenie ciągłości tego ośrodka prowadzi do zmiany właściwości hydraulicznych oraz może w istotny sposób pogarszać warunki rozwoju roślin. Omawiana degradacja jest zwykle lekka, rzadziej umiarkowana, a zatem przywrócenie przydatności rolniczej gleb jest najczęściej możliwe poprzez modyfikację systemu gospodarowania i rzadko wymaga dodatkowych zabiegów inżynierskich.

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem wzrostu zagęszczenia gleby na jej właściwości hydrauliczne oraz warunki rozwoju roślin.

MATERIAŁY I METODY

Badania terenowe przeprowadzono w miejscowości Kotowiecko, położonej w gminie Nowe Skalmierzyce w odległości około 13 km na północny zachód od Kalisza. Materiałami macierzystymi badanych gleb są silnie rozmyte osady płaskiej moreny dennej, charakteryzujące się dużą zawartością frakcji pyłowej. W warunkach niewielkiej deniwelacji terenu zarysowuje się katenalne zróżnicowanie pokrywy glebowej. W miejscach wyżej położonych wykształciły się gleby płowe opadowo- i gruntowo-glejowe, natomiast w obniżeniach terenu głównie czarne ziemie właściwe [Komisja V PTG 1989]. Badania przeprowadzono w dwóch przekrojach usytuowanych poprzecznie względem trasy rurociągu naftowego. Jeden przekrój zlokalizowano w obrębie gleb płowych opadowo-glejowych, drugi w czarnych ziemiach właściwych. W obu przekrojach przeanalizowano po 3 profile glebowe reprezentujące miejsca charakterystyczne dla robót liniowych, tj. pas najsilniej zdegradowanej gleby nad rurociągiem, pas transportowy oraz dla porównania – profil odniesienia reprezentujący glebę położoną poza zasięgiem oddziaływania robót (40 m od osi rurociągu). W poszczególnych poziomach genetycznych analizowanych profili glebowych pobrano monolityczne próbki o strukturze naruszonej oraz próbki o strukturze nienaruszonej.

W próbkach o naruszonej strukturze wykonano standardowe analizy gleboznawcze, z których przedstawiono jedynie wyniki oznaczenia składu granulometrycznego [PKN 1998 a i b], węgla organicznego [Nelson, Somers 1982] oraz gęstości stałej fazy gleby [Soil Conservation Service 1992]. W próbkach o nienaruszonej strukturze, pobranych w 4 replikacjach do cylindereków 100 cm^3 oznaczono współczynnik filtracji metodą stałej wysokości słupa wody [Klute, Dirksen 1986] oraz gęstość objętościową gleby suchej. Krzywe wodnej retencyjności oznaczono w 4 powtórzeniach, w cylinderkach 50 cm^3 , metodą komór niskociśnieniowych Richardsa [Klute 1986], w zakresie ciśnień od 2,5 do 100 kPa. Wilgotność trwałego wędnięcia (1500 kPa) oznaczono metodą eksykatorową (według Kędziory [1971] nad roztworem H_2SO_4). W badaniach modelowych krzywe wodnej retencyjności gleb (WRG) dla wybranych stanów zagęszczenia wyznaczono przy pomocy modelu Kaźmierowskiego (w przygotowaniu do druku). W modelu tym na podstawie charakterystyk uziarnienia, gęstości gleby i zawartości węgla organicznego wyznaczane są parametry równania Van Genuchtena. Do obliczeń współczynnika filtracji wykorzystano równanie Spychalskiego i in. (oddana do druku), wykorzystujące krzywoliniową zależność współczynnika filtracji od porowatości drenażowej ($\phi_d = \phi_n - \text{PPW}$ przy 10 kPa).

WYNIKI BADAŃ

Badania terenowe wykazały, iż trasa rurociągu wyraźnie wyróżnia się w krajobrazie licznymi zastoiskami wody na powierzchni terenu. Zastoiska te rozmieszczone są nierównomiernie w pasie o szerokości około 10–15 m wzdłuż rurociągu, a najliczniej występują w pasie transportu. Pomimo dość starannego zasypania wykopu segregowanym urobkiem, na powierzchniach położonych w strefie wykopu obserwowano zaburzenia w układzie warstw i poziomów glebowych. Odbudowany poziom próchniczny zawierał liczne domieszki materiałów z poziomów podpowierzchniowych, które miejscami wychodziły na powierzchnię terenu, a niekiedy uwidaczniały się tylko w ścianie profilu glebowego. Domieszki te powodowały zmniejszenie rzeczywistej miąższości poziomu akumulacyjno-próchnicznego w obrębie trasy wykopu o około 10 cm. Zaobserwowano ponadto osiadanie powierzchni terenu położonego bezpośrednio nad rurociągiem, co jest związane z brakiem wstępnego zagęszczenia usypanego materiału.

Badane gleby płowe opadowo-glejowe (profil 1.1–3) wykazują uziarnienie glin piaszczystych, natomiast w czarnych ziemiach właściwych (profile 2.1 i 2) glina piaszczysta zalega płytko na tyle piaszczystym (tab. 1). Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują, iż w poziomach poduprawnych gleb płowych położonych w strefie robót, gęstość objętościowa gleby suchej waha się w granicach od 1,879 do 1,945 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. W czarnych ziemiach położonych w strefie robót, przy większej zawartości frakcji pylastej, wysoka gęstość objętościowa gleby suchej występuje zarówno w poziomie uprawnym, jak i poduprawnym (od 1,849 do 1,923 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$). W profilu odniesienia gleby płowej (tab. 1 – profil 1.3) gęstości objętościowe nie przekraczają wartości 1,8 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, natomiast w profilu odniesienia czarnej ziemi stwierdzono nadmierne zagęszczenie poziomów poduprawnych (tab. 1 – profil 2.2). Konsekwencją wysokich wartości gęstości objętościowej są niskie wartości porowatości ogólnej (ϕ_n) i bardzo niskie wielkości porowatości drenażowej – $\phi_d < 0,1 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 2).

Wysokie zagęszczenie badanych gleb wpływa na ograniczenie retencji wody dostępnej dla roślin (tab. 2). Wodę potencjalnie dostępną dla roślin (WPD) wyznacza się na ogół jako różnicę wilgotności gleby: $\text{WPD} = Q_{10 \text{ kPa}} - Q_{1500 \text{ kPa}}$. W niniejszej pracy obliczono natomiast wodę realnie dostępną dla roślin (LLWR – *least limiting water range* [da Silva i in. 1994]), uwzględniając dodatkowe ograniczenia dostępności wody wynikające z warunków natlenienia gleby (zawartość powietrza $>10\%$ obj. [Grable, Siemer 1968] oraz ograniczenia wzrostu korzeni roślin w wyniku wzrostu oporu mechanicznego gleby ($\text{PR} = 3 \text{ MPa}$) [Benghough, Mullins 1990]. W obliczeniach tych górną granicę wody dostępnej dla roślin stanowi mniejsza z pośród wilgotności $Q_{10 \text{ kPa}}$ i $Q_{10\% \text{ powietrza}}$, a granicę dolną wyznacza większa z pośród wilgotności $Q_{1500 \text{ kPa}}$ i $Q_{\text{PR} = 3 \text{ MPa}}$. Wyniki przedstawione w tabeli 2 wskazują, że w glebach położonych w strefie robót liniowych znacznie maleje retencja wody realnie dostępnej dla roślin LLWR, a jej udział w WPD waha się w granicach od 0 do 31%.

Wpływ gęstości objętościowej na ilość wody realnie dostępnej dla roślin przeanalizowano także w badaniach modelowych (rys. 1 i 2). Krzywe WRG przy różnych gęstościach objętościowych gleby wyznaczono z modelu Kaźmierowskiego (w

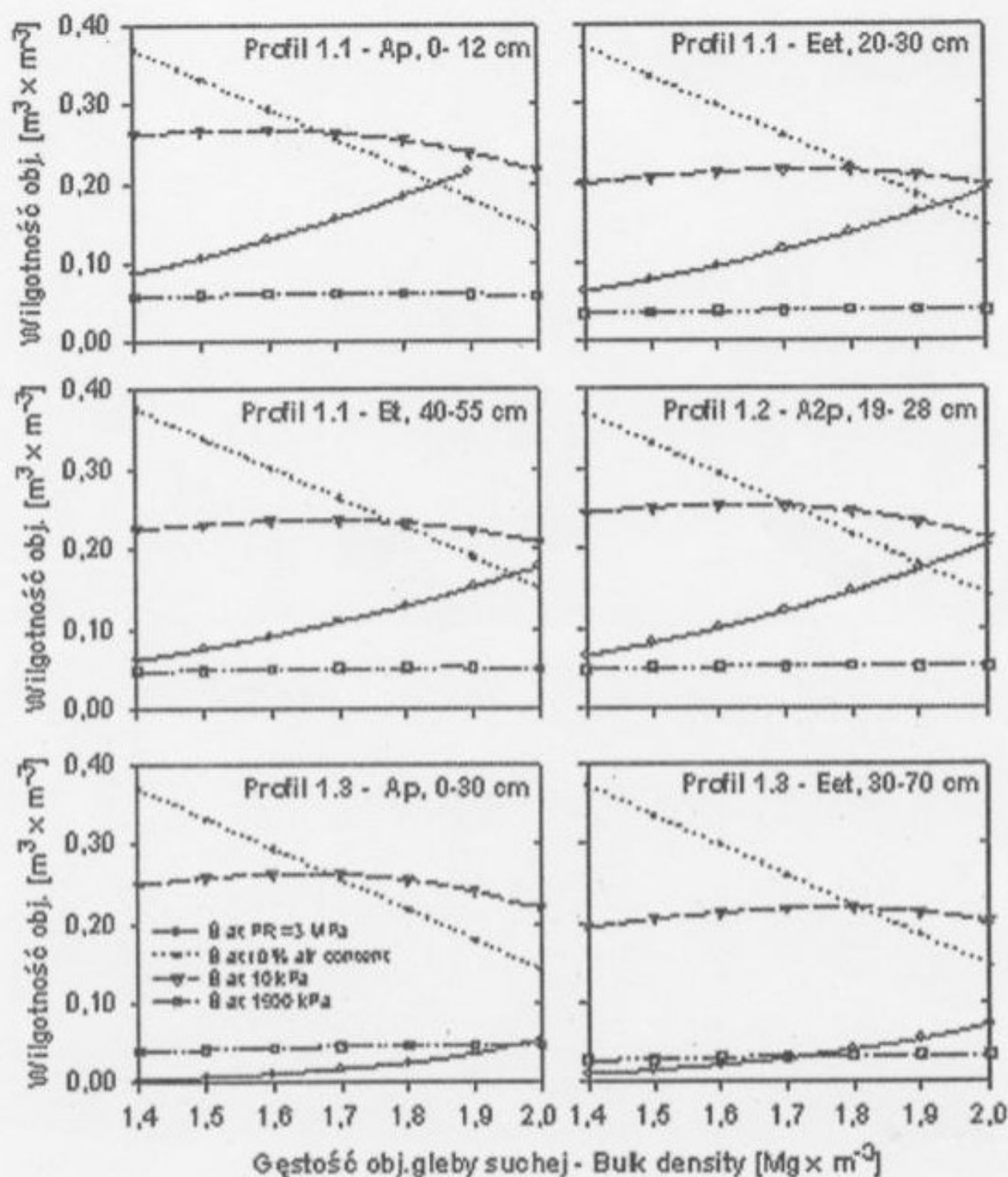
TABELA 1. Uzamięnie i właściwości fizyczne wybranych poziomów genetycznych badanych gleb
TABLE 1. Texture and physical properties of selected genetic horizons of the soils studied

Nr pro- filu Pro- file No	Głęb- kość Depth (cm)	Poziom Horizon	Części > 2 mm Gravel (%)	Zawartość frakcji Fraction content (%)			Grupa teksturalna Texture		Corg Corg (%)	Gęstość obj. gleby suchej- Bulk density ρ_e	Prze- dział ufności Confi- dence level $s_{\alpha}^t = 0,05$	Gęstość stałej fazy Particle density ρ_s	Porowatość Porosity ϕ_e
				piasku sand	pyłu silt	łłu clay	PNR- 04033 1998	USDA 1975					
Gleby płowe opadowo-glejowe – Aquic Hapudalfs													
1.1	0-12	Ap	1,02	69	20	11	gp	sl	0,85	1,760-	0,063	2,640	0,333
1.1	20-30	Eet	0,23	76	15	9	gp	sl	0,35	1,945	0,051	2,656	0,268
1.1	40-55	Bt	3,06	72	19	9	gp	sl	0,10	1,920	0,057	2,675	0,282
1.2	19-28	A2p	1,22	70	23	9	gp	sl	0,60	1,879	0,059	2,640	0,288
1.3	0-30	Ap	1,92	63	35	2	gp	sl	0,81	1,736	0,042	2,640	0,342
1.3	30-70	Eet	0,00	71	26	3	gp	sl	0,40	1,790	0,063	2,656	0,326
Czarne ziemie właściwe – Typic Mollisols													
2.1	0-27	Ap	1,31	53	39	8	gp	sl	1,48	1,923	0,035	2,600	0,260
1.1	27-48	A2	0,36	43	50	7	płp	sl	1,20	1,849	0,049	2,625	0,296
2.2	0-26	Ap	0,50	63	30	8	gp	sl	1,50	1,660	0,060	2,597	0,361
2.2	26-44	A2	0,60	44	50	6	płp	sl	1,23	1,795	0,040	2,625	0,316

TABELA 2. Właściwości hydrauliczne wybranych poziomów genetycznych badanych gleb
 TABLE 2. Hydraulic properties of selected genetic horizons of the soils studied

Nr pro- filu Pro- file No	Poziom Hori- zon	Głębokość pobra- nia próbek Sam- pling depth	Poro- watość drena- żowa Drainage porosity ϕ_d -PPW	PPW Θ_{10kPa} Field capa- city	WTW $\Theta_{1500kPa}$ Perma- nent wilking point	θ przy PR 3 MPa θ at PR 3 MPa	θ przy 10% powie- trza θ at 10% air content	WPD PAW	LLWR	LLWR w% WPD LLWR as % PAW	Współ filtracji Hydrau- lic conduct. Ks	Prze- dział ufności Ks Confid. level $s.t. = 0,05$	Klasa- Ks * Class of Ks
			$m^3 \cdot m^{-3}$			$\mu m \cdot s^{-1}$							
Gleby płowe opadowo-glejowe — Aquic Haplxidalfs													
1.1	Ap	5	0,075	0,258	0,061	0,172	0,233	0,20	0,06	31	2,30	0,46	MS
1.1	Eet	25	0,063	0,204	0,040	0,174	0,168	0,16	0	0	1,01	0,37	S
1.1	Bt	45	0,062	0,221	0,050	0,157	0,182	0,17	0,03	15	0,81	0,38	S
1.2	A2p	22	0,052	0,236	0,052	0,166	0,188	0,18	0,02	12	0,49	0,24	S
1.3	Ap	15	0,082	0,260	0,046	0,019	0,242	0,21	0,20	92	2,15	0,66	MS
1.3	Eet	40	0,107	0,219	0,033	0,039	0,226	0,19	0,19	100	6,10	2,29	M
Czarne ziemie właściwe — Typic Mollisols													
2.1	Ap	15	0,012	0,248	0,075	0,218	0,160	0,17	0	0	0,002	0,005	I
2.1	A2	40	0,012	0,283	0,079	0,150	0,196	0,20	0,05	22	0,013	0,025	VS
2.2	Ap	15	0,072	0,288	0,061	0,122	0,261	0,23	0,14	61	2,36	0,69	MS
2.2	A2	40	0,018	0,299	0,077	0,114	0,216	0,22	0,10	46	0,02	0,03	VS

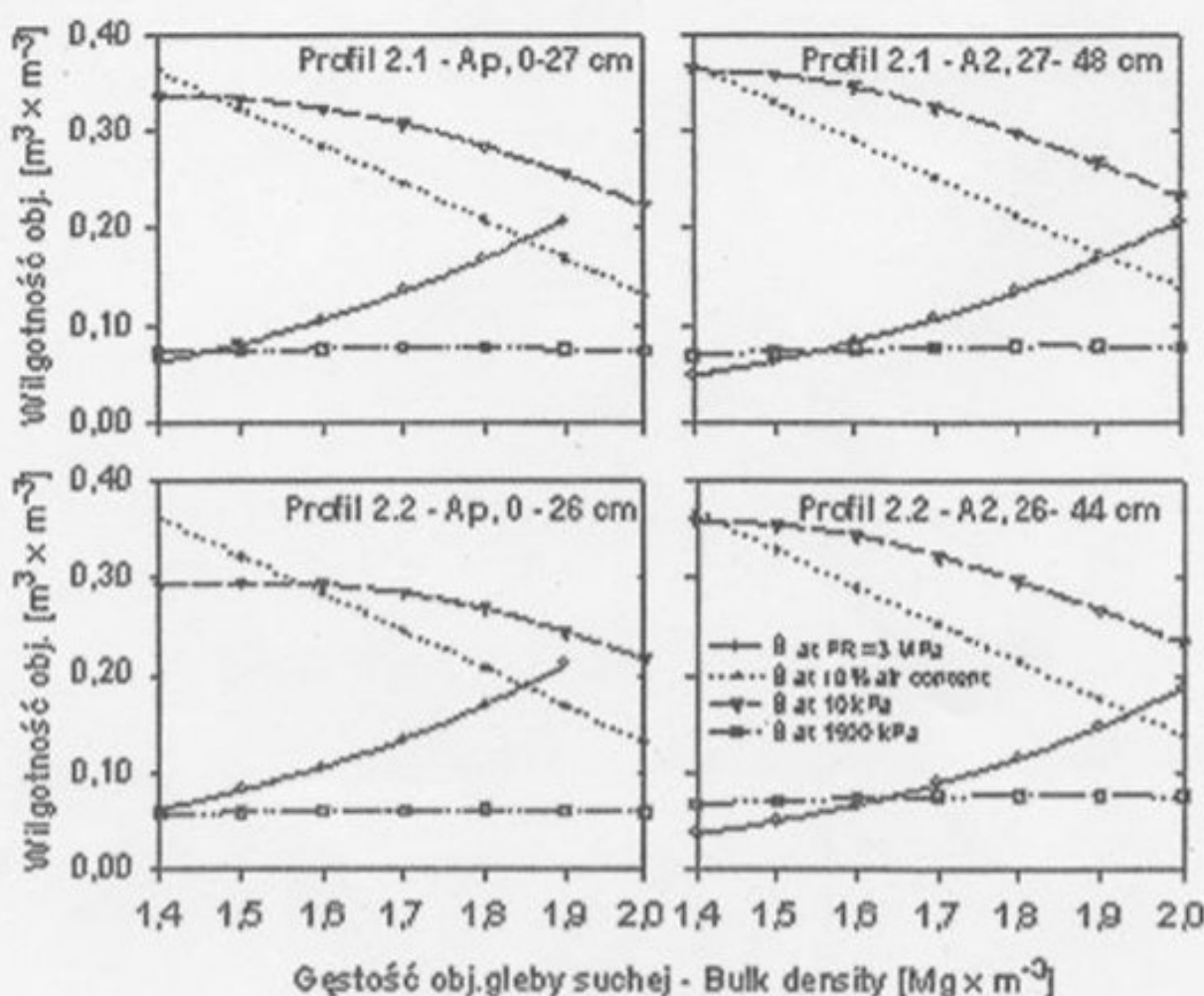
* według (according to) USDA-NRSC 2002: M – średnia, moderate; MS – średnio niska, moderately slow;
 S – niska, slow; VS – bardzo niska, very slow; I – utwor nieprzepuszczalny, impermeable.



RYSUNEK 1. Wpływ gęstości objętościowej gleby na ilość wody realnie dostępnej dla roślin (LLWR) w wybranych poziomach genetycznych gleb pólowych (Profile 1. 1-3)

FIGURE 1. Influence of bulk density on the least limiting water range (LLWR) in selected genetic horizons of Aquic Hapludalfs (Profile 1.1-3)

przygotowywaniu do druku), natomiast wilgotność gleby która przy danej gęstości odpowiada oporowi mechanicznemu $PR = 3 \text{ MPa}$, obliczono równaniami da Silvy i Kaya [1997]. Wyniki modelowania (rys. 1 i 2) wskazują, że ilość wody realnie dostępnej dla roślin LLWR maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby. W poziomach zawierających ponad 5 % frakcji ilastej (profile 1.1-2 oraz 2.1-2, tab. 1), przy

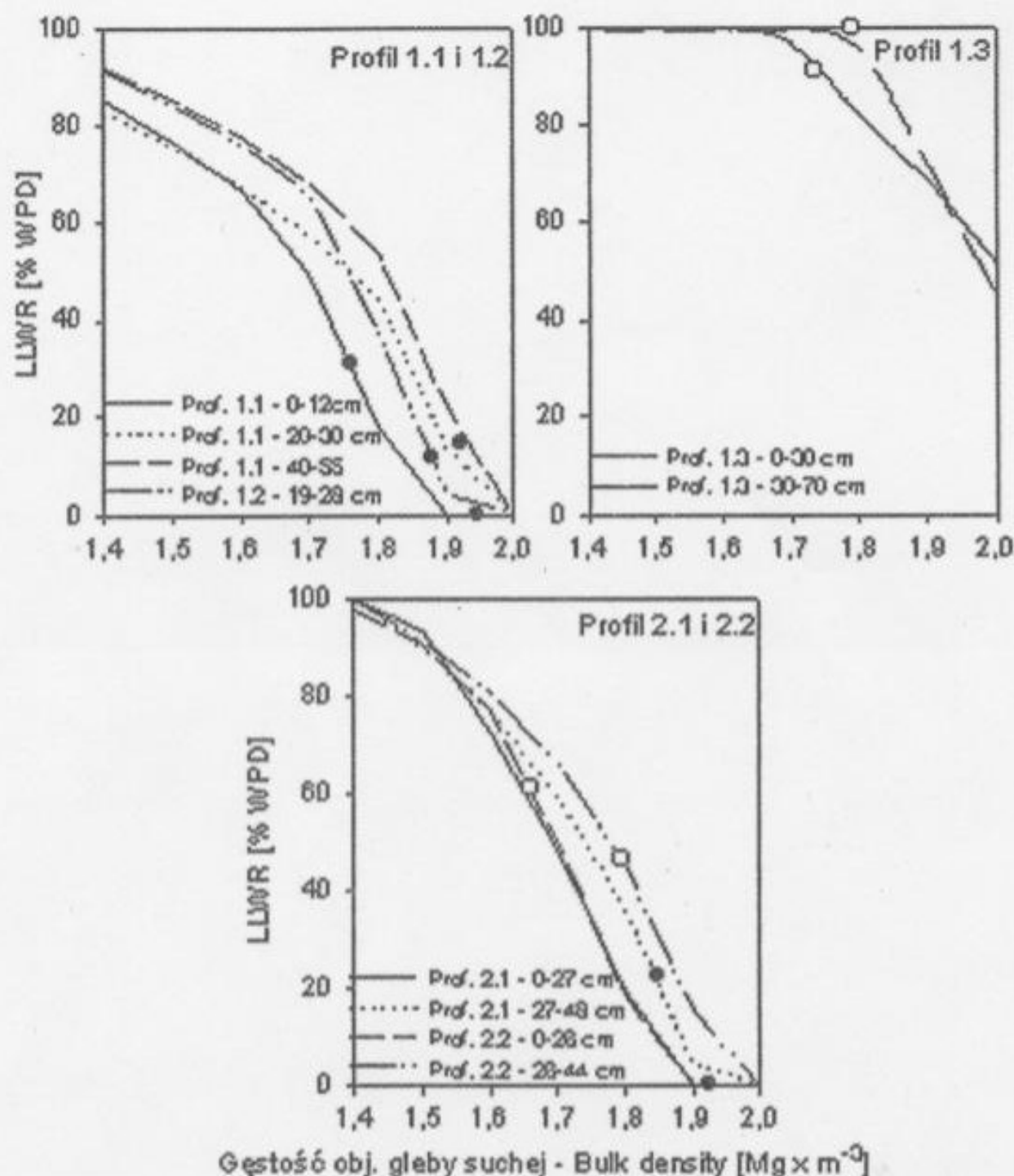


RYСУNEK 2. Wpływ gęstości objętościowej gleby na ilość wody realnie dostępnej dla roślin (LLWR) w poziomach mollicznych ziem właściwych (Profile 2.1 i 2.2)

FIGURE 2. Influence of bulk density on the least limiting water range (LLWR) in mollic horizons of Typic Mollisol (Profile 1.1-3)

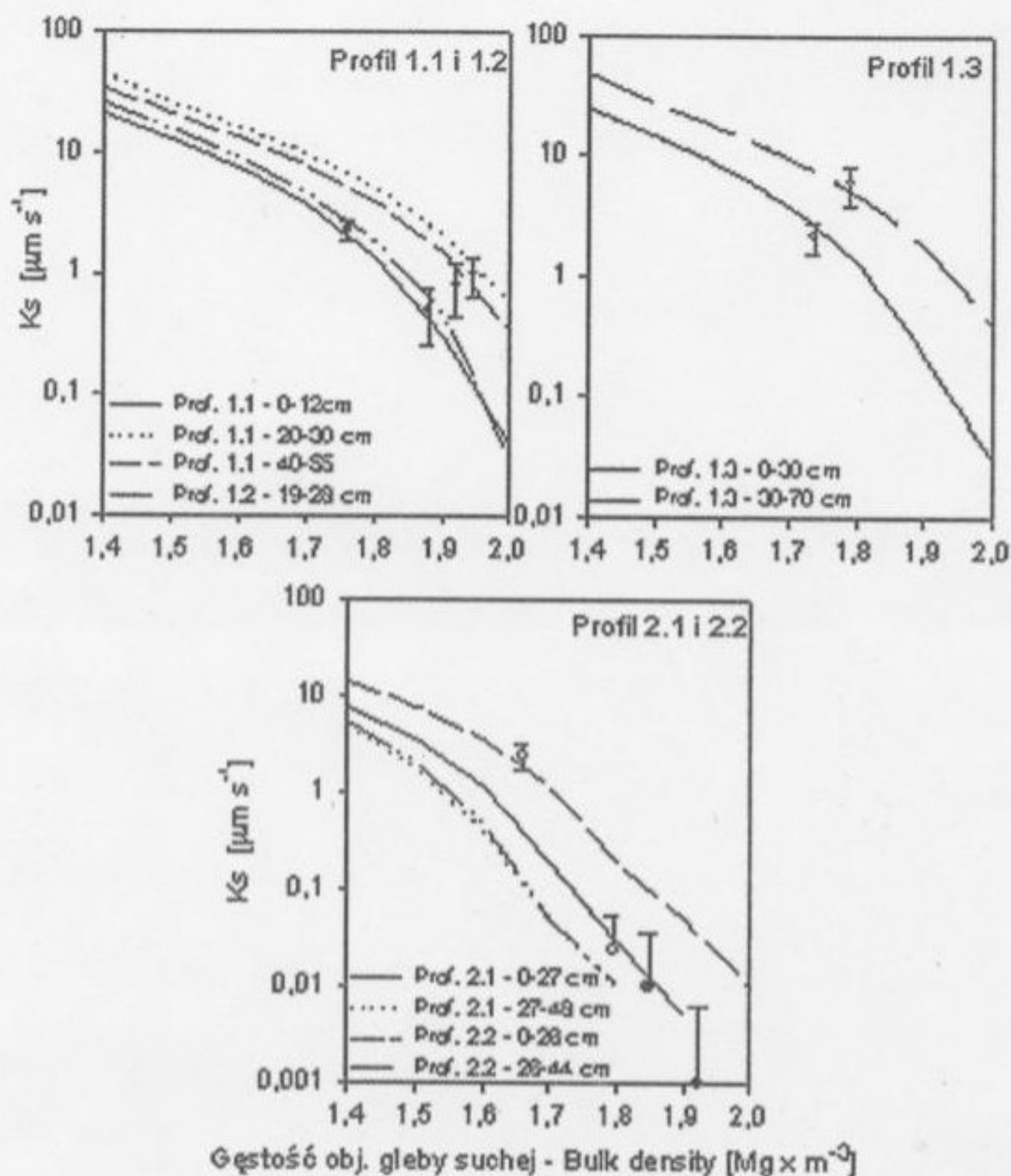
niewielkich wartościach gęstości gleby ($1.4-1.6 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) czynnikiem ograniczającym dostępność wody dla roślin jest hamowanie rozwoju korzeni roślin w wyniku wzrostu oporu mechanicznego gleby. W poziomach o mniejszej zawartości frakcji ilastej (2-3% – profil 1.3, tab. 1), wzrost gęstości nie powoduje tak wyraźnego wzrostu oporu mechanicznego gleby i ograniczenia dostępności wody. Wpływ zagęszczenia na redukcję ilości wody dostępnej dla roślin zależy od zawartości węgla organicznego. W poziomach o zawartości $C_{\text{org}} < 1\%$ ograniczenie dostępności wody związane z warunkami aeracji występuje przy gęstościach powyżej $1.7 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (rys. 1). W poziomach próchnicznych czarnych ziemiach, o zawartości $C_{\text{org}} > 1\%$, ograniczenie to występuje już przy gęstości gleby przekraczającej $1.4 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (rys. 2).

Wpływ wzrostu gęstości objętościowej gleby na redukcję ilości wody realnie dostępnej dla roślin LLWR, wyrażoną procentowym udziałem LLWR w WPD, przedstawiono na rysunku 2. Z uwzględnieniem różnic w uziarnieniu, profil odniesienia gleby płowej przedstawiono na odrębnym rysunku (profil 1.3). W profilu tym przy 2,3% zawartości ilu, dopiero wzrost zagęszczenia powyżej $1.7 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ powoduje redukcję LLWR, a przy największym rozpatrywanym zagęszczeniu LLWR stanowi ponad 40% WPD. W



RYSUNEK 3. Wpływ wzrostu gęstości objętościowej gleby na ilość wody realnie dostępnej dla roślin LLWR, wyrażoną w procentach WPD ($\Theta_{10\text{kPa}} - \Theta_{1500\text{kPa}}$)
 FIGURE 3. Influence of increasing bulk density on the least limiting water range (LLWR) expressed as percentage of plant available water PAW ($Q_{10\text{kPa}} - Q_{1500\text{kPa}}$)

pozostałych poziomach glebowych, przy zawartości łu $> 5\%$ i różnych zawartościach Corg, stwierdzono bardzo zbliżony wpływ wzrostu zagęszczenia na wykorzystanie WPD. Udział LLWR w WPD maleje począwszy od gęstości $1,4 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, a w zakresie maksymalnych wartości gęstości objętościowej osiąga wartości zerowe. Wyniki te wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości frakcji ilastej zwiększa się wpływ zagęszczenia na redukcję ilości wody realnie dostępnej dla roślin (LLWR).



RYSUNEK 4. Wpływ wzrostu gęstości objętościowej gleby na redukcję współczynnika filtracji wody w glebie

FIGURE 4. Reduction of saturated hydraulic conductivity caused by increasing bulk density of soil

We wszystkich analizowanych poziomach glebowych stwierdzono generalnie niskie wartości współczynnika filtracji (K_s), jednak wartości najniższe występują w strefie robót liniowych (tab. 2). Wpływ gęstości gleby na warunki ruchu wody zależy od uziarnienia gleby. Przy zbliżonych gęstościach objętościowych w profilach 1.1–2 i 2.1 (tab. 1), większa zawartość frakcji pyłu w profilu 2.1, powoduje występowanie skrajnie

niskich wartości K_s ($0,001-0,02 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$). W badaniach modelowych współczynnik filtracji przy poszczególnych stanach zagęszczenia wyznaczono z równania Spychalskiego i in. (praca oddana do druku) na podstawie porowatości drenażowej (ϕ_d) uzyskanej z modelu Kaźmierowskiego (w przygotowaniu do druku). Wyniki modelowania wskazują na około 100-krotną redukcję wielkości K_s w analizowanym zakresie gęstości objętościowej gleby.

DYSKUSJA

Badania Pabina i in. [1998] wskazują, że wpływ zagęszczenia gleby na warunki rozwoju korzeni roślin zależy od uziarnienia gleby i nasila się ze wzrostem zawartości frakcji pyłu i łu. Według kryteriów USDA [2002], wszystkie badane poziomy glebowe należą do jednej grupy granulometrycznej (sl), dla której krytyczna gęstość objętościowa gleby (gęstość objętościowa, przy której następuje ograniczenie rozwoju korzeni roślin) wynosi $1,8 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [Arshad i in. 1996]. Tak więc we wszystkich poziomach poduprawnych gleb położonych w strefie robót gęstość objętościowa ogranicza rozwój korzeni roślin. Rozwój korzeni roślin uprawnych jest ograniczony także z powodu niedostatecznego natlenienia badanych gleb. Dostateczne napowietrzenie gleby występuje przy zawartości makro- i mezoporów (ϕ_d) większej niż $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ [da Silva i in. 1994], a krytyczna dla wymiany gazowej i rozwoju roślin zawartość powietrza w glebie wynosi $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ [Grable, Siemer 1968]. W świetle przytoczonych kryteriów, we wszystkich przedstawionych poziomach glebowych występują ograniczenia rozwoju korzeni roślin związane z niedostateczną wymianą gazową. Ograniczenia te są wynikiem redukcji ilości makro- i mezoporów w warunkach dużego zagęszczenia gleby i związanej z tym redukcji współczynnika filtracji. Prezentowane wyniki badań modelowych wykazały drastyczną redukcję K_s wraz ze wzrostem zagęszczenia, zgodną z wynikami wcześniejszych badań [m.in. Dawidowski i Koolen 1987, Arvidsson 1997]. Przyjmując $K_s = 1 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ jako dolną granicę dostatecznych warunków przepływu wody, zapewniającą minimalną wymaganą wymianę gazową [McQueen i Shepard 2002] można zauważyć, że w większości gleb położonych w strefie robót warunek ten nie jest spełniony. Występowanie powyższych ograniczeń powoduje, iż w warunkach nadmiernego zagęszczenia gleby nie można stosować klasycznej oceny ilości wody dostępnej dla roślin WPD ($\Theta_{10 \text{ kPa}}$ – Heise i in. [1955]; $\Theta_{1500 \text{ kPa}}$ – Richards i Weaver [1944]). Wzrost zagęszczenia wpływa bowiem na redukcję wody realnie dostępnej dla roślin (LLWR) – w glebach położonych w strefie robót na głębokości od 0 do 50 cm LLWR nie przekracza 31% klasycznie wyznaczonej WPD.

Wyniki przedstawionych badań opisują stan fizyczny gleb zdegradowanych pod wpływem ciężkiego sprzętu używanego do robót ziemnych. Jednak wielkości naprężeń powodowane przez ten sprzęt, występują także w zabiegach uprawowych z wykorzystaniem ciężkich ciągników [Kirby i Blunden 1992] oraz osprzętu z niskociśnieniowym ogumieniem [Vermeulen i Perdok 1994]. W przypadku badanych gleb uwaga ta odnosi się bezpośrednio do intensywnie uprawianej czarnej ziemi właściwej w profilu odniesienia (profil 2.2). Gleba ta jest położona poza strefą robót, jednak wykazuje cechy degradacji fizycznej.

Z wcześniejszych badań i obserwacji [Spychalski, materiały niepublikowane] wynika, iż zarówno następstwa wymieszania poziomów próchnicznych z materiałami podglebia, jak i następstwa procesów osiadania gleby nad rurociągiem są skutecznie i względnie szybko likwidowane przez zabiegi uprawowe. Poważniejszym problemem jest natomiast bardzo wyraźna degradacja fizyczna gleby powodująca niekorzystne zmiany właściwości hydraulicznych gleb. Przyjmuje się, że w warunkach prawidłowej uprawy, przy oddziaływaniu procesów mrozowych i spulchnieniu gleby przez system korzeniowy roślin, wpływ zagęszczonych poziomów poduprawnych na redukcję plonów trwa ponad 5 lat [Håkansson 1994]. Jednak wyniki ostatnich badań Schwartz i in. [2003] wskazują, iż czas pełnej regeneracji gleby może wynosić nawet ponad 10 lat. Przedstawiony w pracy stan silnej degradacji fizycznej gleb wskazuje że bez zabiegów rekultywacyjnych pełna produktywność może zostać osiągnięta w czasie nie krótszym niż 10 lat.

WNIOSKI

1. Degradacja fizyczna gleb położonych w strefie robót liniowych powoduje przekroczenie krytycznych dla rozwoju korzeni roślin – parametrów zagęszczenia, porowatości i filtracji wody w glebie oraz znaczącą redukcję ilości wody dostępnej dla roślin.
2. W glebach zwięzłych, w miejsce tradycyjnie wyznaczanej ilości wody potencjalnie dostępnej dla roślin PAW, należy wyznaczać wodę realnie dostępną dla roślin (LLWR), uwzględniając pogorszenie warunków aeracji oraz wzrost oporu mechanicznego gleby.

LITERATURA

- ARSHAD M.A., LOWERY B., GROSSMAN B. 1996: Physical tests for monitoring soil quality. W: Methods for assessing soil quality. Doran J.W., Jones A.J. (eds) Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI: 123–142.
- ARVIDSSON J. 1997: Soil compaction in agriculture – from soil stress to plant stress. Phd. thesis, Agraria 4, Swedish Univ. of Agric Science, Upsala: 146 ss.
- BENGHOUGH A.G., MULLINS C.E. 1990: Mechanical impedance root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41: 341–358.
- da SILVA A.P., KAY B.D., PERFECT E. 1994: Characterisation of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775–1781.
- da SILVA A.P., KAY B.D. 1997: Estimating the last limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877–883.
- DAWIDOWSKI J.B., KOOLEN A.J. 1987: Changes in soil water suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples. *Soil Tillage Res.* 9: 169–180.
- GRABLE A.R., SIEMER E.G. 1968: Effect of bulk density, aggregate size and soil water suction in the rooting zone limit crop growth. *Aspects Appl. Biol.* 22: 173–181.
- HÅKANSSON I. (ed.) 1994: Subsoil compaction by high axle load traffic (special issue). *Soil Till. Res.* 29: 105–306.
- HEISE H.R., HAAS H.J., JENSEN L.R., 1955: Soil moisture studies of some Great Plains soils: II. Field capacity as related to 1/3 atmosphere percentage and "minimum point" as related to 15- and 26-atmosphere percentages. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 20–25.
- KĘDZIORA A., 1971: Zależności sił ssących gleby od jej wilgotności i temperatury; tezy pracy doktorskiej zrealizowanej w Inst. Mel. Rol. i Leś. WSR w Poznaniu; niepublikowane.

- KIRBY J.M., BLUNDEN B.G., 1992: Avoiding compaction: soil strength more important than vehicle ground pressure. *The Aust. Cotton Grower* **13**: 48–50.
- KLUTE A., 1986: Water retention: Laboratory methods. W: „Method of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods” Klute A. (ed.). Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition). Am. Soc. Agr., Wisconsin, USA: 635–662.
- KLUTE A., DIRKSEN C. 1986: Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. W: Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Klute A. (ed.). 2nd edn. Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison, Wi.
- Komisja V PTG 1989: Systematyka gleb Polski. *Rocz. Glebozn.* **40**, 3/4: 1–150.
- McQUEEN D.J., SHEPARD T.G. 2002: Physical changes and compaction sensitivity of fine-textured, poorly drained soils (Typic Endoaquept) under varying duration of cropping Manawatu Region, New Zealand. *Soil Tillage Res.* **63**: 93–107.
- NELSON D.W., SOMMERS L.E. 1982: Total carbon, and organic matter. Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph no. 9 (2nd edition), S. Segor (Ed.), ASA-SSSA, Madison, USA.
- PABIN J., LIPIEC J., WŁODEK S., BISKUPSKI A., KAUS A. 1998: Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Tillage Res.* **46**: 203–208.
- PKN, 1998: Polska Norma PN-R-04032: Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, ss.12.
- PKN, 1998: Polska Norma PN-R-04033: Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, ss.12.
- RICHARDS L.A., WEAVER L.R. 1944: Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Sci.* **56**: 331–339.
- SCHWARTZ R.C., EVETT S.R., UNGER P.W. 2003: Soil hydraulic properties of cropland compared with reestablished and native grassland. *Geoderma* **116**: 47–60.
- SOIL CONSERVATION SERVICE 1992: Soil Survey laboratory methods manual. Soil Survey. Invest. Raport No. 42., U. S. Dept. Agric., Washington, DC.
- Soil Survey Staff, 1993: Soil Survey Manual, U.S. Dept. Of Agric. Handb. 18, U.S. Govt. Print. Off. Washington, DC., ss. 437.
- SPYCHALSKI M., KAŻMIEROWSKI C., KACZMAREK Z.,(): Estimation of saturated hydraulic conductivity on the basis of drainage porosity. *Geoderma* w druku
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Natural Resources Conservation Service, 2002: National Soil Survey Handbook, title 430-VI. <http://soils.usda.gov/procedures/handbook/main.htm>.
- VERMEULEN G.D., PERDOK U.D. 1994: Benefits of low ground pressure tyre equipment. W: Soil compaction in crop production. Soane B.D., van Ouwerkerk C. (eds): Elsevier, Amsterdam: 447–478.

dr hab. Marek Spsychalski

Katedra Gleboznawstwa Melioracyjnego AR
ul. Piątkowska 94, 61-691 Poznań