

JACEK NIEDŹWIECKI, EWA A. CZYŻ, ANTHONY R. DEXTER

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów,
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

PRZEWODNOŚĆ HYDRAULICZNA WARSTWY ORNEJ W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRÓW FAZY STAŁEJ GLEBY

Plough layer hydraulic conductivity in dependence on solid phase parameters

ABSTRAKT: Badania przeprowadzono w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB w Puławach na próbkach glebowych o nienaruszonej strukturze pochodzących z warstwy ornej (0–30 cm) dla 16 gleb mineralnych. Przewodność hydrauliczną nasyconą K_s oznaczono metodą zmiennego gradientu. Przewodność hydrauliczna w funkcji ciśnienia ssącego $K_{(h)}$ badanych gleb została wyliczona z równania van Genuchtena. Stwierdzono, że w badanych glebach na przewodność hydrauliczną nasyconą K_s dodatnio wpływa frakcja iłu koloidalnego, a ujemnie gęstość objętościowa gleb. Na szacowaną wielkość przewodności hydraulicznej nienasyconej K_p w badanych glebach, przy zawartości wody odpowiadającej ciśnieniu ssącemu 100 hPa, dodatni wpływ miała zawartość iłu koloidalnego oraz ujemny gęstość objętościowa gleb. W przypadku pozostałych wartości ciśnień ssących gleby, tj. 200, 400, 1000 hPa, na wielkość przewodności hydraulicznej nienasyconej $K_{(h)}$ dodatni wpływ miała zawartość frakcji iłu koloidalnego oraz substancji organicznej. Uzyskane wyniki wskazują, że w przypadku badanych gleb istnieją statystyczne zależności pomiędzy wybranymi właściwościami fazy stałej gleby a przewodnością hydrauliczną, co może być podstawą do przyszłych prac nad opracowaniem cyfrowych map przewodności hydraulicznej gleb mineralnych Polski. Tego typu opracowania ułatwiłyby ochronę agroekosystemów oraz zarządzanie rolniczą przestrzenią produkcyjną.

słowa kluczowe – key words:

przewodność hydrauliczna – *hydraulic conductivity*, ił koloidalny – *clay*, substancja organiczna – *organic matter*, gęstość gleb – *bulk density*

WSTĘP

Przewodność hydrauliczna gleby w znacznym stopniu decyduje o infiltracji wody w głąb profilu glebowego. Jest to szczególnie ważne podczas obfitych opadów deszczu, przy których może wystąpić intensywny spływ powierzchniowy, a co za tym idzie: erozja wodna gleb, transport koloidów i składników pokarmowych do wód powierzchniowych, prowadzący do ich eutrofizacji. Znajomość wartości przewodności hydraulicznej gleb pozwala m.in. na przewidywanie wielkości spływu powierzchniowego (6, 7) oraz powstałych w jego wyniku strat gleby (14) – zjawisk

szczególnie niebezpiecznych w terenach urzeźbionych. Przewodność hydrauliczna gleb jest również jednym z parametrów modelu SWAT pozwalającego m.in. na prognozowanie wielkości plonów roślin, szczególnie w powiązaniu z danymi meteorologicznymi (30).

Ponieważ oznaczenia przewodności hydraulicznej gleb są kosztowne i czasochłonne, istnieje potrzeba szukania funkcyjnych zależności, tzw. funkcji pedotransferu (PTF), pomiędzy podstawowymi cechami glebowymi standardowo oznaczanymi w laboratoriach: składem granulometrycznym, zawartością substancji organicznej, gęstością gleb a badanymi właściwościami takimi jak przewodność hydrauliczna gleb czy charakterystyki retencji wodnej (15, 19, 22, 27, 32, 36, 37). Funkcje pedotransferu mogą być szczególnie pomocne m.in. w cyfrowym modelowaniu zjawisk determinowanych przez przewodność hydrauliczną, mogą być też łatwo eksportowane do technologii GIS (5) w celu tworzenia cyfrowych map np. właściwości hydraulicznych gleb, ułatwiając tym samym zarządzanie rolniczą przestrzenią produkcyjną. Niniejsza praca stanowi badania wstępne nad możliwością stworzenia cyfrowej mapy właściwości hydraulicznych gleb mineralnych Polski.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu składu granulometrycznego (a w szczególności frakcji koloidalnej), substancji organicznej i gęstości gleb na przewodność hydrauliczną w warstwie ornej wybranych gleb mineralnych Polski.

MATERIAŁ I METODY

Badania wpływu parametrów fazy stałej gleb na przewodność hydrauliczną przeprowadzono w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB w Puławach na próbkach glebowych o nienaruszonej strukturze pobranych do stalowych cylindrów o objętości 100 cm³ z warstwy ornej (0–30 cm) 16 gleb mineralnych. Współrzędne geograficzne miejsc pobrania próbek glebowych wyznaczono za pomocą GPS (tab. 1).

Właściwości fizyczne i fizykochemiczne próbek glebowych oznaczono zgodnie z podaną poniżej metodyką:

- skład granulometryczny metodą areometryczną Cassagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego (20),
- zawartość substancji organicznej zmodyfikowaną metodą Tiurina (25),
- gęstość gleb metodą wagowo-suszarkową, w 3 powtórzeniach, pozostawiając próbki glebowe w suszarce w temperaturze 105°C przez 48 h, do uzyskania stałej wagi,
- przewodność hydrauliczną nasyconą K_s oznaczono metodą zmiennego gradientu (ang. falling head method); (12, 18), w dziesięciu powtórzeniach dla każdej gleby.

Tabela 1

Lokalizacja miejsc pobrania próbek glebowych
Place of soil sampling

Miejsce pobrania próbek glebowych Place of soil sampling	Nr. gleby Soil No.	Pozycja geograficzna gleby Position of soil	
		N	E
Dąbrowa Krynicka	F1	50° 35' 28,2"	23° 23' 42,2"
Dąbrowa Krynicka	F2	50° 35' 25,9"	23° 23' 51,9"
Dąbrowa Krynicka	F3	50° 35' 26"	23° 24' 5,6"
Grabów	F4	51° 20' 59,1"	21° 39' 49,7"
Grabów	F5	51° 20' 57,1"	21° 39' 52,6"
Huta	F6	51° 16' 28,1"	22° 05' 52,2"
Kępa	F7	51° 24' 36,4"	21° 57' 23,1"
Poletka dośw. IUNG *	M1-M9	51° 24' 51,1"	21° 57' 33,4"

* Parcele o powierzchni 12 m² i głębokości 1 m napełniono w latach 1880/1881 materiałem glebowym z rejonu Puław z zachowaniem naturalnej budowy profilu glebowego (31).

The experiment was conducted on 12 m² plots using soil material collected in the Pulawy area. The plots were filled in 1880/1881 to 1m depth reconstructing the soil profiles with the original horizons and depth (31).

- przewodność hydrauliczna w funkcji ciśnienia ssącego gleby jest bardzo trudno mierzalną właściwością hydrofizyczną, szczególnie w próbkach glebowych o nienaruszonej strukturze (19). Dlatego powszechnie wyznacza się tę właściwość pośrednio na podstawie standardowo mierzonych charakterystyk retencji wodnej gleb (9, 32). Przewodność hydrauliczna w funkcji ciśnienia ssącego $K_{(h)}$ badanych gleb została wyliczona z równania (1) van Genuchtena (34), wg procedury Mualema (23).

$$K_h = K_s \frac{[1 + (\alpha h)^n - (\alpha h)^{n-1}]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m(L+2)}} \quad [1]$$

$L = 0,5$ – parametr empiryczny określający ciągłość oraz krętość porów glebowych (23),

K_s – przewodność hydrauliczna nasyciona [$m \cdot s^{-1}$], określona laboratoryjnie,

h – ciśnienie ssące gleby [hPa],

α – parametr empiryczny kontrolujący pozycję krzywej przewodności [hPa^{-1}],

n – parametr empiryczny bezwymiarowy kontrolujący kształt krzywej przewodności,

$m = 1-1/n$, (23).

Z uwagi na brak danych pomiarowych przewodności hydraulicznej nienasyconej zdecydowano się zastosować wartość 0,5 dla parametru empirycznego L określającego ciągłość oraz krętość porów glebowych. Jest to wartość uzyskana na podstawie pomiarów przewodności hydraulicznej kilkudziesięciu różnych gleb i zalecana przez Mualema (23). Do analizy regresji szacowanych wartości K_h wybrano wartości prze-

wodności dla następujących ciśnień ssących: 100, 200, 400 i 1000 hPa (pF 2, pF 2,3, pF 2,6, pF 3) ważnych z punktu widzenia dostępności wody dla roślin.

Do wyliczenia wartości parametrów α , n , równania [1] zastosowano program komputerowy RETC (35). Jako dane wejściowe do programu posłużyły oznaczone laboratoryjnie wartości zawartości wody w glebie, wyrażone w procentach wagowych. Oznaczeń dokonano na bloku piaskowym (Eijkelkamp Holandia) oraz na płytach ceramicznych w komorach ciśnieniowych (Soil Moisture Inc. USA) w 3 powtórzeniach dla 11 wartości ciśnień ssących gleby, tj.: 10, 20, 40, 80, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 15000 hPa.

Uzyskane wyniki dotyczące K_s oraz K_h poddano analizie regresji (program statystyczny MINITAB®). Najlepszym dopasowaniem charakteryzowały się równania regresji liniowej, dlatego przedstawiono je w pracy.

WYNIKI

Podstawowe właściwości gleb

Próbki glebowe do badań właściwości hydraulicznych reprezentowały wszystkie grupy granulometryczne gleb mineralnych występujące na terenie Polski: piaski (8 próbek glebowych), gliny (2), pyły (5) oraz łą (1); (tab. 2). Średnia zawartość łą koloidalnego w badanych glebach wynosiła $7,3 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$, wartość ta jest zbliżona do uzyskanej na podstawie badań monitoringowych 210 próbek glebowych z różnych rejonów Polski – $7,4 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ (3, 33). Zawartość substancji organicznej w 16 badanych próbkach glebowych wynosiła średnio $1,77 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$. Wartość ta jest zbliżona do wartości uzyskanych przez Terelaka i in. (33) oraz Czyż i in. (3) dla 210 próbek glebowych z terenu Polski – $1,95 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$. Gęstość badanych gleb mieściła się w granicach $1,08\text{--}1,76 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (średnio $1,42 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Badania wielu autorów (6, 7, 15, 16, 22) wskazują, że przewodność hydrauliczna jest właściwością o rozkładzie log-normalnym. W badanych glebach stwierdzono, że wartości K_s i K_h posiadają rozkład log-normalny, dlatego przewodność hydrauliczną wyrażono jako logarytmy K_s i K_h (tab. 3).

Badania wykazały, że najlepszą zdolność transportowania wody w warunkach pełnego nasycenia posiadała gleba M4 o składzie gliny lekkiej pylastej (glp), natomiast najgorszą gleba F1 o składzie pyłu ilastego (pli); (rys. 1). Wyniki oznaczonych wartości K_s ($\log K_s$) przedstawiono w tabeli 3.

W badanych glebach stwierdzono dodatni wpływ zawartości frakcji łą koloidalnego na przewodność hydrauliczną nasyconą K_s oraz ujemny – gęstości gleb. Zależność tę przedstawia równanie:

$$\log K_s = -0,34 + 0,0566 \text{ łą} - 3,08 \rho, \quad r^2 = 0,57 \quad [2]$$

łą – zawartość frakcji łą koloidalnego [$\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]

ρ – gęstość gleby [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Tabela 2

Podstawowe właściwości badanych gleb (warstwa 0–25 cm)
The basic properties of investigated soils (layer 0–25 cm)

Nr gleby Soil No.	Il koloidalny Clay Ø<0,002mm	Substancja organiczna Organic matter	Gęstość gleby Soil bulk density (Mg·m ⁻³)	Skład granulometryczny wg PTG Particle size distribution PTG system
	g·(100 g) ⁻¹			
F1	7	1,33	1,48	pli
F2	15	1,13	1,53	pli
F3	8	2,46	1,29	pli
F4	3	1,08	1,76	pgm
F5	2	1,32	1,69	pgl
F6	3	1,53	1,58	pgmp
F7	24	1,87	1,59	ip
M1	3	1,39	1,42	pgl
M2	4	0,89	1,31	ps
M3	6	2,68	1,08	pgm
M4	18	1,96	1,31	glp
M5	7	1,51	1,30	plg
M6	4	4,08	1,18	gpp
M7	3	1,28	1,45	ps
M8	7	1,90	1,37	plp
M9	3	1,96	1,34	pglp
Zakres; Range	2–24	0,89–4,08	1,08–1,76	
Średnia; Mean	7,3	1,77	1,42	

Na szacowaną wielkość przewodności hydraulicznej nienasyconej K_h w badanych glebach przy zawartości wody odpowiadającej ciśnieniu ssącemu 100 hPa dodatni wpływ miała zawartość łu koloidalnego oraz ujemny – gęstość gleb, zgodnie z równaniem:

$$\log K_h (100 \text{ hPa}) = - 0,92 + 0,132 \text{ il} - 4,01\rho, \quad r^2 = 0,66 \quad [3]$$

il – zawartość frakcji łu koloidalnego [g·(100 g)⁻¹]

ρ – gęstość gleby [Mg·m⁻³].

W przypadku pozostałych wartości ciśnień ssących gleby, tj. 200, 400, 1000 hPa na wielkość przewodności hydraulicznej nienasyconej K_h , dodatkowo wpływała zawartość frakcji łu koloidalnego oraz substancji organicznej, co przedstawiają równania:

$$\log K_h (200 \text{ hPa}) = - 9,05 + 0,155 \text{ il} + 0,96 \text{ OM}, \quad r^2 = 0,67 \quad [4]$$

$$\log K_h (400 \text{ hPa}) = - 10,1 + 0,186 \text{ il} + 1,01 \text{ OM}, \quad r^2 = 0,70 \quad [5]$$

$$\log K_h (1000 \text{ hPa}) = - 11,5 + 0,217 \text{ il} + 1,00 \text{ OM}, \quad r^2 = 0,75 \quad [6]$$

il – zawartość frakcji łu koloidalnego [g (100 g)⁻¹]

OM – zawartość substancji organicznej [g (100 g)⁻¹].

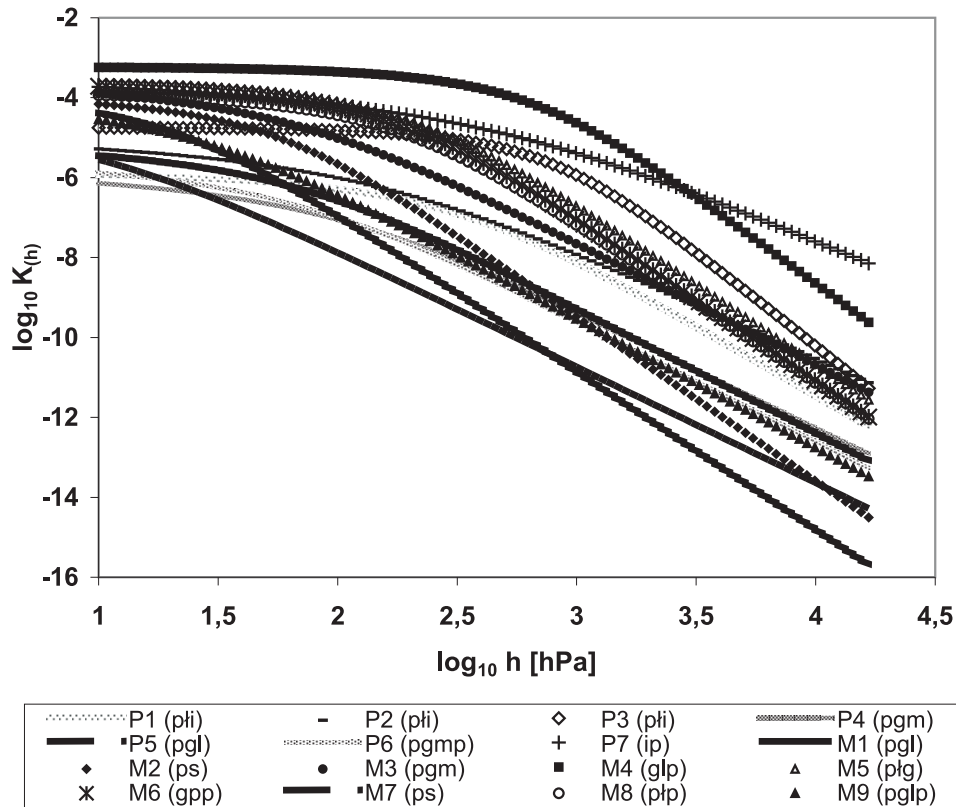
Tabela 3

Wartości logarytmów przewodności hydraulicznej K_h oraz K_s badanych gleb oraz parametry równania (1), α , n , wykorzystanych do wyliczenia K_h
 Values of logarithms of hydraulic conductivity K_h and K_s of investigated soils and parameters of equation (1), α , n , for calculations K_h

Nr gleby Soil No.	α [hPa ⁻¹]	n	log K_s *	log K_h **			
				[100 hPa]	[200 hPa]	[400 hPa]	[1000 hPa]
F1	0,002	1,60	-5,828	-6,283	-6,587	-7,091	-8,107
F2	0,004	1,27	-4,808	-6,006	-6,442	-7,012	-7,927
F3	0,001	2,11	-4,744	-4,824	-4,924	-5,164	-5,974
F4	0,007	1,36	-5,728	-7,051	-7,618	-8,327	-9,394
F5	0,011	1,45	-5,060	-6,576	-7,273	-8,099	-9,288
F6	0,010	1,41	-5,446	-6,993	-7,664	-8,459	-9,605
F7	0,001	1,20	-3,251	-4,183	-4,432	-4,772	-5,394
M1	0,071	1,36	-4,218	-7,879	-8,727	-9,589	-10,739
M2	0,015	1,84	-3,965	-5,663	-6,704	-7,876	-9,490
M3	0,010	1,42	-3,473	-5,014	-5,694	-6,499	-7,659
M4	0,001	1,96	-3,227	-3,353	-3,487	-3,777	-4,635
M5	0,004	1,80	-3,678	-4,165	-4,609	-5,357	-6,725
M6	0,005	1,83	-3,648	-4,218	-4,748	-5,598	-7,052
M7	0,039	1,78	-3,854	-6,967	-8,114	-9,291	-10,860
M8	0,004	1,80	-3,865	-4,442	-4,956	-5,778	-7,193
M9	0,028	1,49	-3,904	-6,449	-7,339	-8,279	-9,548
Zakres Range	0,001-0,071	1,20-2,11	(-5,828)-(-3,227)	(-7,879)-(-3,353)	(-8,727)-(-3,487)	(-9,589)-(-3,777)	(-10,860)-(-4,635)

* K_s – przewodność hydrauliczna nasycona [m·s⁻¹], określona laboratoryjnie; saturated hydraulic conductivity [m·s⁻¹], determined from the lab method

** K_h – przewodność hydrauliczna nienasycona w funkcji ciśnienia ssącego [m·s⁻¹], obliczona z równania 1; unsaturated hydraulic conductivity as function of soil suction [m·s⁻¹], calculated from equation 1



Rys. 1. Krzywe przewodności badanych gleb w funkcji ciśnienia ssącego
Curves of hydraulic conductivity of investigated soils as function of soil suction

DYSKUSJA

Czynnikiem decydującym o ruchu wody w glebie, poza jej budową, jest gradient potencjału wody, a różnica pomiędzy ruchem wody w strefie nasyconej i nienasyconej polega na tym, że wpływ składowej grawitacyjnej potencjału wody glebowej na przepływ wody w strefie nienasyconej jest znikomy (36).

Dodatni wpływ frakcji łu koloidalnego na przewodność hydrauliczną wiąże się zapewne z lepszą agregacją warstwy ornej, która korzystnie wpływała na ilość makroporów w glebie. Z danych literaturowych wynika, że z przewodnością hydrauliczną nasyconą mamy do czynienia głównie w porach największych, w których woda podlega w dużej mierze siłom grawitacji (1, 10, 11, 15-17, 36). W gleboznawstwie za pory duże przyjęto uważać pory o średnicy większej niż 30 μm , czyli pory, w których woda jest wiązana potencjałami niższymi niż odpowiadający połowej pojemności wodnej.

Dane literaturowe (26) potwierdzają wyniki badań własnych, które wskazują, że zawartość łu w glebie może dodatnio wpływać na przewodność hydrauliczną nasyconą. Wielu autorów wskazuje na istotny wpływ gęstości objętościowej na przewodność hydrauliczną nasyconą. Xu i Mermoud (38) stwierdzili, że 10% wzrost gęstości gleby powodował aż 50% spadek przewodności hydraulicznej nasyconej w glebie. Dexter i in. (8) wykazali, że przewodność hydrauliczna nasycona była średnio 4,7 razy wyższa w zmianowaniu wzbogacającym glebę w substancję organiczną w porównaniu ze zmianowaniem zubażającym. Przedstawili oni funkcyjną zależność, wskazującą na spadek gęstości gleb wraz ze wzrostem zawartości substancji organicznej. Funkcyjne zależności między przewodnością hydrauliczną nasyconą a parametrami fazy stałej przedstawili również w swoich pracach m.in. Niedźwiecki i in. (24), Witkowska-Walczak (36), Wösten i in. (37).

Przewodność hydrauliczna nienasycona badanych gleb zmniejszała się ze wzrostem ciśnienia ssącego gleby, czyli ze spadkiem zawartości wody w glebie. Potwierdzają to wyniki badań Dechnika i Lipca (4) oraz Lipca (19).

Z przebiegu krzywych przewodności wynika, że najbardziej gwałtowny spadek przewodności dla wszystkich badanych gleb odnotowano dla ciśnień ssących powyżej 100 hPa. Podobne wyniki badań w tym zakresie uzyskali Sławiński i in. (28, 29) oraz Witkowska-Walczak (36) dla niektórych gleb Polski, m.in. rędzin i mad, oraz Chen i Payne (2) dla gleb Australii.

Różnice w zależnościach między gęstością gleb a przewodnością hydrauliczną K_h przy ciśnieniu ssącym 100 hPa i pozostałymi wartościami ciśnień, tj. 200, 400, 1000 hPa, wynikały zapewne z faktu, że o przewodności hydraulicznej nienasyconej K_h przy ciśnieniu ssącym 100 hPa decydowała głównie siła grawitacji i przepływ wody odbywał się w porach o dużych średnicach $\geq 30 \mu\text{m}$, gdzie siły międzycząsteczkowe i kapilarne odgrywają rolę marginalną. Przy wyższych ciśnieniach ssących gleby woda przemieszcza się przez pory o mniejszych średnicach w przypadku ciśnienia ssącego 200 hPa przez pory o śr. $15 \mu\text{m}$, 400 hPa przez pory o śr. $7,5 \mu\text{m}$, a w przypadku ciśnienia 1000 hPa przez pory o śr. $3 \mu\text{m}$. Z przeprowadzonych badań wynika, że zróżnicowanie gęstości nie zmieniało w sposób istotny zdolności do transportu wody przy ciśnieniach ssących 200, 400, 1000 hPa. Do podobnych wniosków w swojej pracy doszedł Miatkowski (21), który stwierdził, że wzrost gęstości nie powoduje istotnych zmian w ilości mikroporów, a co za tym idzie w możliwościach przewodzących gleb, oraz Dexter i in. (8), którzy w swojej pracy wykazali, że oszacowana przewodność hydrauliczna nienasycona była istotnie wyższa w zmianowaniu wzbogacającym glebę w substancję organiczną (gleba o niższej gęstości) w porównaniu ze zubażającym (gleba o wyższej gęstości) tylko w przypadku zawartości wody w glebie wynoszącej powyżej $13 \text{ g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ gleby, dla pozostałych zawartości wody różnice były nieistotne.

Istnieją również opracowania, w których autorzy wykazują istnienie zależności pomiędzy gęstością gleb a przewodnością hydrauliczną nienasyconą (13, 39). Dlatego wydaje się konieczne dalsze doskonalenie istniejących modeli dla dokładniejszego szacowania przewodności hydraulicznej gleb.

WNIOSKI

1. Na przewodność hydrauliczną nasyconą K_s w warstwie ornej badanych gleb dodatni wpływ miała frakcja łu koloidalnego, natomiast ujemny gęstość gleb.

2. Stwierdzono dodatni wpływ frakcji łu koloidalnego oraz ujemny gęstości gleb na szacowaną wielkość współczynnika K_h (100 hPa). Natomiast dla pozostałych wartości ciśnień ssących gleb, tj. 200, 400, 1000 hPa, stwierdzono dodatni wpływ zawartości frakcji łu koloidalnego oraz substancji organicznej.

3. W przypadku badanych gleb istnieją statystyczne zależności pomiędzy wybranymi właściwościami fazy stałej gleby a przewodnością hydrauliczną nasyconą, co może być podstawą opracowania cyfrowych map przewodności hydraulicznej gleb mineralnych Polski w technologii GIS, które umożliwiałyby przewidywanie wielu niekorzystnych zjawisk lub zmian mogących wystąpić w środowisku glebowym. Tego typu opracowania ułatwiłyby ochronę agroekosystemów oraz zarządzanie rolniczą przestrzenią produkcyjną. Z kolei oszacowane wartości współczynnika przewodności hydraulicznej nienasyconej mogą być przydatne m.in. w modelowaniu niektórych zjawisk zachodzących w profilach glebowych.

LITERATURA

1. Campbell G.S.: Soil Physics with Basic Transport Models for Soil-Plant Systems. Develop. Soil Sci., Elsevier, Amsterdam, 1985, vol. **14**.
2. Chen C., Payne W.A.: Measured and modeled unsaturated hydraulic conductivity of Walla Walla Silt Loam. Soil Sci. Am. J., 2001, **65**: 1385-1391.
3. Czyż E.A., Dexter A.R., Terelak H.: Content of readily-dispersible clay in the arable layer of some Polish soils. Adv. GeoEcol., 2002, **35**: 115-124.
4. Dechnik I., Lipiec J.: Przewodnictwo wodne gleby w strefie nienasyconej i metody jego pomiaru. Probl. Agrofiz., 1980, **32**: 3-43.
5. Dexter A.R., Bird N.R.A.: Methods for prediction the optimum and range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil Till. Res., 2001, **57**: 203-212.
6. Dexter A.R., Czyż E.A., Niedźwiecki J.: Soil hydraulic conductivity and the implications for water run-off. Mat. Międz. Konf. Nauk. nt. „Aktualne problemy inżynierii rolniczej w aspekcie integracji Polski z Unią Europejską”. Lublin (13-14 IX 2000), Wyd. AR Lublin, 2000, 320-322.
7. Dexter A.R., Czyż E.A., Niedźwiecki J.: Log-normal distributions of soil hydraulic conductivity and the implications for water run-off. Mat. XI Międzynarodowej Konf. Nauk. nt. „Problemy inżynierii rolniczej na progu III Tysiąclecia: Technika-Środowisko-Człowiek, Międzyzdroje, 30 V-1 VI 2001, 2001, 15-18.
8. Dexter A.R., Czyż E.A., Niedźwiecki J., Maćkowiak Cz.: Water retention and hydraulic conductivity of loamy sand soil as affected by crop rotation and fertilization. Archiv. Agron. Soil Sci., 2001, **46(1)**: 123-133.
9. Gerke H.H., Köhne J.M.: Estimating Hydraulic Properties of Soil Aggregate Skins from Sorptivity and Water Retention. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, **66**: 26-36.
10. Gerke H.H., van Genuchten M.Th.: A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. Water Resour. Res., 1993, **29**: 305-319.
11. Gwo J.P., Jardine P.M., Wilson G.V., Yeh G.T.: A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media. J. Hydrol., 1995, **164**: 217-237.

12. Hartge K.H., Horn R.: Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Verlag, Stuttgart, 1992, 116-121.
13. Horton R., Allmaras R.R., Cruse R.M.: Tillage and compactive effects on soil hydraulic properties and water flow. W: *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*; red.: W.E. Larson, G.R. Blake, R.R. Allmaras, W.B. Voorhees and S.C. Gupta, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 1989, 187-203.
14. Jadczyzyn J., Niedźwiecki J.: Relation of saturated hydraulic conductivity to soil losses. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2005, **14(4)**: 431-435.
15. Jarvis N.J., Zvattaro L., Rajkai K., Reynolds W.D., Olsen P.A., McGechan M., Mecke M., Mohanty B., Leeds-Harrison P.B., Jacques D.: Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, 2002, **108**: 1-17.
16. Jarvis N.J., Messing I., Larsson M.H., Zvattaro L.: Measurement and prediction of near-saturated hydraulic conductivity for use dual-porosity models. W: *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*; red.: van Genuchten M. Th., Leij F.J., Wu L., 1999, US Salinity Lab. USDA-ARS, Riverside, CA, USA, 839-850.
17. Kaszubkiewicz J., Wątor I., Kiełbowicz J.: Retencja i przepuszczalność wodna w topokwencjach górskich gleb łąkowych i leśnych. *Rocz. Gleb.*, 2001, **LII(3/4)**: 33-43.
18. Klute, A., Dirksen C.: *Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods*. p. 687–734. W: *Methods of Soil Analysis. Part 1*; red.: A. Klute, 2nd ed., Agron. Monogr., 9. 1986, ASA and SSSA, Madison, WI.
19. Lipiec J.: Możliwości oceny przewodnictwa wodnego gleb na podstawie ich niektórych właściwości. *Probl. Agrofiz.*, 1983, **40**: 5-64.
20. Lityński T., Jurkowska H., Gorlach E.: *Analiza chemiczno-rolnicza, gleba i nawozy*. PWN Warszawa, 1976.
21. Miatkowski Z.: Wpływ zabiegów agromelioracyjnych na właściwości fizyczno-wodne gleb zwięzłych oraz ukorzenie i plon roślin. *Wiad. IMUZ*, 2001, **99**: 5-103.
22. Minasny B., McBratney A.B.: Evaluation and development of hydraulic conductivity pedo-transfer functions for Australian soil. *Aust. J. Soil Res.*, 2000, **38**: 905-926.
23. Mualem Y.: Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. W: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*; red.: A. Klute, American Society of Agronomy, Madison, WI, 1986, 799-823.
24. Niedźwiecki J., Czyż E.A., Dexter A.R.: Effect of particle size distribution, organic matter and bulk density on saturated hydraulic conductivity of arable soils. Abstract International Workshop "Soil Physical Quality" 2-4 Oct. 2003, 61-64.
25. Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z.: *Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin*. Wyd. IOŚ, Warszawa, 1991.
26. Rawls W.J., Brakensiek D.J., Saxton K.E.: Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 1989, **25**: 1316-1328.
27. Schaap M. G., Leij F. J.: Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, **64**: 843-851.
28. Sławiński C., Walczak R.T., Witkowska-Walczak B.: Przewodnictwo wodne rędzin Polski. *Acta Agrophys.*, 2000, **38**: 259-266.
29. Sławiński C., Walczak R.T., Witkowska-Walczak B.: Przewodnictwo wodne mad Polski. *Acta Agrophys.*, 2000, **38**: 281-288.
30. Srinivasan, R., Arnold J.G., Muttiah R.S.: Plant and hydrologic simulation at the continental scale using SWAT and GIS. *AIH Hydrologic Science and Technology*, 1995, **11(1-4)**: 160-168.
31. Strzemiński M.: *Historia gleboznawstwa polskiego od zarania polskiego piśmiennictwa do powstania Drugiej Rzeczypospolitej*. PWRiL, Warszawa, 1980.
32. Talsma T.: Prediction of hydraulic conductivity from soil water retention data. *Soil. Sci.*, 1985, **140(3)**: 184-188.

33. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Pondel H., Maliszewska-Kordybach B., Pietruch Cz.: Monitoring chemizmu gleb Polski. Warszawa IOŚ. Biblioteka Monitoringu Środowiska, 1999.
34. van Genuchten M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, **44**: 892-898.
35. van Genuchten M. TH., Leij F. J., Yates S. R.: The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA. US Environmental Protection Agency, document EPA/600/2-91/065. 1991.
36. Witkowska-Walczak B.: Wpływ struktury agregatowej gleb mineralnych na ich hydrofizyczne charakterystyki. Acta Agrophys., 2000, **30**: 5-96.
37. Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C.: Development and use of database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 1999, **90**: 169-185.
38. Xu D., Mermoud A.: Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. Soil Till Res., 2001, **60**: 11-19.
39. Zhuang J., Nakayama K., Yu G.R., Miyazaki T.: Predicting unsaturated conductivity of soil based on basic soil properties. Soil Till. Res., 2001, **59**: 143-154.

PLOUGH LAYER HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN DEPENDENCE ON SOLID PHASE PARAMETERS

Summary

Saturated hydraulic conductivity of samples from the tilled layers (0-30 cm) of 16 agricultural soils was measured. The samples were collected from field experiments and from experimental microplots at IUNG-PIB, Puławy. Saturated hydraulic conductivity K_s was measured by the falling-head method, with 10 replications for each soil. Unsaturated conductivity $K_{(h)}$ as a function of water potential was calculated from the van Genuchten equation. Results show that higher clay content and lower bulk density increase saturated hydraulic conductivity. It was found that higher clay content and lower bulk density increase unsaturated hydraulic conductivity at -100 hPa water potential (field capacity). Higher clay content and organic matter content increase unsaturated conductivity at water potentials of -200 , -400 , -1000 hPa. The pedotransfer functions obtained for hydraulic conductivity might be useful for estimating hydraulic conductivity from particle size distribution, organic matter content and bulk density data. Our research suggests that such studies may be a basis for digital maps of hydraulic conductivity of mineral soils in Poland. Large-scale surveys of saturated hydraulic conductivity may be useful for prediction of adverse changes in the soil environment. That would be helpful in protection of rural ecosystems and proper management of production capacity.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 VIII 2006 r.