

## WPLYW GEOMETRII PRÓBKII NA RETENCJĘ WODNĄ GLEBY

*H. Czachor*

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: hczachor@demeter.ipan.lublin.pl

**Streszczenie.** Strukturę gleb mineralnych można rozpatrywać jako wynik upakowania cząstek gleby. Opracowana procedura symulacyjna pozwoliła rekonstruować strukturę ośrodka granularnego na jego podstawie porowatości i rozkładu granulometrycznego. Następnie, przy pomocy metody tesselacji, objętość wirtualnego ośrodka podzielono na zbiór przestrzennych elementów dyskretnych, z których każdy zawierał pojedynczy por. Każdy z nich kwantyfikowano wyliczając jego objętości i wartości 4-ch promieni przewężeń określających ich ciśnienie kapilarne. Założono że, osuszanie dowolnego poru jest możliwe wtedy gdy na jego przewężeniu istnieje granica faz powietrze – woda (tzw. por aktywny). W trakcie początkowego stadium osuszania próbki ilość porów aktywnych jest stosunkowo mała – znajdują się one tylko na powierzchni zewnętrznej która ma kontakt ma otoczeniem. Ograniczenie tej powierzchni utrudnia perkolację fazy gazowej w ośrodku, co oznacza, że dla danego ciśnienia jego wilgotność powinna być większa w porównaniu do próbki "otwartej". Symulacja osuszania stosunkowo dużego układu składającego się z cząstek polidispersyjnych pokazuje, że jego retencja wodna zależy od geometrii badanego ośrodka, rozumianej jako stosunek powierzchni poprzez którą ośrodek ma kontakt z atmosferą i całej powierzchni próbki. Pomiary retencji wykonane dla ośrodka składającego się z drobnoziarnistych kulek szklanych (70–100  $\mu\text{m}$ ) jakościowo potwierdzają występowanie przewidywanego efektu.

Słowa kluczowe: retencja wodna, ośrodek porowaty, perkolacja.

### WSTĘP

Zależność wilgotności-potencjał wody nazywana jest podstawową charakterystyką hydroficzyczną gleby. Na jej podstawie można określić zarówno potencjalne możliwości retencyjne jak również ilość wody użytecznej, pojemność polową gleby, itp. W praktyce wyznaczanie tej zależności odbywa się poprzez określenie wilgotności odpowiadającej znanemu potencjałowi, którego miarą jest, tzw. ci-

śnienie ssące gleby. Próbkę gleby ustawiona na płycie porowatej o znanym ciśnieniu oddaje (lub pobiera) wodę dopóki nie zostanie osiągnięty stan równowagi między nimi. Powszechnie uważa się że krzywa retencji określona jest przez strukturę gleby, która dla danej gleby przede wszystkim zależy od rozkładu ziarnowego (granulometrycznego) i porowatości.

### REKONSTRUKCJA STRUKTURY OŚRODKA GRANULARNEGO

Z mikroskopowego punktu widzenia strukturę ośrodka granularnego (np. gleby mineralnej) można uważać za wynik upakowania cząstek fazy stałej w przestrzeni trójwymiarowej. Między cząstkami fazy stałej (granulami) istnieją pory, których rozkład wielkości jest pochodną składu granulometrycznego i porowatości ośrodka. Te dwie składowe struktury ośrodka granularnego mają decydujący wpływ na większość charakterystyk fizycznych ośrodka jak: krzywa retencji, współczynnik przewodnictwa wodnego, współczynnik przewodnictwa cieplnego czy właściwości mechaniczne. Właściwości te zależą od struktury ośrodka rozumianej jako przestrzenny rozkład heterogeniczności [3].

W celu lepszego opisu struktury opracowano metodę jej rekonstrukcji przy pomocy symulacji upakowania cząstek i na podstawie znajomości składu granulometrycznego i porowatości badanej gleby. Opracowana procedura upakowania pozwala generować zbiory cząstek ciasno upakowanych w trzech wymiarach, których liczba winna być na tyle, duża aby powstała struktura mogła być uznana za reprezentatywną dla danego ośrodka (ang. Representative Element Volume REV) [4]. Taką strukturę nazywano *wirtualnym ośrodkiem granularnym*. Przyjęto założenie o sferycznym kształcie cząstek, co pozwala na wykorzystanie wyników rutynowo przeprowadzanych analiz składu granulometrycznego gleb. Liczba cząstek niezbędnych do symulacji danego ośrodka związana jest z jego składem granulometrycznym – im większy zakres zmienności średnic cząstek, tym większa ich liczba jest potrzebna do utworzenia reprezentatywnej struktury. Dla frakcji piasku liczba ta wynosiła około 6000, a dla piasku pylastego około 30000 [2]. Podstawową cechą wirtualnego ośrodka granularnego jest znajomość dosłownie rozumianej jego struktury – znane są położenia i wielkości wszystkich tworzących go cząstek

Utworzenie wirtualnego ośrodka granularnego stwarza nowe możliwości analizy i opisu jego porów, np. zdefiniowanie pojęcia poru. W tym ujęciu między czterema cząstkami o numerach  $i, j, k, l$  istnieje pojedynczy por, jeśli można okre-

ślić styczną do nich kulę (tzw. identyfikator poru), która nie przecina powierzchni żadnej cząstki ośrodka.

Pojedynczy por jest częścią objętości czworościanu zawartą między powierzchniami czterech trójkątów sferycznych i płaszczyznami jego ścian bocznych. Por taki może być scharakteryzowany następującymi parametrami: objętością i 4 przewężeniami, które można również łatwo skwantyfikować.

Znając położenia wszystkich cząstek ośrodka w przestrzeni oraz ich promienie geometryczne i stosując metodę tessellacji [5, 7] w odniesieniu do wszystkich cząstek, można podzielić całą objętość ośrodka na zbiór czworościanów, z których każdy zawiera jeden por. Każde przewężenie łączy dwa pory i jest umowną granicą między nimi. Każdy por znajdujący się wewnątrz ośrodka ma bezpośredni kontakt z czterema sąsiednimi. Analogicznie każdy por dwuwymiarowy z Rys. 1 ma 3 sąsiadów.

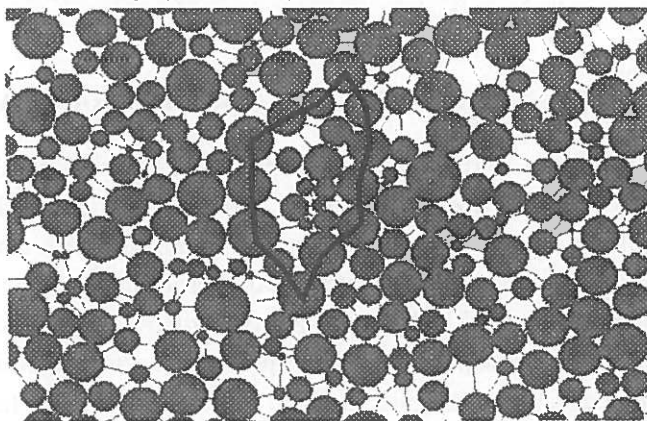
#### ANALIZA MECHANIZMU OSUSZANIA OŚRODKA GRANULARNEGO

Utworzenie ośrodka wirtualnego i jego podział na dyskretne elementy przestrzenne, z których każdy zawiera jeden por o znanych parametrach, pozwala na wyliczanie wielkości makroskopowych charakteryzujących cały ośrodek na podstawie uśrednienia wielkości odnoszących się do poszczególnych porów.

Podczas pomiaru retencji gleby woda z próbki gleby, umieszczonej na płycie porowatej dąży do wyrównania z nią swego potencjału, którego wartość jest znana. Proces prowadzący do osiągnięcia stanu równowagi polega na opróżnianiu porów, których potencjał kapilarny jest równy/mniejszy od potencjału macierzystego płyty porowatej.

Jest oczywiste, że opróżnienie pojedynczego poru odbywa się poprzez zastąpienie fazy ciekłej przez fazę gazową. Warunkiem koniecznym opróżnienia rozpatrywanego poru jest jego kontakt z fazą gazową, tzn. przynajmniej jedno jego przewężenie, musi mieć kontakt z otoczeniem (z atmosferą) [6, 8]. Taki por nazywano porem aktywnym. Z powyższego stwierdzenia wynikają istotne ograniczenia dotyczące procesu osuszania ośrodka. Jeśli duży por, tzn. o stosunkowo dużych przewężeniach, otoczony jest wyłącznie przez drobne pory, to nie zostanie on opróżniony przy ciśnieniu zewnętrznym równym ciśnieniu kapilarnemu odpowiadającym jego przewężeniom, ponieważ meniski porów drobnych na to nie pozwolą. Taką konfigurację można łatwo dostrzec analizując Rys. 1. Przedstawia on przekrój przez trójwymiarowy ośrodek utworzony z cząstek sferycznych.

Czarne linie przedstawiają przewężenia między sąsiadującymi ze sobą porami będące granicami porów. Ich długość jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia kapilarnego danego przewężenia. Analizując Rys.1. łatwo dostrzec grupy sąsiadujących ze sobą porów, których opróżnienie w trakcie osuszania ośrodka będzie podlegało wyżej opisanym ograniczeniom (np. klaster zaznaczony wielokątem). Przewężenia połączone tą linią są małe w stosunku do przewężeń znajdujących się wewnątrz zaznaczonej figury. Oznacza to, że opróżnienie porów znajdujących się wewnątrz zaznaczonego obszaru będzie możliwe dopiero wtedy gdy ciśnienie ssące osiągnie wartość odpowiadającą jakiegokolwiek spośród przewężeń leżących na obwodzie tego wielokąta. Opróżnienie danego poru jest uzależnione od stanu porów sąsiednich. Istnienie analogicznych klasterów stwierdzono również w przypadku ośrodka trójwymiarowego.



**Rys. 1.** Przekrój przez ośrodek granularny utworzony z cząstek sferycznych z zaznaczonymi granicami porów dwuwymiarowych.

**Fig. 1.** Cross section through a granular medium composed from the spherical particles and the inter-pore boundaries.

Zaakceptowanie zaproponowanego mechanizmu prowadzi do wniosku, że osuszenia dowolnego poru ośrodka zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy jednocześnie spełnione są dwa warunki:

- Ciśnienie zewnętrzne musi być większe/równe ciśnieniu kapilarnemu przewężenia poru,
- Por ten musi być aktywny (przynajmniej jedno przewężenie musi mieć kontakt z atmosferą).

Założono, że ciśnienie kapilarne przewężenia związane jest z promieniem geometrycznym poprzez zależność Laplace'a. Dowolnemu porowi o numerze  $i$  przyporządkowano następujące parametry :

- objętość  $v_i$ ,
- ciśnienia kapilarne wszystkich przewężeń  $P_i^k$ , gdzie  $k = 1, \dots, 4$ ,
- numery porów sąsiednich.

Na tej podstawie określono zakres zmienności ciśnienia kapilarnego porów, tzn. wartość minimalną  $P_{\min}$  i maksymalną  $P_{\max}$ . Przy ciśnieniach mniejszych/równych  $P_{\min}$  ośrodek jest nasycony, a przy ciśnieniu  $P_{\max}$  – całkowicie osuszony. Przedział między tymi wartościami podzielono na  $j = 100$  podzakresów  $\Delta p$ . Wartości ciśnień  $P_j$  zmieniają się skokowo od  $P_{\min}$  do  $P_{\max}$  zgodnie z zależnością

$$P_j = P_{\min} + j \cdot \Delta p \quad (1)$$

Wilgotność  $\theta(P_j)$  oceniano na podstawie zależności

$$\theta(P_j) = \frac{\sum v_i}{V_i} \quad (2)$$

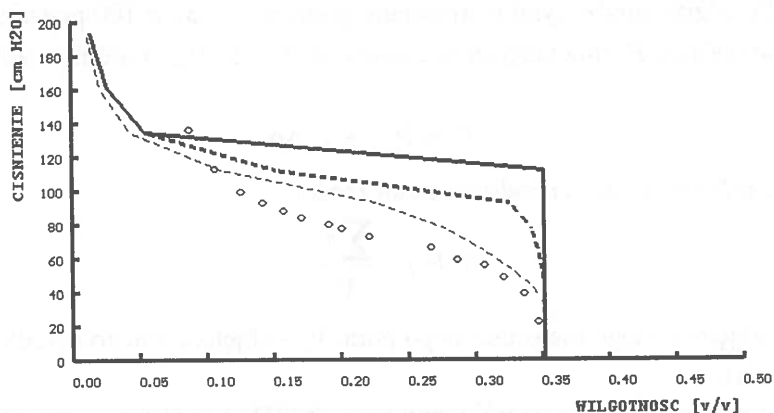
gdzie:  $v_i$  – objętość  $i$ -tego nie osuszonego pora,  $V_i$  – objętość całego ośrodka (por + faza stała).

Badania przeprowadzono na trójwymiarowych (3D) ośrodkach wirtualnych.

Na ogół w trakcie laboratoryjnych pomiarów retencji wodnej gleba znajduje się w cylinderku o wymiarach: wysokość 4,7 cm, średnica 5,2 cm i objętości 100 cm<sup>3</sup>. Na początku pomiarów nasycona próbka gleby na płycie porowatej kontaktuje się z otoczeniem (atmosfera) przez górną powierzchnię, która stanowi ca 18% jej całkowitej powierzchni zewnętrznej. Należy więc przyjąć, że podczas rutynowych oznaczeń taki procent porów aktywnych uczestniczy w początkowym stadium osuszania próbki. Wydaje się oczywistym przypuszczenie, że większa ilość porów aktywnych na początku procesu, zwiększa prawdopodobieństwo opróżnienia jednego z nich, a tym samym wpływa na retencję wodną ośrodka.

W celu sprawdzenia tej hipotezy wykonano 3 symulacje osuszania trójwymiarowego jednego ośrodka wirtualnego przy różnej ilości początkowo aktywnych porów. Wyniki symulacji przedstawiono na Rys 2. Dotyczą one ośrodka o składzie granulometrycznym piasku drobnego, składającego się z ok. 30.000 porów, przy czym ilość porów powierzchniowych wynosiła 3571. Trzy krzywe retencji wodnej odpowiadają różnej ilości początkowo aktywnych porów: linia przerywa-

na cienka – 100%, przerywana gruba – 9,3%, ciągła gruba – 0,083%. Punkty na wykresie odpowiadają wynikom pomiarów. Wyniki symulacji potwierdzają hipotezę roboczą – krzywa retencji zależy, szczególnie dla małych wartości ciśnienia, od ilości początkowo aktywnych porów. Im mniejsza jest ich ilość tym wyższa wartość ciśnienia przy którym rozpoczyna się osuszanie. Na początku osuszania ilość porów aktywnych szybko rośnie, ponieważ można przyjąć, że opróżnienie jednego poru powoduje powstanie trzech nowych przewężeń z meniskiem wodnym (liczba koordynacyjna porów wynosi 4).



**Rys. 2.** Krzywe retencji piasku drobnego otrzymane na podstawie symulacji osuszania wirtualnego ośrodka trójwymiarowego przy różnej ilości porów początkowo aktywnych.

**Fig. 2.** Retention curves of fine sand from simulation of virtual 3D medium for different amount of initially active pores.

Przedstawiony model umożliwia jakościowe wyjaśnienie otrzymanego przebiegu zależności wilgotność – ciśnienie. Mała liczba porów aktywnych zwiększa prawdopodobieństwo powstania konfiguracji przestrzennej przewężeń uniemożliwiającej opróżnianie porów ośrodka, co musi mieć wpływ na proces osuszania ośrodka.

#### WERYFIKACJA EKSPERYMETALNA WYNIKÓW SYMULACJI

W celu sprawdzenia wyników symulacji przeprowadzono 2 pomiary osuszania ośrodka składającego się z kuleczek szklanych o wymiarach 70–110  $\mu\text{m}$ .

Celem pomiarów była odpowiedź na pytanie: Czy zmiana geometrii próbki ośrodka porowatego pociąga za sobą zmianę jego krzywej retencji? Poprzez termin „geometria próbki” rozumiana jest w tym tekście wielkość będącą ilorazem powierzchni zewnętrznej próbki przez którą kontaktuje się ona z otoczeniem i całkowitej powierzchni zewnętrznej.

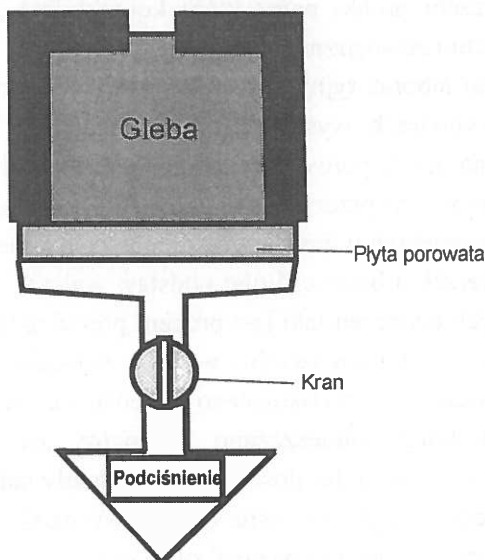
Na ogół w trakcie laboratoryjnych pomiarów retencji wodnej gleba znajduje się w cylinderku o wymiarach: wysokość 4,7 cm, średnica 5,2 cm i objętości 100 cm<sup>3</sup>. Znajdująca się na płycie porowatej, nasycona wodą próbka gleby kontaktuje się z otoczeniem (atmosferą) przez górną powierzchnię cylinderka, która stanowi ca 18% całkowitej powierzchni zewnętrznej próbki (stosunek powierzchni podstawy do sumy powierzchni bocznej i obu podstaw walca). Można więc przyjąć, że podczas rutynowych oznaczeń taki jest procent porów aktywnych. Postawiono pytanie – czy ograniczenie tej powierzchni wpływa na kształt krzywej retencji?

Schemat doświadczenia weryfikującego przedstawia Rys.3. Kulki szklane o składzie piasku drobnego umieszczono wewnątrz „twardego” lejka Szota o małych porach (17 G 5) w takiej ilości, aby wypełniały całą jego objętość wynoszącą 175 cm<sup>3</sup>. Średnica lejka wynosiła 65 mm wysokość 60 mm. Powierzchnia całkowita tak utworzonej próbki wynosiła 179 cm<sup>2</sup>.

Przygotowując próbkę do pierwszego pomiaru do oczyszczonej krawędzi lejka przyklejono silikonem metalową płytkę z otworem o średnicy 10 mm. W otwór włożono wężyk PCV o długości 20 mm i średnicy wewnętrznej 6 mm, który zagłębił się w ośrodku porowatym na kilka milimetrów. Połączenie wężyka z płytką również uszczelniono. Celem tych zabiegów było ograniczenie powierzchni kontaktu porów ośrodka z otoczeniem. W tym przypadku powierzchnia kontaktu próbki z atmosfera wynosiła 0,28 cm<sup>2</sup> co stanowiło 0,16% całej powierzchni zewnętrznej. Przed wykonaniem drugiego z zaplanowanych pomiarów usunięto wężyk PCV wraz z metalową płytką. W ten sposób powierzchnia kontaktu wzrosła do 33,2 cm<sup>2</sup> co odpowiadało 18,5% powierzchni zewnętrznej próbki. Stosunek powierzchni aktywnych w obu doświadczeniach wynosił 1:118.

Należy zauważyć, że oba pomiary dotyczyły dokładnie tego samego ośrodka, a sam pomiar nie wymagał zdejmowania próbki z płytą porowatej co zawsze prowadzi do zerwania kontaktu wodnego między porami płyty i próbki. Wilgotność określano na podstawie pomiarów ciężaru lejka Szota wraz z próbką i wodą znajdującą się pod płytą porowatą. Przed każdym ważeniem zakręcano kranik znajdujący się pod lejkiem Szota i odłączano przewód PCV łączący go z naczy-

niem wyrównawczym. Po wykonaniu pomiaru obie części łączono, zwracając przy tym uwagę, aby do układu nie przedostało się powietrze. Dla każdej wartości ciśnienia pomiary prowadzono do momentu ustabilizowania się ciężaru próbki.



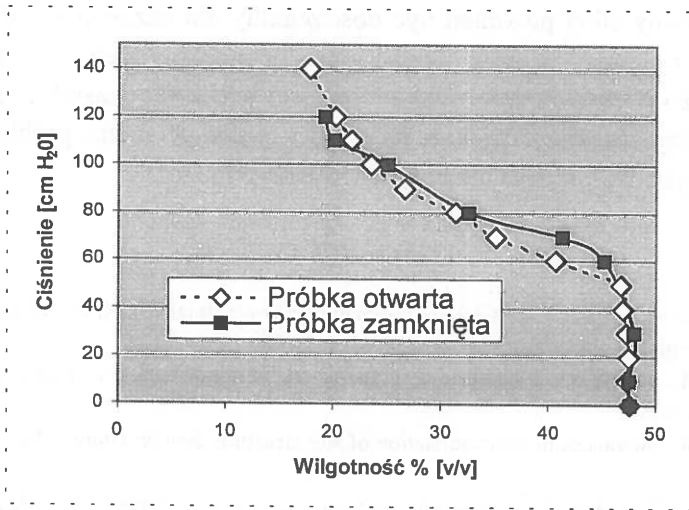
Rys. 3. Schemat przeprowadzonych pomiarów retencji wodnej.  
Fig. 3. Scheme of the moisture retention measurements.

### OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Otrzymane wyniki przedstawiono na Rys. 4 i 5. Krzywe retencji odnoszące się do próbki z dużą i małą ilością porów początkowo aktywnych (Próbka otwarta, Próbka zamknięta, odpowiednio), tzn. dla próbek o wyraźnie różnych geometriach, pokazano na Rys.4.

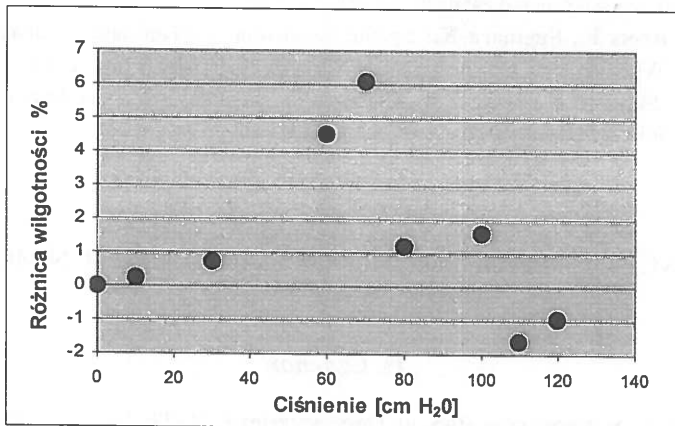
Różnicę wilgotności próbki zamkniętej i otwartej w zależności od ciśnienia wody w ośrodku przedstawiono na Rys. 5. Na podstawie Rys. 4 i 5 można stwierdzić, że ograniczenie kontaktu próbki z otoczeniem wpływa na zależność potencjał wilgotność ośrodka porowatego. Zmiany te są jakościowo zgodne z wynikami symulacji osuszania wirtualnego ośrodka porowatego przedstawionymi na Rys.2. Zarówno wyniki symulacji uzyskane na podstawie opracowanego modelu jak i doświadczenie pokazują, że ograniczenie powierzchni kontaktu próbki





Rys. 4. Krzywe retencji kulek szklanych o wymiarach 70–110  $\mu\text{m}$  dla próbek różnej geometrii.

Fig. 4. MRC of 70–110  $\mu\text{m}$  glass beds for 2 different sample geometries.



Rys. 5. Różnica krzywych retencji kulek szklanych o wymiarach 70–110  $\mu\text{m}$  dla 2-ch próbek o różnej geometrii.

Fig. 5. MRC difference of 70–110  $\mu\text{m}$  glass beds for 2 different sample geometries.

z atmosferą powoduje wzrost wilgotności dla niskich wartości ciśnienia. Należy przypuszczać, że jakościowo podobne efektu powinny być dostrzegalne dla próbek o różnym kształcie (zróżnicowany stosunek wysokości do średnicy cylindra).

Powyżej opisany efekt powinien być dostrzegalny dla każdego ośrodka porowatego, a więc i gleby. Ponieważ rozkład granulometryczny gleb charakteryzuje się z zasady dużo większym zakresem zmienności wielkości cząstek, a tym samym i porów, należy oczekiwać większego wpływu zmian geometrii próbki na krzywą pF niż w przypadku ośrodka niemal monodispersyjnego.

#### PIŚMIENICTWO

1. **Czachor H.:** Geometria fazy stałej i przestrzeni porów w rolniczych ośrodkach granularnych na przykładzie gleby mineralnej. *Acta Agrophysica*, 7, 1997.
2. **Czachor H., Gózdź A.:** Modelling of granular and cellular materials. *Trans. ASAE*, 44 (2), 439–445, 2001.
3. **Dexter A.R.:** Advances in characterisation of soil structure. *Soil & Tillage., Res.*, 11, 199–238, 1988.
4. **Eggleston J.R., Peirce J.J.:** Dynamic programming analysis of pore space. *European J. Soil Sci.*, 46, 4, 581–590, 1995
5. **Mason G.:** Desaturation of porous media. I. Unconsolidated Materials. *J. Colloid and Interface Sci.*, 47, 208–227, 1972.
6. **Mason G., Mellor D.W.:** Analysis of the percolation properties of the real porous materials. *Studies in surface science and catalysis*. 62, 41–50, 1991.
7. **Okabe A., Boots B., Sugihara K.:** Spatial tessellation. Concept and application of Voronoi diagrams. J. Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Singapore, 1992.
8. **White N.F., Sunda D.K., Duke H.R., Corey A.T.:** Boundary effects in desaturation of porous media. *Soil Sci.*, 113, 7–12, 1972.

#### INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF SOIL SAMPLE ON MOISTURE RETENTION CURVE

*H. Czachor*

Institute of Agrophysics PAS, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27, Poland  
e-mail: hczachor@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The structure of mineral soils can be treated as the results of soil particles packing. The elaborated computer packing procedure allowed to reconstruct the structure of granular medium on the basis of porosity and grain size distribution data. The void space of virtual medium has been divided on a set of individual pores by means of tessellation procedure. Each pore has been described by volume and 4 neck radii related to neck capillary pressure of them. It seems

evident that the presence of air-water interface at the neck is the necessary condition of any pore drying. At the beginning of MRC measurements all pores are saturated and only the pores at the top of sample fulfil the above condition. Such pore was called an active one. The drainage simulation of a relatively big aggregate composed from polysize particles shows that moisture retention curve depends on sample geometry defined as the ratio of external sample surface area exposed to the atmosphere and its total value. At the early stages of a sample drainage the amount of active pores is relatively small. If the surface area exposed to the atmosphere is smaller the percolation of gas phase inside the sample can be limited and the measured moisture content will be higher. The experimental verification done for a fine glass beds confirms the predicted effect.

Keywords: MRC, particle packing, perclation, reconstruction.