

Jan SZATYŁOWICZ, Tomasz BRANDYK, Piotr HEWELKE,
Tomasz GNATOWSKI, Daniel SZEJBA

Katedra Melioracji Rolnych i Leśnych

Modelowanie procesu infiltracji wody w glebach z makroporami

Wstęp

W niektórych glebach obserwuje się występowanie ciągłych pionowych makroporów, które mogą przybierać formę kanalików utworzonych przez obumarłe korzenie roślin lub faunę glebową bądź formę szczelin będących efektem kurczenia się gleb. Skutkiem istnienia makroporów jest szybki odpływ wody w głąb profilu glebowego poniżej strefy korzeniowej. Powoduje on, że woda infiltrująca z opadów atmosferycznych lub nawodnień powierzchniowych omija tzw. macierz glebową i trafia bezpośrednio do wód gruntowych, nawet gdy gleba nie osiągnęła uwilgotnienia odpowiadającego polowej pojemności wodnej (Beven i Germann 1982).

Preferencyjny przepływ wody w glebie (tzw. by-pass flow) może powodować zanieczyszczenie wód gruntowych. Zachodzi to w czasie procesu infiltracji wody, kiedy stosowane na powierzchni gleby środki ochrony roślin i nawozy ulegają rozpuszczeniu, a następnie jako roztwór

w sposób natychmiastowy docierają do wód gruntowych, omijając macierz glebową.

Celem niniejszej pracy była analiza wpływu makropory glebowej na przebieg zjawiska infiltracji. Jako metodę badawczą zastosowano symulację numeryczną, w której wykorzystano komputerowy model FEMWAT. Model ten umożliwił uwzględnienie w procesie symulacji zarówno założonych warunków glebowych, jak też makropory jako warunku brzegowego. Zakresem badań objęto trzy rodzaje profil glebowych: glebę piaszczysto-pylastą, glinę ciężką i glebę heterogeniczną. Dla każdego z rozpatrywanych profili przeprowadzono obliczenia symulacyjne zmian uwilgotnienia gleby w procesie infiltracji oraz sumarycznej objętości wsiąkającej wody w przypadku braku makropory i w przypadku jej wystąpienia. W glebie piaszczysto-pylastej przeprowadzono szczegółową analizę wpływu wymiaru makropory (długości) na przebieg uwilgotnienia gleby w procesie infiltracji.

Zastosowany model matematyczny

W niniejszej pracy zastosowano model FEMWAT, opracowany przez Nutzmanna (1987), który umożliwia symulację ruchu wody w strefie nasyconej i nienasyconej przy zadanych różnych warunkach brzegowych. Podstawowym równaniem w modelu jest uogólnione równanie Richardsa w postaci:

$$\phi c(\Psi) \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} K_r(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

ϕ – porowatość (–),

$c(\Psi)$ – różniczkowa pojemność wodna charakteryzująca zmiany retencji wywołane zmianą zawartości wody (L^{-1}),

Ψ – wysokość ciśnienia wody (L),

h – całkowita wysokość hydrauliczna (L),

t – czas (T),

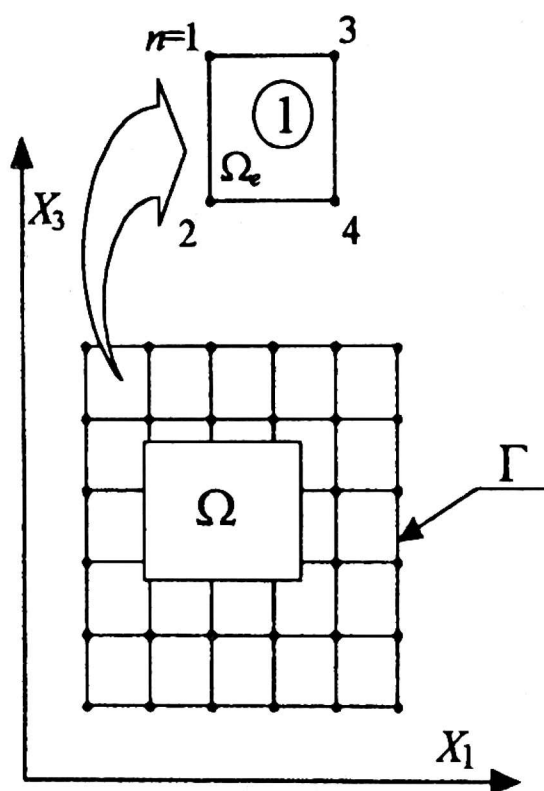
K_{ij} – tensor przewodności hydraulicznej dla pełnego nasycenia ($L \cdot T^{-1}$),

K_r – względna przewodność hydrauliczna (–).

Równanie (1) opisuje ruch wody w nieściśliwych ośrodkach nasyconych lub nienasyconych bez członu źródłowego. Może ono być typu:

- parabolicznego gdy $\Psi < 0$ i $c(\Psi) \neq 0$ (ośrodek nienasycony),
- typu eliptycznego, gdy $\Psi \geq 0$, $c(\Psi) = 0$ oraz $K_r(\Psi) = 1$ (ośrodek nasycony).

Dla rozwiązania równania przepływu w modelu FEMWAT wykorzystuje się metodę elementów skończonych. Obszar, w którym rozwiązujemy równanie ruchu wody (Ω), jest dzielony na elementy



① - element

1, 2, 3, 4 - węzły

Ω_e - obszar elementu

Ω - obszar

Γ - granica

RYSUNEK 1. Dyskretyzacja obszaru w metodzie elementów skończonych

czworokątne (Ω_e). Każdemu elementowi w zdyskretyzowanym obszarze (rys. 1) przypisany jest kolejny numer, cztery numery węzłów oraz współrzędne. Dla każdego elementu przypisuje się cechy materiałowe, tzn. funkcję przewodności hydraulicznej i charakterystykę retencyjności wodnej.

Warunek początkowy stanowi zadana wielkość ciśnienia hydraulicznego w czasie $t=0$ w każdym punkcie węzłowym w obrębie rozpatrywanego obszaru Ω i jest zapisany:

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i) \text{ w obszarze } \Omega \quad (2)$$

Warunki brzegowe mogą być pierwszego rodzaju (warunek Dirichleta) oraz drugiego rodzaju (warunek Neumanna). Warunek pierwszego rodzaju występuje wtedy, gdy wielkość ciśnienia hydraulicznego jest wielkością znaną dla punktów węzłowych leżących na granicy obszaru Γ i może być wyrażony jako:

$$h(x_i, t) = h \text{ na granicy } \Gamma \quad (3)$$

Warunek drugiego rodzaju polega na zadaniu przepływu normalnego q do granicy obszaru Γ :

$$-\left(K_{ij} K_r \frac{\partial h}{\partial x_j}\right) l_i = q \text{ na granicy } \Gamma \quad (4)$$

gdzie l_i jest długością segmentu.

Jako rezultat podziału obszaru, w którym rozwiązywane jest równanie różniczkowe (1), przy zadanych warunkach początkowych i brzegowych oraz znanych cechach materiałowych, uzyskuje się układ liniowych równań algebraicznych, który rozwiązuje się metodą Gaussa. Szczegółowy opis procedur zastosowanych w modelu FEMWAT znajduje się w pracy Nutzmanna (1987).

Charakterystyka parametrów glebowych

Do badań modelowych wytypowano następujące trzy rodzaje utworów glebowych: piasek, piasek pylasty i glinę ciężką. Krzywe retencyjności wodnej dla rozpatrywanych utworów glebowych wyrównano wzorem van Genuchtena (1980) w postaci:

$$\Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{[1 + |\alpha\Psi|^n]^m} \quad (\Theta_r \leq \Theta \leq \Theta_s) \quad (5)$$

gdzie:

α, n – parametry empiryczne α (cm^{-1}),
 n (-), $m = 1 - 1/n$ (-),

Ψ – ciśnienie ssące (cm),

Θ – wilgotność objętościowa gleby ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),

Θ_r, Θ_s – resztkowa i pełna pojemność wodna gleby ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Natomiast funkcję nienasyconej przewodności wodnej w zależności od ciśnienia ssącego opisano równaniem van Genuchtena-Mualem (van Genuchten 1980) w postaci:

$$K(\Psi) = K_s \frac{[(1 + |\alpha\Psi|^n)^m - |\alpha\Psi|^{n-1}]^2}{(1 + |\alpha\Psi|^n)^{m(l+2)}} \quad (6)$$

TABELA 1. Określone wartości współczynnika filtracji oraz parametrów wymaganych w równaniu van Genuchtena-Mualem opisującym krzywą pF oraz przewodność wodną przy stanie niepełnego nasycenia dla rozpatrywanych utworów glebowych

Utwór glebowy	Θ_s (-)	Θ_r (-)	α (cm^{-1})	n (-)	l (-)	K_s ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)
Piasek	0,315	0,015	0,03745	3,523	1,7228	5000,0
Piasek pylasty	0,320	0,050	0,02460	1,814	0,7660	91,0
Gлина ciężka	0,340	0,000	0,01961	1,195	0,5000	2,0

gdzie:

K_s – współczynnik filtracji ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),

l – parametr glebowy (–),

α, n, m, Ψ – jak w równaniu (5).

Parametry wymagane w równaniach van Genuchtena i van Genuchtena-Mualem dla rozpatrywanych gleb zestawiono w tabeli 1.

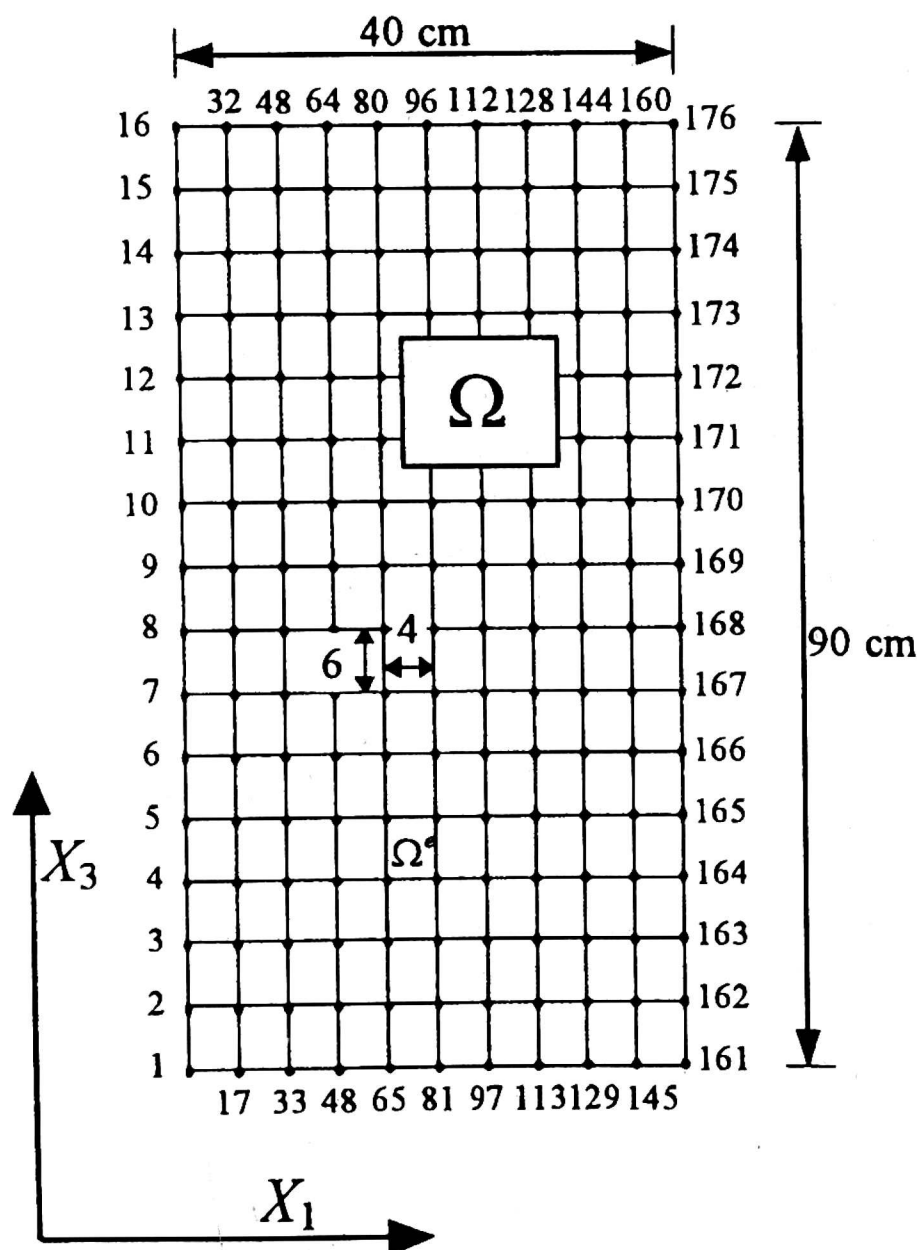
Procedura modelowania

Model FEMWAT wykorzystano do symulacji przebiegu zjawiska dwuwymiarowej infiltracji w profilu glebowym.

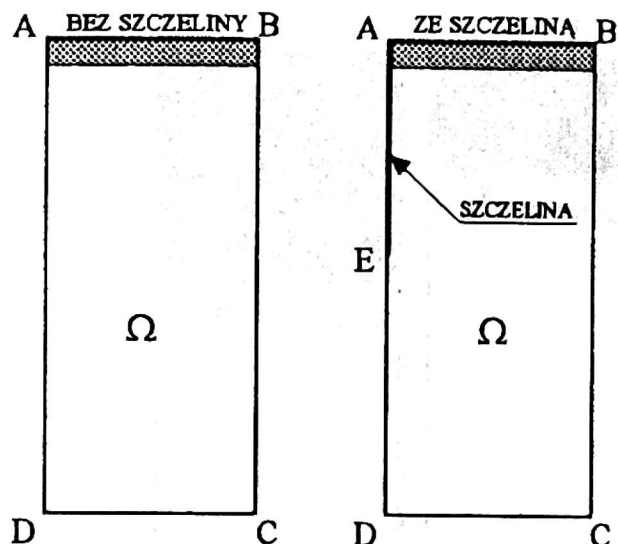
Sieć elementów skończonych użyta w procedurze symulacji składała się ze 150 czterowęzłowych elementów z 176 węzłami, gdzie całkowita szerokość i długość obszaru infiltracji wynosiły odpowiednio: 40 i 90 cm (wymiary poszczególnych elementów sieci wynosiły $\Delta X_1 = 4$ cm, i $\Delta X_3 = 6$ cm). Schemat sieci elementów skończonych dla regionu przepływu pokazano na rysunku 2.

W procesie symulacji rozpatrywano następujące dwa przypadki infiltracji:

- w profilu glebowym bez szczelin,



RYSUNEK 2. Schemat sieci elementów skończonych zastosowanej w procedurze symulacji



RYSUNEK 3. Warunki brzegowe przyjęte w procesie symulacji

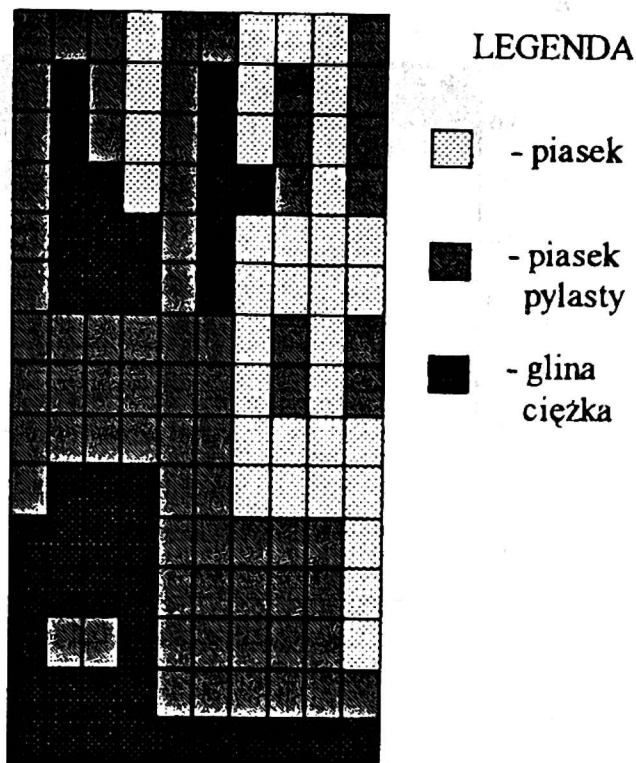
- w profilu glebowym ze szczeliną.

Schematy przepływu oraz warunki brzegowe przedstawiono na rysunku 3. Zastosowano następujące typy warunków brzegowych:

- na powierzchni profilu glebowego (AB) pierwszy typ warunku brzegowego ($\Psi = 0$),
- pierwszy typ warunków brzegowych użyto do opisu infiltracji ze szczeliny (AE, $\Psi > 0$),
- drugi typ warunku brzegowego ($q = 0$) użyto dla opisu pozostałych ograniczeń obszaru przepływu.

Takie sformułowanie warunków brzegowych może być odniesione do sytuacji polowej, kiedy szczelina została napełniona wodą w sposób natychmiastowy. Ciśnienie ssące $\Psi = 1000$ cm użyto jako warunek początkowy.

Symulację zmian uwilgotnienia gleby w procesie infiltracji przeprowadzono w następujących trzech różnych profilach glebowych: piasku pylastym (SS), glinie ciężkiej (HC) i glebie heterogenicznej (HE). Schemat profilu gleby heterogenicznej przedstawiono na rysunku 4.



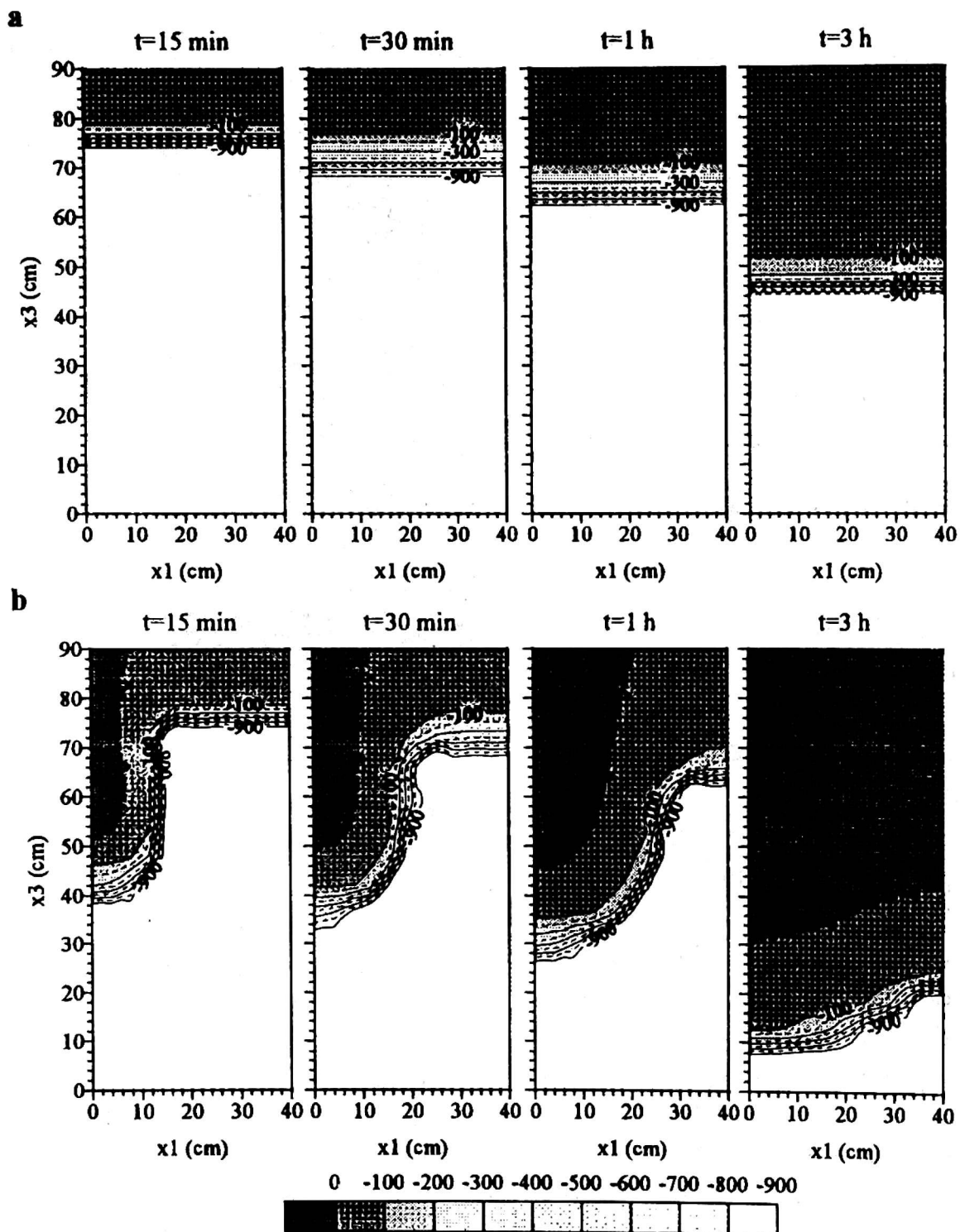
RYSUNEK 4. Schemat profilu gleby heterogenicznej

W procesie symulacji rozpatrywano następujące przypadki infiltracji:

- w piasku pylastym, w glinie ciężkiej oraz w heterogenicznym profilu glebowym bez szczeliny,
- w trzech rozpatrywanych profilach glebowych (piasku pylastym, glinie ciężkiej i glebie heterogenicznej), zawierających szczelinę głębokości 36 cm,
- w piasku pylastym zawierającym szczelinę różnej głębokości ($l = 18, 36$ i 72 cm).

Wyniki symulacji

Obliczony układ ciśnienia ssącego podczas infiltracji w piasku pylastym ze szczeliną (głębokości 36 cm) i bez szczeliny przedstawiono na rysunku 5. Na podstawie tego rysunku zauważyć można, że

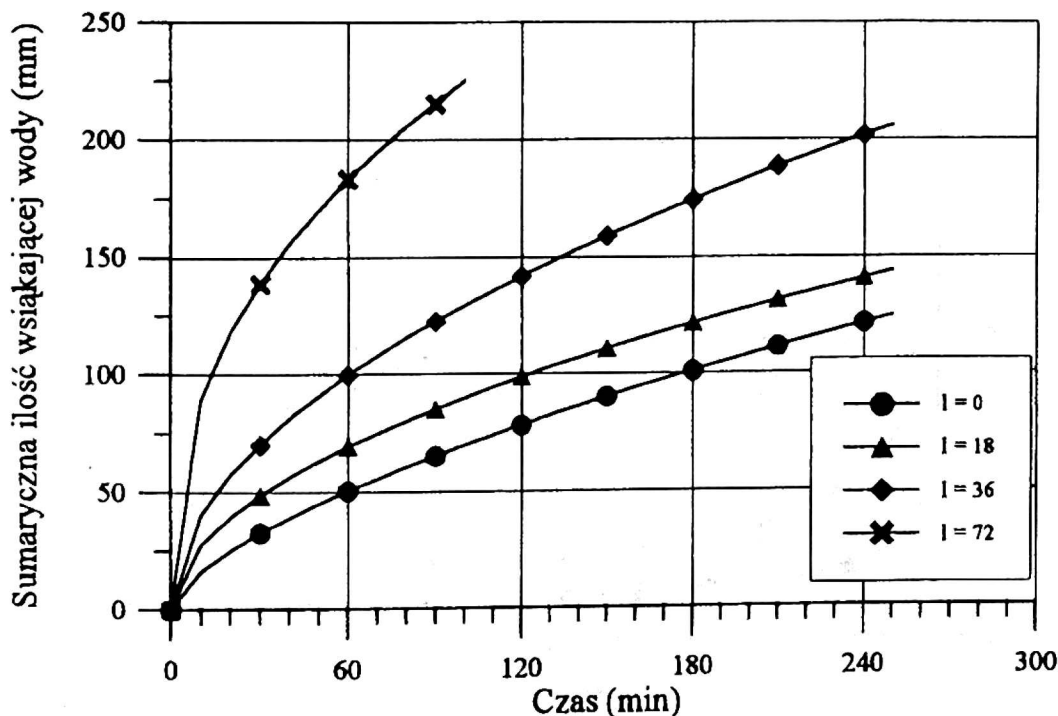
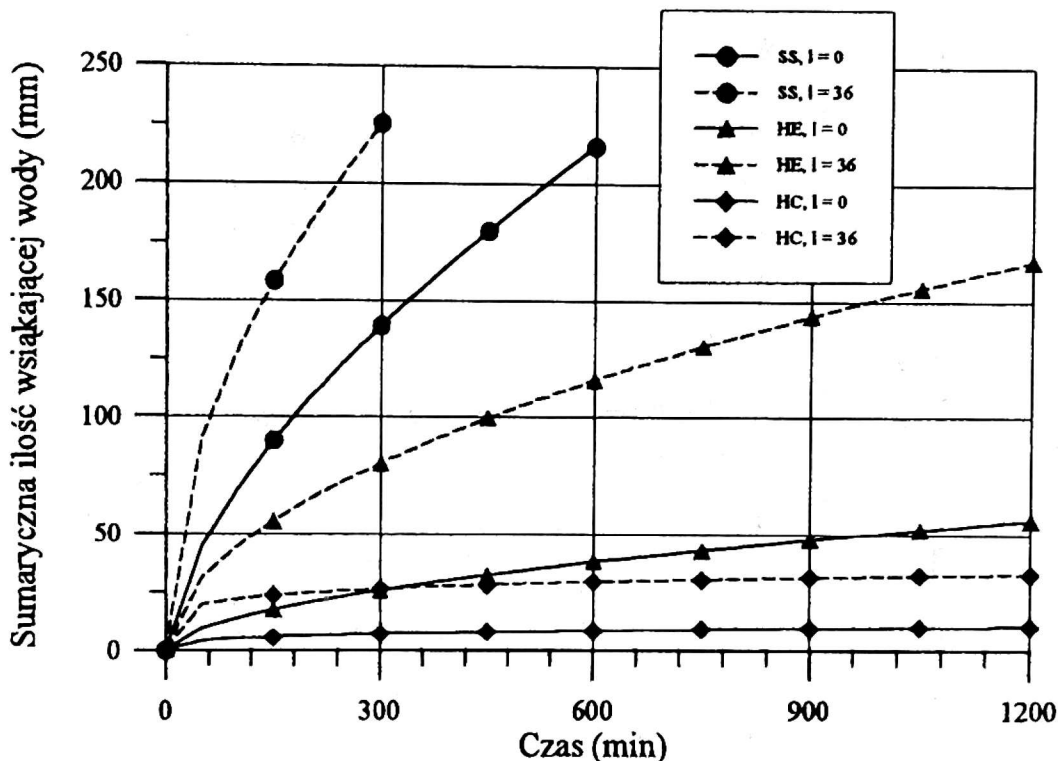


RYSUNEK 5. Układ ciśnień ssących w piasku pylastym bez szczeliny (a) oraz ze szczeliną (b) w różnych czasach (t) od rozpoczęcia infiltracji

szczelina znacząco modyfikuje ciśnienie ssące. Po trzech godzinach od momentu rozpoczęcia infiltracji profil glebowy z makroporą jest zwilżony do głębokości 80 cm w przeciwieństwie do profilu glebowego bez makropory, w którym zwilżenie następuje do głębokości 45 cm.

Na rysunku 6 przedstawiono sumowe ilości wsiąkającej wody w czasie dla trzech różnych profili glebowych (piasku pylastego, gleby heterogenicznej oraz gliny ciężkiej) bez szczeliny oraz posiadających szczelinę głębokości 36 cm. Spośród badanych gleb najszybciej woda

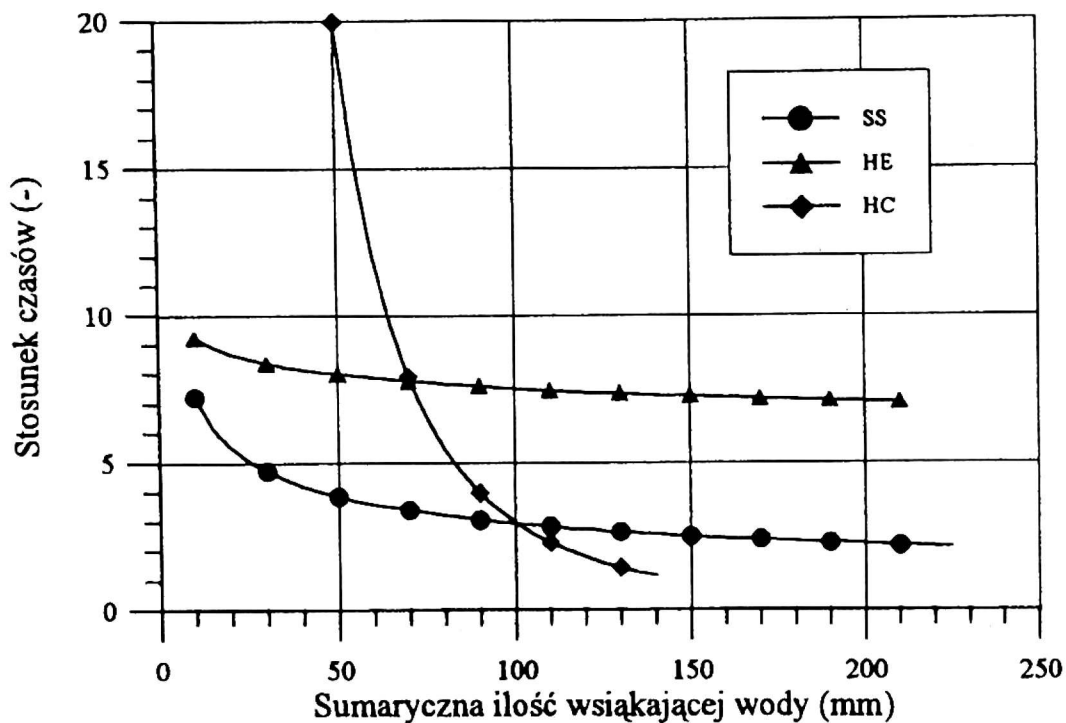
RYSUNEK 6. Krzywe sumowe ilości wsiąkającej wody dla piasku pylastego (SS), gleby heterogenicznej (HE) oraz gliny ciężkiej (HC) bez szczeliny i ze szczeliną długości 36 cm (1)



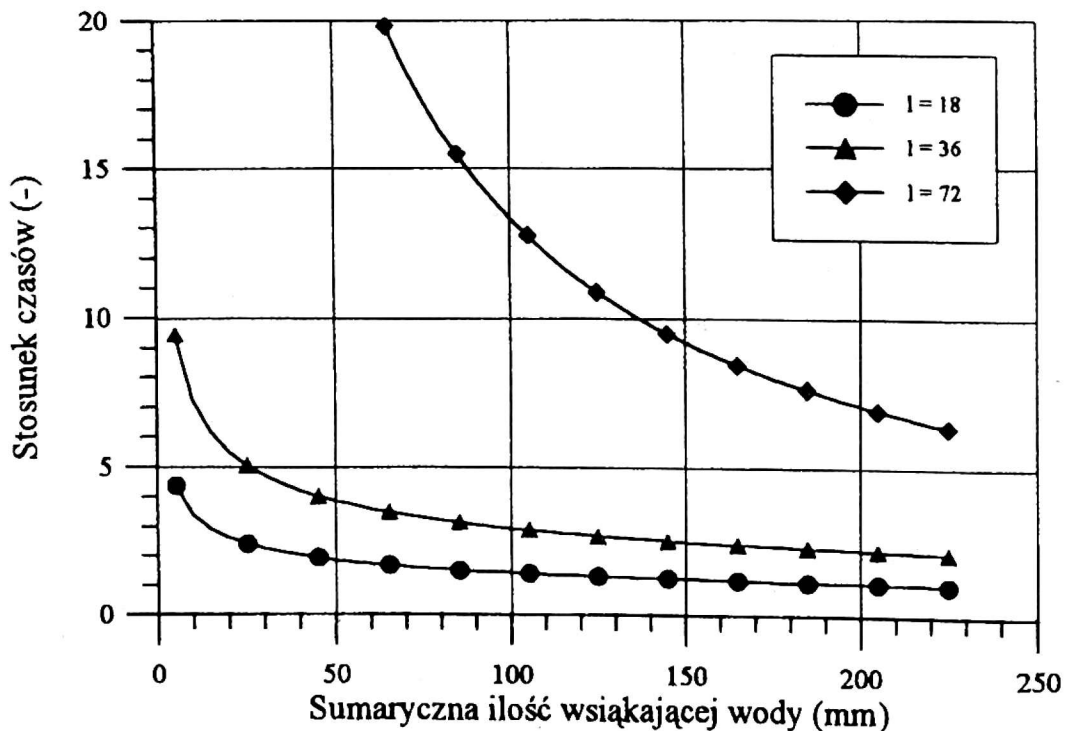
RYSUNEK 7. Krzywe sumowe ilości wsiąkającej wody dla piasku pylastego bez szczeliny i ze szczeliną różnej długości (1)

wsiąkała w piasku pylastym, zaś najwolniej w glinie ciężkiej. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach makropora przyspieszała infiltrację i jej wpływ na prędkość wsiąkającej wody do gleby uwidaczniał się już na samym początku procesu infiltracji.

Na rysunku 7 przedstawiono krzywe sumowe ilości wsiąkającej wody dla piasku pylastego z różną głębokością szczeliny. Z przedstawionych danych wynika, że wpływ głębokości szczeliny na ilość wsiąkającej wody jest znaczny. Wraz ze wzrostem głębokości szczeliny infiltracja



RYSUNEK 8. Krzywe zależności stosunków czasów od ilości infiltrującej wody dla różnych profili (SS – piasek pylasty, HE – gleba heterogeniczna, HC – glina ciężka) bez i z makroporą długości 36 cm



RYSUNEK 9. Krzywe zależności stosunków czasów od ilości infiltrującej wody dla piasku pylastego z różną głębokością makropory (l)

następuje szybciej, przy czym nie jest to zależność liniowa.

Relacje pomiędzy stosunkiem czasów (iloraz czasu wsiąkania określonej objętości wody do profilu glebowego z makroporą i czasu wsiąkania tej samej objętości wody do profilu glebowego bez

makropory) a sumaryczną ilością wsiąkającej wody dla trzech badanych gleb przedstawiono na rysunku 8. Z rysunku tego wynika, że stosunek czasów jest zależny od rodzaju gleby i można przypuszczać, że im gleba jest bardziej zwięzła, tym wpływ makropory na czas wsiąkania

wody jest większy. Największy stosunek czasów występuje w początkowym okresie infiltracji, co oznacza, że makropory szczególnie silnie zwiększają ilość wsiąkającej wody na początku procesu infiltracji.

Krzywe zależności stosunków czasów od sumarycznej ilości infiltrującej wody dla piasku pylastego z różną głębokością makropory glebowej przedstawiono na rys. 9. Z przedstawionych danych wynika, że im większa jest głębokość szczeliny, tym czas potrzebny do wsiąknięcia tej samej ilości wody do profilu glebowego posiadającego makroporę w porównaniu z profilem bez makropory jest wielokrotnie mniejszy. W miarę zwiększania się ilości wsiąkającej wody stosunek czasów maleje i nie jest to relacja liniowa.

Wnioski

1. W wyniku symulacji procesu infiltracji w trzech różnych glebach stwierdzono, że makropory znacznie modyfikują układ ciśnień ssących w profilach glebowych i zwiększają prędkość infiltracji.

2. Zależność pomiędzy stosunkiem czasów wsiąkania określonej objętości wody do profilu glebowego z makroporą i czasem wsiąkania tej samej objętości wody do profilu glebowego bez makropory a sumaryczną ilością wsiąkającej wody jest krzywoliniowa. Makropory szczególnie silnie zwiększają ilość wsiąkającej wody na początku procesu infiltracji i jest to zależne od rodzaju gleby.

3. Długość makropory w znacznym stopniu wpływa na prędkość infiltracji, która wzrasta wraz ze wzrostem długości makropory glebowej.

Literatura

- BEVEN K., GERMANN P. 1982: *Macropores and water flow in soils*. Water Resour. Res. 18; 1311–1325.
- GENUCHTEN M.Th. VAN 1980: *A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil. Soc. Am. J.: 44; 892–898.
- NUTZMANN G. 1986: *Isoparametric finite element analysis of transient unsaturated – saturated water table flow problems*. Acta Hydrophysica XXX; 137–159.
- Badania zrealizowano w ramach projektu Nr 5 P06H 019 08. "Środowiskowe skutki preferencyjnego przepływu wody w glebach o zmiennej geometrii" finansowanego przez KBN.

Summary

Modelling of infiltration in soils with macropores. The application of computer model FEM-WAT for the description of infiltration process for three different soil profiles was presented. The macropore was included in the model as a boundary condition. The examples of the results concerning distribution of soil moisture pressure heads in sandy soil without and with macropore as well as cumulative infiltration rates for considered three soils with the presence of macropore and without macropore were also presented. The influence of depth of the macropore on infiltration process was examined.

Authors' address

J. Szatyłowicz, T. Brandyk, P. Hewelke,
T. Gnatowski, D. Szejba

Warsaw Agricultural University – SGGW
02–787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166
Poland