

## A talaj kapilláris vezetőképességének számítása a pF-görbe alapján

RAJKAI KÁLMÁN

MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest

A talaj vízgazdálkodását, a rajta termesztett növények vízellátásának lehetőségeit elsősorban a talajfelszín és a talajvízszint közötti talajszelvényt felépítő, vízzel nem telített (háromfázisú) talajrétegek egymásutánisága, vastagsága és vízgazdálkodási tulajdonságai szabják meg. Ez utóbbiak közül legfontosabb a talaj nedvességtartalma, a talajnedvesség állapota (nedvességpotenciál), valamint a talaj folyadékfázisának mozgása. A talaj vízgazdálkodásának szabatos jellemzéséhez a felsorolt paraméterek kvantitatív adatain túlmenően szükség van azok térbeli eloszlásának és időbeni dinamizmusának, az ezt befolyásoló tényezőknek, azok hatásmechanizmusának ismeretére is. Ilyen részletes elemzés nyújt lehetőséget annak megállapítására, hogy a talaj vízgazdálkodását milyen mesterséges beavatkozásokkal tudjuk kedvező irányban megváltoztatni, így a növény optimális vízellátását biztosítani, illetve elősegíteni.

A talaj vízzel nem telített rétegeiben végbemenő folyadékmozgás egzakt ismerete elengedhetetlenül szükséges olyan gyakorlati problémák vizsgálatánál, mint a beszívárgás, az evaporáció, az aszályérzékenység, a talaj víz- és sóforgalma, a növény vízfelvétele, a növények vízellátása a talajvízből, a talajvízből történő sófelhalmozódás, a talaj anyag- és energiaforgalma stb.

A háromfázisú talajrétegekben végbemenő folyadékmozgás egzakt és kvantitatív leírásához mindenképp a talaj kapilláris vezetőképességének ( $k = \text{cm/nap}$ ) a tenzió ( $h = \text{vízoszlop cm}$ ), illetve a nedvességtartalom ( $\Theta = \text{térfogat-\%}$ ) függvényében történő meghatározására, tehát a  $k(h)$ , illetve  $k(\Theta)$  függvény ismeretére van szükség. Ennek meghatározása általában a nedvességtartalom ( $\Theta$ ) és a tenzió ( $h$ ) helyszínen vagy bolygatatlan szerkezetű talajmintákon a laboratóriumban elvégzett párhuzamos mérésével történik. Utóbbira az elmúlt években „infiltrációs” és „evaporációs” oszlopokon végzett mérésekre alapozott metodikai rendszert alkalmaztunk [18]. A kísérletileg meghatározott  $k(h)$  összefüggések alapján VÁRALLYAI [18] négylépcsős modellt fejlesztett ki, amelynek alkalmazásával az emelkedő (vagy ingadozó) talajvízszint feletti rétegezett talajszelvényekben végbemenő folyadékmozgás iránya és sebessége pontosan meghatározható, nyomon követhető, előre jelezhető.

A  $k(h)$  összefüggés közvetlen meghatározása — bármely módszerrel történik is — meglehetősen nehézkes, bonyolult, idő- és munkaigényes, sorozatvizsgálatokra nem alkalmas, különösen nehéz mechanikai összetételű, duzzadó agyagtalajok esetében. Ennek a következménye azután, hogy míg a talaj alapvető fizikai és vízgazdálkodási

tulajdonságaira (mechanikai összetétel, térfogatsúly, higroszkóposság, kötöttségi szám stb.) több tízezer, a pF-görbékre közel ezer mért adat áll rendelkezésre hazánkban, addig a  $k(h)$  összefüggésre alig ötven. Ez természetesen nem elegendő ahhoz, hogy ez a fontos paraméter a talajok vízgazdálkodásának kategória-rendszerébe már jelenleg is beépüljön, s a talaj vízgazdálkodását ábrázoló, különböző méretarányú térképeken feltüntetésre kerüljön. Pedig erre — mint ez az előbbiekből következik — a jövőben mindenképpen szükség lesz. Ilyen megfontolások alapján a  $k(h)$  összefüggés további közvetlen mérésén túlmenően kísérletet tettünk a függvény egyszerűbben mérhető vízgazdálkodási paraméterek alapján számítással történő közelítő meghatározására [20]. A kapilláris vezetőképesség-függvény számítására több lehetőség kínálkozik. A szakirodalomban a rendelkezésre álló módszerekről jól használható összefoglaló, értékelő munkák találhatók [4, 9, 13, 14].

A számítási módszerek két fő csoportra oszthatók. Az egyik a Kozeny-egyenlet telített és telítetlen talajokra történő alkalmazásán alapul. Eszerint a relatív hidraulikus vezetőképesség ( $k_r$ ) az effektív víztelítettség ( $S$ ) hatványfüggvénye:

$$k_r = k/K_{tel} = S^a. \quad (1)$$

Az effektív telítettség meghatározása a következő:

$$S = \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_{tel} - \Theta_r}, \quad (2)$$

ahol  $\Theta$  az aktuális,  $\Theta_{tel}$  a telítési,  $\Theta_r$  pedig a maradék nedvességtartalom.

$\Theta_r$  az a nedvességtartalom-érték, amelynél  $d\Theta/dh \approx 0$ . Ekkor a talaj kapilláris vezetőképessége közelítőleg nulla. Gyakorlati célokra kielégítő, ha  $\Theta_r$ -t nagy nedvességpotenciál-értéknél ( $10^6$  cm) olvassuk le a pF-görbéről. Általában ekkor már a nedvességpotenciál változása nem okoz jelentős változást a nedvességtartalomban, vagyis gyakorlatilag  $\Theta$  változása ebben a potenciáltartományban elhanyagolható.

AVERJANOV [1] javaslatára talajokra az (1) egyenlet kitevője (a) általában 3,5; míg IRMAY [8] elvi levezetése szerint 3,0; BROOKS és COREY [3], valamint BORELI és VACHAUD [2] az  $a = 3,5$  értéket tartották méréseik alapján megfelelőbbnek. Tapasztalataink szerint a módszer eredményesen használható hazai talajok esetén is [20]. Alkalmazásának megbízhatóságára csak nagyszámú mintaanyagon történt ellenőrzést követően lehetne tapasztalatot gyűjteni. A nehézséget ebben az esetben a kevés mért adat jelenti. Emiatt fizikailag megalapozottabb módszer kiválasztását tartjuk helyesebb megoldásnak. E kívánalomnak megfelel a számítási eljárások második csoportja, amely BURDINE [5], WYLLIE és GARDNER [21], FARELL és LARSON [7], MILLINGTON és QUIRK [11], valamint KUNZE et al. [10] közelítéseit foglalja magába. Ezeknél az eljárásoknál a vezetőképesség-függvény számításának az alapja a pF-görbe. A függvénykapcsolatot a BURDINE-egyenlet tartalmazza:

$$k_r(\Theta) = S^2 \int_{\Theta=0}^{\Theta} d\Theta/h^2 \bigg/ \int_{\Theta}^{\Theta_{tel}} d\Theta/h^2, \quad (3)$$

ahol  $h$  a nedvességpotenciál (vízoszlop cm).

Az ismertetésre kerülő eljárás a BURDINE [5] által kidolgozott, majd MUALEM [12] által továbbfejlesztett elveken alapul. A módszerhez szükséges paraméterek

előállításához VAN GENUCHTEN [17] zárt alak pF-pontokra illesztését javasolta és dolgozta ki. A zárt alak illesztése bonyolult és nagy számítógépet igényel. Emiatt a módszer a gyakorlatban nehézkes, nehezen alkalmazható. Az egyszerű kivitelezhetőség érdekében megadunk egy grafikus, főként tájékoztató jellegű információ nyerésére lehetőséget adó változatot. Kidolgoztuk a talaj pF-görbéjének leírására alkalmazott hatványfüggvény [19] e számítási módszerben történő alkalmazásának módját is.

### Anyag és módszer

A talaj relatív kapilláris vezetőképessége és nedvességtartalma közötti összefüggés leírására MUALEM [12] a következő egyenletet vezette be:

$$k_r(\Theta) = S^{1/2} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2, \quad (4)$$

ahol:

$k_r$  = a relatív kapilláris vezetőképesség;

$S$  = dimenzió nélküli nedvességtartalom a (2) egyenlet szerint számolva;

$m$  = kísérletileg meghatározott állandó.

A MUALEM-konceptió szerint a talaj relatív vezetőképessége és a nedvességpotenciál között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$k_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}}, \quad (5)$$

ahol:

$$\alpha = \frac{1}{h} (S^{-1/m} - 1)^{1-m}. \quad (6)$$

A (6) egyenletet (5)-be helyettesítve látható, hogy csupán az  $m$  paraméter ismerete szükséges  $k_r$  számításához, minthogy a feltételezés szerint:

$$m = 1 - 1/n. \quad (7)$$

Az  $m$  paraméter előállításához VAN GENUCHTEN [17] zárt alakú függvény pF-pontokra való illesztését dolgozta ki.

A javasolt függvény:

$$S = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m, \quad (8)$$

ahol:

$h$  = a nedvességpotenciál (vízoszlop cm);

$\alpha$ ,  $n$  és  $m$  konstansok.

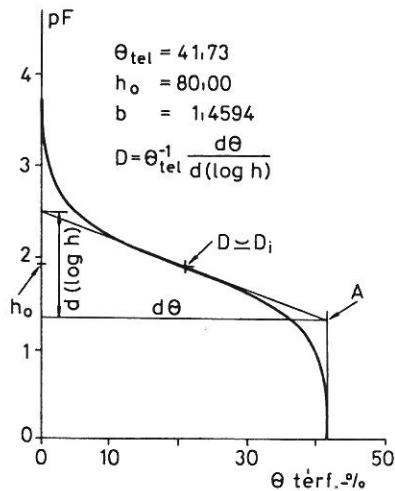
A (8) zárt alakból  $m$  számítható. Állítsuk elő a függvény differenciálját. Legyen

$$D = \frac{d\Theta}{d(\log h)}. \quad (9)$$

A differenciálást elvégezve:

$$D = 2,303 S \frac{m}{1-m} (1 - S^{1/m}). \quad (10)$$

$D$  értékét a pF-görbe ismeretében egyszerű grafikus úton is meg lehet határozni a kiválasztott értékekre (1. ábra).  $D$  értékét praktikusán a görbe inflexiós pontjában vagy a maximális nedvességtartalom felénél ( $\Theta_{tel}/2$ ) célszerű kiszámítani.



1. ábra

A modell paramétereinek grafikus ábrázolása. Független tengely: pF. Vizsgált tengely:  $\Theta$  térf.-%. A: metszéspont

Az összefüggés  $D$  és  $m$  között a pF-görbe inflexiós pontjában:

$$D_i = \frac{2,303}{1-m} \left[ \frac{m}{1+m} \right]^{m+1}. \quad (11)$$

Ekkor az inflexiós pont koordinátái a zárt alakból:

$$\Theta_i = \Theta_s \left[ \frac{m}{1+m} \right]^m \quad (12)$$

$$h_i = \frac{1}{\alpha} m^{m-1}, \quad (13)$$

ahol  $\Theta_i$  és  $h_i$  az inflexiós pont koordinátái.

A pF-görbe inflexiós pontjának vagy a maximális nedvességtartalom felének ismeretében  $D$  meghatározása szükséges  $m$  számításához.  $D$  meghatározásához a legegyszerűbben az 1. ábra szerinti grafikus úton juthatunk. A meghatározás módja ekkor a következő:

Az 1. ábra szerinti koordináta-rendszerbe a berajzolt pontokra szabadkézzel „görbét” illesztünk. A  $\log h=0$  (maximális nedvességtartalom-értéknek megfelelő) helyen a koordináta-rendszerbe az ordinátával párhuzamos egyenest rajzolunk.

A maximális nedvességtartalom feléhez tartozó  $h$ -nál metsszük a görbét. Ez a pont lesz a görbe inflexiós pontja,

$$\text{ha } \Theta_r = 0.$$

A ponthoz tartozó érintő egyenest berajzoljuk.

Ezt követően a vízszintes tengellyel párhuzamos egyenest húzunk az 1. ábra A pontjából az ordinátáig. Az így nyert ordinátaszakasz hosszát leolvassuk, és az 1. ábrán megadott képlet segítségével  $D$  értékét kiszámítjuk.

Megjegyezzük, hogy az ismertett eljárás bár gyors és egyszerű, ugyanakkor azonban a pF-görbe „illesztése” miatt pontatlan. A grafikus parametrizálás pontatlanságát tovább növelné, ha a kézzel rajzolt pF-görbéről kívánnánk  $\Theta_r$  értékét is leolvasni, ami az eredeti számításmenetben szükséges. Azért, hogy ezeket a hibákat elkerülhessük, javasoljuk a következő számításmenetet: A pF-görbe leírására alkalmazzuk a következő függvényt [19]:

$$\frac{\Theta}{\Theta_{tel}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_0}\right)^b}, \quad (14)$$

ahol:

$\Theta_{tel}$  a telített talaj nedvességtartalma (térfogat-%)

$h_0, b$  konstansok.

A (14) függvény egyszerűen illeszthető a mért pF-pontokra. Az illesztett függvény paramétereivel mind az inflexiós pont helye, mind deriváltja számítható.  $D_i$  értéke a (14) egyenletből:

$$D_i = \frac{4h_0}{b\Theta_{tel}}. \quad (15)$$

További egyszerűsítő feltételezésünk, hogy a maradék nedvesség mennyiségét a talajban közelítőleg nullának tekintjük. Ez a feltételezés CAMPBELL [6] szerint könnyű és középköttött talajokra jó közelítéssel teljesül.

Emiatt a (11) függvény inflexiós pontja éppen  $\Theta_{tel}/2$  abszcisszájú.

A számításmenet alkalmazhatóságának ellenőrzésére két, mechanikai összetételében különböző talajból vettünk mintát. A minták fontosabb kémiai és fizikai jellemzőit és a telített talaj vízvezető képességét az 1. táblázatban közöljük. A választott két talaj pF-értékeire illesztett (14) egyenlet paramétereit, és a mért különböző nedvességpotenciálhoz tartozó kapillaris vezetőképesség-értékekre illesztett Gardner-egyenlet (18, 21) paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

A további számításmenetre két variánst dolgoztunk ki. Az ún. korrekció nélküli eljárás első lépéseként a (14) egyenlet paramétereiből a (15) összefüggés segítségével kiszámítjuk  $D$  értékét.

$D$  ismeretében a (10) egyenletből egyszerű iteratív úton a kívánt pontossággal (egy ezred jelen esetben elegendő pontosság) meghatározzuk  $m$  értékét. A (6) egyenletbe

1. táblázat  
A vizsgált talajminták fontosabb fizikai és kémiai jellemzői

(1) Talajminta típusa és száma	pH	CaCO <sub>3</sub>	(2) Szer- ves anyag	(3) Tér- fogal- tömeg, g/cm <sup>3</sup>	(4) Mechanikai összetétel, %						(5) K cm/nap
					1 – 0,25	0,25 – 0,05	0,05 – 0,01	0,01 – 0,005	0,05 – 0,001	< 0,001	
					mm						
Karbonátos futóhomok 301	8,1	25,5	0,4	1,47	14,6	58,5	1,1	0,35	0,15	1,4	100
Karbonátos réti cser- nozjom 198	8,2	30,1	1,9	1,33	–	11,8	31,8	5,04	6,40	11,8	1,8

*m*-et helyettesítve  $\alpha$  számítható. Ekkor a (6) formula  $\Theta$  és *h* értéke egyenlő a (11) egyenlet  $\Theta_{tel}/2$  és  $h_0$  paramétereivel. Ezután  $k_r$  mint a nedvességtartalom ( $\Theta$ ) vagy a nedvességpotenciál (*h*) függvénye számítható a (4) és (5) egyenletek felhasználásával.

A (14) egyenlet inflexió pontja nem esik egybe a (8) zárt alakéval. Ezért a számításmenetben korrekciót hajtottunk végre.

2. táblázat  
A talajmintákra számított hidrodinamikai függvények paraméterei

(1) Talaj- minta száma	(2) pF-görbe paraméterei (a (14) egyenlet szerint)			(3) Mért kapillaris vezető- képesség függvény-para- méterek*			(4) Számított kapillaris vezető- képesség függvény-paraméterek			
	$\Theta_{tel}$	$h_0$	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$\alpha$	<i>m</i>	$\alpha_i$	$m_i$
301	41,73	80,0	1,4594	$8 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^5$	4,5	0,019	0,547	0,017	0,645
198	52,04	1352,6	0,5077	5600	5600	2,5	0,004	0,273	0,007	0,264

$$* k = \frac{a}{b + h^c} \text{ [18]}$$

Az *m* paraméter számításához *D* meghatározása után — amelyet most jelöljünk  $D_i$ -vel — a (11) összefüggést alkalmazzuk. Jelöljük az így meghatározott *m* paramétert  $m_i$ -vel. A (12) összefüggésből  $m_i$  ismeretében meghatározzuk  $\Theta_i$ -t, majd  $\Theta_i$  birtokában a (14) egyenlet felhasználásával  $h_i$ -t.  $h_i$  a (13) egyenletbe helyettesítve adja  $\alpha_i$ -t. Ezt követően  $m_i$  és  $\alpha_i$  behelyettesítésével számolható  $k_r^x(\Theta)$  vagy  $k_r^x(h)$  függvény.  $k^x$  jelentse a korrekcióval számított függvényt.  $k_r$  függvény ismeretében  $k(\Theta)$  vagy  $k(h)$  tényleges függvényei *K* ismeretében egyszerű beszorzással állíthatók elő:

$$k(\Theta) = K \cdot k_r(\Theta), \tag{16}$$

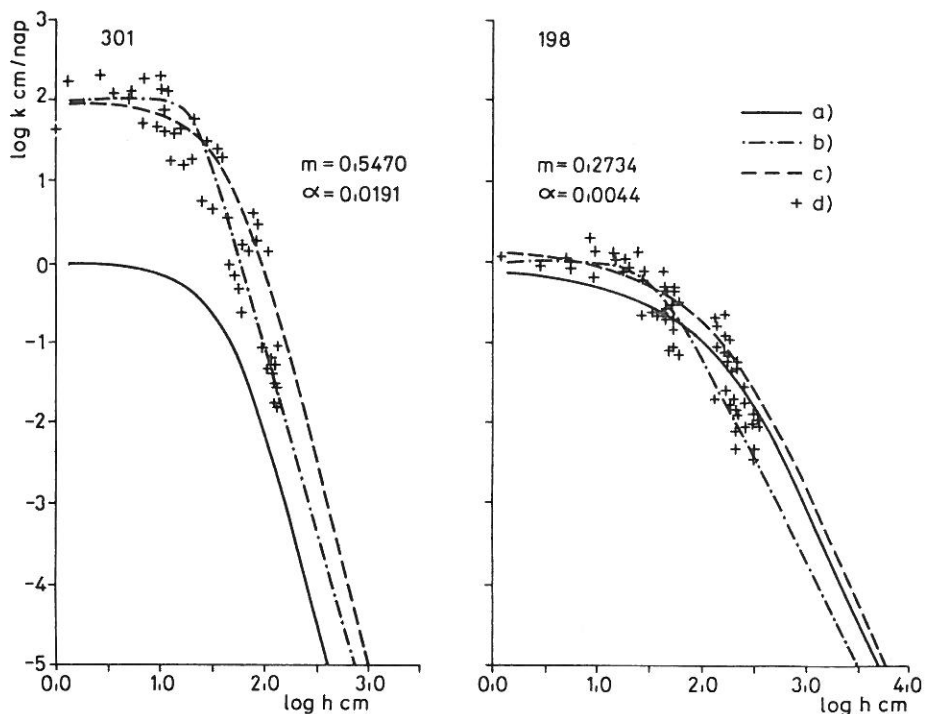
ahol: *K* a telített talaj vízvezető képessége (cm/nap).

### Eredmények és értékelés

Az ismertetett számítások eredményeit  $m$ ,  $\alpha$  és  $m_i$ ,  $\alpha_i$  értékeit a 2. táblázatban tüntettük fel. A talajmintákon meghatározott kapilláris vezetőképesség-görbéket, a korrekció nélkül számított relatív vezetőképesség- és a számított tényleges vezetőképesség-görbéket a 2. ábrán, míg a korrekcióval számított görbéket a 3. ábrán közöljük. A 4. ábrán a vizsgált talajok pF-görbéit adjuk meg.

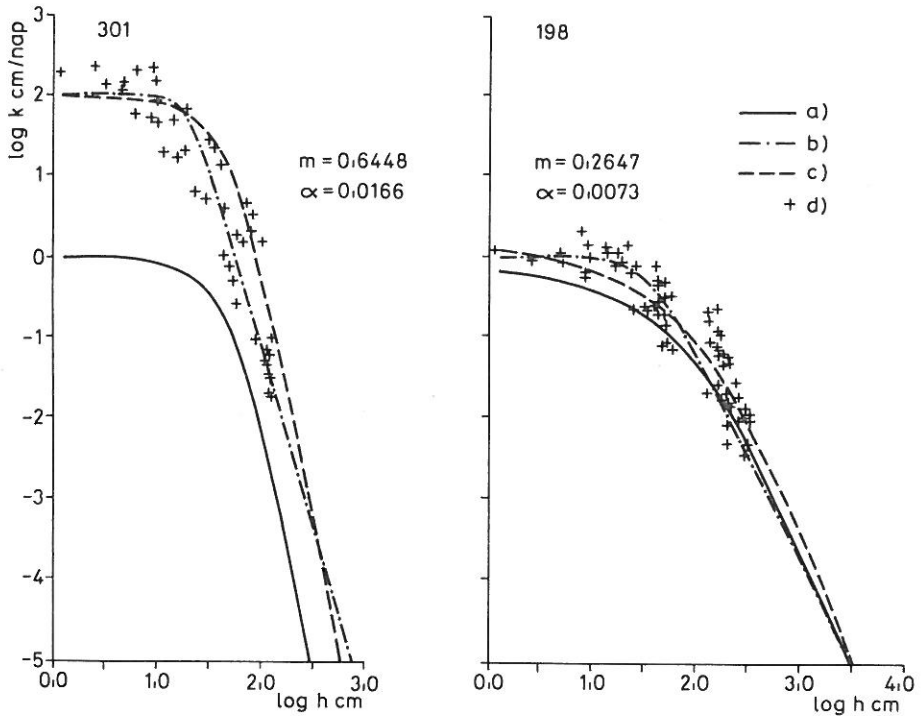
A mért és a számított kapilláris vezetőképesség-görbék közti eltérés nem számottevő, különösen akkor, ha a számított görbéket az ábrákon szintén feltüntetett mérési pontokkal vetjük egybe.

Minden elvi módszer, közelítés próbája a gyakorlat. A talaj kapilláris vezetőképességének kísérletes meghatározása azonban számos hibával terhelt, ezért a mérési eredmények megbízhatósága általában kicsi. Ez a tapasztalat különösen igaz akkor, amikor a kapilláris vezetőképesség-görbét a teljes nedvességpotenciáltartományban egyetlen talajmintán kívánjuk meghatározni. A talaj vízvezetőképesség-értékeinek megbízhatóságára irányuló vizsgálatok szerint egy aktuális mért érték hibája plusz-mínusz egy nagyságrend [13].



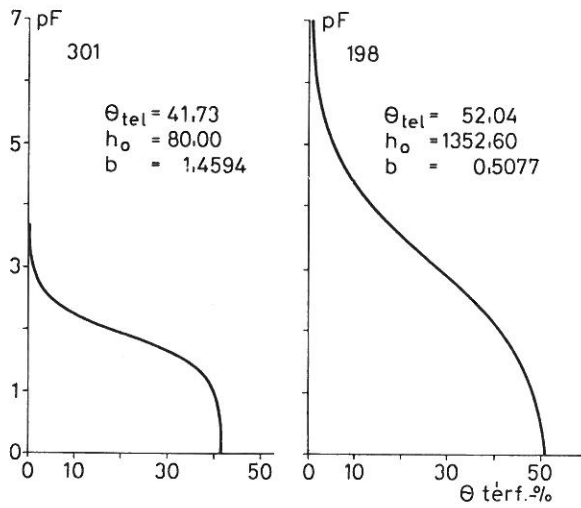
2. ábra

A vizsgált talajok mért és korrekció nélkül számított kapilláris vízvezetőképesség-görbéi. Független tengely:  $\log k$ , cm/nap. Vízszintes tengely:  $\log h$ , cm. a)  $k$  relatív; b)  $k$  mért; c)  $k$  számított; d) mérési pont



3. ábra

A vizsgált talajok mért és korrekcióval számított kapilláris vezetőképesség-görbéi. Jelzések: lásd 2. ábra



4. ábra

A vizsgált talajok pF-görbéi. Fügőleges tengely: log h, cm. Vízszintes tengely:  $\theta$  térf.-%



Tekintettel a talaj hidraulikus és kapilláris vezetőképesség-értékeinek mérési bizonytalanságára, a módszerek bonyolultságára, idő- és költségigényére, a számítással történő meghatározás mindenképp alkalmas — ha nem is abszolút módszerként — tájékoztató információ nyerésére. A talaj kapilláris vezetőképességének ismerete az adott nedvességtartományban (nedvességpotenciál-tartományban) végbemenő oldatmozgás intenzitásának a becslésében nélkülözhetetlen. Hozzávetőleges ismerete mind a mezőgazdasági gyakorlat (drénrendszerek tervezése, szivárgási sebességek számítása, öntözési gyakorlat, növényi vízellátás stb.), mind a talajtan és ökológia területén alapvető jelentőségű az anyagforgalmi folyamatok leírásában és értelmezésében. A legutolsó, érvényben levő, a mezőgazdasági gyakorlatban betartandó Talajfizikai Szabvány [16] tartalmazza a talaj pF-görbéjének és telítési vízvezető képességének meghatározási előírásait. Ebből következik, hogy az említett módszerek „rutin” talajvizsgálati eljárásokká válásával és a közölt számítási eljárással a talaj kapilláris vezetőképesség-görbéje a gyakorlatban is széles körűen előállítható és használható talajparaméterré válhat.

### Összefoglalás

A talajban végbemenő víz- és oldatmozgás leírásához, adott határfeltételek közötti számíthatóságához alapvetően a talaj hidrodinamikai tulajdonságainak ismeretére van szükség. A talajnedvesség összpotenciálját leíró pF-görbe, és a talaj kapilláris vezetőképesség függvény ismerete mind elméleti, mind gyakorlati szempontból alapvető.

A kapilláris vezetőképesség-függvény számításal történő meghatározását a mérési technikák bonyolultsága, idő- és költségigénye, valamint ezen technikák sorozatvizsgálatra való alkalmatlansága indokolja. Ennek megvalósítása érdekében számítási módszert javasolunk, amely a talaj pF-görbéjének ismeretén alapul. A számításmenethez a talaj pF-görbéjének leírására általunk korábban alkalmazott függvény közvetlen felhasználhatóságát dolgoztuk ki. Az egyszerű kivitelezhetőség érdekében a modellben szükséges ún. *maradék nedvességtartalmat* — amelynek meghatározása sem elvi, sem gyakorlati szempontból nem egyértelmű — nullának vettük ( $\Theta_r = 0$ ). Az általunk javasolt függvény pF-pontokra illesztése az eredetileg javasolt zárt alakhoz képest szintén egyszerűsítést jelent. Kidolgoztuk a számítási eljárásokhoz szükséges paraméterek ún. grafikus úton történő előállítását is.

A számításmenet alkalmazhatóságának ellenőrzésére két, mechanikai összetételben különböző talajmintát választottunk, amelyekre összehasonlítottuk a mért, és a számítással nyert kapilláris vezetőképesség-függvényeket.

A kapott eredmények alapján, valamint a javasolt számítási módszer fizikai alapjainak ismeretében a közös számítási módszer mind gyakorlati, mind laboratóriumi körülmények között alkalmazható.

Irodalom

- [1] AVERJANOV, S. F.: About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation. Eng. Collect. 7. 1950.
- [2] BORELI, M. & VACHAUD, G.: Notes sur la détermination de la teneur en eau résiduelle et sur la variation de la perméabilité relative dans les sols non saturés. C. R. Acad. Sci. 263. 698—701. 1966.
- [3] BROOKS, R. H. & COREY, A. T.: Properties of porous media affecting fluid flow. J. Irrig. Drain. Div. Amer. Soc. Civil. Eng. 92. 61—88. 1966.
- [4] BRUTSAERT, W.: Some methods of calculating unsaturated permeability. Trans. ASAE. 10. 400—404. 1967.
- [5] BURDINE, N. T.: Relative permeability calculation from size distribution data. Trans. AIME. 198. 71—78. 1953.
- [6] CAMPBELL, G. S.: A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117. 311—317. 1974.
- [7] FARELL, D. A. & LARSON, W. E.: Modelling the pore structure of porous media. Water Resour. Res. 8. 699—706. 1972.
- [8] IRMAY, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. EOS. Trans. AGU. 35. 463—467. 1954.
- [9] KLUTE, A.: The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. Soil Sci. 113. 264—276. 1972.
- [10] KUNZE, R. J., UAHERA, G. & GRAHAM, K.: Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32. 760—765. 1968.
- [11] MILLINGTON, R. J. & QUIRK, J. P.: Permeability of porous solids. Trans. Faraday Soc. 57. 1200—1206. 1961.
- [12] MUALEM, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12. 513—522. 1976.
- [13] NIELSEN, D. R., BIGGAR, J. M. & EARTH, K. T.: Spatial variability of field-measured soil-water properties. Hilgardia. 42. 215—259. 1973.
- [14] RAGAB, R., FEYEN, J. & HILLEL, D.: Comparative study of numerical and laboratory methods for determining the hydraulic conductivity function on sand. Soil Sci. 131. 375—388. 1981.
- [15] RAJKAI K. et al.: pF-görbék számítása a talaj mechanikai összetétele és térfogattömege alapján. Agrokémia és Talajtan. 30. 409—438. 1981.
- [16] A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata. MÉM Szabvány (MÉMSz. 206), Budapest, 1978.
- [17] VAN GENUCHTEN, R.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. Re. Report No. 78-WR-08. Princeton Univ., Princeton, N. J. 1979.
- [18] VÁRALLYAY Gy.: Háromfázisú talajrétegekben végbemenő vízmozgás tanulmányozása. Agrokémia és Talajtan. 23. 261—296. 1974.
- [19] VÁRALLYAY Gy. et al.: A pF-görbék matematikai leírása. Agrokémia és Talajtan. 28. 3—14. 1979.
- [20] VÁRALLYAY Gy. & RAJKAI K.: Háromfázisú talajok kapillaris vezetőképességének közelítő számítása a pF-görbékből. Mezőg. Vizg. Kut. Magyarországon. 1978. VITUKI Közl. 54—58. 1979.
- [21] WYLLIE, M. R. & GARDNER, G. H. F.: The generalised Kozeny-Carman equation. World Oil. 146. 210—228. 1958.

Érkezett: 1983. május 4.

## A Method for Calculating the Capillary Conductivity of the Soil on the Basis of the Water Retention (pF) Curve

K. RAJKAI

Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest

### Summary

The knowledge of the capillary conductivity data is indispensable in estimating the intensity of water movement within a given moisture range (range of moisture potential) in the soil. This knowledge, even if approximative, is essential for the description and interpretation of material transport processes important for both agricultural practice and soil scientific and ecological studies.

Because of the uncertainty of the measured values of capillary conductivities, as well as the complexity and the high cost in time and money of the various direct measurements, the calculation of these values — even if it cannot be considered as an absolute method — is very useful in obtaining practical information.

From among the methods known, MUALEM's model (equation (14)) assuming the knowledge of the water retention (pF) curve of the soil has been selected and combined with our model describing the pF curve [19].

It is assumed that the so-called residual water content of the soil is zero — a simplification as compared to the calculation method suggested by VAN GENUCHTEN [17]. This way the capillary conductivity function of the soil can be calculated quite simply if the parameters of equation (14) are known and the hydraulic conductivity value of the soil has been measured.

The conductivity functions measured in Hungarian soil samples and calculated in the suggested way have proved the practicability of the method. Naturally, its wide-spread use must be preceded by validation based on an adequate number of representative soil samples.

*Table 1.* Relevant physical and chemical characteristics of the soil samples. (1) No. and soil type of the sample (301—calcareous blown sand; 198—calcareous meadow chernozem). (2) Organic matter content, %. (3) Bulk density, g/cm<sup>3</sup>. (4) Mechanical composition, % (particle diameter in mm). (5) Water conductivity of the saturated soil, cm/day.

*Table 2.* Parameters of the hydrodynamic functions calculated for the soil samples. (1) No. of soil sample. (2) Parameters of the water retention (pF) curve (according to equation (14)).  $\theta_{iel}$ ,  $h_0$ ,  $b$ : constants of equation (14). (3) Parameters of the capillary conductivity function.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ : parameters of the Gardner-equation. (4) Calculated parameters of the capillary conductivity function.  $\alpha$ ,  $m$ : parameters of equation (5);  $\alpha_i$ ,  $m_i$ : parameters calculated on the basis of equations (12) and (13), given for the inflexion point.

*Fig. 1.* Graphic representation of the model's parameters. Vertical axis: pF. Horizontal axis:  $\theta$  volume %. A. point of intersection.

*Fig. 2.* Graphs of the measured and calculated (non-corrected) capillary conductivities of the soil samples. Vertical axis:  $\lg k$ , cm/day. Horizontal axis:  $\lg h$ , cm. a)  $k$  relative; b)  $k$  calculated; d) measured data.

*Fig. 3.* Graphs of the measured and calculated (corrected) capillary conductivities of the soil samples. For the legend see Fig. 2.

*Fig. 4.* Water retention (pF) curves of the soil samples. Vertical axis:  $\lg h$ , cm. Horizontal axis:  $\theta$  volume %.

## Berechnung der kapillaren Wasserleitfähigkeit der Böden mit Hilfe der pF-Kurven

K. RAJKAI

Forschungsinstitut für Bodenkunde und Agrikulturchemie der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest

### Zusammenfassung

Die Kenntnis der kapillaren Wasserleitfähigkeit der Böden ist zur Schätzung der Intensität der Wasserbewegung, die im Boden in einem gegebenen Feuchtigkeitsbereich (bzw. Feuchtigkeitspotentialbereich) stattfindet, unentbehrlich. Ihre annähernde Kenntnis ist auf dem Gebiet der Landwirtschaft, der Bodenkunde und der Ökologie bei der Beschreibung und Erklärung der Stoffumsatzvorgänge von grundlegender Bedeutung.

Da die direkte Bestimmung der kapillaren Leitfähigkeit der Böden nur ungenau durchgeführt werden kann, die dazu dienenden Verfahren kompliziert ausführbar sind und ausserdem noch viel Zeit und hohe Kosten beanspruchen, ist eine Bestimmung derselben durch Berechnung — wenn auch nicht als absolute Methode — jedoch um Informationen zu gewinnen, äusserst geeignet.

Unter den zur Verfügung stehenden Rechenverfahren wurde jenes von MUALEM weiterentwickeltes Modell (Gleichung 14) gewählt, das die Kenntnis der pF-Kurven der Böden voraussetzt. Dieses Modell haben wir mit unserem früheren, die pF-Kurven beschreibenden Modell verbunden [19].

Im Gegensatz zum Berechnungsverfahren nach VAN GENUCHTEN [17] ist laut unserer vereinfachenden Annahme der s.g. Rest-Feuchtigkeitsgehalt der Böden gleich Null.

In Kenntnis der Parameter von Gleichung (14) — mit Annahme der Vereinfachung — ist nach Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit der Böden die Funktion der kapillaren Leitfähigkeit sehr einfach zu berechnen.

Die Verwendbarkeit dieser Methode wurde durch einen Vergleich der an ungarischen Bodenproben gemessenen und der mit dem vorgeschlagenen Verfahren berechneten Funktionen der kapillaren Leitfähigkeit bestätigt. Bevor die vorgeschlagene Methode in weiten Kreisen verwendet werden kann, muss natürlich an einer entsprechenden Anzahl repräsentativer Proben die Kalibrierung der Methode vorgenommen werden.

*Tab. 1.* Wichtigere physikalische und chemische Kennwerte der untersuchten Bodenproben. (1) Bezeichnung und Typ der Bodenprobe (301 — karbonathaltiger Flugsand; 198 — karbonathaltiger Wiesenschernosem). (2) Organische Substanz, %. (3) Lagerungsdichte, g/cm<sup>3</sup>. (4) Körnung, %. (5) Wasserleitfähigkeit des gesättigten Bodens, cm/Tag.

*Tab. 2.* Parameter der für die Bodenproben berechneten hydrodynamischen Funktionen. (1) Bezeichnung der Bodenproben. (2) Parameter der pF-Kurven (nach Gleichung (14)).  $\theta_{tel}$ ,  $h_0$ ,  $b$ : durch Versuche bestimmte Konstanten der Gleichung (14). (3) Parameter der Funktion der kapillaren Leitfähigkeit.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ : Parameter der Gardner'schen Gleichung. (4) Parameter der Funktion der berechneten kapillaren Leitfähigkeit.  $\alpha$ ,  $m$ : Parameter der Gleichung (5);  $\alpha_1$ ,  $m_1$ : aufgrund der für den Inflexionspunkt gegebenen Lösung (der Gleichung (12, 13)) berechneten Parameter.

*Abb. 1.* Graphische Darstellung der Parameter des Modells. Ordinate: pF-Werte. Abscisse:  $\theta$  Vol. %. A: Schnittpunkt.

*Abb. 2.* Kurven der gemessenen und ohne Korrektion berechneten kapillaren Leitfähigkeit der untersuchten Bodenproben. Ordinate:  $\log k$ , cm/Tag. Abscisse:  $\log h$ , cm. a) relativer  $k$ -Wert; b) gemessener  $k$ -Wert; c) berechneter  $k$ -Wert; d) Messpunkt.

*Abb. 3.* Kurven der gemessenen und mit Anwendung der Korrektion berechneten kapillaren Leitfähigkeit der untersuchten Bodenproben. Bezeichnungen: s. Abb. 2.

*Abb. 4.* pF-Kurven der untersuchten Böden. Ordinate:  $\log h$ , cm. Abscisse:  $\theta$  Vol. %.

## Расчёт капиллярной водопродности по кривым рF

К. РАЙКАИ

Научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии Венгерской Академии Наук, Будапешт

### Резюме

В оценке интенсивности передвижения воды в определенных пределах влажности (в области потенциала влаги) необходимо знать капиллярную водопродность почвы. Приблизительное знание этого имеет решающее значение в описании и толковании процессов переноса веществ как в области сельского хозяйства, так и в области почвоведения и экологии.

Принимая во внимание неустойчивость определения капиллярной водопродности почв путем прямого измерения, сложность методов измерения, затрату времени и расходы, во всех случаях применимо определение расчётным путем, хотя и не как абсолютный метод получения данных информативного характера. Из методов расчётов мы выбрали модель, базирующуюся на кривых рF, модифицированную Муалем (уравнение 14) и связали её с нашими ранними моделями, описывающими кривые рF [19]. По сравнению с методом расчёта, предложенным Ван Генухтен [17], для упрощения предположили, что содержание т. н. остаточной влаги равно нулю.

Зная параметры уравнения [14], вводя указанное упрощение, определив величину измеренной гидравлической проводимости, можно быстро рассчитать функцию капиллярной водопродности почв.

Измеренные и рассчитанные для венгерских почв функции капиллярной водопродности подтверждают применимость указанного метода. Естественно, широкому внедрению должно предшествовать определение действительности при использовании определенного количества репрезентирующих образцов.

*Табл. 1.* Наиболее важные физические и химические свойства изученных почвенных образцов. (1) Номер почвенного образца и тип почвы (301 — карбонатный сыпучий песок; 198 — карбонатный луговой чернозем). (2) Органическое вещество, %. (3) Объемная масса, г/см<sup>3</sup>. (4) Механический состав, %. (5) Водопродность насыщенной почвы, см/день.

*Табл. 2.* Параметры гидродинамических функций, рассчитанные для почвенных образцов. (1) Номер образца. (2) Параметры кривых рF (по уравнению [14]).  $\Theta_{tel}$ ,  $h_0$ ,  $b$ : постоянные, определенные для уравнения [14] экспериментальным путем. (3) Параметры функции капиллярной водопродности.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ : параметры уравнения Гарднера. (4) Параметры функции рассчитанной капиллярной водопродности.  $\alpha$   $m$ : параметры уравнения (5);  $\alpha_i$ ,  $m_i$ : параметры, рассчитанные на основе решения, данного для точки рефлексии (уравнения [12, 13]).

*Рис. 1.* Графическое изображение параметров модели. По вертикальной оси: рF. По горизонтальной оси:  $\Theta$  в объем. %. А: точка пересечения.

*Рис. 2.* Кривые капиллярной водопродности измеренные и рассчитанные без поправки для изученных почв. По вертикальной оси:  $\log k$ , см/день. По горизонтальной оси:  $\log h$ , см. а)  $k$  относительная. б)  $k$  измеренная. в)  $k$  рассчитанная. д) точка измерения.

*Рис. 3.* Кривые капиллярной водопродности измеренные и рассчитанные с поправкой для изученных почв. Обозначения смотри на рис. 2.

*Рис. 4.* Кривые рF для изученных почв. По вертикальной оси:  $\log h$ , см. По горизонтальной оси:  $\Theta$  объем. %.