

# K problematike rýchleho prenosu kontaminantov cez pôdu do podzemnej vody

*L. Lichner: On the Rapid Transport of Contaminants Through Soils into Groundwater. Život. Prostr., Vol. 30., No. 6, 318–321, 1996.*

Rapid transport of contaminants through the unsaturated zone of soils owing to macropore flow has an unpropitious effect on the groundwater quality. Soil macropores will be active only in the case if two conditions of macropore flow are fulfilled: the macropore network is open on the soil surface and rain (or irrigation) intensity exceeds a threshold value. If the intensity of irrigation following an application of agricultural chemicals is less than the saturated hydraulic conductivity of soil matrix, the chemicals will not be washed off from the soil surface with no benefit for plants but they will be settled in relatively immobile water in soil matrix. Destruction of macropore openings at the soil surface (e. g., by ploughing) also prevents a rapid macropore flow of chemicals into groundwater.

Rýchly prenos rozpustených látok cez nenasýtenú zónu pôdy je nevýhodný z ekologického i ekonomického hľadiska. Veľká rýchlosť prenosu umelých hnojív koreňovou zónou spôsobuje malú efektívnosť hnojenia a navyše sa podieľa na znečisťovaní podzemnej vody. Rýchly prenos rozpustených látok v telese skládky a v jej podloží (napr. cez ílovité tesnenie, vysušené a rozpukané v priebehu prevádzkovania skládky) môže mať z hľadiska kvality podzemnej vody katastrofálne následky. A práve znepokojivý rast znečistenia podzemnej vody podmienil prehodnotenie doterajších predstáv o prenose rozpustených látok v nenasýtenej zóne pôdy.

## Pôdne makropóry

Pôda je subjektom fyzikálnych, chemických a biologických procesov, ktorých dôsledkom je vývoj jej štruktúry. Z hydrologického hľadiska to možno interpretovať ako prítomnosť makropórov, ktoré sú spojené na značné vzdialenosti a dovoľujú, aby prúdiaca voda obtekala časti pôdnej matrice (Beven, 1991) rýchlosťou, ktorá je o niekoľko rádov vyššia než rýchlosť prúdenia vody v póroch matrice.

Na základe morfológie možno makropóry rozdeliť do troch skupín:

1. *Póry vytvorené pôdnou faunou.* Majú tvar trubice s priemerom 1–50 mm a koncentrujú sa v blízkosti povrchu, ojedinele však siahajú až do hĺbky 10 m (Beven, Germann, 1982). Vlhkostné podmienky a pH pôdy ovplyvňujú zloženie pôdnej fauny. V kyslých pôdach prevláda hmyz, zatiaľ čo dažďovky uprednostňujú slabokyslé až neutrálnu pôdu.

2. *Póry vytvorené koreňmi rastlín.* Aj tieto majú tvar trubice, avšak často bývajú vyplnené zvyškami rozloženého koreňa. Nové korene majú tendenciu rásť v kanálikoch vytvorených odumretými časťami. Póry, vytvorené pôdnou faunou alebo koreňmi rastlín, majú aj spoločný názov *biopóry*.

3. *Trhlíny a pukliny (plošné póry).* Vytvorí sa buď zmršťovaním pôdy, sprevádzajúcim proces sušenia ílovitých pôd, alebo chemickým zvetrávaním podložnej horniny. Ak sa v ílovej pôde vytvorí trhlina, vyskytuje sa v tej istej polohe počas mnohých cyklov navlhčovania a sušenia, čo často využívajú korene a pôdna fauna. Plošné póry sa môžu pri napučívaní pôdy s vysokou hodnotou lineárnej rozťažnosti uzavrieť (závisí to od drsnosti stien – uzavriú sa trhlíny s hladkými stenami), biopóry však zostávajú väčšinou otvorené (Bouma a kol., 1982).

## Prúdenie vody v pôde s makropórmami

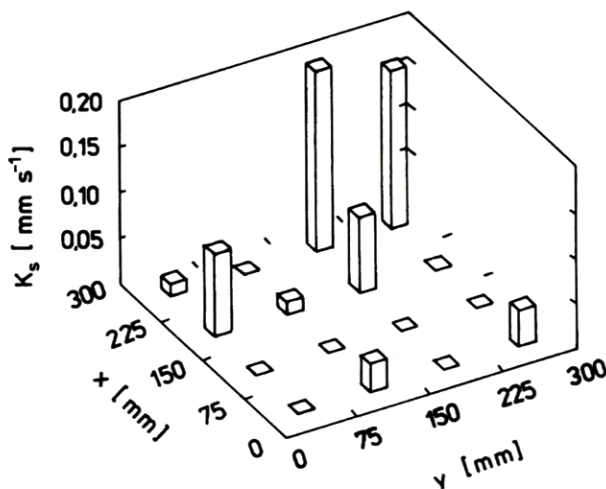
Makropóry tvoria len malú časť celkovej pórovitosti pôdy (obvykle menej ako 5 %), majú však podstatný vplyv na prúdenie vody. Prúdenie vody makropórmami závisí skôr od rozdielnosti priemerov pórov v makropórovej a matricovej doméne, než od ich priemeru. Informácia, že priemer póru prevyšuje nejakú hodnotu ešte neznamená, že ním bude prúdiť voda. Prúdenie podmieňuje vertikálna spojitosť makropórov (makropórová sieť) a otvorenie makropóru na povrchu pôdy. Okrem toho musí byť prekročená kritická (prahová) výška výtopy na povrchu pôdy, pričom hodnota criticalkej výšky závisí od mikroreliefu. Výtopa sa na povrchu pôdy vytvorí vtedy, keď je intenzita závlahy alebo zrážky väčšia ako nasýtená hydraulická vodivosť pôdnej matrice.

Na základe týchto poznatkov nastali zmeny v klasifikáciách pôdných pórov. Odmietlo sa ich rozdelenie podľa veľkosti (priemeru) na mikropóry, mezopóry a makropóry a pristúpilo sa k ich rozdeleniu na základe ich funkcie. V klasifikácii, ktorú navrhol Skopp (1981), makropórovosť označuje taký pórový priestor, cez ktorý sa voda a v nej rozpustené látky pohybujú relatívne veľkou rýchlosťou, pričom miešanie s pôdnym roztokom v matrici a prenos rozpustenej látky do pórov matrice sú veľmi obmedzené. Matricová pórovitosť zasa označuje pórový priestor, ktorý prenáša vodu a v nej rozpustené látky malou rýchlosťou (niekoľkonásobne menšou než je rýchlosť prúdenia vody v makropóroch), čo má za následok rozsiahle miešanie a pomerne rýchly prenos rozpustenej látky medzi rôznymi pórmami. Toto rozdelenie pôdných pórov na dve domény s výrazne odlišnými vlastnosťami, t. j. na makropórovú a matricovú doménu, ukázalo sa najvýhodnejšie a bežne sa používa.

### Nasýtená hydraulická vodivosť

Nasýtená hydraulická vodivosť  $K_s$  je vlastnosť vodou nasýtenej pôdy viesť vodu, charakterizovaná súčiniteľom v Darcyho rovnici (ON 73 6518). Jej veľkosť závisí od štruktúry a textúry pôdy a od prítomnosti makropórov a mení sa nielen v priestore, ale aj v čase (Starr, 1990).

Namerané hodnoty nasýtenej hydraulickej vodivosti  $K_s$  v pôdach s makropórmami môžu závisieť od použitej experimentálnej metódy a od objemu vzoriek, ak vzorky neobsahujú reprezentatívny počet makropórov (aspoň 20 elementárnych jednotiek pôdnej štruktúry a takisto aspoň 20 biopórov a plošných pórov). Dôsledkom toho je vysoká variabilnosť nasýtenej hydraulickej vodivosti (obr. 1). Na obrázku sú zaznamenané výsledky meraní  $K_s$  na 16 neporušených vzorkách (s priemerom 5 cm a dĺžkou 6 cm) ilovitohlinitej pôdy odobratých na ploche 30 x 30 cm v hĺbke 7 cm (Logsdon a kol., 1990).



1. Príklad zmien nasýtenej hydraulickej vodivosti  $K_s$  nameranej na 16 neporušených vzorkách neobrábanej pôdy odobratých z plochy 30 x 30 cm v hĺbke 7 cm

Pri vyhodnotení rozsiahleho súboru 90 meraní nasýtenej hydraulickej vodivosti pôdy pomocou vsakovacích pokusov, ktoré vykonalí pracovníci Inžiniersko-geologického a hydrogeologického prieskumu (Repka a kol., 1985) v Trstíne, sme sa presvedčili, že rozmery vnútorného valca infiltrometra často vymedzujú objem menší, než je reprezentatívny elementárny objem (REV) pôdy. Prejavilo sa to vysokou hodnotou variačného koeficientu ( $CV = 402,43\%$ ) nameraného súboru hodnôt  $K_s$  (Lichner a kol., 1990). Aj ďalšie vsakovacie pokusy na siedmich miestach tejto lokality, pri ktorých sa na určenie polohy čela omáčania použil rádioaktívny indikátor  $^{131}\text{I}$  (Lichner a kol., 1990), preukázali vysokú variabilnosť hĺbky prieniku indikátora do pôdy pod vnútorným valcom infiltrometra, čo v prípade hlinitých alebo ilovitohlinitých pôd svedčí o prítomnosti makropórov.

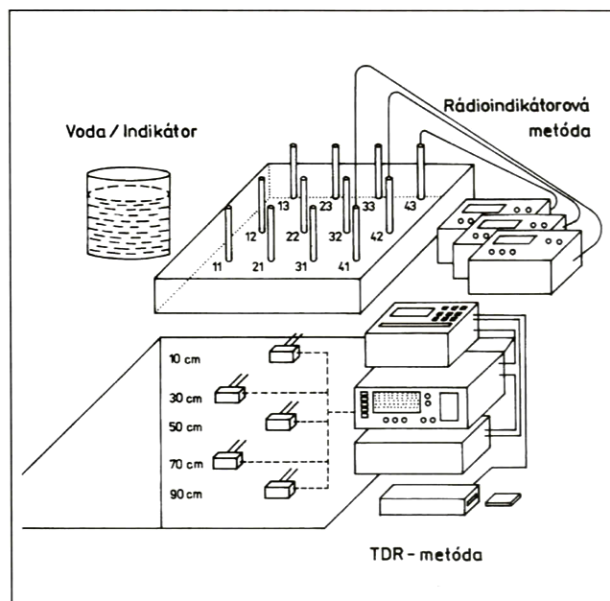
Nasýtená hydraulická vodivosť ťažkých pôd sa počas sezóny môže značne meniť v závislosti od procesov tvorby a zániku biopórov, napučovania a zmršťovania pôdy a pod. Snaha, aby neporušené vzorky pôdy, používané na laboratórne meranie  $K_s$ , neobsahovali makropóry, je vlastne snahou o získanie časovo nezávislej hodnoty  $K_s$ . Bolo by však treba túto skutočnosť zvýrazniť (napr. označením  $K_{sp}$ ), aby bolo zrejme, že ide o nasýtenú hydraulickú vodivosť pôdnej matrice (v zmysle už spomínaného rozdelenia pôdných pórov) alebo pôdných pedov. Hodnota  $K_{sp}$  je pre prax veľmi dôležitá, lebo prúdenie v makropóroch nastane len vtedy, keď intenzita dažďa prekročí túto hodnotu, čo sa v našich podmienkach stáva len niekoľkokrát ročne. Táto hodnota by sa mala využívať aj pri navrhovaní zavlažovacích systémov, lebo keď intenzita závlahy pre-



2. Sprava A. Mdaghri, P. Germann a L. Lichner pri spoločných meraniach v Moste pri Bratislave

kročí túto hodnotu (prejavuje sa to tvorbou výtopy na povrchu pôdy), začne prúdenie v makropóroch, a tým rýchly prenos živín z povrchu a koreňovej oblasti rastlín do väčších hĺbok, kde už živiny neslúžia rastlinám, ale spôsobujú znečistenie podzemnej vody.

3. Schéma rozmiestnenia meracích zariadení pri experimente "Most 1995"



### Prenos rozpustných látok v pôde s makropórmami

V období 1994–1996 sa riešil švajčiarsko–slovenský projekt *Terénne merania rýchleho prenosu rozpustených látok a častíc v štruktúrnych pôdach* (s príspevom Švajčiarskeho národného fondu na podporu vedy v Berne), ktorého cieľom bolo získať nové poznatky o vplyve prúdenia preferovanými cestami na prenos látok v pôde. Spoločné merania pohybu vody označenej rádioaktívnym jódom  $^{131}\text{I}$  v štruktúrnej ilovito–hlinitej pôde (pôdny typ: čiernozem karbonátová, stredne ťažká) prebiehali v júli 1995 na experimentálnej stanici Výskumného ústavu závlahového hospodárstva v Moste pri Bratislave (obr. 2).

Na ploche  $1 \times 1$  m sa infiltrovalo 27 mm vody označenej  $200 \text{ MBq } ^{131}\text{I}$  a aplikovanej postrekom s intenzitou  $15 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Pohyb jódu sa sledoval Geiger–Muellerovými detektormi umiestnenými v 12 zapichovacích sondách. Prvé meranie bolo okamžite po skončení infiltrácie ( $t = 1$  hod). Na druhý deň sa najprv zmerali zmeny koncentračného rozdelenia jódu po hĺbke, spôsobené redistribúciou ( $t = 21$  hod), potom sa postrekom aplikovalo 27 mm neoznačenej vody a zmeralo sa koncentračné rozdelenie po aplikácii vody ( $t = 25$  hod) a po jej redistribúcii ( $t = 45$  hod). Na tretí a štvrtý deň nasledovali ďalšie dve aplikácie po 27 mm neoznačenej vody spojené s meraniami koncentračného rozdelenia jódu po aplikácii ( $t = 49$  hod,  $t = 73$  hod) a po redistribúcii vody ( $t = 69$  hod,  $t = 99$  hod). Schéma rozmiestnenia meracích zariadení je na obr. 3. Germann a Mdaghri z Univerzity v Berne sledovali prúdenie vody piatimi vlhkomermi TDR, umiestnenými v hĺbkach 10, 30, 50, 70 a 90 cm (Mdaghri a kol., 1996). Lichner a Novák z Ústavu hydrológie SAV v Bratislave merali prenos jódu v pôde v 12 miestach rádioindikátorovou metódou (Lichner a kol., 1994; 1996). Stredné hodnoty výsledkov, týchto meraní uvádza tab. 1.

Z nameraných výsledkov vidno vplyv prúdenia makropórmami na prenos jódu v pôde, keď sa po prvej aplikácii 27 mm vody (s rádioaktívnym jódom) jód dostal do hĺbky 50–60 cm a po troch ďalších aplikáciách rovnakého množstva (čiže spolu 81 mm vody) a redistribúciách sa hĺbka prieniku jódu zväčšila len o 20 cm. V tomto prípade sa jód ako nereaktívny indikátor (inkorporácii rádioaktívneho jódu do pôdnych mikroorganizmov sme sa snažili zabrániť nasýtením pôdy neaktívnym jódom pred začiatkom meraní) pohyboval rovnakou rýchlosťou ako voda. Na základe takýchto zistení by sa mali upraviť počiatočné podmienky modelov opisujúcich prenos rozpustených látok v pôde bez zohľadnenia vplyvu makropórov, napr. do konvekтивно–disperzného modelu zaviesť počiatočnú podmienku, že v čase  $t = 0$  sa rozpustená látka nenachádza na povrchu, ale že jej koncentrácia v závislosti od hĺbky

**Tab. 1. Závislosť relatívnej koncentrácie  $^{131}\text{I}$  od času vo vybraných hĺbkových intervaloch**

Čas [hod]	Relatívna koncentrácia $^{131}\text{I}$ v hĺbke [cm]							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
1	0,447	0,289	0,157	0,078	0,025	0,005		
21	0,404	0,295	0,164	0,091	0,038	0,009		
25	0,299	0,319	0,200	0,119	0,050	0,012		
45	0,250	0,286	0,212	0,151	0,077	0,021	0,002	
49	0,203	0,264	0,225	0,174	0,096	0,032	0,006	
69	0,179	0,236	0,208	0,182	0,123	0,056	0,015	0,001
73	0,149	0,221	0,213	0,191	0,137	0,068	0,019	0,002
99	0,131	0,197	0,193	0,184	0,151	0,093	0,040	0,010

má napr. lognormálne rozdelenie, ktorého parametre možno určiť z niekoľkých rádioindikátorových meraní. Vhodnejšie je však používanie modelov zohľadňujúcich vplyv makropórov na prenos rozpustených látok v pôde, napr. modelu využívajúceho teóriu kinematickej vlny (Levy, Germann, 1988).

Na zníženie strát agrochemikálií z koreňovej zóny v dôsledku prúdenia makropórmí treba tieto látky (po ich povrchovej aplikácii) zaviesť do pôdy takým spôsobom, aby sa usídlili v pomerne nepohyblivej vode v matrici. Jednou z možností je zníženie rýchlosti aplikácie vody pri postrekovej alebo kvapkovej závlaha tak, aby sa na povrchu pôdy nevytvorila kritická výška výtopy. Intenzita závlahy by teda mala byť menšia než nasýtená hydraulická vodivosť pôdnej matrice. Druhou možnosťou je povrchová orba, ako demonštrovali Bouma a kol. (1982). Na neporušenú vzorku pôdy nasypali vrstvu piesku a takto zamedzili prístupu vody a rozpustených látok do makropórov. Dôsledkom povrchovej orby je vytvorenie vrstvy s malými agregátmi. Makropóry v tomto prípade nie sú otvorené na povrchu pôdy, čo je jednou z podmienok existencie prúdenia v nich.

## Literatúra

- Beven, K., 1991: Modeling Preferential Flow: An Uncertain Future? In Proc. Nat. Symp. Preferential flow. Chicago, p. 1–11.
- Beven, K., Germann, P., 1982: Macropores and Water Flow in Soils. Water Resour. Res., 18, 5, p. 1311–1325.
- Bouma, J., Belmans, C. F. M., Dekker, L. W., 1982: Water Infiltration and Redistribution in a Silt Loam Subsoil With Vertical Worm Channels. Soil Sci. Soc. Am. J., 46, 5, p. 917–921.

- Levy, B. S., Germann, P. F., 1988: Kinematic Wave Approximation to Solute Transport along Preferred Flow Paths in Soils. J. Contam. Hydrol., 3, p. 263–276.
- Lichner, L. a kol., 1990: Prenos znečistenia v nenasýtenej zóne. (Výskumná správa). Inžiniersko-geologický a hydrogeologický prieskum, Žilina.
- Lichner, L., Majerčák, J., Slaboň, S., Štekauerová, V., 1994: Prenos rozpustených látok v pôde. Bratislava. Veda.
- Lichner, L., Novák, V., Germann, P., Mdaghri, A., 1996: In situ Measurements of Solute Transport in Structured Soils by Means of Nuclear Tracer Technique. Annales Geophysicae, Suppl. C, 14, 323 pp.
- Logsdon, S. D., Allmaras, R. R., Wu, L., Swan, J. B., Randall, G. W., 1990: Macroporosity and its Relation to Saturated Hydraulic Conductivity under Different Tillage Practices. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 4, p. 1096–1101.
- Mdaghri, A., Germann, P., Lichner, L., Novák, V., 1996: Field Measurements of Water and Solute Transport in Structured Soil using TDR and Radioactive Tracer Technique. Annales Geophysicae, Suppl. C II, 14, p. 323.
- ON 73 6518. Názvosloví v hydropedológii. Praha 1976.
- Repka, T., a kol., 1985: Miera antropogénneho ovplyvňovania pôdneho systému vo vzťahu k hydrosfére na modelovom povodí Rosuchovského potoka. (Výskumná správa). Inžiniersko-geologický a hydrogeologický prieskum, Bratislava.
- Skopp, J., 1981: Comment on "Micro-, Meso-, and Macroporosity of Soil". Soil Sci. Soc. Am. J., 45, 6, 1246 pp.
- Starr, J. L., 1990: Spatial and Temporal Variation of Pondered Infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 3, p. 629–636.

**„V přírodě mám pocit jako v obydlém pří-  
bytku. Příroda má svůj řád, hvězdné nebe nade  
mnou stejně jako les okolo a půda pod nohama.  
Je něčí. Není moje: ten řád, smysluplný život, tu  
byl dávno, než jsem vymýtil les a sroubil své  
obydlí. Nepatří ani drobným obyvatelům lesa,  
lišce pod břízou za hrází, rodině dikobrazů na  
druhé straně řeky, bobrům, kteří tu řeku přehra-  
dili. I ti k ní patří, ale nevlastní ji. Přesto je  
příroda něčí.**

**I já v ní žiji, jejím řádem. I pro mne platí  
cyklus práce a odpočinku, rytmus ročních obdo-  
bí i rytmus života. Mám v ní své místo a svůj  
úkol. Jsem schopen údivu nad krásou sněženky  
a hvězdy, jsem schopen poznávat řád přírody  
a řídit se jím, nejen jím být řízen. Jsem schopen  
v řádu přírody chápat i hlubší, vše propojující  
zákon lásky, víry a naděje...**

**Erazim Kohák  
Dopisy přes oceán**