

Monitorování preferenčního proudění na heterogenních půdách s využitím stopovačů

D. ZUMR and M. CÍSLEROVÁ

Department of Irrigation, Drainage and Landscape Engineering, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic (e-mail: david.zumr@fsv.cvut.cz, cislerova@fsv.cvut.cz)

Abstract Although the importance of preferential flow on soil water regime is a known fact, it is difficult to quantify the impact of the preferential pathways. One way how to measure the effect of macropores is based on the use of tracers.

Around 60% of the soil layer in the Czech Republic is composed of cambisoles formed on weathered crystalline bedrock. These soils are texturally heterogeneous and exhibit fast preferential flow. In order to simulate the soil water regime, hydraulic properties of the soil and the ratio of preferential pathways must be known.

This study presents a review on the use of mainly human applied tracers in unsaturated zone hydrology. A short description of laboratory and in situ experiments, which were performed with use of dye tracer Brilliant Blue, is given.

It is concluded that the data resulting from the tracer experiments are useful for calibration in dual-permeability numerical simulations.

Key words: *dye tracers, Brilliant Blue, fluorescent tracers, preferential flow, infiltration experiments*

Úvod

Sledování pohybu vody a rozpuštěných látek nasyceným i nenasyceným půdním profilem je v posledních několika desítkách let v popředí zájmu mnoha výzkumných týmů po celém světě. Zemědělský sektor, sanace půd a ochrana podzemních vod vyžadují metodiku, která dokáže kvantifikovat transportní procesy v půdní vrstvě mezi povrchem a hladinou podzemní vody. Nehomogenita proudění v této oblasti má zásadní vliv na dobu zdržení a prostorovou distribuci půdní vody, hnojiv a případných kontaminantů. Při simulacích v heterogenním prostředí často selhávají transportní charakteristiky získané standardním průměrováním. Příkladem je šíření rozpuštěné látky vadózní zónou, které často nelze popsat advektivně disperzní rovnicí, protože neplatí předpoklad konstantní disperzivity v celém profilu (Aeby, 1998).

Při experimentálním výzkumu hydrologických procesů ve vadózní zóně hrají důležitou úlohu stopovače (tracery). Tracery se uplatňují v případech, kdy nejsme schopni konkrétní informaci získat přímým měřením, nebo je potřebné měření technicky a finančně příliš náročné (např. zjištění oblasti proudění heterogenním půdním profilem, hydraulické propojenosti pórů a hydrodynamické disperze) (Flury et al., 1994).

Tracery se v podpovrchové hydrologii úspěšně

využívají již více než sto let při řešení různých praktických i výzkumných úkolů. Dříve se jednalo zejména o práce spojené s poptávkou po kvalitní pitné vodě. Existují studie z devatenáctého století, které pojednávají o využití stopovačů při identifikaci zdrojů znečištění pitné vody. Díky této metodě bylo zabráněno několika epidemiím tyfu v Evropě. První zmínka o využívání stopovačů pochází dokonce již z počátku našeho letopočtu z území dnešního Izraele (Kass, 1998).

Dnes se pomocí tracerů sleduje účinnost a environmentální dopad hnojení na zemědělsky využívaných půdách, průsaky skládek, simulace nehod při nichž dojde k úniku kontaminantu do půdy, dynamika odtoku vody z povodí. Stopovače se využívají i pro sledování složitých jevů, jako jsou například multifázové reaktivní proudění, koloidní transport nebo výměna vody a látek mezi puklinami a půdní maticí. Nezanedbatelný význam mají pro kalibrace matematických modelů, které simulují pohyb rozpuštěných látek v laboratorním i polním měřítku.

Pro detailní popis fyzikálních a chemických procesů, které se podílejí na proudění vody a na transportu látek, jsou stopovače nezastupitelné. O významu tracerů v podpovrchové hydrologii vypovídá i rostoucí počet vědeckých publikací (Divine a McDonnell, 2005).

Tato práce se zaměřuje zejména na sledování preferenčního proudění půdním profilem, kde se využití tracerů ukázalo jako velmi vhodné. Lokální rychlosti proudění jsou v nenasyceném prostředí časově i prostorově velmi proměnlivé. Vlivem preferenčního proudění může docházet k velmi rychlému postupu rozpuštěných látek do hlubších horizontů půdního profilu, kde se vlivem vysokého tlakového gradientu mezi preferenčními cestami a půdní maticí dostává rozpuštěná látka horizontálním prouděním do matrice (Fluhrer et al., 1996). V extrémních případech může čelo zvlhčení v preferenční doméně dosáhnout až hladiny podzemní vody. Retenční kapacita půdy je vlivem preferenčního proudění využita pouze z malé části (Císlarová, 2005). Množství rozpuštěných látek, které se pohybují preferenčními cestami, není obvykle vysoké, přesto může mít při řešení určitých úloh nezanedbatelné důsledky.

Kung et al. (2000) experimentálně testovali vliv preferenčních cest na šíření sorbujících a nesorbujících chemikálií. Místo kontaminantů použili různé stopovače. Potvrdili, že preferenční proudění je významným faktorem při významných srážkových událostech, kdy se chemikálie rychle šíří preferenčními cestami a vliv sorpce a degradace je v této fázi minimální. Preferenční proudění má také velký vliv na interpretaci experimentů založených na lokálních odběrech vzorků půdní vody, kdy se musí pečlivě zvažovat reprezentativnost takto získaných dat (Kung, 1990).

Základní charakteristika tracerů

Obecně lze tracer definovat jako látku nebo specifickou charakteristiku určité látky (teplota nebo barva), kterou je možno během experimentu monitorovat a díky níž jsme schopni určitý pozorovaný jev sledovat. Aby bylo možno stopovací látku v prostředí snadno identifikovat, musí tedy být odlišná od ostatních látek obsažených ve sledovaném systému. Výsledkem aplikace tracerů do půdního prostředí jsou průnikové čáry, zachycující ve zvolených pozorovacích bodech, případně ve zvolených časech, změny koncentrace aplikované látky po průchodu tímto prostředím.

Požadavky na vlastnosti ideálního traceru shrnuli Flury a Wai (2003) do následujících bodů:

- Tracer se během transportu pohybuje konzervativně a jeho charakteristiky, které pohyb půdním profilem ovlivňují, jsou velmi podobné vlastnostem vody. Stopovač se v prostředí šíří, aniž by sorboval na půdních zrnech nebo na stěnách puklin a v časovém měřítku zahrnujícím experiment nedegraduje.
- Tracer se ve sledovaném prostředí přirozeně nevyskytuje nebo je koncentrace v pozadí nízká. Uměle aplikovaná látka musí být vůči pozadí rozeznatelná.
- Vlastnosti traceru zůstávají konstantní i při změně chemismu půdního roztoku. Pohyb a degradace stopovače nesmí být ovlivněny změnami pH a různými iontovými silami v půdním roztoku.
- Detekovat tracer lze na základě chemické analýzy nebo jej přímo vizualizovat.
- Tracer má žádný nebo minimální toxický dopad na studované prostředí a na člověka.

Obdobné formulace je možno nalézt i v jiných publikacích (Davis et al., 1980, Kass, 1998). Ve skutečnosti ideální tracer pro sledování pohybu vody neexistuje.

V podpovrchové hydrologii se používá mnoha různých typů tracerů. Jejich přehled je zpracován v několika odborných člancích (např. Davis et al. 1980, Kass et al. 1998, Flury a Wai, 2003).

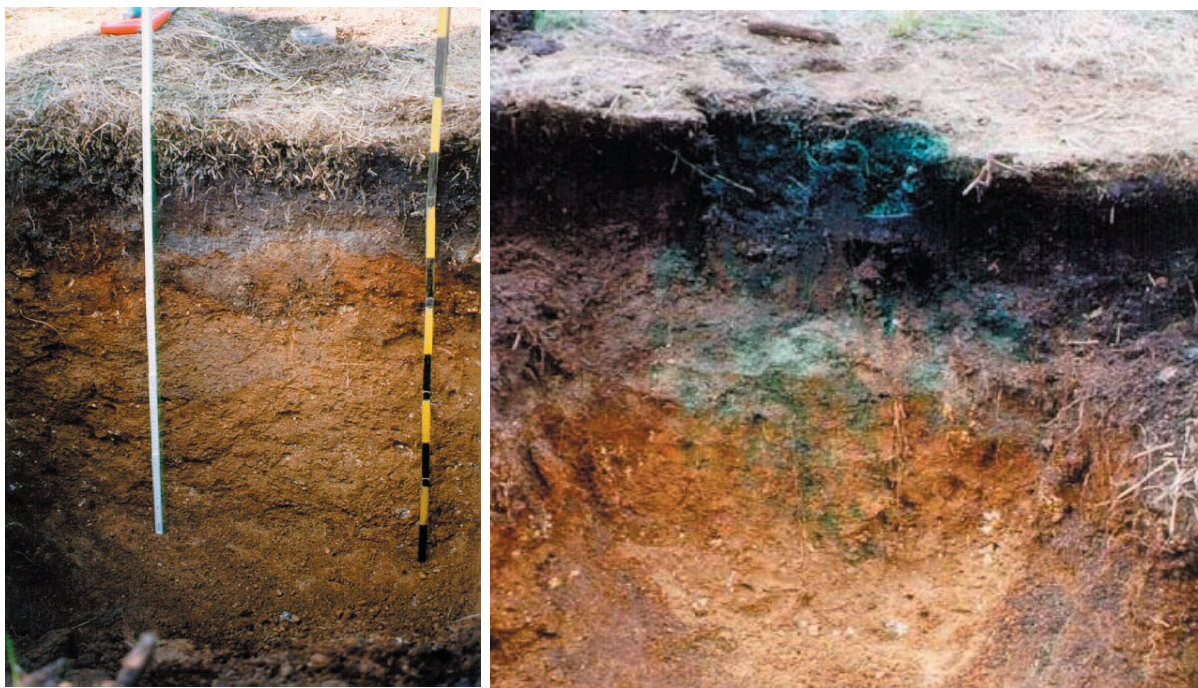
V nasycené zóně se využívá vsakovacích studní, jimiž je do prostředí aplikován puls vody o jiné teplotě než je pozadí. Tato metoda je vhodná pro identifikaci velmi propustných zón ve zvodních s puklinami. Často se používají stabilní a radioaktivní isotopy. Mezi ně patří i deuterium, považované za fyzikálně nejvhodnější tracer, které je svými vlastnostmi nejvíce podobné vodě. Pro zpracování experimentů s deuteriem je však třeba velmi náročná a drahá technologie (Flury a Wai, 2003). Mimo deuteria jsou za velmi vhodné stopovače považovány anionty Cl^- a Br^- . Tyto anionty na půdních zrnech téměř nesorbují a jejich transport půdním profilem lze považovat za konzervativní (Roth et al., 1991). Vzhledem k poměrně vysokým koncentracím chloridů v půdním prostředí se pro pokusy s reálnými půdami častěji používá bromid (např. Fayer et al. 1999, Kung et al. 2000, Sobotková et al.,

2007). V literatuře lze dohledat použití i dalších tracerů, jako jsou fluorované uhlovodíky, fluorid sírový, ethanol, benzoát, polyaromatické sulfonáty, koloidní částice a mikroorganismy.

Barevné stopovače

Pokud je třeba vyznačit cesty proudění, užívají se barevné stopovače, velmi často ve formě „koktailů“, v kombinaci s konzervativními tracery. Cílem je identifikace konkrétních oblastí proudění rozpuštěných látek a vody v půdě. Pohyb barviva půdním profilem může být přímo vizuálně pozorován nebo lze odebírat vzorky a analyzovat koncentraci traceru laboratorně. V případě potřeby vizualizovat tracer, musí být barevný stopovač na půdním pozadí dobře viditelný, a to jak v půdním roztoku, tak sorbovaný na půdních zrnech.

Všechny barevné tracery sorbují, s cílem obarvovat jiné látky jsou již vyráběny. Sorpční charakteristiky mnoha populárních tracerů včetně adsorpčních isoterm lze nalézt v literatuře, byť jsou tyto charakteristiky závislé i na testované půdě. Ukazuje se, že většina tracerů nemá adsorpční isotermu lineární (Fluhrer a Flury, 1996, Kasteel et al., 2002, Flury a Wai, 2003). Na příklad populární barvivo Brilliant Blue se v porovnání s konzervativním stopovačem dostává během terénního experimentu do menších hloubek, proto je doporučováno pro sledování pohybu vody současně aplikovat i jiný tracer (Flury a Fluhrer, 1995).



Obr. 1 a) půdní profil kambizemě na povodí Uhlířská v Jizerských horách, b) vertikální řez po aplikaci barviva Brilliant Blue

Výhodami barevných tracerů jsou relativně snadná detekce i při nízkých koncentracích, možnost jednoduchého zjišťování koncentrace, jednoduchá vizualizace, většinou nízká toxicita, nízká cena a možnost aplikace tracerů na poměrně velkých územích. Nevýhodou je větší velikost organických molekul, kterými jsou tracery tvořeny, adsorpce tracerů na půdních zrnech a degradace. Experimenty s barevnými tracery jsou ve většině případů destruktivní a tudíž pokusy nemohou být k potvrzení výsledků na stejné lokalitě opakovány. Vlastnosti některých barviv mnohdy závisí na chemických vlastnostech prostředí, zejména na pH půdního roztoku.

Barevné stopovače lze rozdělit na fluorescenční a nefluorescenční. Fluorescenční tracery mají tu výhodu, že je lze detekovat i při velmi nízkých koncentracích, a to i na tmavých půdách, kde je běžné

barvivo špatně viditelné. Pro jejich vizualizaci je však třeba zařízení emitující UV záření a tudíž je nelze jednoduše využít pro detekci cest proudění vody při experimentech v terénu. Vizualizací fluorescenčních tracerů na laboratorních vzorcích se zabývali na příklad Aeby et al. (2001) nebo Vanderborght et al. (2002b).

Mezi nejčastěji citované barevné tracery používané ve vadózní zóně patří Brilliant Blue, Methylene Blue, Pyranin, Lissamine Yellow a Rhodamine (Flury a Wai, 2003, Sutton et al., 2001, Flury et al., 1994, Hangen et al., 2004, aj.). Detailní popis vlastností barviva Brilliant Blue včetně jeho porovnání s jinými tracery zpracovali Flury a Fluhler (1995).

Využití stopovačů při modelování

Na heterogenních půdách vlivem preferenčního proudění dosahuje při silných srážkách část čela zvlhčení značných hloubek, a to mnohem rychleji než bychom předpověděli pomocí Richardsovy rovnice a průměrováním přes reprezentativní elementární objem (Beven a Germann, 1981). Režim proudění, který uvažuje preferenční proudění, lze popsat pomocí modelů založených na principu duální pórovitosti nebo multi-pórovitosti, případně duální permeability (viz Fluhler et al., 1996, Šimůnek et al., 2003 a další).

Existuje řada studií, které pojednávají o modelování proudění vody a rozpuštěných látek v souvislosti se stopovači. Tracerové experimenty se ukázaly být jednou z vhodných metod pro určení charakteru proudění a pro odhad vlastností a objemového podílu preferenční domény (Jelínková et al., 2005). Výsledky tracerových experimentů se používají pro kalibraci stochastických i matematických modelů. Stručné shrnutí nabízí Javaux et al. (2006). Vhodnost spojení tracerového experimentu a modelování s přístupem duální permeability ukázali ve svých pracích Kohne et al (2002) a Gerke a Kohne (2004)



Obr. 2 a) výtupová infiltrace s barvivem Brilliant Blue, b) horizontální pohled v hloubce 43 cm s vyznačenou polohou válce

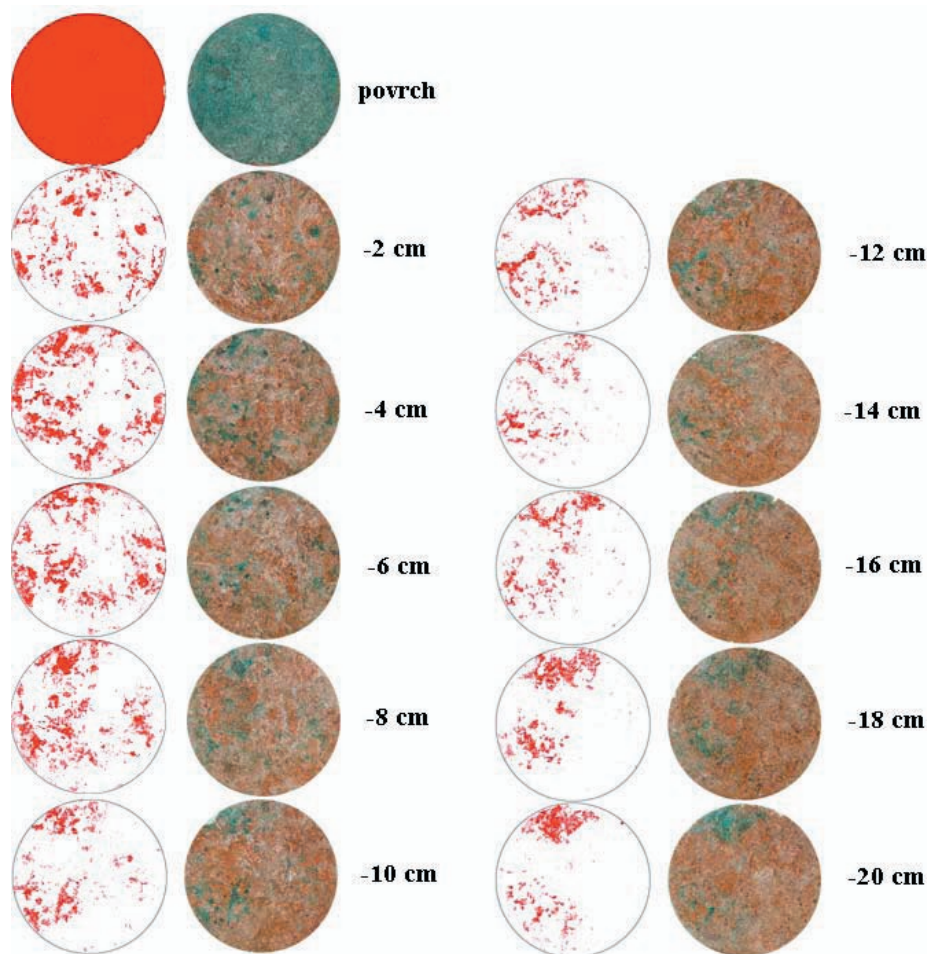
Nejobvyklejším způsobem vyhodnocení experimentů s barevným značkovačem je fotografování postupně odkrytých ploch jednotlivých půdních vrstviček. Pokud je cílem pokusů s barvivy určit podíl domény proudění, případně koncentrace barviva v různých místech oblastí, fotografie se obvykle dále digitálně upravují. Nejjednodušší metodou je filtrování barevného spektra s cílem zvýraznit oblasti proudění. Ze snímků lze kvantifikovat objemový podíl preferenčních cest v jednotlivých hloubkách (obr. 3). Problém spočívá v často subjektivním ohraničení vizualizovaných vlnových délek.

Pro kalibrace transportních procesů jsou účelnější koncentrace barviva, než pouze vyznačené oblasti proudění (Forrer et al., 1999). Javaux et al. (2006) provedli experiment, z kterého byli schopni určit i koncentrace barviva v různých místech sledované oblasti. Po fotografování jednotlivých horizontů odebírali malé vzorky z různě obarvených míst oblasti a zjišťovali koncentraci stopovače. Na základě zjištění byli schopni digitalizovat snímky včetně škály koncentrací. Nutno podotknout, že experiment prováděli na uměle nasypaném homogenním vzorku.

Na reálných půdách v terénu je nutno brát v úvahu různou intenzitu a směr osvětlení během ve většině případu dlouho trávajícího experimentu. Metodu na vizualizování koncentrace stopovače (Brilliant Blue) v půdě v využitím barevné kalibrační tabulky prezentovali Forrer et al. (1999), ve větším měřítku zopakovali stejný postup Kaastel et al. (2005). Obdobným způsobem vizualizovali fluorescenční barviva Vanderborght et al. (2002a).

Tracerové experimenty na kambizemích

Ve zdrojových oblastech České kotliny se půdní profil tvoří místním zvětráváním krystalinického podkladu. Takto vzniklé půdy, klasifikované jako kambizemě, mají heterogenní strukturu a většinou mělký horizont, který přechází v rozrušenou matečnou horninu (obr. 1). Vzhledem k vysoké heterogenitě těchto půd dochází k velice rychlým reakcím na srážky, odtok z povodí je tvořen z větší části mělkým podpovrchovým odtokem (Císlarová a Vogel, 2006).



Obr. 3 Vyhodnocení laboratorního experimentu s barvivem Brilliant Blue. V pravých sloupcích jsou fotografie řezů půdního vzorku z hloubek 0 až 20 cm, v levých sloupcích jsou digitálně upravené binární snímky se zvýrazněnými oblastmi proudění kapaliny. (upraveno z Jelínková et al., 2005)

Na sledovaných experimentálních povodích (Šumava, Jizerské hory, Českomoravská vrchovina) bylo zaznamenáno rychlé preferenční proudění, takže simulace podpovrchového odtoku ve vadózní zóně s využitím tradičních simulačních modelů založených na jednoduché Richardsově rovnici, pouze s vyhodnocením prostorové variability hydraulických vodivosti, nedávají uspokojivé výsledky (Vogel et al., 2000). Na obr. 1 a 2 jsou příklady šíření barviva půdním profilem při výtopové infiltraci. Z obrázků je zřejmé, že stopovač proudí preferenčními cestami a ve větších hloubkách zaujímá pouze malou část průřezu.

Na obr. 3 jsou výsledky laboratorního infiltračního experimentu s barvivem Brilliant Blue (koncentrace 1,5 mg/l vody) na velkém neporušeném vzorku půdy, odebraném na experimentální lokalitě Valečov u Havlíčkova Brodu na Českomoravské vrchovině (Doležal et al., 2006). Cílem experimentu bylo kvantifikovat oblast preferenčního proudění. Uspořádání infiltračně výtokového experimentu popsali Sněhota et al. (2002). Do předem nasyceného vzorku byly infiltrovány tři pórové objemy vody s barvivem. Ihned po odkapání byl vzorek příčně rozřezán a fotografován. Fotografie byly graficky upraveny tak, aby byly zobrazeny pouze oblasti proudění. Z výsledků vyplývá, že oblast proudění během výtopy na horním okraji je tvořena pouze 20-30% z celkového průřezu vzorku. Podíl hydraulicky aktivních preferenčních cest není ve všech hloubkách konstantní (Jelínková et al., 2005).

Na základě těchto experimentů s barvivem bylo možno kalibrovat jednorozměrný model, pomocí kterého byla simulována dynamika infiltrace a kapkové závlahy během vegetační sezóny. Pro získání retenčních čar a nasycených hydraulických vodivostí jednotlivých půdních horizontů byla provedena laboratorní měření, která byla optimalizována metodou inverzního modelování. Experiment s barvivem poskytl zásadní informace o charakteru proudění a o objemovém podílu preferenčních cest (Zumr et al., 2006). Obdobné experimenty byly provedeny i na půdách v Jizerských horách a na Šumavě.

Závěr

Příspěvek je úvodní zprávou probíhajícího řešení interního grantu ČVUT „Sledování preferenčního proudění na kambizemích pomocí tracerových experimentů s fluorescenčním stopovačem“, jehož řešitelem je autor příspěvku. Interní grant navazuje na ukončené a probíhající projekty na fakultě stavební ČVUT v Praze, které se zabývají zkoumáním vodního režimu v silně heterogenních prostředích s existencí preferenčních cest různého původu.

V rámci projektu bude testováno barvivo Brilliant Blue a fluorescenční tracery Rhodamine 6G a Fluorescein diacetate. Cílem laboratorních a terénních experimentů bude získání informací, na základě kterých bude metodou inverzního modelování kalibrován dvourozměrný matematický model, který uvažuje duální permeabilitu prostředí. Pro co nejpřesnější popis průběhu experimentů bude monitorována koncentrace tracerů na výtoku i uvnitř sledované oblasti pomocí flouometru a cesty proudění budou fotografovány pod UV lampou. Výsledky budou prezentovány formou posteru na konferenci Bioclimatology and natural hazards 2007.

Poděkování

Tato studie byla vypracována v rámci řešení interního grantu ČVUT CTU 0702811 a projektu MSMT 1K05024.

Literatura

- [1] Aeby, P. G., 1998, Quantitative Fluorescence Imaging of Tracer Distributions in Soil Profiles, Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- [2] Aeby P., U. Schultze, D. Braichotte, M. Bundt, F. Moser-Boroumand, H. Wydler, H. Fluhner, 2001. Fluorescence imaging of tracer distributions in soil profiles, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 753-760.
- [3] Beven, K., P. Germann, 1981: Water flow in soil macropores II. A combined flow model, *Journal of Soil Science*, 32, p.15-29.
- [4] Císlarová M., 2005. Preferenční proudění ve vadózní zóně kambizemí, *In HYDROLOGIE MALÉHO POVODÍ 2005*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AVČR, 2005, s. 23-30. ISBN 80-02-01754-4.
- [5] Císlarová M., T. Vogel, 2006. Preferenční proudění a vodní bilance ve vadózní zóně, *In: Zpracování a interpretace dat z průzkumných a sanačních prací III*, 5. – 6. prosince 2006, Litomyšl, s. 83-88.
- [6] Davis, S.N., G. M. Thompson, H. W. Bentley, G. Stiles, 1980. Ground-water tracers – A short review, *Ground Water J*, 18, 14-23.
- [7] Divine, C. E., J. J. McDonnell, 2005. The future of applied tracers in hydrogeology, *Hydrogeol J*, 13, 255-258.
- [8] Doležal F., M. Císlarová, T. Vogel, M. Dohnal, J. Dušek, T. Kvítek, J. Vopravil, J. Zavadil, J. Vacek, K. Březina, D. Vetišková, 2006. Posouzení vlivu preferenčního proudění v půdě na vyplavování dusičnanů v podmínkách krystalinika českých a moravských vrchovin: Metodika, *Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy*, Praha, ISBN 80-239-8451-9.
- [9] Feyen H., H. Wunderli, H. Wydler, A. Papritz, 1999. A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil, *Journal of Hydrology*, 225, 155–167.
- [10] Flury M., H. Fluhner, W. A. Jury, J. Leuenberger, 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, *Water Resources Research*, 30 (7), 1945-1954.
- [11] Fluhry M., H. Fluhner, 1995. Tracer Characteristics of Brilliant Blue FCF, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 22-27.
- [12] Flury M., N. N. Wai, 2003, Dyes as Tracers for Vadose Zone Hydrology, *Rev. Geophys.*, 41(1), p.2-1 – 2-37.
- [13] Fluhler, H., W. Durner, and M. Flury. 1996. Lateral solute mixing processes - A key for understanding field-scale transport of water and solutes. *Geoderma* 70:165-183.
- [14] Forrer I., R. Kasteel, M. Flury, H. Fluhner, 1999. Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil, *Water Resources Research*, 35 (10), 3049-3060.
- [15] Forrer I., A. Papritz, R. Kasteel, H. Fluhner, D. Luca, 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing, *European Journal of Soil Science*, 51, 313-322.
- [16] Gerke, H. H., J. M. Kohne, 2004. Dual-permeability modeling of preferential bromide leaching from a tile-drained glacial till agricultural field, *Journal of Hydrology*, 289, 239–257.
- [17] Hangen E., H. H. Gerke, W. Schaaf, R. F. Huttel, 2004. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine–starch staining, *Geoderma*, 120, 121-135.
- [18] Javaux M, R. Kasteel, J. Vanderborght, M. Vanclooster, 2006. Interpretation of dye transport in a macroscopically heterogeneous, unsaturated subsoil with a one-dimensional model, *Vadose Zone Journal*, (2): 529-538.

- [19] Jelínková V., D. Zúmr, M. Císlarová, 2005. Laboratorní infiltračně-výtopové experimenty na neporušených válcích z experimentální plochy Valečov, *In XII. posterový deň s medzinárodnou účasťou: Transport vody, chemikálií a energie v systéme poda – rastlina – atmosféra* [CD-ROM], Bratislava, s. 1-5
- [20] Kass W., 1998. Tracing technique in geohydrology, *Balkema*, Rotterdam, The Netherlands, 581 pp.
- [21] Kasteel R., H.-J. Vogel, K. Roth, 2002. Effect of non-linear adsorption on the transport behaviour of Brilliant Blue in a field soil, *European Journal of Soil Science*, 53, 231-240.
- [22] Kasteel R., S. Giesa, H. Vereecken, 2005. Characterization of field tracer transport using high resolution images, *Vadose Zone Journal*, 4, 101-111.
- [23] Kohne, J.M., Kohne, S., Gerke, H.H., 2002. Estimating the hydraulic functions of dual-permeability models from bulk soil data. *Water Resour. Res.*, 38 (7), 1–11.
- [24] Kung, K.-J. S., 1990. Preferential Flow in a Sandy Vadose Zone. 1. Field Observation, *Geoderma* 46, 51–58.
- [25] Kung, K.-J., S. T. S. Steenhuis, E. J. Klavivko, T. J. Gish, G. Bubenzer, C. S. Helling, 2000. Impact of Preferential Flow on the Transport of Adsorbing and Non-Adsorbing Tracers, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1290-1296.
- [26] Roth K., W. A. Jury, H. Fluhrer, W. Attinger, 1991. Transport of chloride through an unsaturated field soil, *Water Resources Research*, 27 (10), 2533-2541.
- [27] Sobotková, M., M. Sněhota, M. Císlarová, 2007. The effect of initial water saturation on the solute transport, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 9, 00888.
- [28] Sněhota, M., A. Robovská, M. Císlarová, 2002. Automated set-up designed to measure hydraulic parameters in heterogeneous soil close to saturation, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 50(3), 247-257.
- [29] Sutton D. J., Z. J. Kabala, A. Francisco, D. Vasudevan, 2001. Limitations and potential of commercially available rhodamine WT as a groundwater tracer, *Water Resources Research*, 37 (6), 1641-1656.
- [30] Šanda M., M. Císlarová, T. Pícek, 2005. Pondered infiltration test in field using fluorescent dye, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7
- [31] Šanda, M., Císlarová, M., Pícek, T. 2005. Terénní infiltrační experiment stopováním fluorescenční barvy. *In HYDROLOGIE MALÉHO POVODÍ 2005*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AVČR, 2005, s. 279-284. ISBN 80-02-01754-4.
- [32] Šanda, M., Sobotková, M., Císlarová, M., 2007. Natural Tracers in the Hydrological Cycle of a Small Mountainous Watershed, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 9, 07956.
- [33] Šimůnek, J., Jarvis, N. J., van Genuchten, M. Th., Gärdenäs, A., 2003: Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone, *Journal of Hydrology*, 272, 14-35.
- [34] Vanderborght J., P. Gahwiller, H. Wydler, U. Schultze, H. Fluhrer, 2002a. Imaging fluorescent dye concentrations on soil surfaces: Uncertainty of concentration estimates, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 760-773.
- [35] Vanderborght J., P. Gahwiller, H. Fluhrer, 2002b. Identification of transport processes in soil cores using fluorescent tracers, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 774-787.
- [36] Vogel, T., Gerke, H.H., Zhang, R. and van Genuchten, M. Th.. 2000. Modeling flow and transport in a two dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties, *J. Hydrol.*, 238, 78-89.

- [37] Zumr D., M. Dohnal, M. Hrnčíř, M. Císlarová, T. Vogel, F. Doležal, 2006. Simulation of soil water dynamics in structured heavy soils with respect to root water uptake. *Biologia*, 61 (Suppl. 19): S320-S323.