

Vliv počáteční půdní vlhkosti na transport chemických látek v půdě

M. SOBOTKOVÁ, M. SNĚHOTA and M. CÍSLEROVÁ

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Česká Republika
(martina.sobotkova.1@fsv.cvut.cz)

Abstract Variation in the initial water saturation in heterogeneous soils may influence water flow and solute transport during infiltration events. The aim of this research was to investigate the effect of initial soil moisture prior the infiltration on dispersion by means of infiltration-outflow experiments done on undisturbed soil samples.

Three undisturbed soil cores were collected in small experimental catchments in Šumava and Jizera Mountains. The sand sample was packed to serve as the reference sample. Infiltration-outflow experiments with the constant pressure head at the top and the seepage face at the bottom of the soil cores were conducted. Boundary conditions were the same for all infiltration events, while the initial soil water contents were different for each infiltration. The tension infiltrometer was used to secure the constant pressure head at the upper surface of soil cores. The breakthrough curves of bromide tracer were determined during the steady state flow. Bromide solution was applied as a concentration pulse to the top of soil cores. Bromide ion concentration in the effluent was measured by an electrochemical in-line analysis.

The results show clearly variations of dispersion with varying initial water saturation. The dispersion coefficients will be determined by fitting a one-dimensional advection-dispersion equation to experimental data.

Key words: *initial water saturation, discontinuous gas, bromide tracer, breakthrough curves, electrochemical in-line analysis*

Úvod

Počáteční půdní vlhkost může ovlivnit hydraulické a transportní charakteristiky vlhkosti heterogenních půd během infiltračních procesů. Detailní porozumění tomu, jaké je míra tohoto ovlivnění a za jakých podmínek k ní dochází, je nezbytné pro zdokonalení matematického popisu pohybu vody a transportu látek během infiltrace. V současnosti používané modely považují hydraulické charakteristiky za neměnné. Vliv časové nestability hydraulických charakteristik a transportních parametrů by měl být uváženo.

Podle některých autorů má počáteční nasycení půdy před infiltrační a dynamika zvlhčování vliv na množství uzavřeného vzduchu v pórech, (Faybishenko, 1995). Vliv uzavřeného vzduchu na nasycenou hydraulickou vodivost měřili na dvou homogenních půdních vzorcích Sakaguchi et al., (2005). Pro získání plného nasycení, vzorek ponořili do 0.02 mol.l⁻¹ roztoku sádrovice a vytvořili podtlakové podmínky. Při následných výtokových experimentech,

při kterých nastavovali různá množství uzavřeného vzduchu výtokových experimentech zjistili, že zvyšující se množství uzavřené plynné fáze má za následek snižování hydraulické vodivosti. Množství a změny objemu uzavřeného vzduchu v terénních podmínkách sledovali např. Fayer and Hillel, (1986). Rozdíly mezi pórovitostí a objemovou vlhkostí při nasycení, sledovanou neutronovou sondou během zavlažování, přisoudili uzavřenému vzduchu. Obsah uzavřeného vzduchu se pohyboval v rozmezí 1.1 až 6.3%.

Na transportu látek heterogenním prostředím se také významně podílí preferenční proudění. Jednoduchý opakovaný výtopový experiment provedli Císlarová et al., 1990. Změnu hydraulické vodivosti během opakované infiltrace zkoumali na čtyřech vzorcích průměru 20 a výšky 20 cm různých druhů půd. Zatímco průměrná ustálená rychlost proudění vody homogenním vzorkem dosahovala při opakované infiltrační téměř totožných hodnot, u heterogenní půdy došlo ke snížení rychlosti proudění téměř o polovinu. Efekt snížení rychlosti při opakované infiltrační byl pozorován u heterogenní půdy s výskytem preferenčního proudění.

K detekci preferenčních cest byl použit barevný stopovač. Po infiltraci stopovače byl vzorek rozřezán. Ukázalo se, že některé části plochy vzorku jsou silně obarveny a některé vůbec. Z toho bylo patrné, že proudění vody se odehrává jen v části vzorku. Voda a rozpuštěné látky proudí makropóry a tedy protékají mimo půdní matici (Císlarová a Vogel, 1998). Proudění látek velkými póry je zpravidla podstatně rychlejší než proudění půdní maticí. Tudiž přítomnost preferenčních cest může zásadně ovlivnit rychlost postupu kontaminantu půdním profilem. U homogenní písčité půdy nebyly změny ustálené infiltrační rychlosti pozorovány.

Laboratorní experimenty na velkých neporušených vzorcích dovolují měření průnikových čar s dobře definovanými počátečními a okrajovými podmínkami. Padilla et al. (1999) měřili průnikové čáry NaCl při různém nasycení pískového vzorku. Výsledek ukázal, že nižší vlhkost má za následek větší podíl imobilní vody a vyšší disperzi. Vliv heterogenity na transportu rozpuštěných látek studoval Johnson et al. (2003). Kamra et al. (2001) provedl studium transportu bromidu a dvou pesticidů na malých vzorcích půdy u nichž indikoval přítomnost preferenčních cest. Na velkých neporušených vzorcích (30 cm průměr, 85 cm výška) bylo popisováno chování transportu látek KCl a DAP (fosfát di-amonný) (Philips and Burton, 2005).

Zvlhčovací fáze experimentu je považována za úzce související s výskytem nespojitě plynné fáze. Efekt snižování hydraulické vodivosti způsobený přítomností nespojitě vzduchu v pórech souvisí s blokováním pórů vzduchovými bublinami. Lze předpokládat, že změna spektra velikosti póru zaplněných vodou, způsobí i změnu disperzivity a s ní ovlivňuje charakter transportu rozpuštěných látek. Standardní laboratorní infiltrační experimenty v kombinaci s průnikem rozpuštěných látek mohou odhalit nejen vliv uzavřeného vzduchu na hydraulickou vodivost, ale také vztah mezi množstvím uzavřeného vzduchu a disperzivitou.

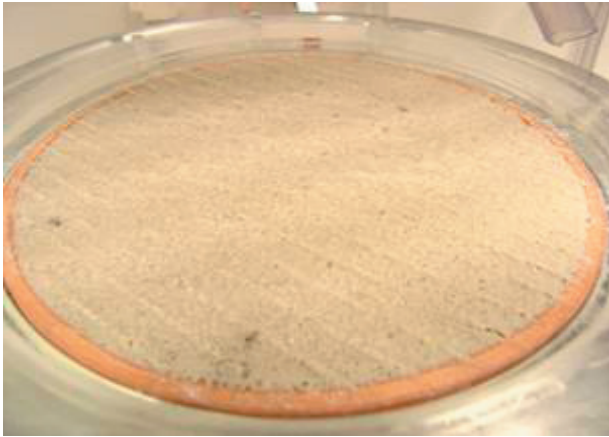
V této práci jsou prezentovány první výsledky infiltračních pokusů s aplikací bromidového stopovače. Výtopové infiltrace byly prováděny na referenčním pískovém vzorku a vzorku heterogenní půdy. Předmětem bylo měření průnikových čar během ustáleného proudění při různých počátečních podmínkách půdní vlhkosti na počátku infiltrací a studování možného vlivu uzavřeného vzduchu v pórech na tvar průnikových čar.

Referenční pískový vzorek a neporušený půdní vzorek

Infiltračně-výtokové experimenty s aplikací konzervativního stopovače byly provedeny na referenčním pískovém vzorku a na velkém neporušeném půdním vzorku. Průměr obou vzorků byl 18,9 cm a jejich výška byla 25,0 cm. Povrchy na spodním a horním okraji neporušeného půdního vzorku byly vyrovnány. Spodní okraj byl opatřen nerezovým sítkem k podepření půdního vzorku a k umožnění volného výtoku vody.

Vzorek A (referenční vzorek) byl připraven z jemného křemičitého písku. Jemný písek byl zvlhčován a po vrstvách hutněn do plastového válce (Obr. 1).

Vzorek B byl odebrán na experimentálním povodí Liz (Šumava, Česká republika). Půdy v lokalitě se vyvinuly na metamorfovaných horninách (Tesař, 1996). Lokalita, v níž byl vzorek odebrán, je typická půdním typem Eutric Cambisol (hlinito-písčítá půda). Zvýšená četnost srážek spolu s nižšími teplotami má za následek spolu s kyselou reakcí zvýšenou akumulaci kyselých organické hmoty na povrchu. Preferenční proudění na podobných půdách bylo zaznamenáno Císlarovou et al., (1988). Půdní vzorek byl odebrán z hloubky 20-50 cm do plastového válce pomocí trojnožkového odběrného zařízení (Obr. 2).



Obrázek 1 Referenční vzorek – jemný písek.



Obrázek 2 Odběr neporušeného půdního vzorku.

Experimentální sestava

K měření infiltračně-výtokových experimentů (Sněhota *et al.*, 2002) s aplikací konzervativního stopovače byla využita nově navržená sestava s automatizovaným záznamem měřených dat (Sněhota *et al.*, 2007). Sestava je navržena tak, aby bylo možné současně měřit experimenty na čtyřech velkých neporušených vzorcích půdy (Obr. 3).

Základ sestavy tvoří ocelová rámová konstrukce, na které jsou připevněna čtyři závěsná vážní čidla typu S (Omegadyne, Inc., LCM 101, U.S.A.). Každý neporušený půdní vzorek je připevněn k samostatnému hliníkovému rámu, který je zavěšen na vážním čidle. Hmotnost půdního vzorku, která se úzce vztahuje k celkové objemové vlhkosti, byla tímto čidlem zaznamenávána. Celá soustava byla během experimentu zásobována vodou z plastových zásobníků o kapacitě 60 litrů.

Na povrch vzorku byla umístěna porézní destička ze sintrovaného skla, které zabraňovala rozplavení povrchu vzorku. Sintrované sklo bylo připevněno přírubou. Hladina vody v disku byla kontinuálně snímána tlakovým čidlem (236 PC Honeywell Microswitch, U.S.A.) a udržována na konstantní výškové úrovni pomocí spínacího ventilu. Při každém poklesu hladiny pod nastavenou úroveň došlo k otevření ventilu a voda proudila z plastových zásobníků.

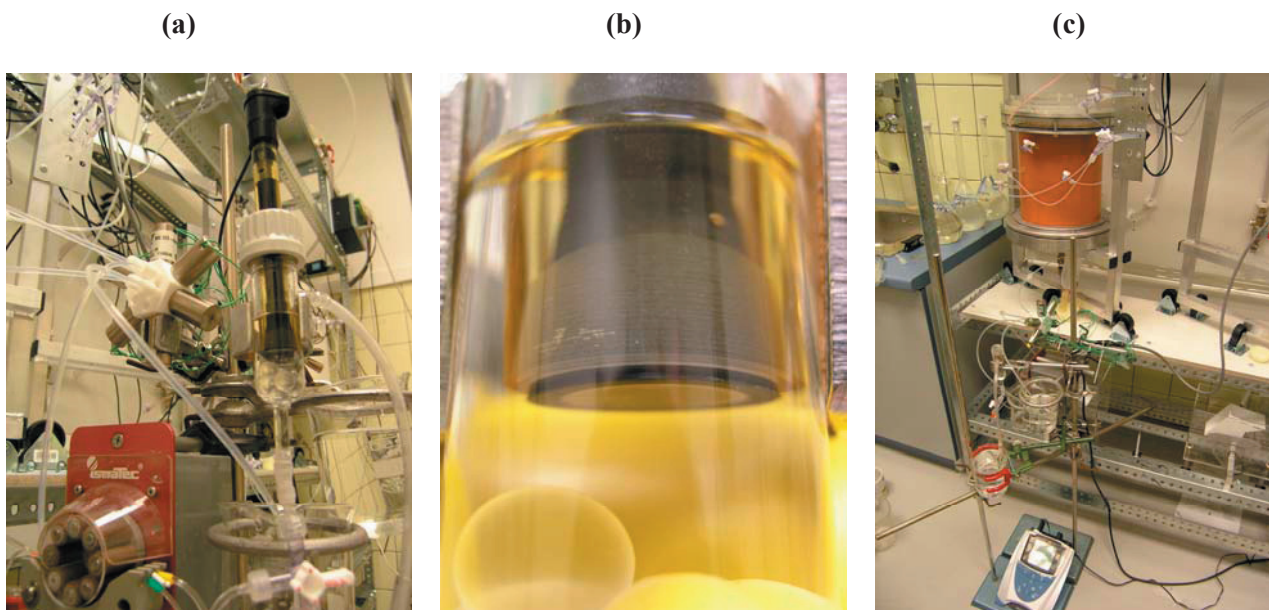
Vzorek byl osazen čtyřmi mikrotenzometry v hloubkách 8, 13 a 17 cm od horního okraje válce. Tělo mikrotenzometru bylo tvořeno keramickým válcovým tělískem (0652X03-B01M3, Soil Moisture, CA, U.S.A.). Keramické tělísko je propojeno teflonovými nestlačitelnými hadicemi s tlakovým čidlem (236 PC Honeywell Microswitch, U.S.A.). Mikrotenzometry umožnily snímat sací tlaky ve vzorku během experimentu.

Množství vody vytékající ze vzorku bylo měřeno překlopným průtokoměrem. Z četnosti překlopení průtokoměru a záznamu vážního čidla, na kterém je překlopný průtokoměr uložen byly vypočteny infiltrační a výtokové rychlosti.

Automatizovaná sestava byla doplněna přímou elektrochemickou analýzou bromidových iontů. Čerpání vytékající vody zajistila peristaltická pumpička (Mini-S Pumps, Ismatec, UK), která je propojena s průtočnou celou z borosilikátového skla. Uvnitř průtočné cely byla umístěna iontově selektivní Br⁻ elektroda (Orion 96-35, Thermo Electron Corporation, U.S.A.). Voda byla čerpána trubičkou do spodní části průtočné cely, kde docházelo k míchání vzorku a ISA roztoku (5M NaNO₃) v poměru 1:50. V horní části průtočné cely byla voda odváděna odpadní trubičkou. Kombinací peristaltické pumpičky a průtočné cely bylo umožněno kontinuální vzorkování koncentrace bromidových iontů během ustálené fáze

proudění experimentu. Elektroda byla napojena na ionometr (Orion 4 Star, Thermo Electron Corporation, U.S.A.). Před každým měřením proběhlo kalibrování elektrody kalibračními standardy o koncentraci 10 a 100 ppm.

Hmotnost vzorku a sací tlaky byly zaznamenávány v intervalu 5 s. Dále byly zaznamenávány časy překlopení průtokoměru. Uložená data byla zálohována stolním počítačem a ukládána do textového souboru 21X.dat. Koncentrace bromidových iontů byla zaznamenávána v intervalu 5s. Data byla kontinuálně ukládána data-loggerem (CR23X, Campbell Scientific, U.S.A.).



Obrázek 3 Experimentální sestava pro infiltračně-výtokový experiment s přímou elektrochemickou analýzou Br^- iontově selektivní elektrodou: (a) peristaltické čerpadlo a průtočná cela s bromidovou elektrodou, (b) detail povrchu bromidové elektrody, (c) celkový pohled na sestavu s jedním půdním vzorkem.

Infiltračně-výtokový experiment s aplikací konzervativního stopovače

Princip experimentu je založen na opakovaném měření výtopových infiltrací. Infiltrace byly provedeny klasickou metodou udržováním stálé hladiny vody nad horním okrajem vzorku. Byly provedeny tři sady měření výtopové infiltrace s aplikací bromidu pro referenční vzorek A a tři měření pro půdní vzorek B.

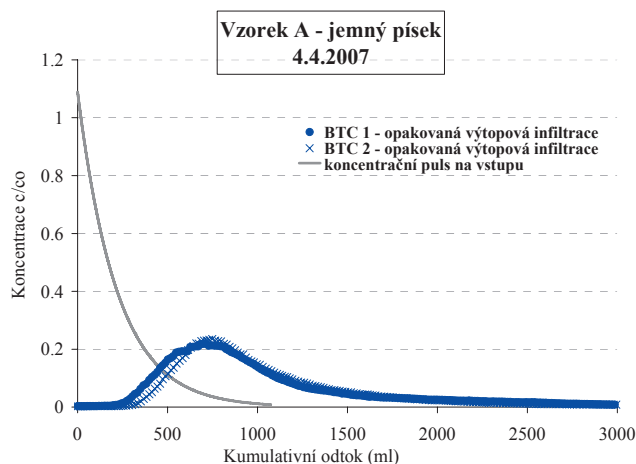
Pro jednotlivá měření byla v tlakovém disku udržována konstantní hladina vody +0.5 až +0.7 cm. Po celou dobu experimentu byly zaznamenávány sací tlakové výšky, okamžité infiltrační rychlosti a změny hmotnosti vzorku. Po dosažení ustálené fáze proudění, byly do vrstvy vody na povrchu disku aplikovány 3 ml standardu bromidu draselného o koncentraci 0.1 M. Roztok bromidu draselného byl použit jako konzervativní stopovač. Počáteční koncentrace v čase aplikace tak činila 108.9 ppm pro experimenty 1, 2, 3 a 152,5 ppm pro experiment 4. Průnikové čáry byly stanoveny během ustáleného proudění. Pro vzorek A bylo měřeno celkem sedm průnikových čar při různém počátečním nasycení referenčního vzorku. Pro vzorek B byly měřeny tři průnikové čáry.

Výsledky

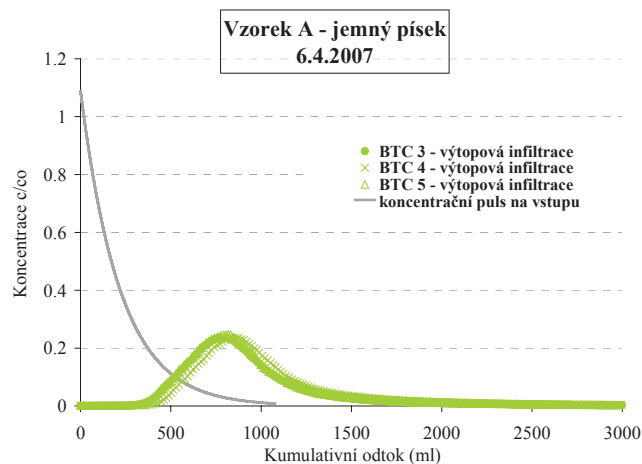
Záznamy sacích tlakových výšek na počátku jednotlivých experimentů jsou zobrazeny v tabulce 1. V prvních čtyřech sadách průnikových experimentů byla udržována horní okrajová podmínka + 0.7 cm, pro dvě následující sady byla horní okrajová podmínka + 0.5 cm. Počáteční podmínky sacích tlakových výšek byly v rozmezí 0 – 30 cm. Provedené experimenty na referenčním vzorku A ukazují změny v průběhu průnikových čar na základě změn počáteční vlhkosti půdy. Průběh první průnikové čáry každé sady experimentů je znázorněn v grafu 4.

Tabulka 1 Sací tlaky na počátku experimentu.

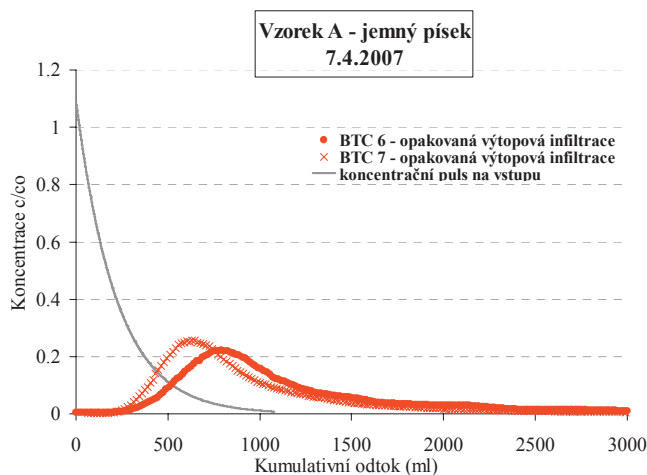
Experiment	Průniková čára č.	Sací tlaky na počátku experimentu			
		1	2	3	4
Vzorek A - 1	1	-19.3	-	-20.1	-13.3
	2	-19.3	-	-20.1	-13.3
Vzorek A - 2	3	-34.5	-	-35.2	-29.3
	4	-34.5	-	-35.2	-29.3
	5	-34.5	-	-35.2	-29.3
Vzorek A - 3	6	-16.6	-	-17.3	-11.5
	7	-16.6	-	-17.3	-11.5
Vzorek B	1	-262.0	-265.1	-266.1	-276.5



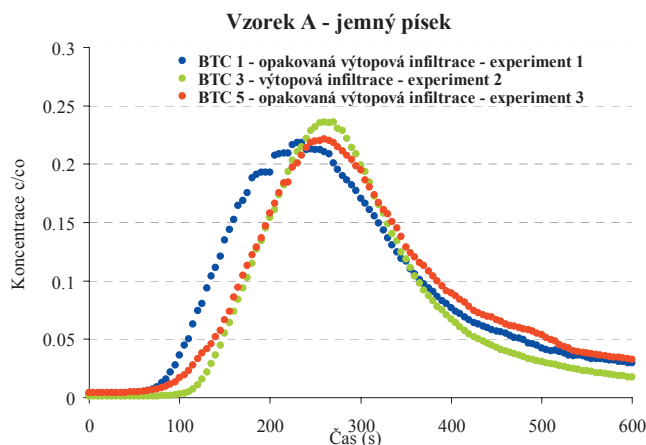
Graf 1 Průnikové čáry bromidu Br⁻ - opakovaná výtopová infiltrace – experiment 1; 2 x opakovaná aplikace 3ml dávky 0.1 M bromidu draselného.



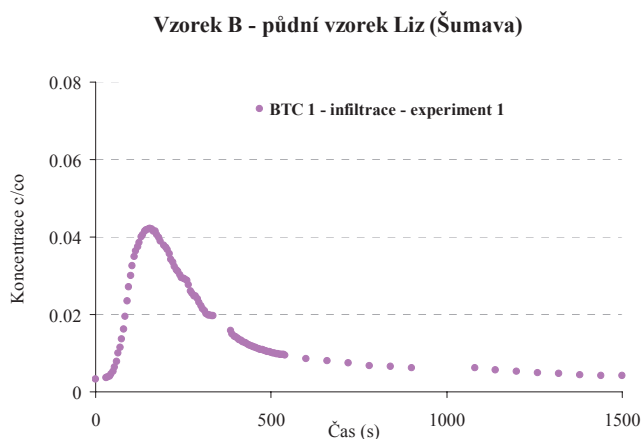
Graf 2 Průnikové čáry bromidu Br^- - výtopová infiltrace experiment 2; 3 x opakovaná aplikace 3ml dávky 0.1 M bromidu draselného.



Graf 3 Průnikové čáry bromidu Br^- - opakovaná výtopová infiltrace – experiment 3; 2x opakovaná aplikace 3ml dávky 0.1 M bromidu draselného.



Graf 4 Záznam průnikových čar č. 1, 3, 5 bromidu Br^- všech tří experimentů v čase pro referenční vzorek A.



Graf 5 Znárodnění průnikové čáry Br pro půdní vzorek B.

Diskuze a závěr

Na referenčním vzorku jemného písku a na neporušeném půdním vzorku byly provedeny opakované infiltračně-výtokové experimenty. Na pískovém vzorku bylo změřeno 7 průnikových čar bromidového iontu referenčního vzorku. Pro porovnání je v tomto příspěvku uvedena průniková čára pro půdní vzorek.

Tvary jednotlivých průnikových čar zjištěných při experimentech na referenčním pískovém vzorku se pro infiltrace s různým počátečním nasycením vzorku příliš neliší. To je ve shodě s předpokladem malé náchylnosti stejnozrnných homogenních materiálů k zachytávání nespojitého vzduchu při zvlhčování. Tvar průnikové čáry získané při experimentu na neporušeném heterogenním vzorku zřetelně vykazuje preferenční proudění. Data prezentovaná v tomto příspěvku jsou prvními výsledky infiltračně-výtokových a transportních experimentů získaných na nově zkonstruované měřicí aparatuře. V současnosti probíhají další ověřovací experimenty na dalších vzorcích heterogenních půd. Naměřená data budou podkladem pro inverzní modelování.

Poděkování

Tento projekt je podporován grantem interním grantem ČVUT v Praze CTU 0702711 a MSMT 1K05024.

Literatura

- [1] Císlarová, M., Vogel, T., 1998, Transportní procesy, skriptum, ČVUT v Praze.
- [2] Císlarová, M., Šimunek, J., Vogel, T., 1988, Changes of steady state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments, *Journal of Hydrology*, 104: 1 – 16.
- [3] Císlarová, M., Vogel, T., Šimunek, J., 1990, The infiltration–outflow experiment used to detect flow deviations, In: *Field-Scale Solute and Water Transport Through Soils*, ed. K. Roth, H. Flühler, W. A. Jury and J. C. Parker, Birkhauser Verlag, Basel, 109-117.

- [4] Faybishenko, B.A., 1995, Hydraulic behaviour of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air – laboratory experiment, *Water Resour. Res.* 31[10]: 2421-243.
- [5] Fayer, M.J., Hillel, D., 1986, Air Encapsulation: I. Measurement in a Field Soil, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 50: 568 – 572.
- [6] Flury, M. and Fluhler, H., 1994, Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 7: 1945-1954.
- [7] Ghodrati, M. and Jury, A., 1992, A field study of the effects of soil structure and irrigation method on preferential flow of pesticides in unsaturated soil, *Journal of Contaminant Hydrology*, 1: 101-125.
- [8] Johnson, G.R., K. Gupta, D.K. Putz, Q. Hu, M.L. Brusseau, 2003, The effect of local scale physical heterogeneity and non-linear, rate-limited sorption/desorption on contaminant transport in porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, 64, p.35-58.
- [9] Kamra, S.K., Lenartz, B., Van Genuchten, M.Th., Widmoser, P., 2001, Evaluating non-equilibrium solute transport in small soil columns, *Journal of Contaminant Hydrology*, 48, p. 189-212.
- [10] Padilla, I.Y., Jim Yeh, T. -C., Conklin, M.H., 1999, The effect of water content on solute transport in unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 35-11, p. 3303-3313.
- [11] Philips, I. and Burton, E., 2005, Nutrient leaching in undisturbed cores of an acid sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73: 1-14.
- [12] Sakaguchi, T., Nishimura, T. and Kato, M., 2005, The Effect of Entrapped Air on the Quasi-Saturated Soil Hydraulic Conductivity and Comparison with the Unsaturated Hydraulic Conductivity, *Vadose Zone Journal*, 4:139-144.
- [13] 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.
- [14] Sněhota, M., Jelinkova, V., Sobotkova, M., Císlarova, M., 2007, Hydraulic conductivity and entrapped air in heterogeneous soil: experimental set-up, *Geophysical Research Abstract*, Vol.8.
- [15] Tesař, M., 1996, Experimental basis and catchments in the Šumava Mts. (the Czech Republic), *Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins Newsletter*, 11, 6 -11.