NESTABILITA PROUDĚNÍ POZOROVANÁ NA ÚROVNI REPRESENTATIVNÍHO ELEMENTÁRNÍHO OBJEMU PŮDY

Michal Sněhota, Milena Císlerová

V heterogenních půdách dochází při vlhkostech blízkých nasycení ke vzniku preferenčního proudění. Preferenční proudění je často doprovázeno časovou nestabilitou hydraulických charakteristik, především hydraulické vodivosti. Tyto jevy byly zkoumány pomocí řady infiltračně výtokových experimentů provedených na neporušených vzorcích vybraných půd typických pro Českou republiku. Infiltrace byla na horním okraji vzorků provedena pomocí infiltračního disku s nastavenou konstantní sací tlakovou výškou. Spodní okraj vzorku byl podepřen perforovanou destičkou a byl přístupný atmosferickému tlaku. Tato okrajová podmínka odpovídá výronové ploše. Během experimentů byly zaznamenávány sací tlakové výšky v tensometrech, kumulativní infiltrace a odtok. Vzorek byl umístěn na elektronické váze a byly zaznamenávány jejho hmotnosti. Bylo potvrzeno, že v blízkosti nasycení velmi malá změna sací tlakové výšky na horním okraji vyvolává změnu hydraulické vodivosti až několika řádů. V průběhu experimentů nebylo dosaženo ustáleného proudění, přestože by podle klasické Richardsovy rovnice pro jednorozměrné proudění mělo nastat krátce po počátku výtoku vody ze vzorku. Při experimentech na neporušených vzorcích hlinitopísčitých půd s infiltračním diskem však po začátku výtoku docházelo dlouhodobě k postupnému zvyšování infiltrační rychlosti. Při obdobném experimentu s přímou aplikací vody na povrch vzorku (výtopová infiltrace) byl pro stejnou půdu zaznamenán trvalý pokles infiltrační rychlosti. Vysvětlením odlišného trendu vývoje infiltračních rychlostí může být rozdílný průběh redistribuce vody mezi preferenční doménou a půdní matricí. Pro hlubší pochopení těchto procesů bylo použito metody snímkování proudění ve vzorku metodou nukleární magnetické rezonance. Výsledky série snímkování neporušených půdních vzorků ukazují rozdíly v dynamice zvlhčování vzorku pro různé okrajové podmínky a různé počáteční nasycení. Experimenty prováděné na neporušených vzorcích heterogenních půd jsou součástí komplexního výzkumu preferenčního proudění na Fakultě stavební ČVUT. Cílem je lepší pochopení procesu preferenčního proudění typických půd v různých měřítcích a rozvoj nástrojů pro modelování pohybu vody a chemických látek v půdě.

Klíčová slova: hydraulické charakteristiky, nestabilita, infiltrační experiment, výtopová infiltrace

Flow instability observed at the scale of representative elementary volume. *Preferential flow occurs in heterogeneous soils when water content is close to saturation. Instability of hydraulic properties, namely hydraulic conductivity in time also often accompanies the preferential flow. These effects were investigated in series of infiltration-outflow experiments done on undisturbed cores of soils typical for Czech Republic. Constant pressure head infiltration was performed on the top of the columns. Lower end of the soil core was supported by coarse perforated plate and was in contact to the atmospheric pressure. The boundary condition at the bottom of soil cores was considered as seepage face. Suction pressure heads in soil pore water, infiltration and outflow rates were recorded during the course of experiments. It was found that close to saturation a small change of the pressure at upper boundary leads to a change of the hydraulic conductivity of several orders in magnitude. Unlike from the theory based on the Richards equation, where steady state flow would be achieved when outflow starts for this type of the experiment, the true steady state was not reached in any of experimental runs. In case of most experiments conducted using an infiltration disc, the infiltration rate gradually increased. When the ponded experiment was conducted on the same soil core, the slow gradual decrease of the flow rate was found. The differences in the water redistribution between the preferential and matrix domains may be a possible explanation for this behavior. To understand better the above processes, the magnetic resonance imaging of the soil core was involved. The results of the series of images show differences in dynamics of the sample wetting for various initial and boundary conditions. Experiments conducted on undisturbed soil cores represent part of the complex investigation of the preferential flow at the Faculty of Civil Engineering, CTU. The goal is the better understanding to the process of preferential flow at various scales and to develop modeling tools to predict water flow and solute transport in soils.*

Key words: hydraulic properties, instability, infiltration experiment, ponded infiltration

---

ÚVOD

Metody vyhodnocování experimentů ke stanovení retenční čáry a funkce hydraulické vodivosti půd vycházejí obvykle z předpokladu stálosti těchto charakteristik v čase. Jak ale ukazují výsledky

experimentálního výzkumu publikované v průběhu uplynulého více než půstoletí, tento předpoklad není pro velkou část půd použitelný. Změny hydraulických charakteristik jsou často reversibilní a nemusí nutně záviset na změně struktury půdy. Uvedená proměnlivost hydraulických charakteristik byla v historii dávána do souvislosti s chováním vzduchu uzavřeného v pórech, nebo s mikrobiologickou aktivitou. *Christiansen* (1944) provedl na malých porušených vzorcích půd výtopové infiltrace, při kterých voda vzorkem proudila při jednotkovém gradientu, a zjistil, že proces infiltrace tvořily za stálých okrajových podmínek tři základní fáze. Po počátečním poklesu hydraulické vodivosti v době trvání přibližně 0,5 dne, docházelo k dlouhodobému výraznému nárůstu infiltrační rychlosti (a tedy hydraulické vodivosti) až k 450% minimální hodnoty za 5 dní. Při dalším pokračování experimentu se hydraulická vodivost opět postupně snižovala. Autor vzrůst infiltračních rychlostí vysvětluje úbytkem množství vzduchu uzavřeného v pórech. Zároveň ukazuje, že podíl minimální a maximální propustnosti koreluje lineárně s množstvím uzavřeného vzduchu v pórech. *Císlerová et al.* (1988) zjistili závislost hodnot infiltrační rychlosti na počátečním nasycení vzorku před zahájením expertimentu. Použili metodu opakované výtopové infiltrace v laboratoři a v terénu. Při druhé infiltraci a všech dalších infiltracích, při kterých voda proudila do půdy ve stavu blízkém nasycení byla infiltrační rychlost nižší než při první infiltraci provedené do přirozeně suché půdy. Za možnou příčinu autoři považovali přítomnost uzavřeného vzduchu v pórech. *Faybishenko* (1995) provedl experimenty na porušených a neporušených vzorcích půdy, kdy zjišťoval vliv okrajových podmínek, směru proudění a počátečních podmínek na množství uzavřeného vzduchu. *Schultze et al.* (1999) experimentálně zjistili, že hydraulické charakteristiky byly závislé na dynamice cyklu sycení a drénování půdního vzorku. Autoři představili experiment, při kterém se plynule měnil tlak vody na spodním okraji půdního vzorku z plného nasycení do nenasyceného stavu. Horní okraj vzorku byl přístupný atmosférickému tlaku. Z výsledků experimentu autoři zjistili, že tvar retenční čáry byl ovlivněn rychlosti změny dolní okrajové podmínky. Podle autorů plynná fáze v pórech ztrácí konektivitu při nasyceních vyšších než 50 až 70%. V obdobném experimentu *Wildenshild* et al. (2001), zjistili závislost hydraulické vodivosti na rychlosti proudění. Retence vody v půdě a hydraulická vodivost byly pro stejný sací tlak vyšší, když voda proudila s vyšším hydraulickým gradientem (tj. s vyšší rychlostí proudění), než při nižším hydraulickém gradientu (nižší rychlosti proudění).

Cílem tohoto příspěvku je seznámit s výskytem dlouhodobé časové variability infiltrační rychlosti pozorované při infiltračně výtokových experimentech na neporušených vzorcích půd. Infiltračně výtokové experimenty jsou významnou skupinou transientních experimentů pro určování hydraulických charakteristik pomocí inverzního modelování. *Robovská* (*2000*) navrhla infiltračně-výtokový experiment, ve kterém je pomocí diskového infiltrometru na horním okraji vzorku nastavena tlaková výška, konstantní po celou dobu infiltrace. Výhodou transientních metod měření je možnost využití složitějších modelů proudění pro vyhodnocení experimentu a tím i možnost určování hydraulických charakteristik půd vykazujících preferenční proudění.

Bylo zjištěno že v té části infiltračního experimentu, ve které by mělo podle klasické Richardsovy rovnice proudění vody být konstantní, dochází k postupné změně infiltrační rychlosti. Míra a trend této časové variability infiltrační a výtokové rychlosti jsou ovlivněny více faktory. V tomto příspěvku se zaměřujeme především na vliv typu okrajové podmínky experimentu. Prvním typem okrajové podmínky byla konstantní tlaková výška aplikovaná na horní okraj vzorku pomocí infiltračního disku (nebo také diskového infiltrometru) v rozmezí malých podtlaků a přetlaků. Druhá okrajová podmínka byla volná výtopa, v rozmezí malých kladných tlakových výšek. Vliv počáteční podmínky je demonstrován na příkladech experimentů provedených na velkých neporušených vzorcích. Pro hlubší pochopení těchto procesů bylo použito metody snímkování metodou nukleární magnetické rezonance. Výsledky série snímkování neporušených půdních vzorků ukazují rozdíly v dynamice infiltrace pro různé okrajové podmínky a různá počáteční nasycení.

METODY A MATERIÁL

Půda

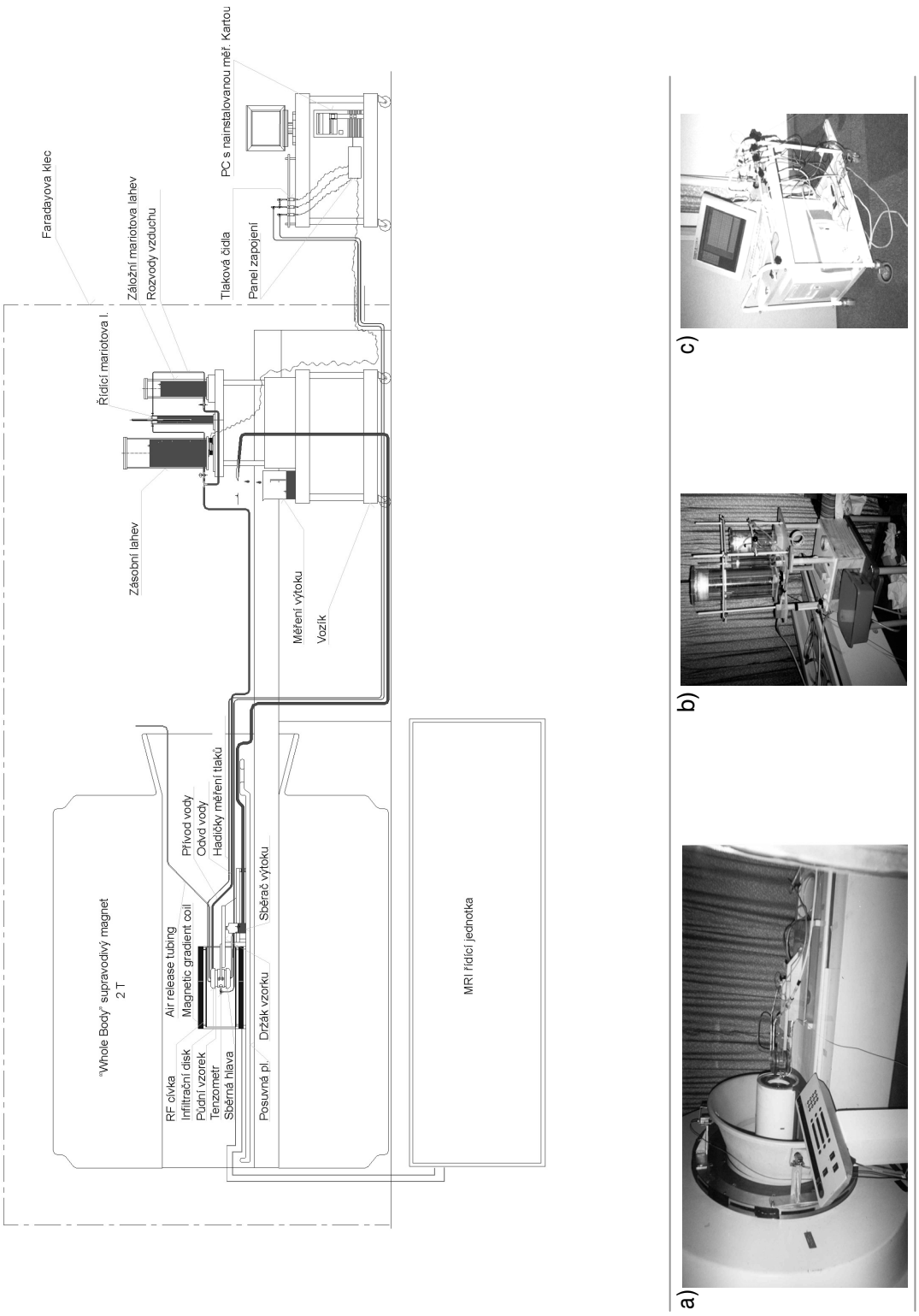
Zkoumanou půdou byla hrubá hlinitopísčitá půda (District Cambisol), z lokality Korkusova Huť (KH). Pro tuto půdu byla opakovaně zjištěna nestabilita hydraulických charakteristik (*Císlerová et al.* 1988; 1990; 2002). Pro srovnání byla použita také hlinitopísčitá půda s obsahem štěrkových zrn z oblasti Krkonošského národního parku KR. Neporušené půdní vzorky byly v terénu odebrány z B horizontu v hloubce 40 cm do plastových válců. Velké neporušené vzorky byly označeny kódy KHXL3 a KRXL1 Velikost vzorku označeného KHS5 byla limitována použitým vybavením pro snímkování pomocí MRI. Základní parametry vzorků půdy KH jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tab. 1: Základní vlastnosti neporušeného půdních vzorků KH
Tab. 1: Basic properties of undisturbed soil samples KH

Vzorek	Velikost				ρ_d	p	V_p
	d (cm)	S (cm^2)	h (cm)	V (cm^3)	(g/cm^3)	(-)	(cm^3)
KHS5	8.9	62.2	8.4	522.6	1.410	0.37	195.2
KHXL3	18.9	280.4	25.0	7010.3	1.458	0.427	2993.4

Experiment sledovaný magnetickou rezonancí

Magnetická nukleární rezonance MR je metoda založená na detekci vodíkových protonů umístěných v silném magnetickém poli. Princip metody je vysvětlen například *Keanem a Smithem* (1986), V porézních materiálech může být tato metoda použita pro měření distribuce vlhkosti, neboť intenzita MR signálu je ve vztahu k množství vody v pórech. MR také umožňuje prostřednictvím měření relaxace T1 měření poměru plochy k objemu vody uzavřené v pórech (*Kleingerg*, 1994). Velké hodnoty podélné relaxace T1 vyjadřují přítomnost vody ve velkých pórech. Nepříznivé vlastnosti většiny přírodních půd z hlediska MR zatím neumožňují kvantitativní měření, přesto je ale MR unikátní metodou pro detekci preferenčního proudění v půdách.
Pro různé fáze experimetů byly použity různé techniky snímkování MR. Všechny typy snímkování byly založeny na protokolu spin-echo, který se v minulosti ukázal být vhodný pro použití při MRI půd (*Amin et al.* 1993, *Votrubová* 2002). K monitorování transientního proudění v počátečních fázích infiltrace bylo použito rychlé 2D snímkování. Ve fázi quasi ustáleného proudění a při rovnovážném stavu po ukončení drenáže bylo provedeno snímkování v 16 horizontálních řezech. Každý snímek byl pořízen v rozlišení 256 x 256 pixelů a každý řez měl toušťku 5 mm. Na vzorku KHS5 byla nejprve provedena podtlaková infiltrace pomocí diskového infiltrometru nastaveného na tlakovou výšku –2.0 cm. Po opětovném vysušení vzorku, na nízkou počáteční vlhkost byla provedena druhá, výtopová infiltrace s tlakovou výškou 3 cm vodního sloupce.
Sestava a postupy použité v této studii byly popsány *Sněhotou (2003).* Schéma uspořádání experimentu je zobrazeno na obrázku 2.



Obr. 1: Schéma uspořádání experimentu se současným snímkováním pomocí magnetické rezonance. Jednotlivé součásti zařízení jsou dokumentovány fotografiemi a) magnet a vysunutý držák vzorku, b) zásobní a řídící Mariotovy lahve, c) tlaková čidla a PC se zabudovanou měřící kartou. (Sněhota, 2003)

Fig. 1: Schema of the experiment performed in MRI. The parts of the set-up are documented in photographs as follows: a) whole body superconducting magnet, and the sample holder b) the trolley carrying Mariote's bottles. c) data acquisition trolley with pressure transducers, PC and data acquisition board. (Sněhota, 2002)

Snímkování bylo provedeno ve velkém “whole body” magnetu (2 Tesla, Oxford Instruments, Oxford, UK) o průměru 100cm, který byl vybaven konzolí Bruker MSL (Bruker BioSpin, Německo) a řízen systémem ParaVision (Bruker Biospin, Německo).

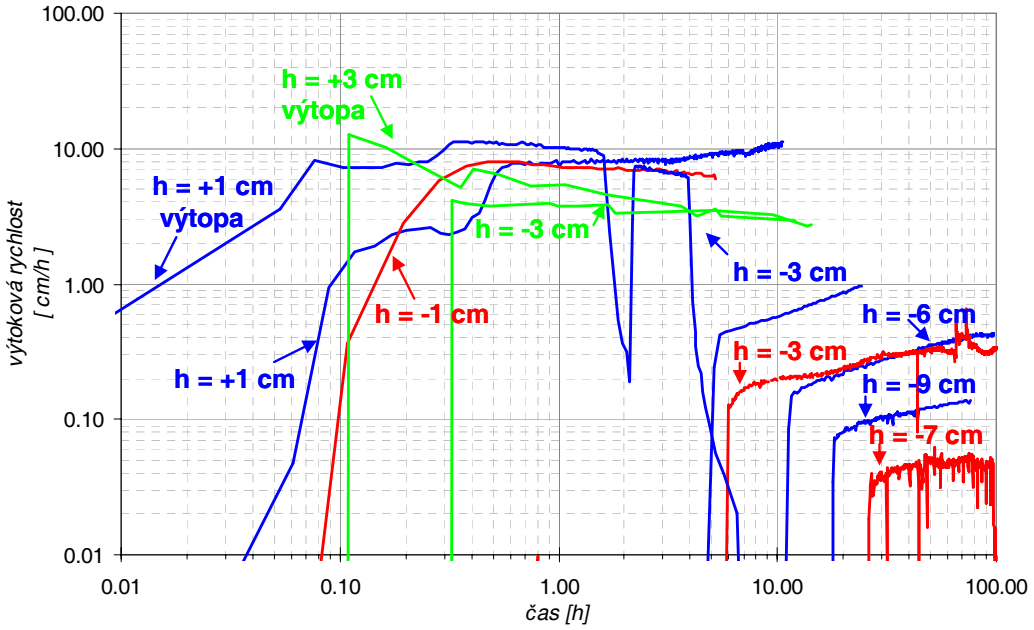
VÝSLEDKY

Měření toků a tlakových výšek

Výsledky experimentů ukazují vývoj výtokových rychlostí (viz. obr.2) a tlakových výšek (viz. obr. 3) pro vzorky půdy KH (vzorky KHXL3,KHS5) a půdy KR (vzorek KRXL1). Záznamy výtokových rychlostí u všech infiltračních pokusů vykazují v první fázi shodný průběh. Voda začala vytékat z půdy v okamžiku, kdy došlo k místnímu nebo plošnému nasycení spodního okraje vzorku. Po dosažení úrovně, při které se intenzita výtoku zhruba rovnala infiltrační rychlosti, došlo ke zlomu čáry výtokových rychlostí. Poté nastal režim proudění které lze označit jako quasi ustálené. Další vývoj infiltračních rychlostí představuje pomalou dlouhodobou změnu rychlosti proudění.
U vzorku KHXL3 bylo zaznamenáno postupné zvyšování rychlostí proudění v této fázi experimentu při experimentech s infiltračním diskem a s tlaky –9, -6, -3, +1 cm vodního sloupce k postupnému zvyšování infiltračních rychlostí. Naopak infiltrační rychlost se postupně snižovala při výtopové infiltraci s tlakovou výškou +1cm na horním okraji. K postupnému zvyšování infiltrační rychlosti docházelo také při experimentech na vzorku KRXL1, při podtlakových výškách h = -7 cm a -3 cm vodního sloupce. Odlišný trend vykazuje infiltrace provedená s podtlakovou výškou h = -1 cm. U tohoto experimentu došlo k postupnému zvyšování infiltrační rychlosti, přestože se jednalo o experiment s použitím infiltračního disku. Na vzorku KHS5 byly provedeny dva infiltrační pokusy.se současným snímkováním metodou magnetické rezonance. Infiltrační rychlost v oblasti quasi ustáleného proudění v obou případech, tedy jak při výtopové, tak při podtlakové infiltraci dlouhodobě klesala. Z uvedených skutečností vyplývá, že trend vývoje infiltrační rychlosti ve fázi quasi ustáleného proudění není jednoznačně dán pouze podmínkou na horním okraji.

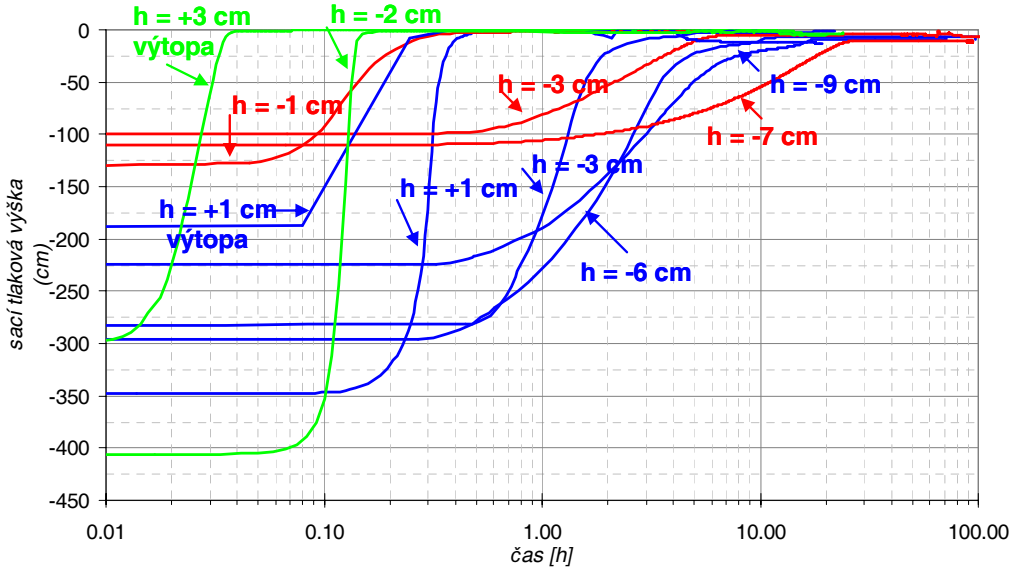
Snímkování nukleární magnetickou rezonancí

Výsledkem experimentu provedeného v MR skeneru jsou toková a tlaková data a zároveň MR snímky. Při experimentu byla získána série 2D a kompozitních 3D snímků půdního vzorku ve vybraných časových úsecích. V tomto příspěvku jsou předmětem zájmu 2D snímky intenzity signálu. Při každém experimentu byly pořízeny snímky horizontálních řezů tak, aby vertikálně pokryly celou výšku vzorku. Snímkování vzorku bylo provedeno ve čtyřech časových úsecích: v suchém stavu před zahájením experimentu (není zde uvedeno), na počátku fáze quasi ustáleného proudění (bude označeno ST1), na konci quasi ustáleného proudění (ST2) a v rovnovážném stavu po ukončení gravitačního drénování vzorku (DR1). Příklady snímků horizontálních řezů dvěma hloubkovými úrovněmi, jsou uvedeny na obrázku 4.
Na obrázcích 5 a 6 jsou zobrazeny histogramy intenzity signálu celé sady snímků z hloubky –1 cm pod povrchem vzorku. Z oblastí snímků mimo obvod vzorku byla vyhodnocena významná úroveň šumu jako průměrná hodnota intenzity signálu plus dvojnásobek standardní odchylky šumu. Intenzita na významné úrovni šumu je v grafu vyznačena svislou čarou. Hodnoty intenzity voxelů nižší než významná úroveň šumu neposkytují spolehlivou informaci. Při výtopové infiltraci je ve spolehlivé oblasti signálu mezi snímky z horní části vzorku v období mezi ST1 a ST2 patrný pokles signálu. Tento pokles signálu koresponduje se snížením výtokové rychlosti. Pokles MR signálu neznamená nutně úbytek veškeré vody, ale vyjadřuje úbytek vody viditelné pomocí MR, tj. vody ve velkých pórech. Voda v malých pórech je v důsledku krátkých relaxačních časů pomocí MR neviditelná. V následné etapě experimentu DR1 nedošlo k výraznému poklesu signálu. V případě podtlakové infiltrace nedošlo ve sledovaných třech fázích experimentu k žádné výrazné změně úrovně signálu.



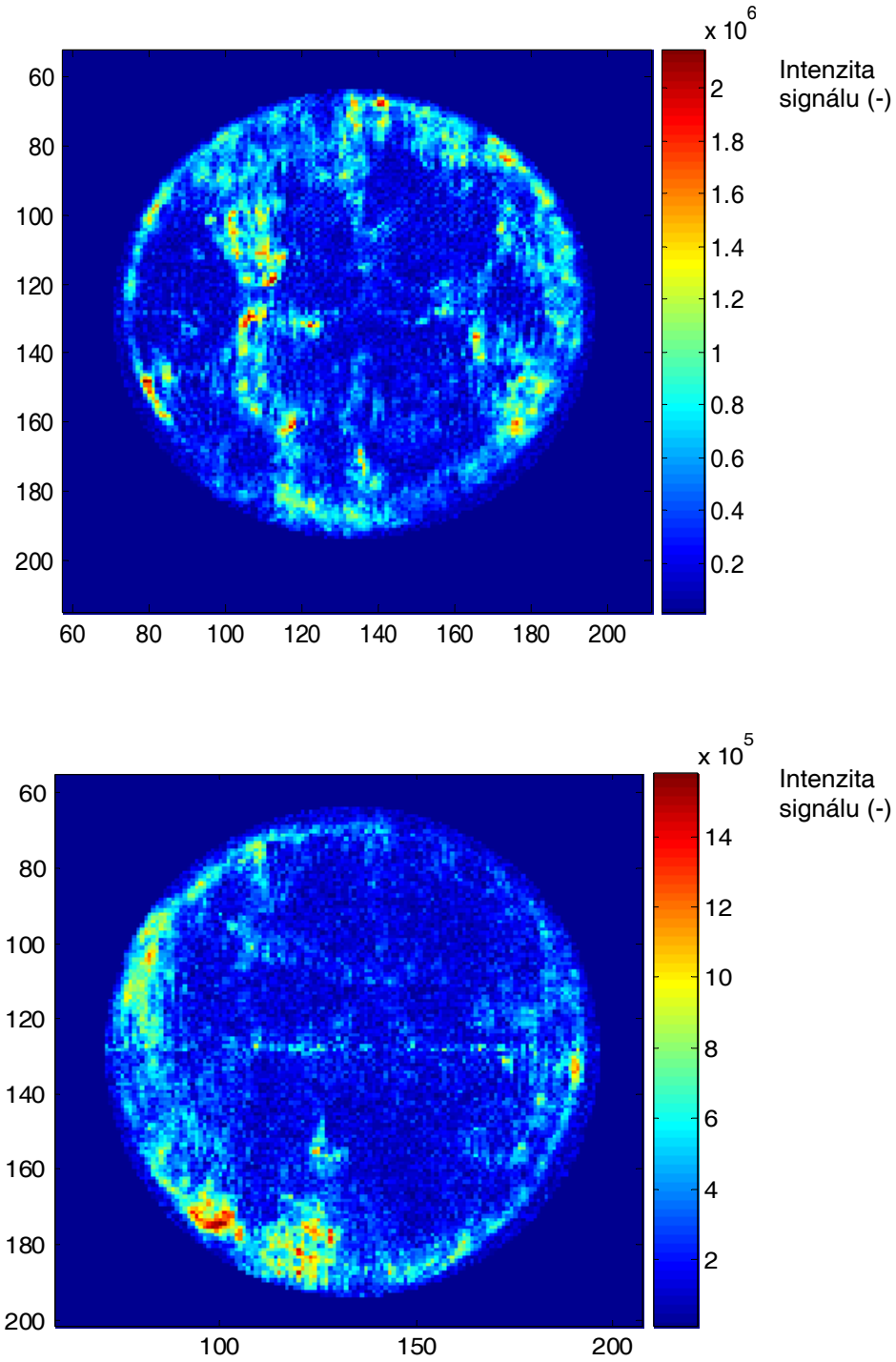
Obr. 2: Výtokové rychlosti při infiltracích provedených na vzorcích KHS5 (zelená), KHXL3 (modrá) a KRXL1 (červená). Tlaková výška h uvedená u každé datové řady vyjadřuje horní okrajovou podmínku experimentu.

Fig. 2: Outflow flux densities during infiltrations done on soil cores KHS5 (green), KHXL3 (blue) a KRXL1 (red). Annotation of each line represents suction pressure head set at the top boundary.



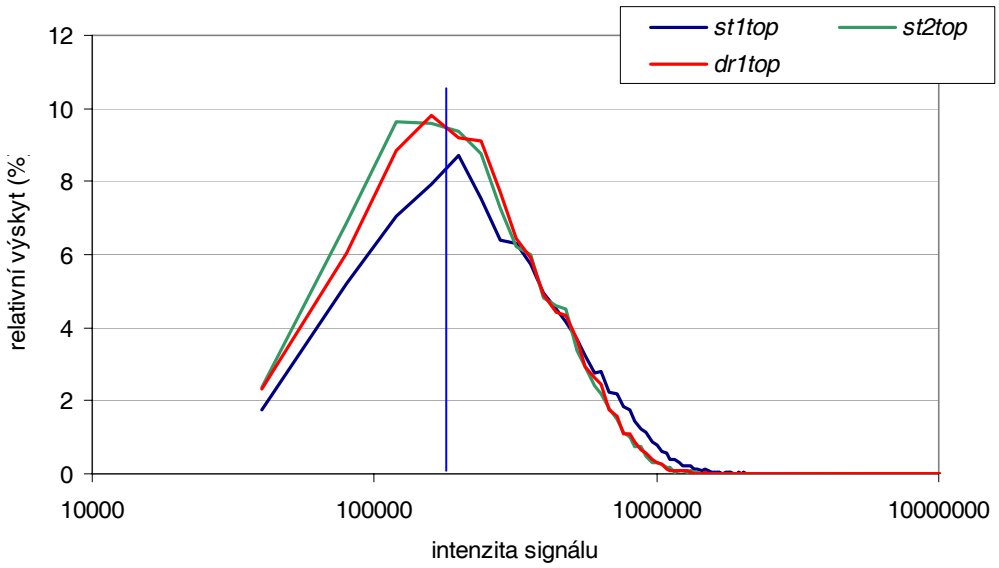
Obr. 3: Sací tlakové výšky měřené tensometrem ve středu vzorku v průběhu infiltrací provedených na vzorcích KHS5 (zelená), KHXL3 (modrá) a KRXL1 (červená). Tlaková výška uvedená u každé datové řady vyjadřuje horní okrajovou podmínku experimentu.

Fig. 3: Suction pressure heads in tensiometers placed in center of the soil core during infiltrations done on soil cores KHS5 (green), KHXL3 (blue) a KRXL1 (red). Annotation of each line represents suction pressure head set at the top boundary.



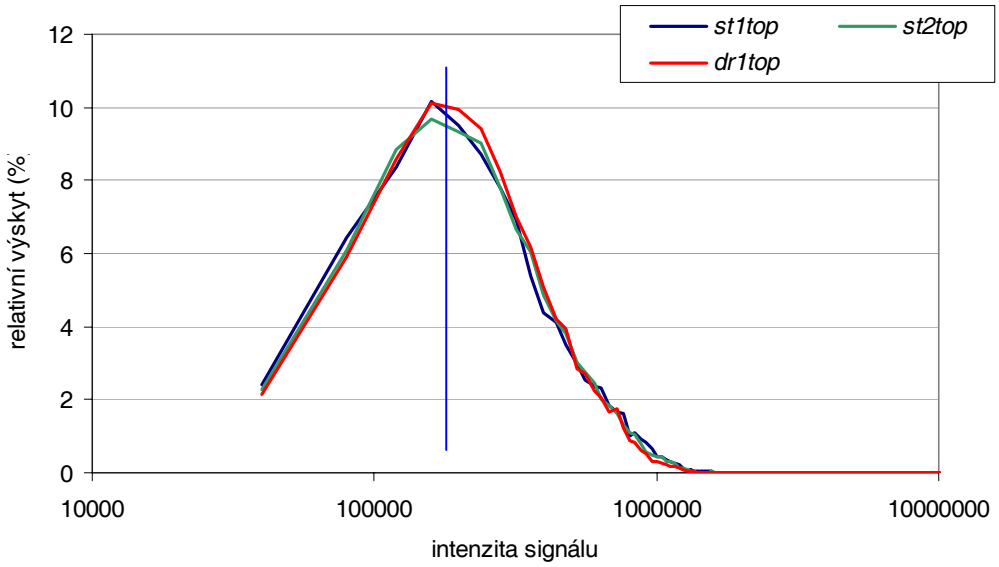
Obr. 4: Intezita MR signálu na snímcích se středem -1 cm (nahoře) a -6 cm (dole) pod povrchem vzorku. Snímky byly pořízeny na počátku fázi quazi-ustáleného proudění, při experimentu na vzorku KHS5.

Fig. 4: Signal intensity in slices – 1cm (upper) and -6 cm (lower) deep into soil core KHS5. Imaging was done during early stage of quasi-steady flow.



Obr. 5: Histogram intenzity signálu MR snímku z hloubky -1 cm pod povrchem vzorku. Snímky vzorku KHS5 byly pořízeny ve fázích ST1(modrá), ST2(zelená) a DR1(červená) výtopové infiltrace.

Fig. 5: Histogram of MR signal intensity from -1cm bellow the top of the samples. Images of soil sample KHS5 taken in stages ST1(blue), ST2(green) and DR1(red) of ponded infiltration.



Obr. 6: Histogram intenzity signálu MR snímku z hloubky -1 cm pod povrchem vzorku. Snímky vzorku KHS5 byly pořízeny ve fázích ST1(modrá), ST2(zelená) a DR1(červená) podtlakové infiltrace.

Fig. 6: Histogram of MR signal intensity from -6 cm bellow the top of the samples. Images of soil sample KHS5 taken in stages ST1(blue), ST2(green) and DR1(red) of tension infiltration.

ZÁVĚRY

Výsledky infiltračně výtokových experimentů na třech neporušených vzorcích půdy ukazují důsledky

změn hydraulických charakteristik v čase. Bylo ukázáno, že tendence těchto změn nezávisí pouze na typu okrajové podmínky.

Měření provedená pomocí nukleární magnetické rezonance zdůraznila netriviální charakter proudění a změn distribuce vlhkosti ve zkoumané heterogenní půdě ve stavech blízkých nasycení vodou. S dlouhodobým poklesem hydraulické vodivosti v čase při výtopové infiltraci korespondoval pokles intenzity platného signálu. Tento pokles může být důsledkem redistribuce vody z velkých pórů do půdní matrice. Pro ověřování nových přístupů modelování takovýchto efektů se s výhodou uplatní unikátní vlastnosti metody MRI. Zjištěné efekty jsou z hydrologického hlediska klíčové, nezanedbatelnou roli mají při popisu transportu látek v půdním profilu.

PODĚKOVÁNÍ

Tento projekt je podporován z výzkumného projektu VaV 650/5/03 Labe IV.

Snímkování pomocí MRI bylo umožněno díky laskavé podpoře Herchel Smith Laboratory of Medicinal Chemistry (HSLMC) na University of Cambridge, UK.

LITERATURA

Amin, M.H.G., Hall, L.D., Chorley, R.J., Richards, K.S., Carpenter, T.A., and Bache, B.W., 1996. Visualization of the static and dynamic water phenomena in soil using magnetic resonance imaging. In: Singh,V.P. and Kumar,B. (Eds.), Subsurface-water hydrology. Kluver, Dordrecht., pp. 3-16.

Anderson, S.H., Peyton, R.L., Wigger, J.W, and Gantzer, C. J. 1992. Influence of aggregate size on solute transport as measured using computed tomography. Geoderma 53: 387-398.

Christiansen, J.E. 1944. Effect of entrapped air upon the permeability of soils. Soil Science 58: 355-365.

Císlerová, M., J. Šimůnek, and Vogel, T. (1988): Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments, J. Hydrol., 104, 1–16.

Císlerová, M., Vogel, T., and Šimůnek, J. (1990): The infiltration-outflow experiment used to detect flow deviations, in Field -Scale Solute and Water Transport Through Soils, edited by K. Roth et al., 109–117, Birkhäuser Boston, Cambridge, Mass.

Císlerová, M., Vogel, T., Votrubová, J., and Robovská, A. (2002): Tracing the origins of preferential flow within undisturbed soil samples, in Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere, Geophys. Monogr. Ser. ,vol. 129, edited by P.A.C. Raats, D.E. Smiles, and A. Warrick, 265–274, AGU, Washington, D. C.

Faybishenko, B.A. 1995. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air – laboratory experiment. Water Resour. Res. 31[10]: 2421-2435.

Kean, D.M. and Smith, M.A., 1986. Magnetic resonance imaging, Principles and Aplications. W. Heinemann Medic. Books, London.

Kleinberg, R.L., Kenyon, W.E., and Mitra, P.P., 1994. Mechanism of NMR Relaxation of Fluids in Rock. Journal of Magnetic Resonance Series A, 108(2): 206-214.

Robovská, A., 2000. Measurements of hydraulic characteristics using tension disc infiltrometer on large soil samples. (In Czech). PhD. Thesis, CTU in Prague

Sněhota, M. 2003. Evaluation of infiltration-outflow experiment using MRI. PhD. Thesis, Czech Technical University in Prague, Prague.

Schultze, B., O. Ippisch, B. Huwe, and W. Durner. 1999. Dynamic nonequilibrium during unsaturated water flow. In M. Th. Van Genuchten, F.J. Leij, and L. Wu (Eds.) Proc. of the Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Oct. 22–24, 1997. Univ. of California. Riverside, CA. p. 877–892.

Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. and Droogers, P., 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions form multiple step outflow experiments. Soil Sci. Soc. of Am. J. 58: 647-652.

Votrubová, J., 2002. MRI potential to monitor preferential flow in structured soils. PhD. Thesis, Czech Technical University in Prague, Prague.

Wildenschild, D., Hopmans, J.W., and Simunek, J., 2001. Flow rate dependence of soil hydraulic characteristics. Soil Sci. Soc. of Am. J., 65 (1): 35-48.

Michal Sněhota, CTU, Faculty of Civil Engineering, Dept. of Drainage, Irrigation and Landscape Engineering, Thákurova 7, 166 29 Prague, Czech Republic, michal.snehota@fsv.cvut.cz

Milena Císlerová, CTU, Faculty of Civil Engineering, Dept. of Drainage, Irrigation and Landscape Engineering, Thákurova 7, 166 29 Prague, Czech Republic