VLIV REZIDUÁLNÍHO VZDUCHU V PÓRECH NA INFILTRACI DO PŮDY V BLÍZKOSTI NASYCENÍ

Michal Sněhota[1], Martina Sobotková [1], David Zumr[1], Vladimíra Jelínková [1], Milena Císlerová [1]

Abstrakt

Infiltrace do půdy během srážek s vysokou intenzitou vyvolává v půdě stavy vlhkosti blízké nasycení, při kterých za určitých podmínek zaniká spojitost půdního vzduchu s atmosférou předpokládaná Richardsovou rovnici. Pro zlepšení znalostí o proudění vody v blízkosti nasycení byla provedena série terénních a laboratorních experimentů ve čtyřech odlišných měřítcích. Laboratorní experimenty byly prováděny na vzorcích referenčního křemičitého písku a na neporušených vzorcích heterogenních půd ze dvou horských povodí. Pomocí laboratorních experimentů byl potvrzen předpoklad vztahu mezi změnami (kvazi)ustálené rychlosti infiltrace a množstvím a distribucí uzavřeného vzduchu v pórech. Bylo zjištěno že objemové změny uzavřeného vzduchu byly doprovázeny výrazným zvyšováním nebo snižováním (kvazi)ustálených rychlostí infiltrace, přestože jsou při experimentu konstantně nastaveny okrajové podmínky, odpovídající plně nasycenému proudění. Zachycení vzduchu, jeho další vývoj a vliv na proudění je odlišný u homogenního písku a u heterogenních půd, kde dominuje preferenční proudění. Experimenty prokázaly, že v heterogenní půdě jsou zmiňované efekty výraznější než v homogenním písku. Zjištěné skutečnosti přispívají k detailnímu objasnění mechanismu elementárního hydrologického procesu infiltrace.

Klíčová slova: půda, uzavřený vzduch, infiltrace, hydraulická vodivost, neinvazivní metody

1. Úvod

Hydraulické charakteristiky, tj. retenční čára a funkce hydraulické vodivosti jsou běžně uvažovány jako v čase neměnné nebo měnící se jen pomalu. Tento předpoklad je také standardně uplatňován při modelování infiltrace. Výsledky některých experimentů publikovaných v literatuře ale ukazují, že se například nasycená hydraulická vodivost může výrazně měnit i v časovém horizontu jednoho infiltračního experimentu. Časová nestabilita hydraulické vodivosti, je v literatuře přisuzována z velké části vlivu přítomnosti uzavřeného vzduchu v pórech jinak zcela nasycené půdy [1, 2]. Jako uzavřený vzduch (entrapped air) se obvykle označuje takový půdní vzduch, který při zvlhčování pórovitého média postupně ztratí spojitost s atmosférou. Jiným případem podobně nespojité plynné fáze jsou bublinky biogenních plynů, které také mohou výrazně ovlivňovat proudění vody v rašeliništích [3]. Vlivem ztráty kontinuity plynné fáze a přítomnosti uzavřeného vzduchu může být hydraulická vodivost půdy snížena o 50 až 70 % [4]. Faybishenko [5] zavedl pro časově proměnlivou charakteristiku vyjadřující schopnost půdy vést vodu při nulových nebo kladných tlakových výškách termín “kvazi-nasycená hydraulická vodivost” a při experimentech na velkých vzorcích heterogenních půd zjistil, že kvazi-nasycená hydraulická vodivost může být 5–8x nižší než hodnota koeficientu nasycené hydraulické vodivosti (Ks) zcela nasycené půdy. Snížení hydraulické vodivosti z důvodu přítomnosti uzavřeného vzduchu bylo zjištěno nejen v laboratorních podmínkách, ale i v terénu při monitorování infiltrace z nádrže pro řízené zasakování [6].

Přesný mechanismus zachytávání vzduchu v pórech a jeho následné redistribuce není dosud znám. Výsledky experimentů [7] ukazují, že vlivy uzavřeného vzduchu na proudění jsou významnější v půdách s přítomností preferenčního proudění.

Standardní přístupy k modelování infiltrace založené na řešení Richardsovy rovnice výše uvedené efekty neuvažují. Přestože uzavřený vzduch může zásadně ovlivňovat infiltraci, nebyl dosud vyvinut jednoduše použitelný matematický model popisující zachycení a vývoj

uzavřeného vzduchu v půdě. Dosud publikované práce představily matematický popis některých dílčích procesů např. rozpouštění bublinek zachyceného plynu [8, 9] a to pouze pro homogenní pórovité prostředí. Důvodem chybějícího matematického popisu je mimo jiné také nedostatek podrobných experimentálních dat.

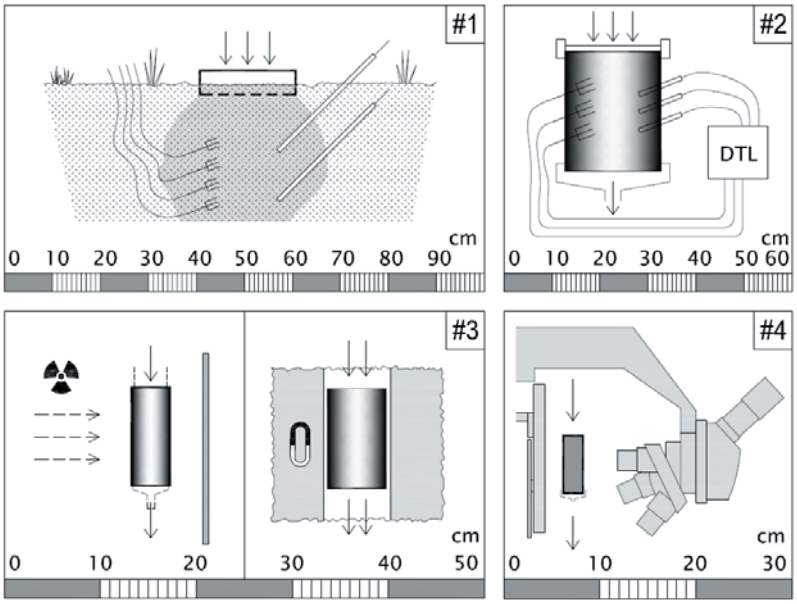
Tento příspěvek ukazuje některé výsledky probíhajícího komplexního experimentálního výzkumu zaměřeného na objasnění podstaty vzniku a vývoje uzavřeného vzduchu a jeho vlivu na infiltraci vody do půdy.

2. Materiál a metody

Infiltrace do půdy byla studována v následujících čtyřech měřítcích experimentu:

- měřítko #1: opakované výtopové infiltrace na experimentální ploše v terénu [10]
- měřítko #2: infiltrační experimenty na velkých neporušených půdních vzorcích [7]
  měřítko #3: infiltrační experimenty na malých neporušených půdních vzorcích se současným snímkováním vzorku pomocí nukleární magnetické rezonance [11] a neutronové tomografie
- měřítko #4: infiltrační experimenty na miniaturních vzorcích, se snímkováním optickým mikroskopem [12].

Výhoda experimentů s velkou oblastí proudění (měřítka #1 a #2) spočívá v tom, že výsledky měření jsou reprezentativní pro studovanou půdu. Naopak použití malých vzorků (měřítka #3 a #4) umožnilo využití moderních neinvazivních vizualizačních metod pro detailní zkoumání procesů uvnitř půdy. Velikost vzorku nebo domény proudění pro jednotlivá měřítka experimentu je znázorněna na obrázku 1.



Obr. 1: Schematické zobrazení experimentů ve čtyřech měřítcích

2.1 Studovaná půda

Ve všech měřítcích experimentu byla zkoumanou půdou hrubá písčitohlinitá půda ze skupiny kambisolů odebraná z lokality Korkusova Huť (KH). Pro tuto půdu byla v minulosti opakovaně zjištěna nestabilita hydraulických charakteristik [2]. Jako referenční médium byl v měřítcích experimentu #2 a #4 použit také jemný křemičitý písek (SAND).

2.2 Infiltrační experimenty v terénu (měřítko #1)

Série výtopových a podtlakových infiltračních experimentů byla provedena v lokalitě KH. Cílem experimentů bylo podrobně vyšetřit režimy proudění ve studované půdě při opakované výtopové infiltraci (kvazi-nasycené proudění) a to pro půdu s různou počáteční vlhkostí před zahájením experimentu. Infiltrace byly prováděny na kruhové ploše o průměru 20 cm. Vlhkost byla ve čtyřech hloubkách kontinuálně monitorována reflektometrickými vlhkostními čidly (TDR). Tlakové výšky byly měřeny v hloubkách 20 a 40 cm pod povrchem. Čidla byla nainstalována z bočního výkopu, s minimálním porušení půdního profilu pod místem infiltrace.

2.3 Infiltrační experimenty na velkých neporušených vzorcích (měřítko #2)

Opakované výtopové infiltrace byly prováděny na neporušeném vzorku o objemu sedmi litrů. Spodní okraj vzorku byl podepřen perforovanou destičkou umožnující volný gravitační výtok ze vzorku (okrajová podmínka "seepage face"). Experimenty byly zahajovány do půdy o různé počáteční vlhkosti, a byly prováděny střídavě s běžnou vodou a s vodou odplyněnou. Předpokladem bylo, že při infiltraci do půdy s vyšší vlhkostí dojde k uzavření většího množství vzduchu a objemový tok proudění v ustálené fázi experimentu bude v jeho důsledku nižší. Dále bylo předpokládáno, že při infiltraci odplyněné vody dojde k částečnému rozpouštění uzavřeného vzduchu a ke zvýšení rychlosti proudění vzorkem. Experimenty byly provedeny na automatizované infiltrační sestavě [8], která zajišťovala kontinuální záznam hodnot kumulativních vtoků a výtoků, změn hmotnosti vzorku, tlakové výšky ve třech tenzometrech a objemové vlhkosti pomocí tří sond TDR. Na změny okamžitého objemu uzavřeného vzduchu ve vzorku se usuzovalo ze změn hmotnosti vzorku při kvazi ustáleném proudění.

2.4 Snímkování infiltrace neinvazivními metodami nukleární magnetickou rezonancí (MRI) a neutronovou tomografií (NT) (měřítko #3)

Pro velmi detailní studium procesu infiltrace bylo využito moderních neinvazivních diagnostických metod.

Ve výzkumném centru v Jülichu (FZJ), ICGIII/ICGIV bylo provedeno MRI snímkování opakované výtopové infiltrace v malém neporušeném vzorku půdy KH. MRI v půdě detekuje a zobrazuje vodu přitomnou ve velkých pórech. Snímkování půdy je na samé hranici možností současné MR techniky. Na špičkovém MRI skeneru ve FZJ se podařilo při experimentu získat 3D snímky počátečního zvlhčování půdy při infiltraci do suché i vlhké půdy a podrobnější 3D snímky distribuce vody během kvazi-ustáleného proudění.

Velmi detailní 3D snímkování opakované infiltrace do malého vzorku půdy KH bylo provedeno metodou NT na zařízení NEUTRA ve švýcarském Paul Scherrer Institutu (PSI). Zařízení v PSI umožňuje provádět neutronovou radiografii a tomografii vzorků. Princip metody je podobný standardní rentgenové počítačové tomografii, neutrony jsou narozdíl od rengenových paprsků nejcitlivější na kolize s lehkými prvky například vodou. Výsledkem NT je trojrozměrný snímek atenuačních koeficientů. Za určitých předpokladů je pomocí NT možné získat informaci o prostorovém rozložení vlhkosti ve vzorku ve vysokém rozlišení 3D snímku.

2.5 Infiltrační experimenty sledované optickou mikroskopií (měřítko #4)

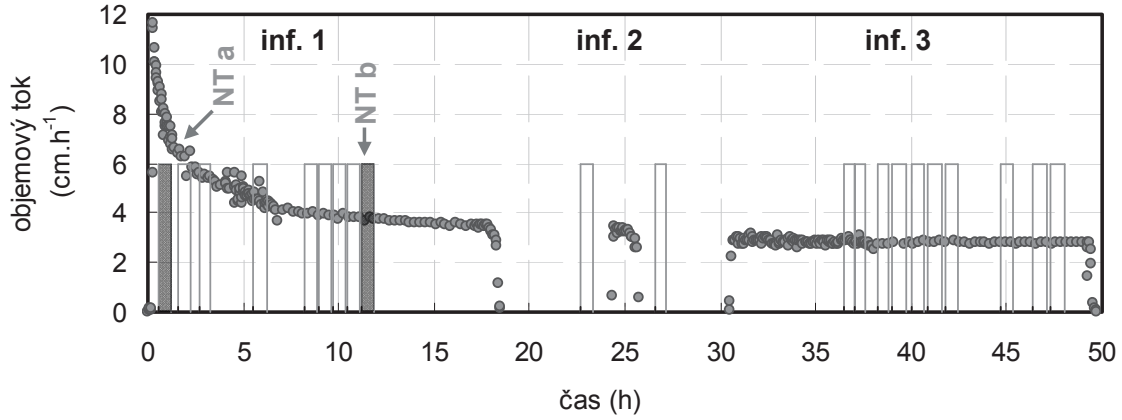
Ještě detailnější zkoumání procesu infiltrace umožnilo použití optického mikroskopu. I v tomto případě byla na vzorcích uzavřených ve speciální transparentní kyvetce provedena opakovaná výtopová infiltrace. Mikroskopem opatřeným digitální kamerou byl snímán obraz na boční stěně vzorku. Rozměry sledované oblasti byly 6x4 mm. Obrazová data byla ukládána v intervalu 1–5 s. Na digitálních snímcích byly poté identifikovány bublinky, jejich vznik a vývoj během experimentu. Pro tytéž experimenty byla také vyhodnocena data infiltračních a výtokových rychlostí.

3. Výsledky

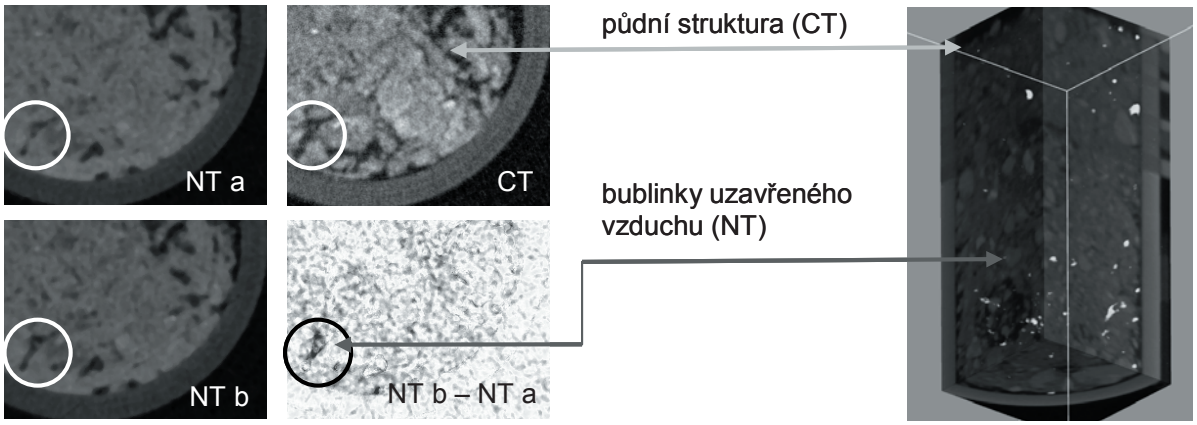
Výsledkem experimentů v každém ze čtyř měřítek je rozsáhlý soubor dat. Experimenty provedené na půdě KH v měřítcích #3 až #4 vykazovaly nestandardní průběh výtokových rychlostí, který je ale ve shodě s výsledky dříve provedených experimentů na stejné půdě [2, 12]. V obrázku 2 je jako příklad uveden průběh výtokových rychlostí při experimentu snímkovaném NT. Z obrázku je patrné, že při první infiltraci (inf. 1) započal výtok velmi krátce po zahájení infiltrace a objemový tok dosáhl hodnoty 12 $cm.h^{-1}$. Poté, při nepřerušené infiltraci, se objemové toky na vtoku i výtoku postupně snižovaly na hodnotu 3,6 $cm.h^{-1}$, tedy na 1/3 původní hodnoty. Při druhé infiltraci (inf. 2), která byla z technických důvodů předčasně ukončena i při třetí infiltraci (inf. 3) byly výtokové rychlosti vždy nižší než při předcházejících infiltracích. Při třetí infiltraci již k dalšímu poklesu objemových toků nedocházelo. Pro objasnění příčin poklesu výtokových rychlostí během první infiltrace byly analyzovány snímky NT získané během stejného experimentu. Vybrány byly dva snímky (označené v tomto textu jako NTa, NTb) (viz Obr. 2). Z rozdílu hodnot atenuačních koeficientů ve snímcích na obrázku 3 je patrné, že během první infiltrace došlo ke snížení atenuace neutronů (úbytku vody) v některých oblastech vzorku. Lokální úbytek vody za daných podmínek experimentu může být způsoben pouze jejím nahrazením plynnou fází - uzavřeným vzduchem. Obrázek 3 (vpravo) ukazuje vizualizaci nově vzniklých bublinek uzavřeného vzduchu během první infiltrace. Porovnáním snímku rentgenové počítačové tomografie a neutronové tomografie (viz Obr. 3 vlevo) bylo zjištěno, že určité množství vzduchu bylo již na počátku infiltrace zachyceno ve velkých pórech půdy. Zachycení bublinek ve větších pórech a zvětšování jejich velikosti během první infiltrace bylo shodně pozorováno také při experimentu se sledováním vzorku optickým mikroskopem (měřítko #4) [13].

Experimenty na velkých neporušených vzorcích (měřítko #2) byly dosud dokončeny pouze pro materiál SAND. Při opakované infiltraci na vzorku tohoto materiálu nebyl pozorován rozdíl mezi výtokovými rychlostmi při ustáleném proudění první a druhé infiltrace, proudění je v tomto ohledu v souladu s Richardsovou rovnicí. Při dalším experimentu, při kterém byla infiltrována odplyněná voda, infiltrační a výtoková rychlost postupně vzrůstala. Zároveň byl vlhkostními čidly detekován postupný nárůst vlhkosti. Tato pozorování indikují přítomnost uzavřeného vzduchu, který byl při infiltraci odplyněné vody do půdy postupně rozpouštěn.

Při opakovaných terénních výtopových infiltračních experimentech na lokalitě KH došlo k poklesu infiltrační rychlosti při první výtopové infiltraci, při všech dalších infiltracích byla infiltrační rychlost nižší než na konci první infiltrace a byla poměrně stabilní. Vzhledem ke komplexnosti terénního infiltračního experimentu bude možné výsledky terénních infiltrací interpretovat až po provedení důkladné analýzy dat inverzním modelováním infiltrace.



Obr. 2: Vývoj objemových toků na výtoku ze vzorku při experimentu monitorovaném neutronovou tomografií (body). Tenkými rámečky jsou vyznačeny časy snímkování NT, vyplněné rámečky vyznačují časy pořízení vybraných snímků (NTa, NTb).



Obr. 3: Příklad výsledků snímkováním vzorku neutronovou tomografií a rentgenovou počítačovou tomografií. Vlevo je zobrazen jeden řez vzorkem snímkovaný rentgenovou počítačovou tomografií (CT), neutronovou tomografií ve dvou časech po zahájení experimentu (NT a, NT b) a rozdíl hodnot atenuačních koeficientů těchto dvou snímků. Kroužkem je vyznačena oblast ve které došlo mezi snímkováním NTa a NTb k lokálnímu úbytku vody. Vpravo jsou na pozadí výřezu CT snímku bílou barvou zobrazeny bublinky uzavřeného vzduchu vzniklé v době mezi pořízením snímků NTa a NTb. Renderovaný 3D snímek zobrazuje 1/8 objemu vzorku.

4. Diskuse a závěr

Výsledky experimentů, které využívají kombinace standardních hydropedologických postupů s moderními neinvazívními metodami ukázaly, že při výtopové infiltraci do heterogenní půdy KH docházelo k významnému snižování objemového toku vzorkem při fázi experimentu, ve které se dle Richardsovy teorie očekává ustálené proudění. Pro danou konfiguraci experimentu lze tento jev popsat jako snižování kvazi-nasycené vodivosti půdy. Neinvazivními metodami bylo ve stejné fázi experimentu detekováno zvětšování objemu uzavřeného vzduchu ve velkých pórech.

Výsledky experimentů podporují platnost následující hypotézy definované dříve autory tohoto příspěvku [7]. Pokles kvazi-nasycené vodivosti půdy je způsoben úbytkem gravitační vody vytěsněné z preferenčních cest zvětšujícími se bublinkami uzavřeného vzduchu. Vzduch pochází z půdní matrice, ve které byl na počátku infiltrace uzavřen vodou protékající preferenčními cestami obklopujícími půdní matrici. Při pokračující infiltraci je voda přitahována do půdní matrice kapilárními silami a vzduch je vytěsňován do větších pórů - preferenčních cest. Zvětšující se bublinky uzavřeného vzduchu stále více blokují proudění v preferenčních cestách a celková hydraulická vodivost půdy se postupně zmenšuje.

Tyto jevy nelze matematicky simulovat použitím Richardovy rovnice, ani jejím rozšířením pro popis preferenčního proudění. Závěry zde popsané jsou platné pro studovanou půdy a aktuální uspořádání experimentů. Pro definování závěrů obecných bude třeba provést doplňující série experimentů na dalších půdách.

Poděkování

Tento výzkum vznikl v rámci projektu GAČR č. 103/08/1552.

Literatura

[1] CHRISTIANSEN, J. E., 1944. Effect of entrapped air upon the permeability of soils. Soil Sci. 58:355–365. ISSN: 0038-075X.

[2] CÍSLEROVÁ, M. – ŠIMŮNEK, J. –VOGEL. T. 1988. Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments. J. Hydrol. 104, 1–16. ISSN: 0022-1694

[3] BAIRD, A. J. – BECKWITH, C. W. – WALDRON, S. – WADDINGTON, J. M., 2004. Ebullition of methane-containing gas bubbles from near-surface Sphagnum peat. Geophysical Research Letters, 31(21), 4. ISSN: 0094-8276.

[4] SCHULTZE, B. – IPPISCH, O. – HUWE, B. – DURNER. W. 1999. Dynamic nonequilibrium during unsaturated water flow. pp 877–892. In: *Proc. of the Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media.* Riverside, CA. 22–24 Oct. 1997. U.S. Salinity Lab., Riverside.

[5] FAYBISHENKO, B A., 1995. Hydraulic behaviour of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air – laboratory experiment. Water Resour. Res., 31, 10, 2421-2435. ISSN: 0043-1397.

[6] HEILWEIL, V. M. – SOLOMON, D. K. – PERKINS, K. S. – ELLETT, K. M., 2004. Gas-partitioning tracer test to quantify trapped gas during recharge. Ground Water, 42, 4: 589-600. 0017-467X.

[7] SNĚHOTA, M. – SOBOTKOVÁ, M. – CÍSLEROVÁ, M., 2008. Impact of the entrapped air on water flow and solute transport in heterogeneous soil: experimental set-up In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics.* 2008, 56, 4, 247-256. ISSN 0042-790X.

[8] KLUMP, S. – CIRPKA, O. A. – SURBECK, H. – KIPFER, R., 2008. Experimental and numerical studies on excess-air formation in quasi-saturated porous media, Water Resour. Res., 44, pp 1-15, 2008. ISSN: 0043-1397.

[9] AESCHBACH-HERTIG, W. – EL-GAMAL, H. – WIESER, M. – PALCSU, L., 2008. Modeling excess air and degassing in groundwater by equilibrium partitioning with a gas phase. Water Resources Research, 44, 8: 12. ISSN: 0043-1397.

[10] SNĚHOTA, M. – ZUMR, D. – PAVELKOVÁ, H. – SOBOTKOVÁ, M. – DOHNAL, M. et al., 2008. Field measurement of hydraulic properties of cambisols by instrumented infiltration experiment In: *Hydrological Extremes in Small Basins (XII Biennal International Conference ERB 2008).* Krakow: Jagellonian University in Krakow, pp 1-4. ISBN 978-83-88424-38-0.

[11] SNĚHOTA, M. – CÍSLEROVÁ, M. – AMIN, M. H. G. – HALL, L. D., 2010. Tracing the entrapped air in heterogeneous soil by means of magnetic resonance imaging In: *Vadose Zone Journal*. 9, 2, pp 373-384. ISSN 1539-1663.

[12] VOTRUBOVA, J. – CÍSLEROVÁ, M. – AMIN, M. H .G. – HALL, L. D., 2003. Recurrent ponded infiltration into structured soil: A magnetic resonance imaging study. Water Resources Research, 39, 12. ISSN: 0043-1397.

[13] DOBEŠ, J. – SNĚHOTA, M., 2009. Sledování uzavřeného vzduchu v půdě v blízkosti nasycení optickou mikroskopií In: *Zborník recenzovaných príspevkov, 17. Posterový deň s medzinárodnou účasťou a Deň otvorených dverí na ÚH SAV [CD-ROM].* Bratislava: Ústav hydrológie SAV, ISBN 978-80-89139-19-4.

Kontakty na autora

1 České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, e-mail: michal.snehota@fsv.cvut.cz