URČOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH PARAMETRŮ MODELU DUÁLNÍ PERMEABILITY INVERZNÍM MODELOVANÍM

Michal Dohnal, Jaromír Dušek, Tomáš Vogel, Michal Sněhota, Milena Císlerová

Pohyb vody v nenasyceném půdním prostředí je důležitou součástí formování hydrogramu odtoku stejně jako celého hydrologického cyklu. Půdní pórovité prostředí je přirozeně heterogenní, navíc může obsahovat makropóry a další preferenční cesty. Preferenční proudění v nenasycené zóně je předmětem zájmu mnoha studií a bylo prokázáno v řadě půdních typů ve střední Evropě. Kvalitní předpověď množství vody a jejího pohybu v půdě vykazující preferenční proudění vyžaduje koncepčně správný a výkonný numerický model. V naší práci jsme použili přístup duální permeability předpokládající, že pórovité prostředí sestává ze dvou paralelních domén odlišných hydraulických vlastností. Platnost Richardsovy rovnice se předpokládá v obou doménách, jejichž vzájemnou komunikaci umožňuje přenosový člen. Model duální permeability byl optimalizován ve smyslu metody nejmenších čtverců Levenberg-Marquardtovým algoritmem. Cílem inverzního modelování bylo nalézt sadu parametrů modelu pro níž by byly odchylky mezi měřeními a simulovanými odezvami modelu minimální. V článku jsou prezentovány dva odlišné případy optimalizace modelu duální permeability – laboratorní infiltračně-výtokový experiment a sezónní změny půdní vlhkosti v terénu. Diskutovány jsou především možnosti formulování cílové funkce, jednoznačnost inverzního problému a problematika citlivosti optimalizovaných parametrů.

Klíčová slova: inverzní modelování, preferenční proudění, duální permeabilita, Levenberg-Marquardtova metoda, režim půdní vlhkosti

The movement of subsurface water in the vadose zone is an important part of the runoff formation and the hydrological cycle as a whole. Natural porous medium is in principal heterogeneous. In addition, it may contain macropores and other preferential pathways. Preferential flow of water in the unsaturated zone is a subject of interest in many studies and has been observed in a variety of soil types in Central Europe. To predict quantitatively water fluxes in the soils, which exhibit preferential flow effects, adequate conceptual model and efficient numerical code have to be used. In our study, dual-permeability approach is applied, in which the porous medium is supposed to consist of two flow domains with different hydraulic properties. In this approach, Richards' equation is assumed to be valid for each of the two domains, allowing local non-equilibrium conditions between the flow domains. The dual-permeability forward simulator (S1D Dual code) was optimized by non-linear weighted least-squares routine based on the Levenberg-Marquardt algorithm. The optimization procedure was used to minimize the discrepancies between the simulated and the measured values. Inverse modeling was carried out to find an optimal set of parameters for the simulation model. Two fundamentally different cases are presented – the optimization of the laboratory infiltration-outflow experiment on a large undisturbed soil sample, and inverse modeling of a field soil-water regime. The formulation of the objective function, the uniqueness of the inverse problem, and the sensitivity of the estimated hydraulic parameters are discussed.

Key words: inverse modeling, preferential flow dual-permeability, Levenberg-Marquardt algorithm soil water regime

---

ÚVOD

Pohyb vody v nenasyceném půdním prostředí je důležitou součástí hydrologického cyklu. Půdní pórovité prostředí je přirozeně heterogenní formací obsahující preferenční cesty různých typů (Beven a German, 1982). Ve střední Evropě jsou silně heterogenní půdy s výskytem preferenčního proudění častým jevem (Císlerová et al., 1990). Kvalitní předpověď množství a pohybu vody v půdě vykazující preferenční proudění vyžaduje fyzikálně adekvátní numerický model. Klasická řešení Richardsovy rovnice v tomto případě selhávají. Atraktivní možností je tudíž využití některého z modelů duální permeability. Optimalizace takových modelů má celou řadu společných rysů s inverzí modelů jednoduché pórovitosti. Nicméně už samotná zdvojená parametrizace (dvojnásobný počet parametrů) u přístupu Gerkeho a van Genuchtena (1993a) je logicky zdrojem nejednoznačnosti a nestability inverzního řešení (v případě duální permeability - Simunek et al., 2003; obecně – Russo et al., 1991). Důležitým faktorem je také nutnost kvantifikace podílu preferenční domény proudění.

V případě one-step výtokového experimentu se objevují doporučení, která lze zobecnit i na obdobné úlohy v kombinaci s modely duální permeability. Hodnocení vhodnosti one-step experimentu z inverzního hlediska jsou však někdy protichůdná (Eching et al, 1994; Mous 1994; Zürmuhl 1996). Nicméně v oblasti konstrukce cílové funkce se shodují - samotná výtoková data k docílení jednoznačnosti inverzní úlohy nepostačují (např. Kool et al., 1985) - kombinace výtokových dat s vlhkostmi (Parket et al., 1985) či tenzometrickými měřeními (Kool a Parker, 1988) v cílové funkci zvětšuje pravděpodobnost nalezení jednoznačného řešení.

Výběr hydraulického modelu a vhodných parametrů významně ovlivňují úspěšnost optimalizačního procesu. Russo (1988) porovnal různé hydraulické modely při one-step výtokovém experimentu a za nejvhodnější označil parametrický model van Genuchtena (1980). Toorman et al. (1992) dosáhli slibných výsledků optimalizací parametrů α, n a K_s van Genuchtenova parametrického modelu.

Cílem práce je na příkladech laboratorního experimentu a terénního měření demonstrovat možnosti řešení některých specifických problémů optimalizace modelu duální permeability. Především (i) představit alternativy zjištění vzájemného poměru domén proudění, (ii) analyzovat tenzometrická měření z pohledu jejich využitelnosti v cílové funkci, a (iii) diskutovat citlivost, limity a zkorelovanost optimalizovaných parametrů.

MATERIÁL A METODY

Optimalizační analýzy byly prováděny a prezentované poznatky demonstrovány aplikacemi v případě laboratorního experimentu a terénních měření sacích tlaků.

Laboratorní infiltračně-výtokový experiment

K laboratornímu experimentu byl použit velký neporušený vzorek půdy. 25 cm vysoký vzorek o průměru 18.9 cm, byl odebrán po stržení povrchové vrstvy tloušťky 40 cm z druhého horizontu hrubé písčitohlinité půdy z oblasti Korkusovy Huti na Šumavě. Půda v oblasti odběru se klasifikuje jako Kambisol. Detaily odběru popisuje Sněhota et al. (2002). Následně byl na vzorku vykonán infiltračně-výtokový experiment pro měření funkce hydraulické vodivosti. Při experimentu byla použita sestava umožňující plně automatický sběr dat (Sněhota et al. 2002). V průběhu infiltrace byl na vrchním okraji osazen podtlakový infiltrační disk, který umožňoval nenasycené proudění vzorkem. Pro měření tlakových výšek v neporušeném půdním válci byly v hloubkách 7.5 cm, 12.5 cm a 17.5 cm pod horním okrajem vzorku instalovány tři tenzometry. Tlakové výšky udržované podtlakovým infiltračním diskem během jednotlivých experimentálních běhů byly postupně: -1 cm, -3 cm, -6 cm a -9 cm. Na závěr byla na vzorku provedena výtopová infiltrace s přetlakem 1 cm. Časový krok sběru dat závisel na aktuální dynamice probíhajícího procesu a pohyboval se mezi 5 a 60 sekundami.

Vnitřní pórová struktura půdního vzorku byla vizualizována pomocí rentgenové počítačové tomografie (CT). Výstupem snímkování jsou horizontální řezy (2D snímky) vzorkem. Následně byl z 2D snímků konstruován 3D snímek. Výsledné rozlišení bylo 0.4 x 0.4 mm v horizontální rovině a 1 mm ve směru vertikálním. Intenzita signálu během snímkování je dána v relativních Hounsfieldových jednotkách (HU), které se pohybují od 0 pro dutiny až do 4095 pro nejhustší části vzorku. Výsledný CT snímek se neomezuje pouze na informaci o rozdělení pevné fáze, ale poskytuje také informaci o rozdělení oblastí s nízkou hustotou (velkých pórů). Zjednodušeně lze předpokládat, že tyto oblasti jsou potenciálními preferenčními cestami.

Sezónní měření půdních sacích tlaků

Terénní měření sacích tlaků pocházejí z povodí Uhlířská. Experimentální povodí Uhlířská (plocha 1.87 km^2, průměrná roční teplota 6.5 ^{o}C a roční srážkový úhrn 1379 mm) v Jizerských horách s kontinuálním monitorováním vlivu odlesnění na vodní režim se nachází v horní části povodí Černé

Nisy. V rámci tohoto malého horského povodí je provozován experimentální svah Tomšovka (Šanda, 1999; Tachecí, 2000). Na zvětralém žulovém substrátu zde vznikly hnědé půdy kyselé ze skupiny Kambisolů. Z hlediska textury se jedná o půdy hlinito-písčité až písčito-hlinité s příměsí skeletu. Typické zvrstvení půdního profilu představuje pod silně prokořeněnou svrchní vrstvou se nacházející zrašelinělá humusová černá vrstva na níž navazuje okrová hlinito-písčitá vrstva, následována eluviální žlutohnědou přecházející do zvětralého žulového substrátu. Na experimentálním svahu probíhá celá řada kontinuálních měření (měření meteorologických veličin, lyzimetrická měření, monitorování půdních sacích tlaků a měření podpovrchového odtoku). Automatická měření půdních sacích tlaků tenzometry probíhají vždy ve třech různých hloubkách odpovídajích příslušným vrstvám půdního profilu v místě instalace. Lyzimetrických měření (Tachecí, 2002) bylo využito ke kontrole kumulativních hodnot potenciální evapotranspirace vypočtených metodou Penman-Monteitha.

Matematický model

Přímé modelování bylo ve všech případech prováděno na bázi konceptu duální permeability. Přístup duální permeability (Gerke a van Genuchten, 1993a) zahrnutý do modelu HYDRUS 5 (Vogel et al., 1996) ve smyslu Vogel et al. (2000) předpokládá, že médium je složeno ze dvou samostatných domén s různými hydraulickými vlastnostmi. Domény spolu mohou komunikovat vzájemnou výměnnou vody a v ní rozpuštěných látek. Proudění vody i transport rozpuštěných látek probíhá simultánně v obou paralelních doménách. I v rychlé doméně se předpokládá proudění v pórech jako laminární a shoda s kapilárním modelem – používá se Richardsova rovnice.
Pórovité prostředí je možné popsat výrazy:

$$\varepsilon = w_f \varepsilon_f + w_m \varepsilon_m \tag{1}$$

$$\theta = w_f \theta_f + w_m \theta_m \tag{2}$$

$$q = w_f q_f + w_m q_m \tag{3}$$

indexy m a f značí vlastnosti popisující pomalou doménu (matrix) a doménu rychlou (fracture), w_f je objemový podíl rychlé domény a w_m je objemový podíl domény pomalé vyjádřitelný $w_m = 1 - w_f$. V jednotlivých výrazech je ε pórovitost [L^3L^{-3}], θ vlhkost [L^3L^{-3}], q je hustota toku [LT^{-1}]. Parametrizace hydraulických charakteristik Vogel et al. (2001) byla použita v modelu modifikací výrazů van Genuchtena (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976). Následující dvojice Richardsových rovnic popisuje proudění vody v duálním pórovitém prostředí:

$$C_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\mathbf{K}_f \operatorname{grad} h_f\right) + \operatorname{div}\left(\mathbf{K}_f \operatorname{grad} z\right) - \frac{\Gamma_w}{w_f} \tag{4}$$

$$C_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\mathbf{K}_m \operatorname{grad} h_m\right) + \operatorname{div}\left(\mathbf{K}_m \operatorname{grad} z\right) - \frac{\Gamma_w}{w_m}, \tag{5}$$

kde h je tlaková výška [L], $\mathbf{K}$ je tensor hydraulické vodivosti [LT^{-1}], C je specifická hydraulická kapacita [L^{-1}], z je souřadnice [L], t čas [T] a Γ_w je přenosový člen [T^{-1}], který zprostředkovává výměnu mezi doménami. Výměna vody mezi pomalou a rychlou doménou je úměrná rozdílu tlaků v nich:

$$\Gamma_w = \alpha_w \left(h_f - h_m\right), \tag{6}$$

kde α_w je přenosový koeficient [$L^{-1}T^{-1}$], pro který Gerkem a van Genuchten (1993b) odvodili semi-empirický výraz:

$$\alpha_w = \gamma_w \frac{\beta}{d^2} K_a, \tag{7}$$

kde a je charakteristická délka [L] a β je bezrozměrný geometrický koeficient. Opravný součinitel γ_w nabývá obvykle pro různé hydraulické vlastnosti a počáteční podmínky hodnoty 0.4. K_a je efektivní hydraulická vodivost [$L^{-1}T^{-1}$] poblíž rozhraní nebo na rozhraní mezi doménami určovaná Gerkem a van Genuchten (1996):

$$K_a(h) = 0.5\left[K_a\left(h_f\right) + K_a\left(h_m\right)\right] \tag{8}$$

Inverzní modelování

Inverzní úloha byla řešena na bázi Levenberg-Marquardtova algoritmu (Doherty et al., 1995). Hydraulické parametry byly optimalizovány ve smyslu metody nejmenších čtverců.

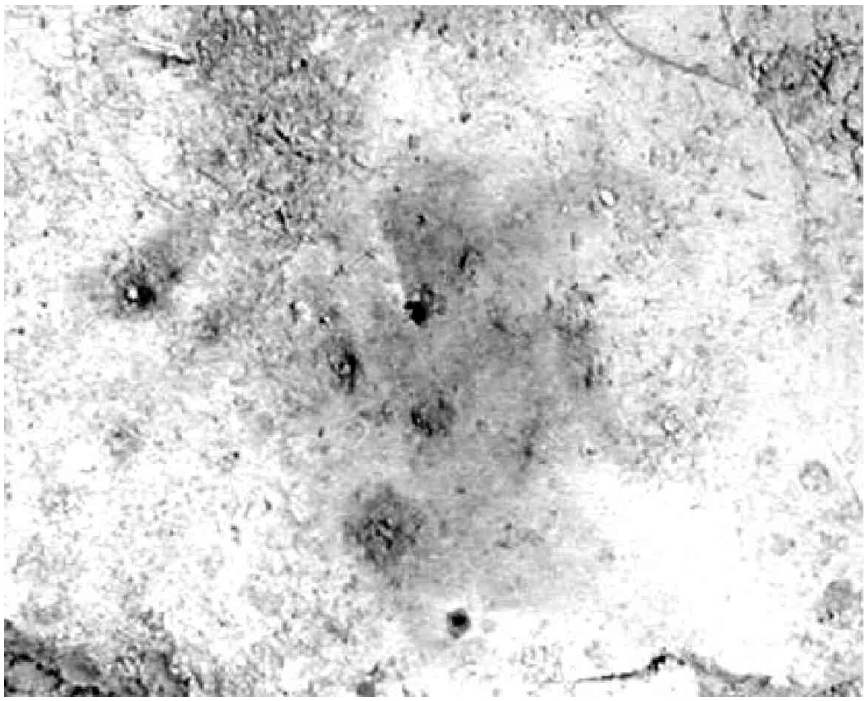
$$OF = \sum_{i=1}^{N} \left(y_i - y_i^* \right) w_i \left(y_i - y_i^* \right) \tag{9}$$

V definici cílové funkce (9) je výraz $\left(y_i - y_i^* \right)$ odchylkou mezi modelovanou a měřenou hodnotou a w_i představuje váhu odpovídající měření *i*. *N* je potom počet měření identifikovaných v cílové funkci.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Využití modelů duální permeability je mnohdy nezbytností. Jejich optimalizace ale stále ještě není rutinní záležitostí. Zvláštností, které řešení inverzní modelování duální permeability přináší, je celá řada – kvantifikace podílu preferenční domény proudění, formulace cílové funkce s ohledem na použitelnost tenzometrických měření, rozdílné citlivostní schéma oproti modélům jednoduché pórovitosti aj.

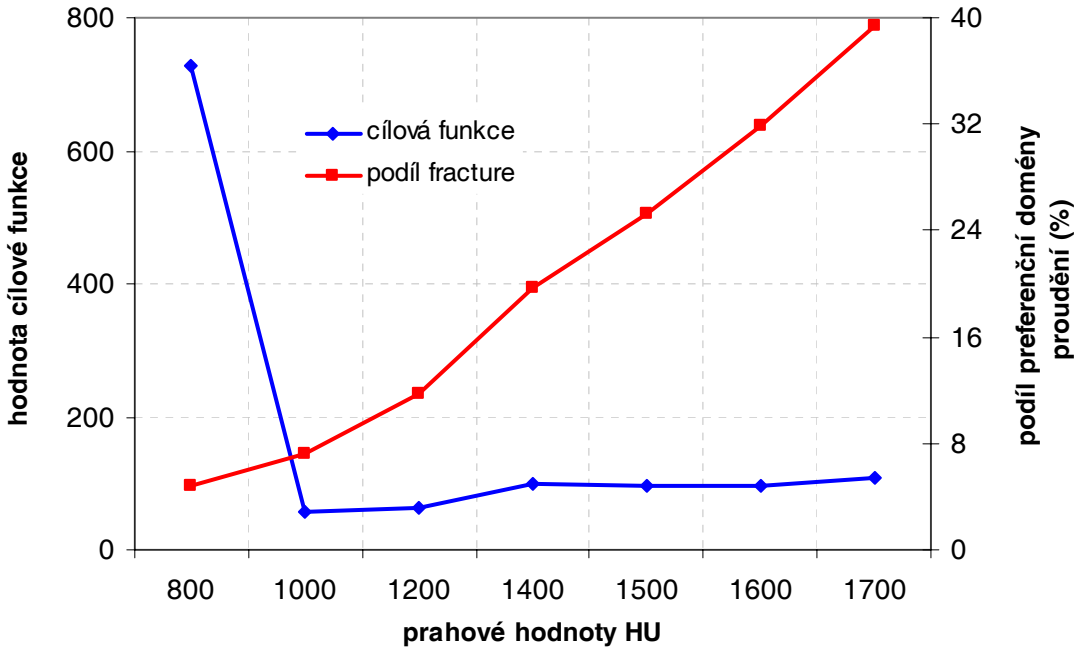
Počáteční odhad hraje klíčovou roli ve všech úlohách inverzního modelování, zjištění podílu preferenční domény proudění v systému nevyjímaje. V terénních aplikacích je možné využít kvantifikace podílu na základě digitálního snímkování domény proudění (obr. 1) po provedení tracerového experimentu (Dohnal et al., 2004a).



Obr. 1 Digitální snímek domény proudění použitý ke kvantifikaci podílu preferenční cest pro účely matematického modelování (černozem, experimentální stanoviště Macov, Slovensko).

Fig. 1 Digital snapshot of flow domain used for quantifying the fraction of the preferential pathways (chernozem, experimental station Macov, Slovakia).

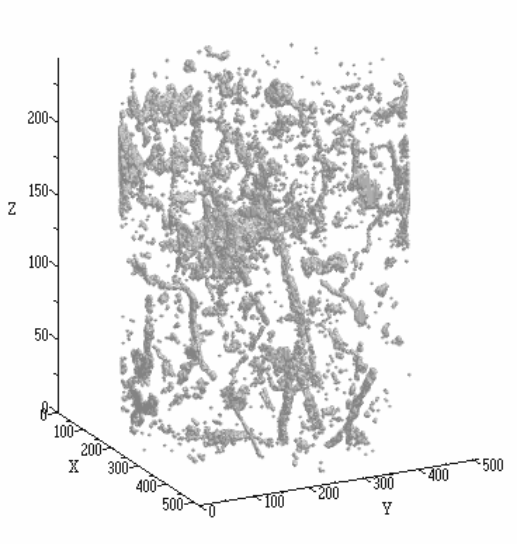
V laboratorním měřítku přibývají k tracerovému experimentu možnosti neinvazivního zobrazení domény proudění. Například CT snímkování poskytující informaci o rozdělení hustoty uvnitř vzorku umožňuje po určení prahové hustoty zjistit příslušný podíl preferenční domény. U obou zmiňovaných způsobů by mělo následovat inverzní ověření správnosti podílu rychlé domény. Vzhledem k tomu, že podíl preferenční domény nemá po celou dobu optimalizačního procesu dostatečnou citlivost je pro jeho inverzní určení vhodným řešením sekvenční optimalizace. To znamená postupná optimalizace jednotlivých přednastavených podílů rychlé domény v intervalu teoreticky možných hodnot. Příklad výsledeku sekvenční optimalizace podílu preferenčních cest v případě matematického modelování infiltračně-výtokového experimentu na velkém neporušeném vzorku je na obr. 2.



Obr. 2 Výsledek sekvenční optimalizace podílu rychlé domény v případě modelování podtlakové infiltrace.

Fig. 2 Sequential optimization result of the preferential flow domain portion in the case of infiltration modeling.

Cílová funkce byla tvořena tenzometrickými měřeními ve třech hloubkách vzorku a vtokem a výtokem na jeho horním respektive spodním okraji. Z grafu plyne, že nejnižší hodnota cílové funkce připadá prahu mezi doménami 1000 HU, který odpovídá 7.24% preferenční domény. Od 7 procent rychlé domény je systém dostatečně duální (optimalizací je možno dosáhnout výrazné minimalizace odchylek tokové části cílové funkce) – hodnota cílové funkce se už řádově nemění. Potenciální preferenční cesty (voxely s hodnotou HU nižší než 1000) jsou zobrazeny na obr. 3.



Obr. 3 Rekonstruovaný 3D snímek půdního vzorku. Zobrazeny jsou oblasti s nízkou hustotou (HU <1000).

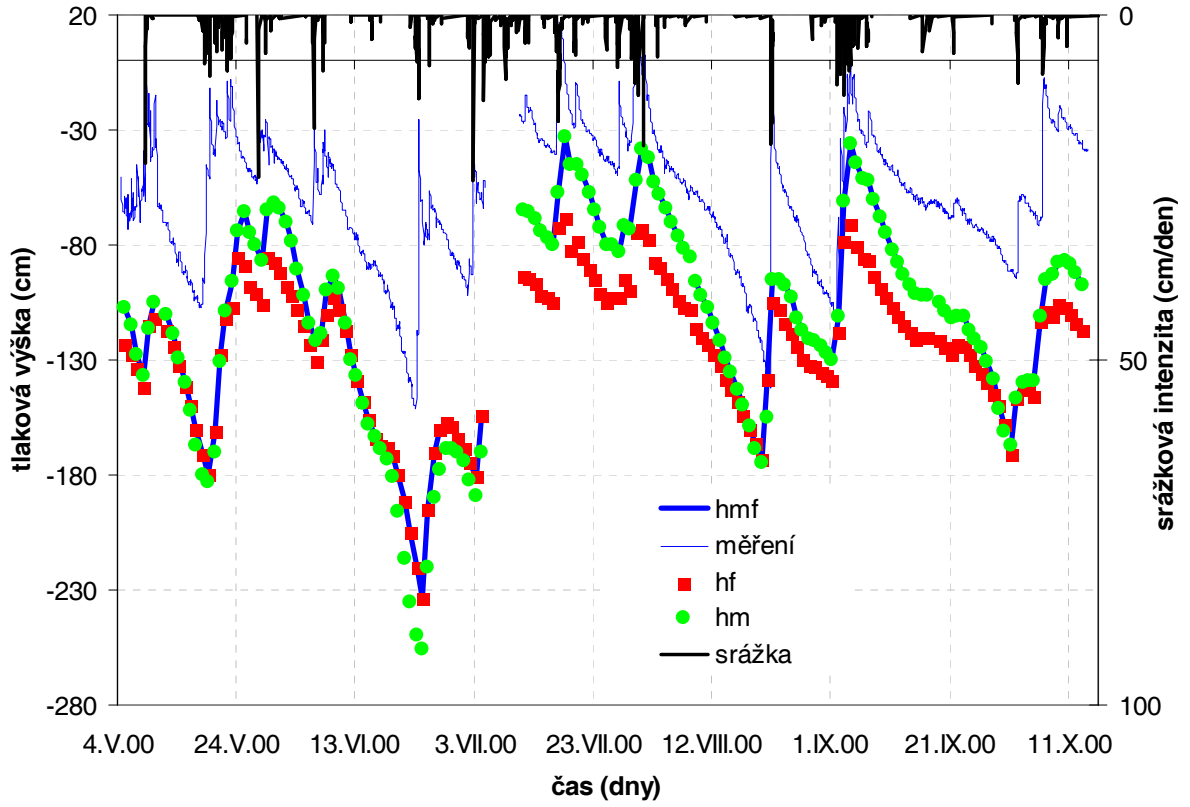
Fig. 3 Three dimensional binarized image of the low-density regions of a soil sample with threshold equal to 1000 HU.

Rozhodnutí jaké doméně a za jakých okolností odpovídají tenzometrická měření případně zahrnutá do cílové funkce představuje další důležitý problém spojený s přístupem duální permeability. Poněkud obecněji lze problém rozdělit na problematiku co vlastně tenzometr měří a problém jak měřenou realitu identifikovat s matematickým modelem. Finsterle a Faybishenko (1999) zjišťovali co tenzometr měří v rozpukaném skalním masívu. Analýzou provedeného laboratorního experimentu a numerické studie došli k závěru, že tenzometr při zvlčování odráží především tlak v puklinách a při vysušování dominuje tlak v matrici. Aplikujeme-li tento přístup v modelu duální permeability identifikujeme v cílové funkci tlak:

$$h_{mf} = \max\left(h_f, h_m\right) \tag{10}$$

kde h_{mf} je tlak, který měří tenzometr a h_f, h_m jsou tlakové výšky v puklinách a v matrici. V případě simulací sezonních tenzometrických měření dochází k zvlhčování a vysušování opakovaně, tudíž můžeme demonstrovat parciální užitečnost tohoto přístupu (obr. 4). Především dvě srážkové epizody po 13.6.2000 jsou lépe popsány tlakem v puklinách, přičemž matrice zůstává po dobu cca 20 dní sušší. Zbylá období jsou přesněji určena sací tlakovou výškou v matrici.

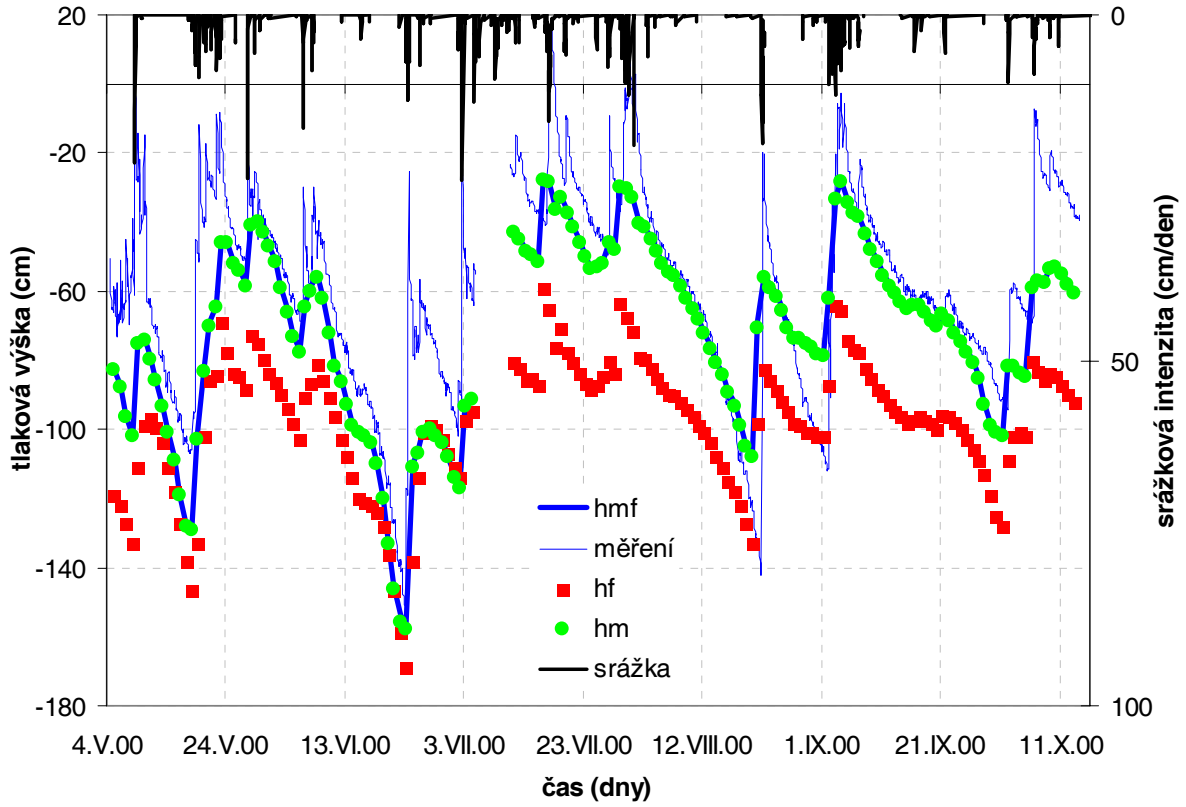
Použitý přístup, byť přinesl ve všech testovaných případech lepší výsledky, nevystihuje realitu. Samotné měření je ovlivněno v čase se měnícími nejistotami spojenými s teplotním závislostí, kalibrací čidel a kontaktem keramiky se zeminou. Z pohledu modelu duální permeability je klíčová adekvátnost modelu, především zahrnutí či nezahrnutí hystereze hydraulických charakteristik a nastavení komunikace obou domén. Efekt všech jmenovaných nejistot může být zaměňován nebo vzájemně neoddělitelně propojen s problematikou co tenzometr měří.



Obr. 4 Porovnání různých způsobů identifikace tenzometrů v modelu duální permeability na příkladě sezónních změn půdních sacích tlaků v roce 2000. Měřené tlakové výšky v hloubce 41 cm pod povrchem jsou znázorněny tenkou modrou čarou, simulované maximum z tlaků v matrici (zelené tečky) a v puklinách (červené čtverečky) je vyneseno silnou modrou čarou.

Fig. 4 Comparison of different approaches used to identify tensiometric measurements in dual-permeability model. Measured pressure head variations at a depth of 41 cm in 2000 are represented by a thin blue line. Simulated maximum from the pressure in matrix (green dots) and fracture (red square symbol) domain is portrayed by a thick blue line.

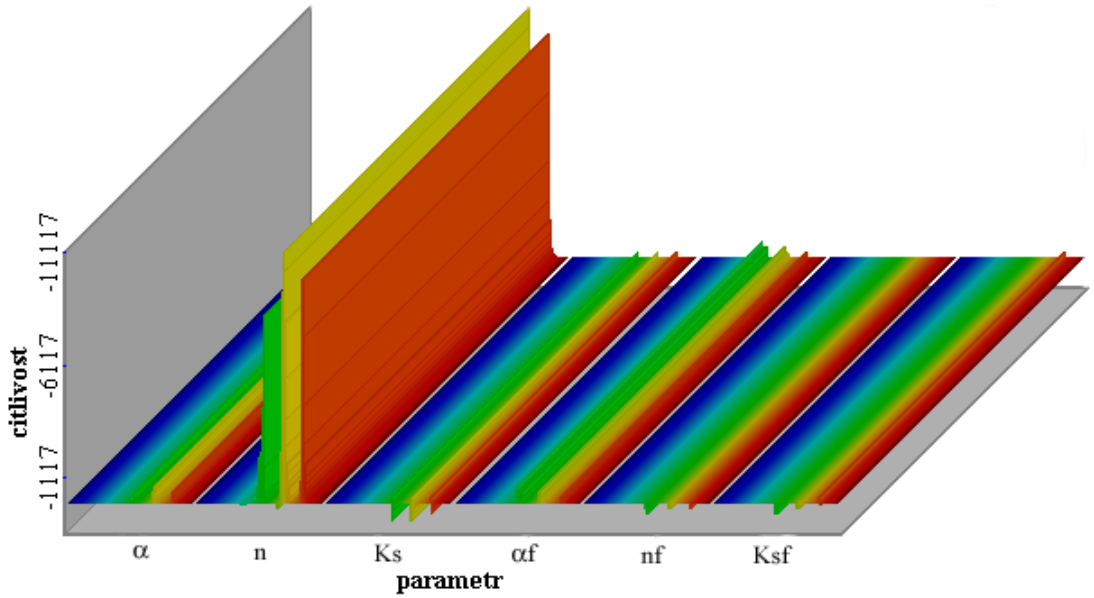
Optimalizace sezónních změn vlhkosti v případě přiřazení tenzometrických měření v cílové funkci tlaku v matrici nebo maximu tlaků v obou doménách umožňuje dosáhnout téměř totožný výsledek (obr. 5). V obou případech má optimalizace potenciál nalézt minimum se srovnatelnou hodnotou cílové funkce. Rozdílná identifikace měření v modelu se projeví v rozdílných hodnotách optimalizovaných parametrů. Považujeme-li jeden z přístupů za adekvátnější musí být nutně jedna sada „optimálních“ parametrů správnější, což implikuje ztrátu jednoznačnosti inverzní úlohy díky neadekvátnosti modelového přístupu. Přiřazení tenzometrických měření do preferenční domény je až na krátké období sucha před srážkou z konce srpna (21.8.2000) nevyhovující.



Obr. 5 Optimalizované změny půdních sacích tlaků v sezóně 2000. Měřené tlakové výšky v hloubce 41 cm pod povrchem jsou znázorněny tenkou modrou čarou, maximum z tlaků v matrici (zelené tečky) a v puklinách (červené čtverečky) je vyneseno silnou modrou čarou.

Fig. 5 Optimized pressure head development in year 2000. Measured pressure heads at a depth of 41 cm are represented by a thin blue line. Maximum from the pressure in matrix (green dots) and fracture (red square symbol) domain is portrayed by a thick blue line.

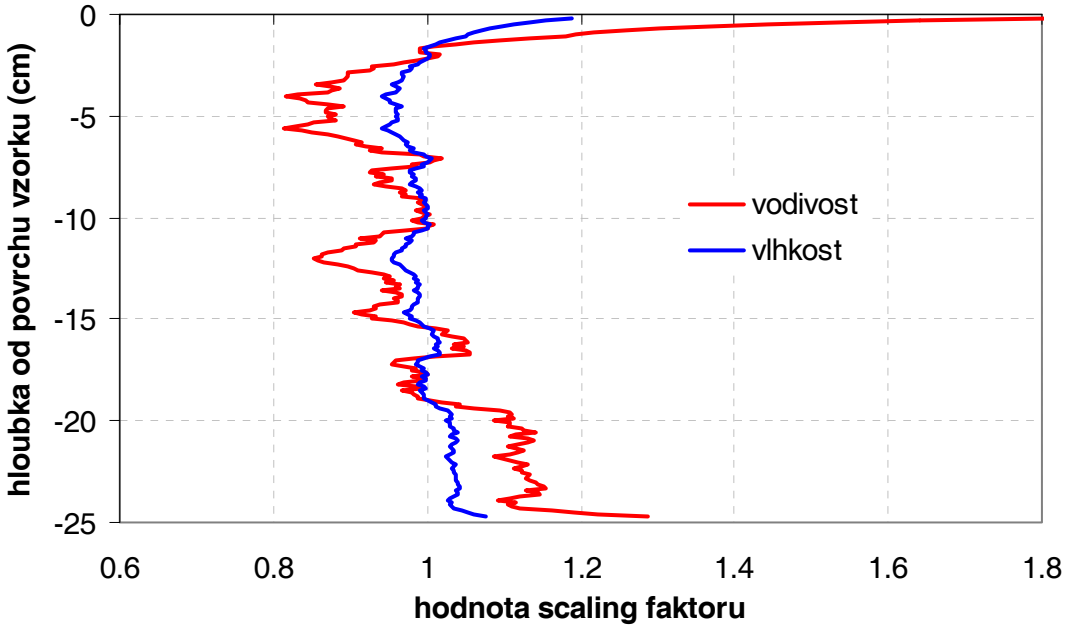
Zabýváme-li se pouze prouděním vody obsahuje model 5 parametrů: nasycenou hydraulickou vodivost K_s, empirické parametry α a n, reziduální vlhkost θ_r, a nasycenou vlhkost θ_s. U dvoudoménového modelu je počet parametrů dvojnásobný. Navíc přistupuje nutnost kvantifikovat podíl preferenční domény a vzájemnou komunikaci obou domén. Výběr parametrů určených k optimalizaci je třeba provádět se zřetelem na minimalizaci jejich počtu a maximalizaci jejich citlivosti během inverzního řešení. Dalším kritériem rozhodujícím o zařazení do optimalizačního schématu je případná neúnosná zkorelovanost nebo naopak potřeba určení parametru přes jeho nízkou citlivost (charakteristiky puklin, podíl preferenční domény). V případě inverzního řešení prezentovaného laboratorního experimentu bylo optimalizovaných parametrů celkem šest - K_s, α a n v obou doménách. Ostatní parametry modelu byly fixovány na svých počátečních odhadech založených na měření. Citlivost parametrů v preferenční doméně je díky malému podílu domény vůči matrici velmi nízká (obr. 6). Tato skutečnost kalibraci modelu významně komplikuje. Volba mezí, v rámci kterých je hledána optimální parametická sada, se řídí fyzikální smysluplností, konvergencí modelu a „rozumnou blízkostí“ počátečnímu odhadu nutnou k dosažení minima cílové funkce. U modelu duální permeability je neméně důležité zajištění preferenčnosti jedné z domén po celou dobu inverzního řešení.



Obr. 6 Citlivosti optimalizovaných parametrů na jednotlivé příspěvky cílové funkce během optimalizace experimentálního běhu -1 cm. Modrá barva značí toková data v cílové funkci, zelená, žlutá a červená představují tenzometrické příspěvky cílové funkcě v hloubkách – 7.5cm, 12.5 cm a 17.5 cm.

Fig. 6 Sensitivity of optimized parameters to objective function contribution. Each individual measurement is represented by own colour. Blue colour indicates inflow and outfow information, green stands for measurements of the first tensiometer (at the depth of 7.5 cm below the top surface), yellow stands for second (at the depth of 12.5 cm), and red colour stands for third tensiometer (at the depth of 17.5 cm).

Nejen v terénních aplikacích je časté komplikované zvrstvení půdního profilu. Každá další vrstva zmnožuje počet parametrů. Jejich citlivost nezávisí pouze na mocnosti vrtstvy a během procesu se mění v čase. V přirozeném půdním profilu vrstvy většinou nepřechází jedna do druhé skokově a tudíž neodpovídá diskretizace profilu v modelu realitě nebo se dále neúnosně komplikuje. Řešení jak jednoduše invertovat problém s zvrstveným profilem pomocí náhradních parametrů a zároveň zachovat proporce mezi jednotlivými vrstvami poskytuje poměrná parametrizace (Vogel et al., 1991). Metoda scalingu Vogel et al. (1991) je založena na konceptu podobných prostředí. Optimalizace zvrstveného profilu pomocí scaling faktorů byla použita v prezentovaném případě sezónních změn půdních sacích tlaků na povodí Uhlířská. Optimalizovanými parametry byly scaling faktory vodivosti a tlakové výšky na horním a spodním okraji řešené oblasti. (Dohnal et al., 2004b).



Obr. 7 Vnesená variabilita vlhkosti a vodivosti půdního vzorku do modelu duální permeability odvozená na základě informace z CT snímkování. Znázorněny jsou změny vlhkosti a vodivosti po výšce vzorku pro pomalou doménu proudění.

Fig. 7 Variability about water content (blue line) and hydraulic conductivity (red line) for the matrix domain in a dual-permeability approach is depicted. Information is derived from CT scanning.

Kromě zmiňovaného usnadnění optimalizace zvrstveného profilu, může další využití spočívat v upscalingu hydraulických charakteristik z měřítka laboratoře do terénu a v neposlední řadě vnesení variability. Informace z CT snímků mohou být pro modelování využity k odvození scaling faktorů vlhkosti po výšce půdního vzorku, které představují variabilitu půdní vlhkosti po výšce vzorku (obr. 7). Z nich lze následně vypočíst scaling faktory vodivosti (obr. 7) podle zjednodušeného Kárman-Koženého vzorce (Hillel, 1998).

SHRNUTÍ

Určování hydraulických parametrů modelu duální permeability inverzním modelováním představuje komplexní problém. K tradičním obtížím inverzního řešení Richardsovy rovnice přistupují zvláštnosti spojené s dualitou systému. Na souboru dat z laboratorního infiltračně-výtokového experimentu a sezónní dynamiky půdní vlhkosti v terénu byla představena některá specifická řešení inverzní úlohy v případě modelu duální permeability.

Demonstrovány byly možné přístupy ke kvantifikaci podílu preferenční domény proudění a jejich využití a verifikace prostředky inverzního modelování. V terénních aplikacích se jedná o digitální snímkování postupně vykopávané výtopové infiltrace doplněné o reflexní barvivo, v laboratorních podmínkách je možné využít neinvazivního zobrazení domény proudění pomocí počítačové tomografie. CT snímkování poskytuje informaci o rozdělení hustoty uvnitř vzorku a umožňuje po určení prahové hustoty zjistit příslušný podíl preferenční domény.

Tvorba cílové funkce při optimalizaci modelu duální permeability se řídí stejnou logikou jako v případě neduálních systémů. Ovšem u tenzometrických měření je nutné rozhodnout, které doméně měření přísluší. Provedli jsme numerickou analýzu identifikace tenzometrických měření v modelu duální permeability. Tenzometrická měření byla přiřazena maximu z tlaků v matrici a preferenční

doméně proudění. Použitý přístup přinesl ve všech testovaných případech lepší výsledky, ale problematika vyžaduje další zkoumání.

Formulována byla kritéria výběru parametrů modelu duální permeability k optimalizaci. Volba parametrů by se měla řídit ohledem na minimalizaci jejich počtu a maximalizaci jejich citlivosti během inverzního řešení, jejich zkorelovaností nebo nutností určení přes relativně nízkou citlivost. Jako životaschopný scénář se jeví v případě kvalitní informace o nasycené vlhkosti optimalizace parametrů α, n a K_s v obou doménách proudění. Diskutovány byly alternativy využití scaling faktorů v duálním modelu. Metoda scalingu může být využita k optimalizaci zvrstveného profilu, upscalingu hydraulických charakteristik z měřítka laboratoře do terénu a vnesení variability.

Poděkování

Podpora tohoto výzkumu byla poskytnuta z prostředků 6. rámcového programu Evropské unie - Water Cycle and Soil Related Aspects - AQUATERRA (No. 505428) a projektu Grantové agentury České republiky 205/05/2312.

Literatura

Beven, K.J., P. Germann (1982): Macropores and water flow in soils, Water Resources Research, 18, 1311–1325.

Císlerová, M., T.Vogel, J.Simunek (1990): The infiltration-outflow experiment used to detect flow deviations, Field-Scale Water and Solute Flux in Soils, K. Roth, H. Fluhler, W.A. Jury, J.C. Parker (editors), Monte Verita, Birkhauser Verlag, Basel, 109-117.

Doherty, J., L. Brebber, P. Whyte (1995): PEST. Model Independent Parameter Estimation, Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia.

Dohnal, M., M. Císlerová, T. Vogel, J. Dušek, V. Štekauerová, L. Lichner, V. Nagy (2004): Modelování infiltrace do půdy s makropóry, Sborník 15. slovensko - česko - poľský seminár „ Fyzika vody v pôde (Zemplínská Šírava).

Dohnal, M., J. Dušek, T. Vogel, M. Šanda (2004b): Určování půdních hydraulických charakteristik a jejich variability inverzním modelováním, XII. posterový deň s medzinárodnou účasťou: Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda – rastlina – atmosféra (Bratislava/Slovensko), 25.11.

Eching, S.O., J.W. Hopmans (1994): Unsaturated hydraulic conductivity from transient multistep outflow and soil water pressure data, Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 687–695.

Finsterle, S., B. Faybishenko (1999): What does tensiometer measure in fractured rock?, in Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, edited by M.Th. van Genuchten, F.J. Leij, L. Wu, pp. 761–768, Univ. of Calif., Riverside.

Genuchten, van M.Th., A closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898, 1980.

Gerke, H. H., and M. Th. van Genuchten, A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media, Water Resources Research, 29, 305-319, 1993a.

Gerke, H. H., M. Th. van Genuchten (1993b): Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models, Water Resour. Res., 29(4), 1225-1238, 10.1029/92WR02467.

Gerke, H. H., M. Th. van Genuchten (1996): Macroscopic representation of structural geometry for simulating water and solute movement in dual-porosity media, Advances in Water Resources 19, 343-357.

Hillel, D. (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press.

Kool, J.B., J.C. Parker, M.Th. van Genuchten (1985): Determining soil hydraulic propeties form one-step outflow experiment by parameter estimation. I – Theory and Numerical Studies, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 1348-1353.

Kool, J.B., J.C. Parker (1988): Analysis of the inverse problem from transient unsaturated flow, Water Resources Research 24, No. 6, 817-830.

Mous, S.L.J. (1994): On identification of nonlinear systems, Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, p. 40–57.

Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol. 12, p.513-522.

Parker, J.C., J.B. Kool, M.Th. van Genuchten (1985): Determining soil hydraulic propeties form one-step outflow experiment by parameter estimation. II – Experimental Studies, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 1354-1359.

Russo, D. (1988): Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties, Water Resources Research, Vol. 24, 453–459.

Russo, D., U. Shani and J. C. Parker (1991): Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology, Water Resources Research, Vol. 27, 1361–1373.

Sanda, M. (1999): Subsurface runoff generation on a slope (in Czech), Ph.D. thesis, Czech Technical University in Prague, Prague.

Simunek, J., N. J. Jarvis, M. Th. van Genuchten, A. Gärdenäs (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.

Tacheci, P. (2002): Hydrological regime of small mountainous catchment and assessment of vegetation change effect (in Czech), Ph.D. thesis, Czech Technical University in Prague, Prague.

Toorman, A.F., P.J. Wierenga and R.G. Hill (1992): Parameter Estimation of Hydraulic Properties from One-step Outflow Data, Water Resources Research, Vol. 28, No. 11: 3021–3028.

Vogel, T., Císlerová, M., and J.W. Hopmans (1991): Porous media with linearly variable hydraulic properties, Water Resources Research 27, 2735–2741.

Vogel, T., K. Huang, R. Zhang, and M.Th. van Genuchten (1996): The HYDRUS code for simulating One-Dimensional Water Flow, Solute Transport, and Heat Movement in Variably-Saturated Media, Version 5.0, Research Report No. 140, U.S. Salinity Lab., ARS, USDA, Riverside, CA.

Vogel, T., H.H. Gerke, R. Zhang, M.Th. van Genuchten (2000): Modeling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties. Journal of Hydrology 238, 78–89.

Vogel, T., M.Th. van Genuchten, M. Cislerova (2001): Effect of the shape of soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions, Advances in Water Resources, 24, 133–144.

Zurmühl, T. (1996): Evaluation of different boundary conditions for independent determination of hydraulic parameters using outflow methods, Workshop On advanced methods to determine hydraulic properties of soils, Thurnau, Germany – 10.-12.6.

Autoři

Michal Dohnal, Katedra hydrauliky a hydrologie, Fakulta Stavební ČVUT, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, dohnalm@mat.fsv.cvut.cz

Jaromír Dušek, Katedra hydrauliky a hydrologie, Fakulta Stavební ČVUT, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, dusek@mat.fsv.cvut.cz

Tomáš Vogel, Katedra hydrauliky a hydrologie, Fakulta Stavební ČVUT, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, vogel@fsv.cvut.cz

Michal Sněhota, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta Stavební ČVUT, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, michal.snehota@fsv.cvut.cz

Milena Císlerová, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta Stavební ČVUT, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, cislerova@fsv.cvut.cz