

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague  
Faculty of Civil Engineering

Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

## **Vyhodnocení infiltračních vlastností půdního povrchu**

## **Evaluation of infiltration properties of soil surface**

## Summary

The habilitation lecture covers problems associated with the determination of infiltration properties of the soil surface. The pertaining research is focused on inverse modeling of single-ring ponded infiltration experiment and the evaluation of methods most frequently used for interpretation of infiltration experiment under suction.

The research explores the validity of the semi-empirical approach of Zhang (1997), which is used to obtain estimates of the near-saturated hydraulic conductivity from disk infiltrometer data. The approach is compared to analytical physically based expressions. The analysis is based on synthetic computer-generated data. The results of the validation procedure show that the analytical expressions often fail, while Zhang's approach performs best amongst the compared methods. This is due to the importance of the lateral soil water movement, which is not adequately addressed by either of the analytical models. Approach of Zhang was recalibrated by inverse modeling using synthetic data of three-dimensional axisymmetric simulations for broader range of soils.

The procedure presented allows reducing uncertainty associated with determination of soil surface hydraulic properties. One of the developed expressions for the determination of near-saturated hydraulic conductivity has been included in the infiltrometer device manufacturer user's manual (Decagon Devices, 2010).

## Souhrn

Habilitační přednáška se věnuje problémům spojeným s vyhodnocením infiltračních vlastností půdního povrchu. Předmětem zájmu jsou inverzní modelování jednoválcového výtopového experimentu a zhodnocení nepoužívanějších analytických a empirických metod vyhodnocení podtlakového infiltračního pokusu.

Spolehlivost určení nenasycené hydraulické vodivosti semiempirickou simulační metodou Zhanga (1997) byla společně s více fyzikálně založenými analytickými metodami testována na syntetických datových souborech. Analytické metody v mnoha případech vedly k chybným výsledkům, nejmenších relativních chyb dosahovala Zhangova metoda. Důvodem selhání testovaných analytických metod byl převládající vliv laterálního proudění, který není těmito modely uspokojivě vyřešen. Zhangovy výrazy byly pomocí řešení inverzní úlohy využívající data z třírozměrných osově symetrických simulací proudění modifikovány tak, aby byly platné pro širší spektrum půd.

Prezentované pracovní postupy umožňují zmenšit nejistotu při vyhodnocení infiltračních vlastností půdního povrchu. Jeden z modifikovaných výrazů pro výpočet hydraulické vodivosti v blízkosti nasycení je od roku 2010 zahrnut zahraničním výrobcem podtlakového infiltrometru do návodu k použití (Decagon Devices, 2010).

**Klíčová slova:**

Infiltrační pokus, hydraulická vodivost, preferenční proudění, inverzní modelování

**Key words:**

Infiltration experiment, hydraulic conductivity, preferential flow, inverse modeling

## Obsah

1. Úvod.....	6
2. Vlastnosti určující infiltrační rychlost.....	6
3. Faktory ovlivňující infiltraci do půdy.....	7
4. Metody vyhodnocení infiltračních vlastností.....	8
4.1 Numerická inverze – inverzní modelování.....	10
4.2 Další metody.....	11
4.2.1 Philipovo řešení.....	11
4.2.2 Haverkampův model.....	12
4.2.3 Zhangův přístup.....	13
5. Výsledky.....	14
6. Závěr .....	16
7. Literatura .....	16
8. Ing. Michal Dohnal, Ph.D. ....	19

## 1. Úvod

Půdní povrch je rozhraní, kde se rozhoduje o tom, jaká část srážkové vody se infiltuje do půdního profilu a jaká oteče po povrchu přímo do recipientu. Zároveň je to biologicky nejaktivnější část půdního profilu, charakterizovaná velkým množstvím kořenů a půdních mikroorganismů, důležitá při sekvestraci CO<sub>2</sub>. Vlhkost půdního povrchu navíc do značné míry ovlivňuje tepelné a hmotnostní toky mezi půdou a atmosférou. Z tohoto pohledu je půdní povrch zásadní například při posuzování efektivity antropogenních půdních systémů.

Půdní povrch je tedy důležitý nejen v hydrologii a vodním hospodářství, z hlediska formování odtoku a možného výskytu extrémních jevů, jako jsou povodně nebo sucha. Je neopomenutelnou součástí výzkumu v oblasti ekologie rostlinných společenstev a zemědělství. Významnou roli hraje také v případech krajinného inženýrství s ohledem na retenci vody v krajině. V technických oborech se soubor znalostí o fungování půdního povrchu uplatňuje při sanacích, v remediačních technologiích, a při návrhu zelených střech.

Proces, při kterém vstupuje voda z půdního povrchu do půdy, se nazývá infiltrace. Kromě počátečních a okrajových podmínek je infiltrace ovlivňována mnoha dalšími okolnostmi, především chemickým složením vody i půdy, heterogenitou hydraulických vlastností půdního profilu, sklonitostí terénu, teplotou infiltrované vody nebo aktivitou mikrobů a vyšších živočichů žijících v půdě.

## 2. Vlastnosti určující infiltrační rychlost

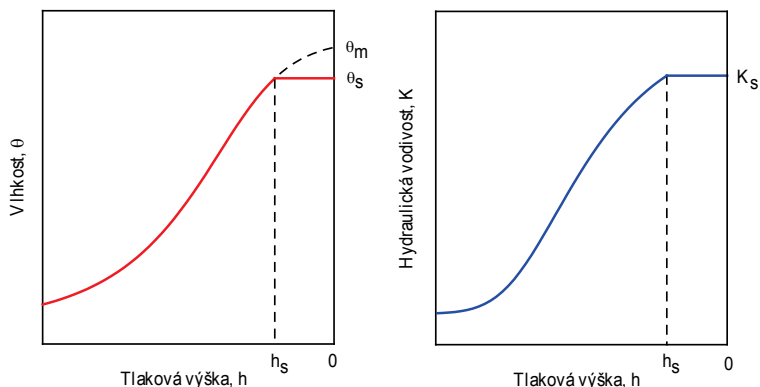
Vyhodnocení, popis, případně předpověď infiltrace vody do půdy jsou závislé na hydraulických charakteristikách půdy. Základními charakteristikami, které definují hydraulické vlastnosti pórovitého půdního prostředí, jsou hydraulická vodivost a závislost mezi tlakovou výškou  $b$  a objemovou vlhkostí  $\theta$ , popsána retenční křivkou (obr. 2).

Hydraulická vodivost  $K$  při dané vlhkosti  $\theta$ , odpovídá rychlosti proudění vody půdou při jednotkovém gradientu celkového potenciálu. Hydraulickou vodivost je zároveň možné přes retenční křivku vztáhnout k tlakové výšce  $b$ . Průběh hydraulické vodivosti  $K(b)$  jako funkce tlakové výšky  $b$  je běžně určován nepřímo z analytického tvaru retenční křivky, protože měření průběhu nenasycené hydraulické vodivosti je časově náročné a problematické.

Retenční křivkou potom chápeme posloupnost rovnovážných stavů mezi objemovou vlhkostí a kapilárním tlakem, reprezentovaným v délkových jednotkách vyjádřenou tlakovou výškou. Retenční křivka není jednoznačná, uplatňuje se zde hystereze.

V simulačních modelech se využívá celá řada výrazů k vyjádření retenční křivky (např. Brooks a Corey, 1964; van Genuchten, 1978; Gardner-Russo, 1958; Vogel a Císlerová, 1988). V současnosti pravděpodobně nejužívanějším

výrazem pro retenční křivku je van Genuchtenův z roku 1978. Pro předpověď nenasycené hydraulické vodivosti v blízkosti nasycení je vhodnější modifikovaná verze Vogela et al., 2001.



Obr. 2 Schéma retenční křivky a křivky hydraulické vodivosti.  $h_s$  je vstupní hodnota vzduchu,  $\theta_s$  je nasycená vlhkost,  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost a  $\theta_m$  je empirický parametr.

### 3. Faktory ovlivňující infiltraci do půdy

Mezi faktory ovlivňující infiltraci do půdy v první řadě patří charakteristiky půdního povrchu, vododpudivost, smršťování a bobtnání v jílovitých půdách, vliv uzavřeného vzduchu, preferenční proudění a časoprostorová variabilita hydraulických vlastností půdy.

Přítomnost krusty či rhizosféry, a míra kamenitosti a zhutnění půdního povrchu do značné míry určují průběh infiltrace.

Vodoodpudivost půdního povrchu může být důvodem výrazně anomálního průběhu infiltrace, především s ohledem na její časový průběh. K vodoodpudivosti může dojít z důvodu přesušení půdy, následkem lesních požárů nebo vlivem přírodních olejů, silic a pryskyřic rozptýlených ze zbytků rostlin.

V půdách s vyšším obsahem jílových minerálů dochází se změnou vlhkosti k poměrně výrazným objemovým změnám. Tyto objemové změny jsou zapříčiněny fyzikálními a chemickými vlastnostmi některých jílových minerálů. Následkem toho se mění nejen infiltrační, ale také mechanické vlastnosti půdy.

V praxi často zjednodušeně předpokládáme, že vzduch přítomný v půdních pórech neovlivňuje proudění vody a rozpuštěných látek. Předpoklad je v mnoha úlohách praktické hydrologie přibližně splněn, nicméně existuje celá řada situací, kdy není možné efekty způsobené přítomností vzdušné fáze zanedbat (opakovaná infiltrace apod.). Poměrně malé množství uzavřeného

vzduchu může mít výrazný dopad na infiltrační rychlost a hydraulickou vodivost. Nejčastějším projevem během infiltrace je probublávání vzduchu. Uzavření i malého procenta na počátku přítomného půdního vzduchu může snížit infiltrační rychlost až řádově. Navíc je za takových podmínek proudění nestabilní (Wang et al., 1998). Touto problematikou se podrobně zabývali Faybishenko (1995) nebo Sněhota et al. (2010).

Dalším faktorem ovlivňujícím infiltraci do půdního profilu je existence preferenčního proudění. Jako preferenční proudění se označuje nečekaně rychlý pohyb vody a rozpuštěných látek pod půdním povrchem (Bouma, 1981) způsobený heterogenitou geometrie pórů (Luxmoore et al., 1990), důsledky smršťování a rozpínání jílových minerálů (Booltink et al., 1991), nestabilním prouděním na fázových rozhraních vlivem vodoodpudivosti (Ritsema et al., 1993) nebo v důsledku, v našich podmínkách pravděpodobně nejčastější, vysoké vnitřní heterogenity půdní matrice (Číslerová et al., 1988). Půda je navíc přetvářena aktivitou půdních organismů (především kroužkovci, členovci a drobnými obratlovci) či kořenovými systémy rostlin. Vzájemné interakce s biotou obohacují půdu o spletitou síť biopórů. V podmínkách přirozených půd je preferenční charakter proudění způsoben kombinací několika příčin, jejichž účinky lze jen obtížně oddělit.

Významný vliv na infiltrační vlastnosti půdy má časoprostorová variabilita hydraulických charakteristik. Střídání ročních období, fenologický cyklus rostlin nebo klimatické změny jsou příčinou časové variability hydraulických charakteristik. Vyhodnocením variability hydraulických charakteristik u znovuzalesněného malého horského povodí v Jizerských horách se zabýval Dohnal (2008). Ve zkoumaném období byla prostorová variabilita tenzometrických měření výrazně vyšší než variabilita časová.

#### **4. Metody vyhodnocení infiltračních vlastností**

Stanovení hydraulických charakteristik pórovitého prostředí, tj. retenční křivky  $\theta(h)$  a křivky hydraulické vodivosti  $K(\theta)$ , je nezbytným výchozím krokem při numerickém modelování proudění vody a transportu chemických látek v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí. Postup vedoucí k určení funkcí  $\theta(h)$  a  $K(\theta)$  závisí na charakteru dostupných experimentálních informací a na zvoleném způsobu jejich vyhodnocení.

Laboratorní měření retenčních křivek provádí v České republice několik specializovaných laboratoří. Měření se obvykle provádí na neporušených půdních vzorcích o objemu 100 cm<sup>3</sup>. Body retenční křivky přitom odpovídají posloupnosti rovnovážných stavů mezi vlhkostí a tlakem půdní vody. Tímto způsobem se většinou určuje pouze jedna z větví obecně hysterezního průběhu retenční křivky (tzv. drenážní větev).

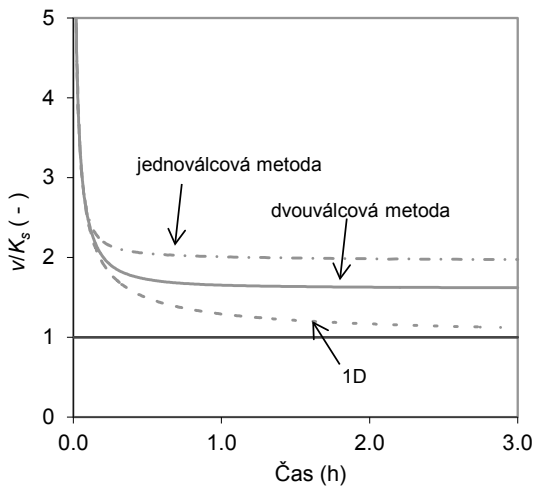
Přímé měření hydraulické vodivosti  $K(\theta)$  je značně náročné. Odhad jejího průběhu se proto běžně odvozuje z tvaru retenční křivky na základě teorie



kapilárních modelů a snadněji měřitelné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$ .

Infiltrační vlastnosti zjištěné v laboratoři na půdních vzorcích se od vlastností zjištěných v terénu často velmi liší. Proto je výhodné provádět měření infiltračních vlastností přímo v polních podmínkách. Experimentální metody určení hydraulické vodivosti zahrnují jednoválcový a dvouválcový infiltrační výtopový pokus nebo podtlakové infiltrace. Výtopová infiltrace je extrémním, v dobře propustných půdách málo častým, případem infiltrace. Na druhou stranu infiltrační pokus je tradičním experimentem, jehož předností je poměrně časově a finančně nenáročná realizace v přirozených polních podmínkách (tj. bez drastického narušení půdního povrchu) a proto je stále poměrně oblíbený. Přesto přináší jeho aplikace četné nástrahy - zejména ve fázi interpretace měření. Významnou a zároveň obtížně kvantifikovatelnou roli často hraje preferenční proudění.

Při srovnání jednoválcového a dvouválcového infiltračního pokusu je v literatuře často upřednostňován dvouválcový pokus. Důvodem je představa, že proudění má ve vnitřním válci přibližně jednorozměrný charakter. Tato představa je však mylná – charakter proudění pod válcem během obou infiltračních pokusů je vždy trojrozměrný. Např. Dušek et al. (2009) prokázali, že nasycená hydraulická vodivost jednorozměrného proudění se od vodivosti zjištěné z dvouválcového výtopového experimentu výrazně liší (obr. 3). Mezi klíčové experimentální podmínky výtopových infiltračních pokusů patří velikost infiltračního válce, hloubka jeho zaražení, výška výtopy a přítomnost preferenčních cest.



Obr. 3 Srovnání infiltračních rychlostí v případě dvouválcové a jednoválcové metody doplněné o infiltrační rychlost jednorozměrné infiltrace.

Ke zjištění půdních hydraulických vlastností v terénu se také již řadu let využívá diskový infiltrometr (např. Smettem a Clothier, 1989). V poslední době je stále častější použití minidiskového infiltrometru Decagon Devices (2010). Tento infiltrometr je atraktivní z důvodu snadné aplikace v terénu a nízké ceny. Řada autorů (Haverkamp et al., 1994; Zhang 1997; aj.) navrhla vlastní metody vyhodnocení minidiskového infiltračního experimentu. Tyto metody většinou vyžadují předběžnou znalost retenční křivky a umožňují stanovení jedné či několika hodnot funkce nenasyčené hydraulické vodivosti.

#### 4.1 Numerická inverze – inverzní modelování

Numerické modelování procesu infiltrace v pórovitém prostředí má velmi široké uplatnění. Správné stanovení hydraulických charakteristik – koeficientů řídicí rovnice proudění – klíčovým způsobem určuje kvalitu modelových předpovědí průběhu infiltrace. Proudění vody v pórovitém prostředí je popsáno Richardsovou rovnicí:

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla h) + \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla z) \quad (1)$$

kde  $h$  představuje tlakovou výšku (cm),  $\mathbf{K}$  je tenzor hydraulické vodivosti ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $C$  je specifická hydraulická kapacita ( $\text{m}^{-1}$ ),  $z$  označuje vertikální souřadnici (m) a  $t$  je čas (s). Parametrická aproximační funkce van Genuchtena

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + (-\alpha h)^n)^{-m} \quad (2)$$

se často používá v kombinaci s Mualemovým kapilárním modelem (Mualem, 1976), hydraulická vodivost se předpovídá ze vztahu (van Genuchten, 1980):

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (3)$$

Vzhledem k tomu, že analytická inverze řídicí rovnice proudění je možná pouze v jednoduchých případech za značně omezujících podmínek (Broadbridge a White, 1988; Warrick et al., 1990) přistupuje se daleko častěji k numerické inverzi Richardsovy rovnice, která dovoluje určení hydraulických charakteristik v komplexních tranzientních podmínkách. Parametrizace (2), (3) je vhodná pro účely inverzního modelování, při kterém se stanovují parametry hydraulických charakteristik na základě jednoduchých transientních laboratorních nebo terénních experimentů. Parametry hydraulických charakteristik se rozumí parametry retenční křivky a stanovení hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (tj. maximální hodnoty funkce  $K(\theta)$ ).

Nejpoužívanějším optimalizačním algoritmem byla relativně výpočetně nenáročná Levenbergova-Marquardtova metoda (Marquardt, 1963) kombinující schopnost gradientních metod konvergovat z počátečního

odhadu, který může být mimo oblast konvergence jiných metod, a potenciál Gaussovy-Newtonovy metody rychle dospět k minimálním hodnotám poté co bylo dosaženo jejich nejbližšího okolí. Současný nástup tzv. globálních optimalizačních metod je zapříčiněn domněnkou, že za častým selháním inverzního modelování ve vadózní zóně je existence řady lokálních minim v prostoru odezev, se kterými nejsou gradientní metody schopné se vypořádat (např. Vrugt, 2004). Používanějšími se staly analogie s přírodními procesy, které dovolují sdílení globální informace o prostoru odezev a zajišťují algoritmu relativní robustnost při výskytu množství lokálních minim (Ines a Droogers, 2002) případně se přistupovalo k randomizaci počátečního odhadu u standardních gradientních metod (např. Blasone et al., 2007).

Existence komplikovaných prostorů odezev s velkým množstvím lokálních minim se v případě inverze Richardsovy rovnice v úlohách podpovrchové hydrologie nepotvrdila, přesto přinesly metody využívající opakovaného spouštění velkého množství přímých úloh řadu výhod.

## 4.2 Další metody

Z důvodu požadavku na maximální jednoduchost a robustnost jsou stále používané také další metody vyhodnocení infiltračních vlastností půdního povrchu. Některé z nich využívají analytická řešení a jsou fyzikálně založené, jiné mají semiempirický nebo čistě empirický charakter. Mezi nejčastěji používané metody k vyjádření rychlosti infiltrace vody do půdy nebo odhadu celkového zainfiltrovaného objemu vody, které nevyžadují numerické řešení Richardsovy rovnice, patří Hortonova rovnice (1933), Greenova-Amptova metoda (1911), Kostjakovova rovnice (1932) a Philipovo řešení (1957).

Nejstarší Greenova-Amptova rovnice je analytickým řešením pro půdy s uniformní velikostí pórů (tzv. *Dirac delta function soils*). Takové řešení může být vhodnou aproximací v hrubozrnných půdách vykazujících strmá čela zvlhčení. Kostjakovova empirická hyperbolická rovnice je vhodná pro úlohy horizontální infiltrace. Empirická Hortonova rovnice popisuje infiltrační rychlost s pomocí exponenciální funkce a třech konstant.

V případě vyhodnocení infiltračních vlastností jsou nejpoužívanější metody vycházející z Philipova řešení (1957).

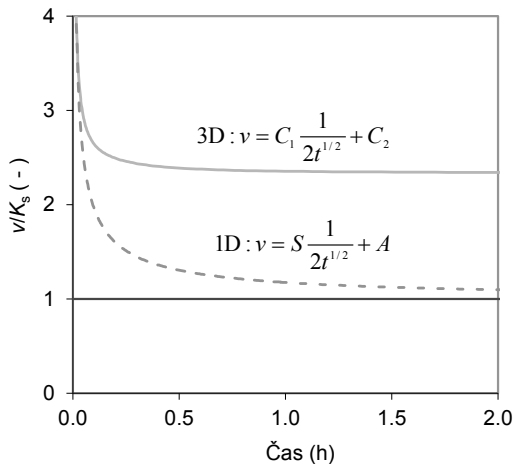
### 4.2.1 Philipovo řešení

Philipovo řešení má formu nekonečné mocninné řady a bylo odvozeno pro nekonečně hluboký homogenní na počátku konstantně vlhký půdní profil. Pro popis infiltračního procesu pod diskovým infiltrometrem se často využívají pouze první dva členy Philipovy aproximace:

$$I = St^{1/2} + At \quad (4)$$

kde  $I$  je kumulativní infiltrace (m),  $t$  je čas (s),  $S$  je sorptivita ( $\text{m s}^{-1/2}$ ), která charakterizuje proudění pod infiltrometrem vzhledem ke kapilárním silám a parametr  $A$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) charakterizuje proudění vzhledem k silám gravitačním.

Philipovo řešení bylo původně odvozeno pro jednorozměrnou infiltraci. Pokud ho aplikujeme na třírozměrné proudění vody z bodového zdroje, je nutné příslušným způsobem pozměnit interpretaci obou koeficientů. Pro okamžitou infiltrační rychlost je rozdílná interpretace koeficientů znázorněna na obr. 4.



Obr. 4 Philipova infiltrační rovnice stejná pro jednorozměrnou a trojrozměrnou infiltraci. Rozdílné jsou v obou případech hodnoty koeficientů.

#### 4.2.2 Haverkampův model

Haverkamp et al. (1994) představili fyzikálně založenou metodu vyhodnocení hydraulické vodivosti poblíž nasycení z měření diskového infiltrometru. Jejich metoda je konzistentní s analýzou publikovanou Smettemem et al. (1994). V jejich přístupu jsou koeficienty  $C_1$  a  $C_2$  vztaženy k sorptivitě a hydraulické vodivosti prostřednictvím výrazů

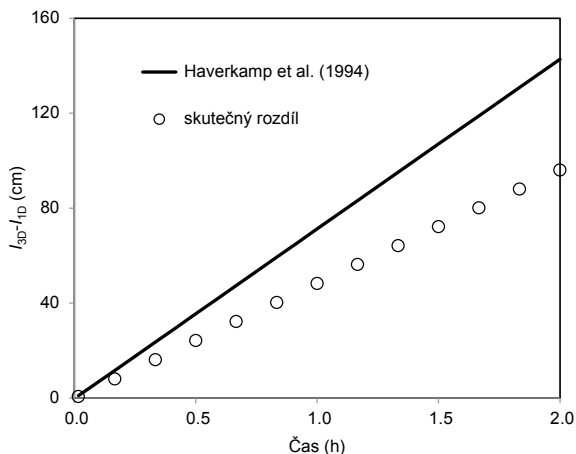
$$C_1 = S \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{2 - \beta}{3} K_{h_0} + \frac{\gamma S^2}{r_0 (\theta_{h_0} - \theta_i)} \quad (6)$$

kde  $\gamma$  je proporční faktor (očekávaný v intervalu hodnot 0.6 - 0.8). Koeficient  $\beta$  nabývá hodnot od 0 do 1. Poslední člen na pravé straně rovnice vyjadřuje opravu pro trojrozměrnou infiltraci, původně odvozenou Smettemem et al. (1994)

$$I_{3D} - I_{1D} = \frac{\gamma S^2}{r_0 (\theta_{h_0} - \theta_i)} t \quad (7)$$

kde  $I_{3D}$  a  $I_{1D}$  jsou kumulativní infiltrace v případě trojrozměrného respektive jednorozměrného proudění. Rozdíl vyjádřený rovnicí (7) je lineární v čase. Dohnal et al. (2010) pomocí numerických experimentů prokázali, že rozdíl mezi trojrozměrnou a jednorozměrnou infiltrací je skutečně lineární v čase, nicméně jak je znázorněno na obr. 5, v některých případech výrazně odlišným způsobem než uvažují Smettem et al. (1994), Haverkamp et al. (1994) aj. Tento rozdíl způsobuje při použití skupiny metod vycházející z analytického řešení Smettema et al. (1994) dominanci laterálního kapilárního členu, která má za následek velmi nepřesné nebo dokonce záporné hodnoty vodivosti.



Obr. 5 Srovnání velikostí laterálních kapilárních složek kumulativní infiltrace během infiltračního experimentu (prachová hlína při nastavené tlakové výšce  $h_0 = -3$  cm).

### 4.2.3 Zhangův přístup

Zhang (1997) pracuje s koeficienty  $C_1$  a  $C_2$  jako s empirickými parametry vystupujícími v Philipově aproximaci. Pro hydraulickou vodivost  $K$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) a sorptivitu  $S$  ( $\text{m s}^{-1/2}$ ) uvádí:

$$C_1 = SA_1 \quad (8)$$

$$C_2 = K(h_0)A_2 \quad (9)$$

kde  $h_0$  ( $\leq 0$ ) je hodnota tlakové výšky nastavené infiltrometrem (cm) a koeficient  $C_2$  se určuje proložením měření  $I(t)$  rovnicí (1). Bezrozměrné empirické koeficienty  $A_1$  a  $A_2$  nabývají podle Zhanga v případě van Genuchtenovy parametrizace retenční křivky (van Genuchten, 1980) tvaru:

$$A_1 = \frac{1.4b^{0.5}(\theta_{h_0} - \theta_i)^{0.25} \exp[3(n-1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.15}} \quad (10)$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_0]}{(ar_0)^{0.91}} \quad n \geq 1.9 \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[7.5(n - 1.9)\alpha h_0]}{(ar_0)^{0.91}} \quad n < 1.9 \quad (12)$$

V rovnicích (10-12) jsou  $n$  (-) a  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) parametry retenční křivky,  $r_0$  značí poloměr infiltračního disku (cm).

Zhangovo vyjádření hydraulické vodivosti je použité v manuálu výrobce minidiskového infiltrometru (Decagon Devices, 2010). Dohnal et al. (2010) testovali spolehlivost určení nenasyčené hydraulické vodivosti metodou Zhanga (1997), za tímto účelem vybrali z modelu pedotransferové funkce ROSETTA (Schaap et al., 2001) 12 parametrizací typických pro 12 odlišných texturních tříd. Pro tlakové výšky nastavitelné infiltrometrem (-0.5 cm, -1 cm, -2 cm, -3 cm, -4 cm, -5 cm a -6 cm) a zvolené půdy provedli třírozměrné osově symetrické simulace proudění pod infiltrometrem.

Osově symetrická oblast proudění byla široká 50 cm a hluboká 100 cm. Uvažován byl homogenní profil, proudění neovlivněné spodní okrajovou podmínkou. Podtlakové infiltrace byly modelovány použitím Dirichletovy okrajové podmínky pod infiltrometrem (konstantní tlaková výška) a Neumannovy okrajové podmínky vně infiltrometru (nulový tok). Plocha infiltračního disku byla 15.2  $\text{cm}^2$ . Počáteční podmínka byla uvažována hodnotou tlakové výšky -1000 cm.

Simulované infiltrační intenzity byly použity jako vstupní data pro výpočet hydraulické vodivosti metodou Zhanga (1997). Přesnost určení hydraulické vodivosti byla kvantifikována pomocí relativní chyby, kde byla hodnota nenasyčené hydraulické vodivosti vypočtená metodou Zhanga porovnávána se skutečnou hodnotou hydraulické vodivosti.

## 5. Výsledky

Výsledky aplikace Zhangových vztahů v kombinaci s původní van Genuchtenovou-Mualemovou parametrizací ukázaly, že pouze u prachu a prachovité hlíny byly relativní chyby do 5%, jak uvádí Zhang (1997). U ostatních půd jsou velikosti relativních chyb do 40%. V naprosté většině jsou hodnoty nenasyčené hydraulické vodivosti získané metodou Zhanga (1997) mírně nadhodnoceny. Zjištěné větší relativní chyby určení hydraulické vodivosti (průměrné  $RE = 19\%$ ) oproti analýze Zhanga (1997) mohou být důsledkem testování funkčnosti metody Zhanga v jiném rozsahu podtlaků a zvolenou plochou disku.

U jedné skupiny půd byla úspěšnost vyhodnocení vodivosti metodou Zhanga výrazně nižší. Tyto půdy (s parametrem  $n < 1.35$ ) vykazují vysokou citlivost na nenulovou vstupní hodnotu vzduchu. V regionu střední Evropy je výskyt takových půd poměrně častý. Patří se například půdy ze skupiny kambisolů a

vznikaly místním zvětráváním krystalinického podkladu. Z hlediska modelové interpretace jsou charakteristické nízkou hodnotou parametru  $n$  vystupujícího v parametrizaci van Genuchtena-Mualema, který má vliv na tvar retenční čáry  $\theta(h)$  a zejména na strmý pokles funkce hydraulické vodivosti v blízkosti nasycení. Analýzou citlivosti nepřímého stanovení funkce  $K(h)$  z naměřeného průběhu  $\theta(h)$  užitím kapilárních modelů se zabývali Vogel a Císlerová (1988), Vogel et al. (2001), aj.

Z výsledků plyne, že pro rutinní stanovení hydraulické vodivosti z měření infiltrometru je nutné omezit platnost výrazu (12) na rozmezí  $n \geq 1.35$  a formulovat nový výraz pro  $n < 1.35$ . Pro praktické využití je výhodné zachování funkční formy navržené Zhangem (1997) i v oboru  $n < 1.35$ .

Nové hodnoty parametrů rovnice (12) byly zjišťovány optimalizací, kdy byl minimalizován rozdíl mezi danými nenasyčenými hydraulickými vodivostmi a vypočítanými vodivostmi metodou Zhanga (rovnice (12)) na základě numerickým modelem generovaných hodnot kumulativní infiltrace v čase (tvořící cílovou funkci). Platnost nového výrazu je určena rozsahem datového souboru v cílové funkci. K tomuto účelu bylo vybráno 10 půd z databáze UNSODA (Nemes et al., 2001) s hodnotou parametru  $n < 1.3$  a průměrnou nasycenou hydraulickou vodivostí  $0.5 \text{ cm h}^{-1}$ . Soubor byl doplněn dalšími 10 půdami ze skupiny kambisolů, s nízkou hodnotou parametru  $n$  a průměrnou nasycenou hydraulickou vodivostí  $2.5 \text{ cm h}^{-1}$ . Celkem bylo vybráno 20 půd. Aby bylo dosaženo vyšší reprezentativnosti výsledného výrazu bylo voleno široké rozmezí ploch diskových infiltrometrů ( $15.2 \text{ cm}^2$ ;  $38.5 \text{ cm}^2$ ,  $314 \text{ cm}^2$ ,  $726 \text{ cm}^2$ ,  $1206.9 \text{ cm}^2$ ) a nastavitelných podtlaků ( $-1 \text{ cm}$ ,  $-5 \text{ cm}$ ,  $-10 \text{ cm}$ ,  $-15 \text{ cm}$ ,  $-20 \text{ cm}$ ,  $-25 \text{ cm}$ ). Ve srovnání s prací Zhanga (1997) došlo tedy k rozšíření v oblasti podtlaků a byla přidána plocha minidiskového infiltrometru.

Pro generování datového souboru pomocí simulací využívajících modifikovanou van Genuchtenovu parametrizaci byla zvětšena oblast proudění a prodloužena délka simulací, aby postačovala pro široké spektrum hydraulických vlastností vybraných půd. U všech půd byla v simulacích předpokládána shodná vstupní hodnota vzduchu  $-4 \text{ cm}$ . Výsledné výrazy, univerzální pro všechny velikosti používaných infiltrometrů, i zvláštní výraz pro výpočet hydraulické vodivosti z měření minidiskovým infiltrometrem, jsou obsaženy v práci Dohnala et al. (2010). Univerzální výraz pro výpočet hydraulické vodivosti z měření širokou škálou velikostí infiltrometrů

$$K_{h_0} = \frac{C_2(\alpha r_0)^{0.87}}{11.65(n^{0.36} - 1)\exp[6.9(n-1.3)\alpha h_0]} \quad n < 1.35 \quad (13)$$

Zvláštní výraz pro výpočet hydraulické vodivosti poblíž nasycení z měření minidiskovým infiltrometrem:

$$K_{h_0} = \frac{C_2(\alpha r_0)^{0.6}}{11.65(n^{0.82} - 1)\exp[34.65(n-1.19)\alpha h_0]} \quad n < 1.35 \quad (14)$$

Relativní chyba stanovení hydraulické vodivosti pomocí nových výrazů je srovnatelná s chybou dosahovanou při aplikaci Zhangových vztahů v oblasti jejich platnosti.

## 6. Závěr

Nezávislé zjištění hydraulických parametrů půdy má pro správnou parametrizaci modelů proudění vody v systému půda – rostlina – atmosféra velký význam. Z tohoto důvodu byla provedena numerická studie ověřující správnost nejpoužívanějších výrazů pro výpočet hydraulické vodivosti půdní matrice v blízkosti nasycení, které se používají k vyhodnocení měření diskovými infiltrometry. Pro popis infiltračního procesu pod diskovými infiltrometry se často využívají pouze první dva členy Philipovy aproximace, které charakterizují proudění pod infiltrometrem vzhledem ke kapilárním respektive gravitačním silám.

Spolehlivost určení nenasyčené hydraulické vodivosti empirickou numerickou metodou Zhanga (1997) byla společně s více fyzikálně založenými analytickými metodami Haverkampa et al. (1994) aj. testována na syntetickém datovém souboru. Analytické metody v mnoha případech vedly k chybným výsledkům, nejmenších relativních chyb dosahovala Zhangova metoda. Důvodem selhání metody Haverkampa et al. (1994) byl převládající vliv laterálního proudění u testovaných půd, který není těmito modely uspokojivě vyřešen. Na základě provedeného testování Zhangovy (1997) metody bylo zjištěno, že původní Zhangovy výrazy pro výpočet vodivosti jsou vhodné pouze pro půdy s hodnotou van Genuchtenova parametru  $n > 1.35$ . Se snižující se hodnotou  $n$  v intervalu  $<1.35; 1.00>$  významně klesá věrohodnost výsledků numerických experimentů, na základě kterých byly určeny empirické parametry v Zhangových výrazech. Řešením inverzní úlohy využívající data z třírozměrných osově symetrických simulací proudění byly určeny koeficienty nového výrazu, platné pro hodnoty parametru  $n < 1.35$ .

Nový výraz významně zvyšuje přesnost vyhodnocení hydraulické vodivosti půdní matrice in situ pomocí podtlakového diskového infiltrometru. Takto určenou vodivost je možné použít jako vstupní údaj pro simulace proudění vody v půdě. Modifikovaný výraz pro výpočet hydraulické vodivosti v blízkosti nasycení z měření minidiskovým infiltrometrem (plocha disku 15.2 cm<sup>2</sup>) – je od roku 2010 zahrnut výrobcem (Decagon Devices Inc., Washington, USA) do doporučené metodiky v návodu k použití (Manuál verze 8 a vyšší).

## 7. Literatura

Blasone, R.-S., H. Madsen, D. Rosbjerg, Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques. Nord. Hydrol. 38, 451–476, 2007.



- Booltink, H.W.G., J. Bouma, D. Giménez, Suction crust infiltrometer for measuring hydraulic conductivity of unsaturated soil near saturation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 566–568, 1991.
- Bouma, J., Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agric. Water. Manag.* 3, 235–250, 1981
- Broadbridge, P., I. White, Constant rate rainfall infiltration - a versatile nonlinear model .1. Analytic solution. *Water Resour. Res.* 24, 145–154, 1988.
- Císlarová, M., J. Šimůnek, T. Vogel, Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments. *J. Hydrol.* 104, 1–16, 1988.
- Decagon Devices Inc., Mini Disk Infiltrometer – Model S, User’s manual Version 8, Pulman WA, USA, 2010.
- Dohnal, M., Soil hydraulic characteristics estimation by means of inverse modeling. Ph.D. Thesis. Czech Technical University in Prague, 2008.
- Dohnal, M., J. Dušek, T. Vogel, Improving hydraulic conductivity estimates from minidisk infiltrometer measurements for soils with wide pore-size distributions. *Soil Sci. Soc. .Am. J.* 74, 804-811, 2010.
- Dušek, J., M. Dohnal, T. Vogel, Numerical Analysis of Ponded Infiltration Experiment under Different Experimental Conditions. *Soil Water Res.* 4, S22–S27, 2009.
- Faybishenko, B.A., Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. *Water Resour. Res.* 31, 2421–2435, 1995.
- Genuchten, van M.Th., Numerical solutions of the one-dimensional saturated-unsaturated flow equation, Res. Report 78-WR-9, *Water Resour. Prog.*, Dept. Civil Eng., Princeton Univ., Princeton, NJ, 1978.
- 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.
- Green, W.H., G. Ampt, Studies of soil physics, part I – the flow of air and water through soils. *J. Ag. Sci.* 4, 1–24, 1911.
- Haverkamp, R., P.J. Ross, K.R.J. Smettem, J.Y. Parlange, Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer 2. Physically-based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 30, 2931–2935, 1994.
- Horton, R. E., The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union.* 14<sup>th</sup> Ann. Mtg. 446–460, 1933.
- Ines, A.V.M., P. Droogers, Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic algorithm approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 6, 49–65, 2002.
- Kostjakov, A.N., On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions of the 6<sup>th</sup> Int. Conf. of the Society of Soil Scientists*, A:17–21, 1932.

- Luxmoore, R.J., P.M. Jardine, G.V. Wilson, Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma* 46, 139–154, 1990.
- Marquardt, D. W., An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust., Appl., Math.* 11, 431–441, 1963.
- Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513–522, 1976.
- Nemes, A., M.G. Schaap, F.J. Leij, J.H.M. Wösten, Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *J. Hydrol.* 251, 151–162, 2001.
- Philip, J.R., The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84, 257–261, 1957.
- Ritsema, C.J., L.W. Dekker, J.M.H. Hendrickx, W. Hamminga, Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.* 29, 2183–2193, 1993.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, M.Th. van Genuchten, ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176, 2001.
- Smettem, K.R.J., B.E. Clothier, Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. *J. Soil Sci.* 40, 563–568, 1989.
- Sněhota, M., M. Císlarová, M.H.G. Amin, L.D. Hall, Tracing the entrapped air in heterogeneous soil by means of magnetic resonance imaging. *Vadose Zone J.* 9, 373–384, 2010.
- Vogel, T., M. Císlarová, On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Trans. Porous Med.* 3, 1–15, 1988.
- Vogel, T., M. Th. van Genuchten, M. Císlarová, Effect of the shape of soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Adv. Water Resour.* 24, 133–144, 2001.
- Vrugt, J., Towards Improved Treatment of Parameter Uncertainty in Hydrologic Modeling. PhD Thesis. Univ. Amsterdam, NL, 2004.
- Wang, D., J. Feyen, M.Th. van Genuchten, D.R. Nielsen, Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resour. Res.* 34, 213–222, 1998.
- Warrick, A.W. D.O. Lomen, A. Islas, An analytical solution to Richards equation for a draining soil-profile. *Water Resour. Res.* 26, 253–258, 1990.
- Zhang, R., Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1024–1030, 1997.

## **8. Ing. Michal Dohnal, Ph.D.**

### **Osobní údaje:**

Narozen 15. 3. 1977 v Přerově.

### **Vzdělání:**

2003 – titul Ing. v oboru: Inženýrství životního prostředí (České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební).

2008 – titul Ph.D., téma disertační práce: „Stanovení hydraulických charakteristik půdy inverzním modelováním.“ (České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, obor: Vodní hospodářství a vodní stavby).

### **Zaměstnání:**

od 2005                      odborný asistent na Katedře hydrauliky a hydrologie Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze

### **Pedagogická činnost:**

Přednášení a vedení cvičení bakalářského kurzu Klimatologie, meteorologie, hydrologie (141KMHL). Přednášky povinně volitelného předmětu Experimentální hydroklimatologie (141EXH). Výuka magisterského kurzu hydrologie (141HYL). Vedení výuky v terénu Hydrometrování (141VYV1 a 141VYZ1). Pořádání pravidelných hydrologických seminářů pro studenty doktorského studia.

### **Odborná a výzkumná činnost:**

Inverzní stanovení parametrů modelů proudění vody a transportu rozpuštěných látek v půdním prostředí. Experimentální hydrologie malých horských povodí. Evapotranspirace lesních ekosystémů. Tvorba odtoku na svahu. Modely procesu infiltrace. Projevy preferenčního proudění v podpovrchové hydrologii.

### **Projekty:**

2005–2008                      výzkumný pracovník Centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí (CIDEAS)

2005–2009                      vyjmenovaný člen týmu projektu 6. rámcového programu Evropské unie: AQUATERRA - Porozumění interakcím v systému řeka-sediment-půda-podzemní voda pro podporu řízení říčních povodí

2008–2010                      vyjmenovaný člen týmu projektu Grantové agentury České republiky Identifikace hydrofyzikálních vlastností způsobujících gravitačně podmíněné proudění v porézních materiálech

2008–2012 vyjmenovaný člen týmu projektu Grantové agentury České republiky Proudění vody a transport rozpuštěných látek v pórovitém prostředí za přítomnosti nespojitě plynné fáze

2008–2012 vyjmenovaný člen týmu projektu Grantové agentury České republiky Hydrologické toky v systému půda-rostlina-atmosféra.

Autorem nebo spoluautorem 17 článků v časopisech registrovaných v databázi Thompson Reuters Web of Science (Research ID: <http://www.researcherid.com/rid/A-1233-2009>; H-index = 6).

Recenzentem odborných časopisů: Journal of Hydrology, Vadose Zone Journal, Soil Science Society of America Journal, Geoderma, Water Resources Research, European Journal of Soil Science, aj.

Člen redakční rady časopisu Soil and Water Research.

Člen European Geosciences Union.

**Publikace** v časopisech s nenulovým impakt faktorem za posledních pět let (řazeno chronologicky):

Dohnal, M. - Dušek, J. - Vogel, T. - Císlarová, M. - Lichner, L. - et al.: Pondered Infiltration into Soil with Biopores - Field Experiment and Modeling. *Biologia*. 2009, vol. 64, no. 3, p. 580-584.

Nadeždina, N. - David, T.S. - David, J.S. - Ferreira, M.I. - Dohnal, M. - et al.: Trees Never Rest: the Multiple Facets of Hydraulic Redistribution. *Ecohydrology*. 2010, vol. 3, no. 4, p. 431-444.

Vogel, T. - Šanda, M. - Dušek, J. - Dohnal, M. - Votrubová, J.: Using Oxygen-18 to Study the Role of Preferential Flow in the Formation of Hillslope Runoff. *Vadose Zone Journal*. 2010, vol. 9, no. 2, p. 252-259.

Vogel, T. - Březina, J. - Dohnal, M. - Dušek, J.: Physical and Numerical Coupling in Dual-Continuum Modeling of Preferential Flow. *Vadose Zone Journal*. 2010, vol. 9, no. 2, p. 260-267.

Dohnal, M. - Dušek, J. - Vogel, T.: Improving Hydraulic Conductivity Estimates from Minidisk Infiltrometer Measurements for Soils with Wide Pore-Size Distributions. *Soil Science Society of America Journal*. 2010, vol. 74, no. 3, p. 804-811.

Dušek, J. - Dohnal, M. - Vogel, T. - Ray, C.: Field leaching of pesticides at five test sites in Hawaii: modeling flow and transport. *Pest Management Science*. 2011, vol. 67, no. 12, p. 1571-1582.

Sobotková, M. - Sněhota, M. - Dohnal, M. - Ray, C.: Determination of hydraulic properties of a tropical soil of hawaii using column experiments and inverse modeling. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2011, vol. 35, no. 4, p. 1229-1239.

- Vogel, T. - Dohnal, M. - Votrubová, J.: Modeling Heat Fluxes in Macroporous Soil under Sparse Young Forest of Temperate Humid Climate. *Journal of Hydrology*. 2011, vol. 402, no. 4, p. 367-376.
- Dohnal, M. - Vogel, T. - Šanda, M. - Jelínková, V.: Uncertainty Analysis of a Dual-continuum Model Used to Simulate Subsurface Hillslope Runoff Involving Oxygen-18 as Natural Tracer. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012, vol. 60, no. 3, p. 194-205.
- Dušek, J. - Vogel, T. - Dohnal, M. - Gerke, H.H.: Combining dual-continuum approach with diffusion wave model to include a preferential flow component in hillslope scale modeling of shallow subsurface runoff. *Advances in Water Resources*. 2012, vol. 44, p. 113-125.
- Votrubová, J. - Dohnal, M. - Vogel, T. - Tesař, M.: On Parameterization of Heat Conduction in Coupled Soil Water and Heat Flow Modelling. *Soil and Water Research*. 2012, vol. 7, no. 4, p. 125-137.
- Pavelková, H. - Dohnal, M. - Vogel, T.: Hillslope Runoff Generation - Comparing Different Modeling Approaches. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012, vol. 60, no. 2, p. 73-86.
- Dohnal, M. - Jelínková, V. – Sněhota, M. – Dušek, J. – Březina, J.: Three-Dimensional Numerical Analysis of Water Flow Affected by Entrapped Air: Application of Noninvasive Imaging Techniques. *Vadose Zone Journal*. 2013, vol. 12, no. 1.
- Vogel, T. - Dohnal, M. - Dušek, J. - Votrubová, J. - Tesař, M.: Macroscopic Modeling of Plant Water Uptake in a Forest Stand Involving Root-mediated Soil Water Redistribution. *Vadose Zone Journal*. 2013, vol. 12, no. 1.
- Dohnal, M. - T. Černý - Votrubová, J. - Tesař, M.: Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2014, vol. 62, no. 4, doi: 10.2478/johh-2014-0037.