# VADÓZNÍ ZÓNA A MODELOVÁNÍ ODTOKU Z POVODÍ

Milena Císlerová

*V České kotlině kolem 60% všech půd vzniklo místním zvětráváním krystalinického podkladu vedoucím ke vzniku písčito hlinitých heterogenních půd patřících do skupiny Cambisolů, s častým výskytem i jinde v Evropě. S těmito půdami se můžeme setkat na svazích našich horských a podhorských oblastí. Jde ve většině případů o zdrojové oblasti - pahorkatiny s vyšší nadmořskou výškou, se kterou úměrně roste také srážková činnost. Půdní profil je mělký, dosahuje zpravidla hloubky mezi 60 až 150 cm, hranice se zvětralým skalním podložím je pozvolná, bez přítomné stálé hladiny podzemní vody. V příspěvku seznámíme s výsledky studia hydrologie svahu v malých povodích na krystaliniku. Pro formování odtoku je typická velmi rychlá reakce na srážky. Jen vyjímečně dochází k povrchovému odtoku, všechna srážková voda infiltruje a formou mělkého hypodermického odtoku odtéká. Bylo zjištěno, že rychlá transformace srážek je zde způsobena výrazným preferenčním prouděním celou vadózní zónou. Popis vzniku preferenčního proudění a jeho podílu na tvorbě odtoku hraje při určování jednotlivých složek hydrogramu odtoku klíčovou roli, což je nutné respektovat při modelování odtoku z malých povodí. Systematický výzkum těchto jevů je zaměřen na hledání experimentální metody na detekci a měření charakteristik preferenčního proudění v heterogenních půdách, na parametrizaci hydraulických vlastností půdy pomocí inverzního modelování, na nedestruktivní visualizaci preferenčního proudění (CT a MR snímkování) a na vývoj adekvátních numerických simulačních modelů proudění a transportu látek v pórovitém prostředí. Cílem je reálnější předpověď důležitých procesů: vzniku odtoku, formování povodní a doplňování zásob podzemní vody a v neposlední řadě transportu rozpuštěných látek.*

*Klíčová slova: vadózní zóna, tvoba odtoku, preferenční proudění, heterogenní půda*

***Vadoze zone and the runoff simulation.*** *In the Czech basin about 60% of soil types was formed by weathering of the cristalline bedrock resulting in heterogeneous sandy loams (Distric Cambisols). They may be found on hillslopes of Czech mountanious ridges and hills, and are of a freequent occurence elsewhere in Europe. In majority, they appear in source areas – hills of the higher elevation above the sea level and linearly growing precipitation. The soil profile is shallow, usually between 60 to 150 cm. The transition zone to the decayed bedrock is gradual, the groundwater level is usually not present within the soil profile. Results of the presented research has been focused on the hydrology of hillslope in small watershed on Cristallinicum. A very fast reaction to the rainfall is typical here in the discharge formation. The surface outflow appears rarely, all rainfall water infiltrates and moves downwards in the form of a shallow hypodermic flow. It was found that the fast transformation of rainfall is due to the significant preferential flow through the whole vadose zone. Description of the preferential flow formation and its impact on the outflow formation plays a key role in the evaluation of particular elements of the outflow hydrograph. It should be taken in account when the outflow from these small watersheds is simulated. A systematic study is focused on the evaluation of experimental methods to detect preferential flow, to determine hydraulic characteristics of heterogeneous soils exhibiting preferential flow, to parametrize soil hydraulic properties of these soils by means of inverse simulation models of flow and solute transport in porous media. The aim is the improved prediction of important processes: outflow and flood events formation, suplement of subsurface water reservoirs and the transport of pollutants.*

*Key words: vadose zone, outflow formation, preferential flow, heterogeneous soil*

---

## ÚVOD

Popsáním zákonitostí srážkoodtokových vztahů v povodí se zabývá již několikátá generace hydrologů, často s překvapivě přesnými odhady a výsledky. Pokud sledujeme prostou hydrologickou bilanci, existuje celá řada spolehlivých nástrojů, které je možno aplikovat. Pokud se zabýváme zároveň popisem transportních procesů, zejména v souvislosti s tvorbou významějších odtokových událostí, velmi často se setkáme se situací, ve které je klíčové co nejpřesnější určení pole rychlostí a kterou stále nejsme schopni uspokojivě simulovat.

V posledních dvou dekádách bylo zjištěno, že v řadě zdrojových povodí, kde je mělký svahový půdní profil tvořen hrubě písčitými půdami kambizemí, vzniklých místním zvětráním krystalinického podloží, hydrologickou bilanci ovlivňuje velmi významně mělké podpovrchové proudění po svahu.

Vzhledem ke skutečnosti, že v České kotlině patří do této skupiny téměř 60 % celkové plochy, jde o významnou skutečnost.

Odtok ze svahu je obvykle tvořen třemi složkami: povrchovým odtokem, mělkým, podpovrchovým tokem a výtokem podzemních vod. Kterákoliv z těchto složek se v reakci na srážky za určitých podmínek může stát dominantní. Vedle dalších faktorů závisí velikost jednotlivých složek a jejich poměr z velké míry na hydraulických vlastnostech pórového prostředí tvořeného půdními a podložními formacemi. K poznání mechanismu tvorby odtoku po svahu je nezbytně nutná detailní znalost vodního režimu půdního profilu. Zatímco pohyb vody v půdní matrici je obvykle relativně pomalý, má na formování odtokového hydrogramu dominantní podíl v přírodních podmínkách obvyklé, rychlé preferenční proudění. V experimentálních povodích, kde půdy vykazují preferenční proudění (např. Tesař, 2001), byly zaznamenány velmi rychlé reakce na srážku, vyznačující se strmým nárůstem a rychlou kulminací. Zároveň jsou zde mnohem vyšší odtokové koeficienty u jednotlivých epizod. Z hydrologického pohledu je tradičně vliv nenasycené zóny přirovnáván ke vlivu retenční nádrže, zmírňující a zpomalující transformaci srážek. V důsledku preferenčního proudění se tato představa ukázala jako velmi vzdálená realitě. K zpřesnění našich znalostí je nezbytné věnovat opět pozornost nenasycenému proudění v mělkých podpovrchových půdních a zeminových vrstvách, včetně jevů souvisejících s rychlým preferenčním prouděním.

Na Fakultě stavební ČVUT v Praze probíhá komplexní výzkum hydrologie svahu v malých povodích na krystaliniku. Systematická pozornost je věnována popisu preferenčního proudění v laboratorním i v terénním měřítku a jeho podílu na tvorbě odtoku při určování jednotlivých složek hydrogramu odtoku. Souběžně jsou vyvíjeny experimentální metody na detekci a měření charakteristik preferenčního proudění v heterogenních půdách. Silným nástrojem pro parametrizaci hydraulických vlastností půdy je inverzní modelování, aplikované jednak na infiltračně výtokových experimentech na velkých neporušených vzorcích, jednak na souborech dat měřených na experimentálním povodí. Velmi detailní studium dynamiky proudění je prováděno pomocí nedestruktivní visualizace proudění ve vzorcích půdy (CT a MR snímkování). Komplexní přístup doplňuje vývoj adekvátních numerických simulačních modelů proudění a transportu látek v pórovitém prostředí. Cílem této prezentace je souhrnně představit problematiku preferenčního proudění ve vadózní zóně s hrubě písčitým půdním profilem.

## VZNIK PREFERENČNÍHO PROUDĚNÍ A MĚŘÍTKO REV

Základní hydraulickou charakteristikou půdy, jejíž hodnota může být zatížena preferenčním prouděním do té míry, že již dále nevystihuje proudění v půdním profilu je nasycená hydraulická vodivost. Je známá velká variabilita hydraulických vodivostí s koeficientem variace kolem sta procent. Často je možné setkat se s názorem, že vyhodnocení variability nasycené hydraulické vodivosti je dostačující i k popsání preferenčního proudění. Důvod, proč tomu tak není, lze nalézt při mapování skutečných cest proudění v neporušených vzorcích, určených ke stanovení nasycené hydraulické vodivosti v laboratoři. Při popisu proudění se pracuje s dvěma typy rychlosti:

(1) s Darcyovskou rychlostí, reprezentující hustotu toku v dané průřezové ploše (obvykle plocha dna vzorku, případně plochy uvnitř infiltračního válce)

(2) se střední pórovou rychlosti, která se uplatňuje v transportní advekčně disperzní rovnici. Je to rychlost proudění vztažená ke skutečné průřezové ploše, dané pórovitostí. Vzhledem k tomu, že póry vyplňují pouze část plochy vzorku, případně infiltračního válce a proteklé množství zůstává konstantní, je zřejmé, že je střední pórová rychlost větší než Darcyovská rychlost, uvažovaná v Richardsově rovnici.

Obě rychlosti jsou teoreticky odvozeny pro reprezentativní elementární plochu (REA), což je průřezová plocha, kolmá na směr proudění, odpovídající reprezentativnímu elementárnímu objemu (REV). V praxi odpovídají rozměry REA i REV pragmaticky rozměrům neporušeného vzorku použitého k měření (odběrný válec, případně infiltrační válec).

Zbarví-li se cesty proudění během experimentu vhodným barvivem, je možné po rozřezání vzorku na konci experimentu zjistit, že skutečná průtočná plocha je pouhým zlomkem průřezové plochy (ve sledovaných půdách mezi 5-20 %). Znamená to, že skutečná rychlost proudění v takovém vzorku je 3 až 20 krát vyšší. Pokud je popsaný experiment určený ke stanovení nasycené hydraulické vodivosti $K_s$ ($LT^{-1}$), což je jednotková rychlost při jednotkovém gradientu, je zřejmé, že standardně vyšetřená hodnota $K_s$ je výrazně podhodnocená. U typu proudění, zjištěného popsaným způsobem, je evidentně dominantní preferenční proudění, u kterého je převažující hnací silou gravitace. Z hlediska hydrologické bilance jsou z tohoto pohledu významné skutečnosti, že srážka zasákne v takovém prostředí mnohem hlouběji a do větší vzdálenosti, než lze standardním měřením zjistit a dále, že retenční kapacita půdy je využita pouze z malé části. V hrubě písčitých půdách na krystaliniku se preferenční proudění uplatňuje v měřítku celého povodí, srážka vertikálně infiltruje na dno propustnějších půdních vrstev a potom se preferenčně pohybuje po svahu směrem k vodoteči.

Současně s preferenčním prouděním probíhá klasické matriční proudění v půdě, způsobené dominantně kapilárními silami. Nejvýraznější rozdíl je časové měřítko obou typů proudění. Zatímco u preferenčního proudění proběhnou dominantní procesy v řádu minut, u matričního proudění jde často o dny, případně i týdny, výrazně se uplatňuje při redistribuci a při srážkách nízkých intezit. Ve snaze respektovat popsanou realitu vzešla myšlenka zavedení dvou domén proudění, s oddělenou doménou pro rychlé preferenční proudění a s doménou pro klasické matriční proudění. V půdách se širokým zrnitostním spektrem, jako je většina kambizemí, existence obou typů proudění v jednom pórovém prostoru vede obvykle k nestabilitě hydraulických charakteristik, z velké části jde o efekty způsobené vzduchem uzavřeným v pórech, značnou roli hraje také smáčivost povrchu pevné fáze, vše potom přímo závisí na počáteční nasycenosti půdního profilu a na časovém průběhu intenzity srážek. Nestabilita zejména hydraulických vodivostí a ustálených infiltračních rychlostí je nadále předmětem studia (v tomto sborníku viz Sněhota a Císlerová, 2005), ve stávajících simulačních modelech se s ní dosud nepracuje. Ke zjištění parametrů preferenčního proudění a hydraulických charakteristik obou domén proudění je třeba věnovat pozornost jak laboratorním tak terénním experimentům.

## LABORATORNÍ EXPERIMENTY URČENÉ K DETEKCI PREFERENČNÍHO PROUDĚNÍ

Výše popsané efekty byly původně zjištěny při terénních výtopových infiltracích (Císlerová et al., 1988) a později potvrzeny v laboratoři (Císlerová et al., 1990). K prokázání původních hypotéz byla provedena řada nezávislých experimentů respektujících volbou okrajových podmínek přírodní poměry. V několika odlišných prostorových měřítcích byly realizovány infiltračně výtokové experimenty ve svislých neporušených půdních vzorcích. Experimentální sestava ve všech případech umožňovala jednorozměrné vertikální proudění s uplatněním účinků gravitačního proudění. Jako horní okrajová podmínka byla volena buď konstantní výtopa (tento pokus je určen ke stanovení nasycené hydraulické vodivosti), případně konstantní sací tlaková výška s hodnotami sacích tlaků blízkých nule. Na spodním okraji vzorku byl umožněn volný výtok, v simulacích zadávaný jako výronová plocha. Vodní bilance byla kontinuálně sledována vážením vzorku, podobně bylo souběžně v čase zaznamenáváno množství infiltrující a vytékající vody ze vzorku a hodnoty sacích tlakových výšek uvnitř vzorku (Robovská, 2001). Takto zadaný experiment poskytuje datový soubor vhodný k inverznímu stanovení parametrů hydraulických charakteristik zkoumaného vzorku. Jde o makroskopické údaje, z průběhu infiltračních a výtokových rychlostí lze usoudit na přítomnost preferenčního proudění i na nestabilitu proudění, případně na nestabilitu geometrie pevné fáze (Císlerová et al., 1990). Pokud však má být uvážen vliv preferenčního proudění při řešení inverzní úlohy k vyšetření hydraulických parametrů obou domén proudění, to znamená preferenčního a matričního proudění, je třeba dále sledovat jejich podíl, který není neměnný. Jak již bylo zmíněno, preferenční proudění se projevuje již v měřítku menším než půdní vzorek, na úrovni propojených větších pórů, umožňujících gravitační proudění. K vyhodnocení podílu preferenčního proudění při infiltraci bylo použito neinvazivního snímkování. Trojrozměrné snímky struktury pevné fáze byly pro jednotlivé vzorky pořízeny pomocí počítačové tomografie (Císlerová a Votrubová, 2002). Zapojení jednotlivých preferenčních cest při výtopě se sledovalo při zakončení jednotlivých experimentů infiltrací dávky modrého barviva a následným pořízením barevných fotografií řezů vzorku ve směru

kolmém na směr proudění. Unikátní informace o charakteru proudění v hrubě písčitých půdách byly získány s využitím nukleární magnetické rezonance ke snímkování vody proudící ve vzorcích během infiltračně výtokového experimentu (Císlerová et al., 2002; Císlerová a Votrubová, 2002; Votrubová et al., 2003; Sněhota, 2003). Bylo zjištěno, že k rychlému proudění dochází pouze v malé části vzorku obsahující spojité cesty větších pórů. Toto zjištění potvrdilo oprávněnost zavedení dvou domén proudění. Potvrdila se závislost ustálené infiltrační rychlosti na počátečním nasycení, což je v rozporu s Richardsovskou teorií. Na základě dosud získaných zkušeností jsou tyto jevy způsobeny geometrií pórů zkoumané půdy, vyznačující se širokým spektrem poloměrů a vedoucí k proměnlivosti lokálních pórových rychlostí v měřítku mnoha řádů. Na MR snímcích je vidět, že při tom dochází k víceméně náhodnému uzavírání nespojité fáze půdního vzduchu ve některých pórech v závislosti na historii plnění vzorku, což je důvodem již zmíněné nestability (Sněhota a Císlerová, 2005). Při experimentech se prokázaly nedozírné možnosti využití metody MRI pro detekci a zejména kvantifikaci preferenčního proudění. Zmíněnými jevy se nadále chceme zabývat.

## TERÉNNÍ SLEDOVÁNÍ PREFERENČNÍHO PROUDĚNÍ

Preferenční proudění je relativně dobře měřitelné v laboratorním měřítku. V terénních podmínkách jsou jeho účinky vzhledem ke složitým klimatickým i morfologickým podmínkám mnohem méně průkazné a je mnohem obtížnější ho uspokojivým způsobem experimentálně sledovat. Teoreticky se nabízí možnost vyhodnocování průnikových čar tracerových experimentů s využitím konzervativních značkovačů, avšak většina výsledků takových experimentů nesplnila očekávání (např. Šanda, 1999), zejména kvůli neurčitelné hranici oblasti proudění a tokům přes hranici.

Preferenční proudění v půdním profilu písčité hlíny v terénním měřítku je již řadu let sledováno na svahovém transektu experimentální plochy Tomšovka v experimentálním povodí Uhlířská (podrobný popis viz Šanda, 1999; Tachecí, 2002; v tomto sborníku viz Šanda et al., 2005).
Během sedmi vegetačních a pěti mimovegetačních období zde bylo zaznamenáno více než 20 významných srážkoodtokových událostí. Lze je rozdělit do dvou skupin podle doby trvání a podle celkového odteklého množství: na události vyvolané letními krátkými a vydatnými srážkami z bouřkové činnosti a události způsobené podzimními delšími dešti s nižší intenzitou. (podrobnější údaje v tomto sborníku viz Šanda et al., 2005). Vzestupné větve jsou velmi strmé, což podporuje hypotézu, že rychlý podpovrchový odtok z mělkého půdního profilu na svazích povodí je přímým zdrojem soustředěného povrchového odtoku z povodí. Rychlá bývá také poklesová větev hydrogramu. Většina odtoku probíhá v krátkých a jasně oddělených časových úsecích. Odtokové jevy jsou ve vztahu půdního sacího tlaku a okamžité intenzity odtoku velmi variabilní a to jak během jedné epizody z důvodu hystereze mezi vzestupnou a sestupnou větví hydrogramu, tak i mezi jednotlivými epizodami. Půdní profil je převážně nenasycený, přesto je půdní vlhkost téměř trvale blízká nasycení, což má zásadní vliv na formování podpovrchového odtoku. Sací tlaky, kontinuálně sledované tenzometry, většinou dále setrvávají na hodnotách dosažených během předchozích srážek, které nezpůsobily odtok, i když se půdní profil během nich dosycoval. Jelikož ale nebylo dosaženo plného nasycení a cesty proudění nebyly spojitě zaplněny vodou, ke drénování půdního profilu zde nedošlo. V takové situaci může potom k počátku často velmi intenzivního odtoku přispět srážka velmi malé intenzity a úhrnu. Jakmile se půdní profil nasytí, zapojují se preferenční cesty a tak po dosažení bodu nasycení půdního profilu, bez významného poklesu sacího tlaku, dochází k okamžitému rychlému odtoku.

Přímá příčinná vazba odtoku a stavu půdní vlhkosti nalezena nebyla vzhledem k nejednoznačnosti vztahu vzestupné a poklesové větve hydrogramu odtoku a celkové vodní zásoby půdy. Přesto lze z průběhu závislosti usuzovat, že půdní prostředí je hlavním kontrolním prvkem, který významně ovlivňuje velikost a průběh odtoku v recipientu. Vztah výšky hladiny podzemní vody, půdní vlhkosti a podpovrchového odtoku s celkovým odtokem z povodí je velmi těsný. Okamžitá vlhkost půdního profilu v závislosti na historii plnění pórového prostoru do velké míry určuje průběh srážkoodtokové události (podrobný rozbor viz Šanda et al., 2005).

## SIMULACE

Popis proudění v půdním profilu obvykle vychází z obecné Richardsovy rovnice proudění vody v pórovitém prostředí, odvozené s využitím mechaniky kontinua. Bilancuje se stupeň nasycení pórového prostoru reprezentující doménu proudění. Nevýhodou tohoto přístupu je silná nelinearita Richardsovy rovnice, projevující se při numerickém řešení restrikcí, týkající se prostorové diskretizace. Nepříjemná je závislost na měřítku pozorování. Pokud hledáme realistický popis proudění vody v přírodních podmínkách v terénním měřítku, obecný předpoklad, že půda představuje jednodoménový systém se ukázal jako neadekvátní. V posledních letech byla vyvinuta řada dvou-doménových modelů proudění vody v pórovitém prostředí (např. Gerke and van Genuchten, 1993; Vogel et al., 2000), umožňujících simulovat pohyb mobilní složky vodních zásob v půdním profilu. Tento koncept uvažuje dvě domény proudění pro dva systémy pórů: doménu půdní matrice a doménu rychlého preferenčního proudění (PF-domain). V modelu se potom řeší dvě Richardsovy rovnice, pohyb v každé doméně je řešen zvlášť, vzájemná interakce obou domén je zprostředkována pomocí zvláštního členu. Použití simulačních modelů postavených na principu dvou domén umožňuje výrazně přesnější simulaci srážko odtokových epizod včetně uvážení preferenčního proudění.

Rozsáhlý soubor měřených dat a poznatky získané z infiltračně výtokových experimentů a z vizualizace neporušených vzorků (Robovská, 2001; Votrubová, 2002; Sněhota, 2003) umožňují simulaci vodního režimu vadózní zóny se zaměřením na modelování preferenčního proudění a jeho vlivu na tvorbu povrchového a podpovrchového odtoku. K tomuto účelu byla použita řada modelových přístupů (Vogel et al., 2000; Vogel, 2005). Vedle již zmíněných modelů na principu duální propustnosti byl testován model využívající k pohybu vody v preferenční doméně kinematickou vlnu. Velmi zajímavé výsledky poskytuje nový model pracující na principu difuzní vlny (HYPO model, v tomto sborníku viz Vogel, 2005). Kombinuje lokální vertikální proudění simulované jednorozměrným modelem proměnlivě nasyceného proudění v duálním pórezním prostředí s Boussinesquovou rovnicí, použitou k vyjádření hypodermického odtoku po svahu. Ve srovnání s modelem S_2D_Dual (Vogel et al., 2000), který lze k řešení stejného problému velmi dobře využít, poskytuje v některých případech méně přesné výsledky. Velkou výhodou je ale mnohem větší flexibilita vzhledem k tomu, že limitující podrobná diskretizace domény proudění, která velmi komplikuje realizaci některých velkých úloh simulovaných modelem S_2D_Dual, se u modelu HYPO týká pouze vertikálního směru. Velmi podrobná diskretizace domény proudění je hlavní překážkou také při aplikaci trojrozměrného modelu řešícího transientní proudění v půdním profilu v terénním měřítku. Přesto, že se v nové verzi tohoto programu využívají při výpočtu paralelní procesory, pro rozsáhlejší úlohy je zatím málo vhodná. Nejrozsáhlejší úlohou byla simulace trojrozměrného proudění ve vzorku s využitím popisu struktury získané z CT snímku a srovnání výsledků s výsledky modelu S_1D_Dual, standardně používaného k inverznímu vyšetření hydraulických parametrů obou domén proudění (v tomto sborníku viz Dušek et al., 2005). Simulace jsou provedeny pro soubor dat změřených při infiltračně výtokových experimentech na neporušených vzorcích v laboratoři. Důležitou roli při určování hydraulických parametrů obou domén proudění plní inverzní modelování. Jde v současnosti o jedinou metodu, pomocí které lze z měřených dat tyto údaje získat. Aplikace metody inverzního modelování ke stanovení hydraulických parametrů půd pro účely numerického modelování jsou prováděny jak v měřítku laboratorního experimentu, tak v měřítku půdního profilu (v tomto sborníku viz Dohnal et al., 2005), získané výsledky umožňují realizaci simulací terénních experimentů.

## ZÁVĚR

Ve zdrojových oblastech povodí na krystaliniku hraje půdní profil podstatnou roli při tvorbě hydrogramu odtoku. Podrobným sledováním všech složek vodní bilance na experimentální ploše Tomšovka v povodí Uhlířská, s podporou výsledků získaných na laboratorních vzorcích, byly identifikovány jednotlivé fáze vodního režimu, výrazně odlišné pro plnění a prázdnění půdního profilu. Ve zkoumaných půdách se potvrdil význam preferenčního proudění ve vztahu k velikosti a časovému průběhu rychlého odtoku v odezvě na srážku. Z výsledků laboratorních metod a

nedestruktivních vizuálních technik byl prokázán vznik preferenčního proudění již v měřítku menším, než je velikost vzorků užívaná ke stanovení nasycených hydraulických vodivostí. Toto preferenční proudění se potom výrazně propaguje do všech větších měřítek, což má významné dopady na celou vodní bilanci a zejména na řešení inženýrských úloh. K simulaci hydrogramu odtoku ve vadózní zóně je v tomto případě možné doporučit modely popisující proudění v proměnlivě nasyceném pórézním prostředí založené na koncepci duální propustnosti, které respektují odlišný charakter proudění v doméně preferenčních cest a v půdní matrici. Jsou zároveň vhodné k řešení transportu látek. Ke stanovení hydraulických parametrů půd pro účely numerického modelování lze využít výsledky aplikace inverzního modelování, a to jak v měřítku podrobného laboratorního experimentu tak v měřítku terénního sezóního měření.

**Poděkování**

Výzkum byl průběžně podporován z výzkumného projektu MŽP VaV Labe IV. V tomto příspěvku jsou shrnuty společné výsledky pracovního týmu, jehož členy, uvedenými v abecedním pořádku, jsou: Dr. Gao M.H.Amin, Prof. Milena Císlerová, Ing. Jaromír Dušek, Ing. Michal Dohnal, Prof. Laurance D. Hall (University of Cambridge, UK), Miroslav Hrnčíř, Ing. Vlaďka Jelínková, Ing. Helena Pavelková, Dr. Alice Robovská, Dr. Michal Sněhota, Martina Sobotková, Dr. Martin Šanda, Prof. Tomáš Vogel, Dr. Jana Votrubová (AVČR ÚH) a David Zumr.

## Literatura

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

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

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

Císlerová, M., a Votrubová, J. (2002): CT derived porosity distribution and flow domains, J. Hydrol., 267, 186–200.

Dušek, J., Dohnal, M., Vogel, T., Březina, J., Sněhota, M. a Císlerová, M. (2005): Porovnání dvou přístupů k modelování proudění vody v heterogenním půdním vzorku (tento sborník).

Dohnal, M., Dušek, J., Vogel, T., Sněhota, M. a Císlerová, M. (2005): Určování hydraulických parametrů modelu duální permeability inverzním modelováním (tento sborník).

Gerke, H.H., and van Genuchten, M.Th. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media, Water Resour. Res., 29, 305–319.

Robovská, A. (2000): Měření hydraulických charakteristik pomocí diskového tlakového infiltrometru na velkých laboratorních vzorcích. Doktorská disertace, ČVUT v Praze, FSv.

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

Sněhota, M. a Císlerová, M. (2005): Nestabilita proudění pozorovaná na úrovni representativního elementárního objemu půdy (tento sborník).

Šanda, M. (1999): Tvorba podpovrchového odtoku na svahu. Doktorská disertace, ČVUT FSv Praha.

Šanda M. a Císlerová, M. (2000): Observation of subsurface hillslope flow processes in the Jizera Mountains region, Czech Republic. Proc. Catchment Hydrol. and Biogeochem. Processes in Changing Environment, IHP-V Technical documents in Hydrology , UNESCO Paris, No. 37, p. 219-226.

Šanda, M., Vogel, T. Císlerová, M. (2004): Euromediterranean Conference. Hydrograph formation in the hillslope transect. ”Progress in Surface and Subsurface Water Studies at the Plot and Small Basin Scale”, Turin, Italy.

Šanda, M., Hrnčíř, M., Novák, L. a Císlerová, M. (2005): Variabilita srážkoodtokových vztahů v půdním profilu (tento sborník).

Tachecí, P. (2002): Hydrologický režim malého horského povodí a odhad účinků změny porostu. Doktorská disertace, ČVUT FSv Praha.

Tesař, M. (2001): Experimental basis and catchments in the Šumava Mts. Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins Newsletter 11, 6 - 11.

Vogel, T. (2005): Modelování hypodermického odtoku (tento sborník).

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.

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

Votrubová, J., Císlerová, M., Amin, M.H.G. a Hall, L.D. (2003): Recurrent ponded infiltration into structured soil: A magnetic resonance imaging study, Water Resour. Res., 39, 10.1029/2003 WR002222.

**Autor**

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