

HYDRAULICKÁ VODIVOSŤ POKRÝVKOVÝCH HORIZONTOV LESNEJ PÔDY

Anton Zvala, Tomáš Orfánus, Dagmar Stojkiová, Viliam Nagy

Príspevok sa zaoberá vplyvom organického materiálu na hydraulickú vodivosť (HV) povrchovej vrstvy lesných pôd. Hydraulická vodivosť je jednou z najdôležitejších fyzikálnych charakteristík pôdy používaná vo fyzikálno-matematickej deskripcii hydraulických procesov v pôde. Organická hmota v pokrývkových horizontoch pochádza z odumretého rastlinného materiálu v rôznom stupni rozkladu a agregácie a významne ovplyvňuje iniciačné procesy infiltrácie a tvorby odtoku. Pokrývkové horizonty lesných pôd majú zvyčajne extrémne vysokú pórovitosť, veľmi nízku objemovú hmotnosť, svojráznu textúru a štruktúru, ktoré sa menia podľa stupňa mechanickej a biochemickej dekompozície. Príspevok obsahuje výsledky poľných a laboratórnych meraní HV pokrývkových organických horizontov rôznymi metódami; Guelph permeameter, diskový permeameter, jednovalcová metóda a metóda premenlivého hydraulického sklonu (falling head). Výsledky poukazujú na nejednoznačnosť interpretácií bežne používaných metód stanovenia HV bez zohľadnenia kontextu lokálnych pôdno-porastových podmienok.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: hydraulická vodivosť, pokrývkové organické horizonty, lesná pôda

HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF FOREST FLOOR SOIL LAYER. The paper deals with the influence of organic litter material on hydraulic conductivity of the top surface layer of the forest soils. The hydraulic conductivity is one of the most important characteristics of the soil used in mathematical description of hydraulic processes within soil. The organic matter in forest floor horizons is formed by dead plant litter material at different stages of decomposition and aggregation and significantly influences initiation processes of infiltration and runoff generation. The forest floor horizons usually have extremely high porosity, very low bulk density, peculiar texture and structure determined by the level of mechanical and biochemical decomposition. This paper contains results of field and laboratory measurements of the hydraulic conductivity of organic horizons estimated by Guelph permeameter, tension disk permeameter, single-ring method and the method of variable hydraulic gradient (falling head). The results point to the ambiguousness of interpretations of commonly used methods of hydraulic conductivity assessment without consideration of local soil-vegetation conditions.

KEY WORDS: hydraulic conductivity, forest floor horizons, forest soil

Úvod

Na povrchu lesných pôd sa ukladajú odumreté časti rastlín a živočíchov, z ktorých vznikajú pokrývkové organické horizonty s nízkym obsahom minerálnej pôdnej zložky. Vysoký obsah organickej hmoty pokrývkových organických horizontov spôsobuje ich špecifické hydrofyzikálne vlastnosti. Hlboké pokrývkové organické horizonty s vysokým obsahom organickej hmoty majú vysokú pórovitosť, ktorá spôsobuje vyššie hodnoty hydraulického vodivosti (Kosugi, 1997). Odumretá organická hmota môže spôsobiť zvýšenie efektív-

neho uhla omáčania a tým výrazné zníženie hydraulického vodivosti pôdnej matrice organominerálneho A horizontu (Orfánus a Bedrna, 2012). Takéto pôdy nazývame vodoodpudivé vplyvom vylúhovaných voskov, prítomnosti hýf húb a pod.

Štúdium pôdnej organickej hmoty je veľmi náročné, pretože v nej prebiehajú kontinuálne a súbežne rôzne transformačné procesy, ktoré spôsobujú jej premenlivé celkové zloženie a habitus. Materiál pokrývkových horizontov, podobne ako ťažké zeminy a pôdy, menia svoj objem so zmenou obsahu vody, aj keď v pozadí týchto zmien sú iné fyzikálne a fyzikálno-chemické

procesy, než je tomu v prípade ťažkých pôd. Pri vysokom obsahu vody napučávajú, zväčšujú objem a pri nízkom obsahu vody sa zmršťujú, znižujú objem (Šútor a kol., 2003).

Význam vplyvu lesov na hydrologiu povodia je stále viac uznávaný z dôvodu zvýšenej hrozby povodní a zmeny vodného režimu v povodiach vyvolaných zmenou klímy a spôsobom využívania krajiny (Hlásny a kol., 2013). Podľa autora Konôpku (2012) vychádza sa z poznatkov, že na území Slovenska lesy zo všetkých ekosystémov najviac zachycujú dažďové vody a následne ich zadržujú. Tá časť vody, ktorú lesy neakumulujú, z nich odtieká komplikovaným systémom povrchových a podpovrchových drenážnych ciest. Jej odvedenie treba zabezpečiť tak, aby nedochádzalo k erózii lesnej pôdy či k poškodeniu lesnej infraštruktúry a k následnému ohrozeniu pod nimi ležiacich poľnohospodárskych pozemkov, vodohospodárskych stavieb, dopravnej, priemyselnej a sídelnej infraštruktúry.

Analogicky k efektom pokrývkových organických horizontov je použitie nastielania (mulčovanie) organickej hmoty (slama, tráva, lístie zo stromov, rákosie, drevené piliny) na povrchu poľnohospodárskej pôdy s cieľom zlepšenia hydrofyzikálnych, hydroizolačných a tepelnoizolačných vlastností poľnohospodárskej pôdy. Aplikáciou organickej hmoty (kompostu) počas obdobia 2 rokov na svahovitú poľnohospodársku pôdu bolo zistené zvýšenie HV pôdy a zníženie povrchového odtoku (Curtis a Claasen, 2007).

Nasytená hydraulická vodivosť K_S je kvantitatívna charakteristika pre schopnosť prenosu vody vo vodou nasýtenom pórovitom prostredí. V prípade pôdy jej veľkosť závisí hlavne od jej štruktúry a textúry. Merania HV významne ovplyvňuje heterogenita pôdneho zloženia. Priestorová variabilita HV sa prejavuje v horizontálnom aj vertikálnom smere. Vyššia vodivosť vo vertikálnom smere ako v horizontálnom smere sa prejavuje u štruktúrnych pôd. Naopak prevažujúcu horizontálnu vodivosť pozorujeme vo zvrstvených a utlačených pôdach (napr. lesné cesty) (Šurda a kol., 2013). Okrem spomínanej priestorovej a časovej variability, existuje v prípade hydraulickej vodivosti veľmi vysoká variabilita hodnôt spôsobená použitými metódami jej merania a výpočtu, ako uvádzajú Fodor a kol. (2011), ktorí zistili v mierke výskumných plôch (10 m²) metodologickú variabilitu HV rovnú ba aj prevyšujúcu variabilitu priestorovú. Z toho vyplýva náročná interpretovateľnosť a porovnateľnosť stanovených hydraulických vodivostí medzi rôznymi štúdiami ako aj vo vzťahu k prebiehajúcemu procesu infiltrácie a redistribúcie zrážkovej vody v pôdnom profile.

Cieľom príspevku je prezentovať výsledky meraní HV rôznymi poľnými a laboratórnymi metódami v pokrývkových organických horizontoch lesnej pôdy. Interpretácia týchto výsledkov má prispieť k objasneniu vplyvu uvedených horizontov na čiastkové hydrologické procesy v zalesnených povodiach nakoľko napriek ich častému výskytu existuje len veľmi málo hydrologických štúdií uvažujúcich s hydrofyzikálnymi vlast-

nosťami pokrývkových horizontov tvorených prevažne rastlinným opadom prirodzene zvrstveným podľa rôzneho stupňa mechanického a biochemického rozkladu.

Materiál a metódy

Lokalita, na ktorej boli merané hydraulické vodivosti pokrývkových horizontov lesnej pôdy bola v oblasti Kokavských lúk v Západných Tatrách, na svahu s dobre vyvinutým hlbokým pokrývkovým organickým horizontom pod smrekovým porastom (Orfánus et al., 2011). Merania boli realizované nepravidelne na ploche 15 x 45 metrov využívajúc prirodzené horizontálne (nenaklonené) úseky reliéfu. Jednotlivé merania v rôznych metód boli realizované s približne rovnakým plošným rozložením po výskumnej ploche, pričom sa konkrétne miesta merania rôznymi metódami navzájom neprekrývali.

Nasytená hydraulická vodivosť pôdy bola meraná terénne a laboratórne. V teréne bola meraná:

1. Guelphským permeametrov integrálna hydraulická vodivosť vrchnej 10 cm hrubej vrstvy pôdy v horizontálnom aj vertikálnom smere, ktorá pozostávala prevažne zo zvrstveného pokrývkového organického horizontu a čiastočne zasahovala aj do organominerálneho A-horizontu.
2. Diskovým permeametrov hydraulická vodivosť samotného povrchu pôdy blízka nasýtenému stavu, keďže infiltrácia prebiehala pri nastavení podtlaku na rozhraní disk-pôda.
3. Jednovalcovou metódou hydraulická vodivosť zvrstveného pokrývkového horizontu vo vertikálnom smere pri okrajovej podmienke plytkej výtopy.

Laboratórne sme merali hydraulickú vodivosť na zariadení s premenlivým hydraulickým sklonom (falling head metóda). Táto metóda na rozdiel od predchádzajúcich (prevažne integrálnych) umožnila stanovovať K_S pre rôzne vrstvy rastlinného opadu charakteristické stupňom mechanického a biochemického rozkladu jednotlivu. Rastlinný opad je v miestnych klimatických a porastových podmienkach (bez vplyvu degradčných procesov) typicky členený na tzv. opadanku, drvinu a melinu (Bútorová, 2013), pričom v smere od opadanky ku meline rastie stupeň dekompozície a agregácie organickej hmoty ako aj obsah minoritnej minerálnej zložky.

Metódy merania hydraulickej vodivosti

Guelphský permeameter je experimentálna terénna metóda, ktorej princípom je upravená Mariottova nádobka pre meranie vo vítanvej sonde pri nastaviteľnej výške výtopy. Namerané hodnoty K_S vyjadrujú integrálne vertikálnu aj horizontálnu vodivosť nasýtenej pôdy a vplyvom výtopy zahŕňa aj preferované cesty (Štekauerová et al., 2010). Merania prebiehali v sondách hlbokých 6 cm a 11 cm pre každé zo šiestich miest merania. Výška výtopy sa nastavila vytiahnutím zavzdušňovacej trubičky na 5 cm a 10 cm. Vypočítali sme

ustálený výtok vody (Q) a následne K_S pomocou rovníc odporúčaných napr. v práci (Matula et al., 1989) alebo v užívateľskej príručke guelphského permeametra. Najskôr treba určiť hodnotu α podľa štruktúry pôdy a následne dosadiť do rovníc spolu s hodnotami tlakovej výšky $H_1 = 5$ cm a $H_2 = 10$ cm a vypočítať tvarový faktor C_1 a C_2 . V našom prípade podľa rovníc (1) a (2):

$$C_1 = \left(\frac{\frac{H_1}{\alpha}}{2.074 + 0.093 \left(\frac{H_1}{\alpha} \right)} \right)^{0.754} \quad (1)$$

$$C_2 = \left(\frac{\frac{H_2}{\alpha}}{2.074 + 0.093 \left(\frac{H_2}{\alpha} \right)} \right)^{0.754} \quad (2)$$

C_1 a C_2 dosadíme do rovníc (3) a (4) a vypočítame:

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + \alpha^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + \alpha^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (4)$$

Z nameraných hodnôt vypočítame R_1 a R_2 ustálenú rýchlosť výtoku z rezervoáru Guelphského permeametra a dosadíme ich do rovníc (5) a (6) pre výpočet prietokov Q_1 a Q_2 :

$$Q_1 = R_1 35.22 \quad (5)$$

$$Q_2 = R_2 35.22 \quad (6)$$

Vypočítame hydraulickú vodivosť dosadením hodnôt Q_1 , Q_2 a G_1 , G_2 do rovnice (7):

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (7)$$

Diskový permeameter je experimentálna terénna metóda, ktorá je skonštruovaná na meranie hydraulických vodivostí v oblasti pôdy obsahujúcej makropóry a preferované cesty (Štekauerová et al., 2010). Metóda je vhodná na elimináciu prúdenia makropórmi. Infiltráciou vody do pôdy pri vlhkosťnom potenciáli h_{w0} menšom ako nula alebo veľmi blízkom nule, získavame hydraulickú vodivosť len pôdnej matrice t.j. časti pôdy obsahujúcej len póry lokalizované medzi časticami pevnej fázy pôdy a ich agregátmi, bez makropórov (napr. po odhnutých koreňoch, chodby pôdneho edafónu). Pri výpočte hydraulickej vodivosti z nameraných údajov diskovým infiltrimetrom sa postupovalo podľa príručky k diskovému infiltrimetru a rovníc Woodingovej metódy (Fodor et al., 2011). Najskôr si vypočítame z nameraných hodnôt v_1 a v_2 (pri aplikovaní podtlakov $h_1 = -4$ cm a $h_2 = -6$ cm) ustálené rýchlosti výtoku z rezervoára diskového infiltrimetra a spolu s r vnútorným polomerom rezervoára dosadíme do rovníc (8) a (9) a vypočítame prietoky Q_1 a Q_2 :

$$Q_1 = \pi r^2 v_1 \quad (8)$$

$$Q_2 = \pi r^2 v_2 \quad (9)$$

Vypočítame parameter α zo vzorca (10) dosadením tlakových výšok h_1 a h_2 :

$$\alpha = \frac{\ln(Q_2 - Q_1)}{h_2 - h_1} \quad (10)$$

Hydraulickú vodivosť K_S vypočítame podľa nasledujúcej rovnice. kde r je polomer disku infiltrimetra (11):

$$K_S = \frac{Q_1}{\pi r^2 \exp[\alpha h_1] \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right]} \quad (11)$$

Terénne sme tiež merali infiltráciu vsakovacím pokusom pomocou jedného kovového valca osadeného do pôdy (jednovalcová metóda). Vo valci je umiestnená dierovaná kruhová doska. Doska tiež zabraňuje rozplaveniu zeminy pri dopĺňovaní vody pre infiltráciu. Valec sa zarazi do hĺbky cca 10 – 20 cm pod terén (je vhodné najskôr po obvode valca rozrezať povrch pôdy nožom, pôda sa menej rozruší), umiestni sa kruhová doska a do valca sa naleje voda tak aby bola na úrovni prvej značky na plaváku so stupnicou namontovaného na vrchu valca. V tej chvíli sa začne merať stopkami čas, za ktorý poklesne plavák a hladina z úrovne prvej značky na úroveň druhej značky nižšej o 2 cm. Za nameraný čas infiltruje 1,4 l vody. Keď hladina vody dosiahne úroveň druhej značky odčítame čas a dolejeme z odmernej nádoby 1,4 l vody. Namerané a zapísané hodnoty sa vyhodnotia za použitia rovníc (Bát'ková et al., 2013).

Vyhodnotenie merania jednovalcovou metódou

Vtok vody do pôdy za podmienok ustáleného prúdenia, ktoré nastáva po dlhšom časovom období trvania infiltrácie popisuje rovnica (Reynolds a Elrick, 1991, Reynolds et al., 1985), ktorá má tvar:

$$Q = \pi a^2 K(\Psi\Psi) + G\phi(\Psi\Psi) \quad (12)$$

Q – vtok vody do pôdy (L^3/T),

a – polomer infiltračného valca (L),

G – funkcia geometrie infiltračného povrchu (L),

Φ – tokový potenciál (L^2/T),

Ψ – vlhkosťný potenciál, vyjadrený ako tlaková výška h v dĺžkových jednotkách (L).

Rovnica (1) pre tlakový infiltrimeter je ďalej upravená na tvar (Elrick and Reynolds, 1992):

$$Q_{ti} = \left(\pi a^2 + \left(\frac{a}{G_{ti}} \right) \left(H + \frac{1}{\alpha} \right) \right) K \quad (13)$$

Q_{ti} – stacionárny vtok vody do pôdy pre tlakový infiltrimeter ($L^3 T^{-1}$),

a – polomer infiltračného valca (L),

G_{ti} – tvarový koeficient ($L^3 T^{-1}$),
 H – hydraulická výška vody v infiltračnom ocelovom valci (L),
 α – alfa parameter (L^{-1}) (Philip, 1985 and 1987; pre tlakovú infiltráciu Elrick and Reynolds, 1989),
 K – nasýtená hydraulická vodivosť v poľných podmienkach ($L T^{-1}$).

Tvarový koeficient G_{ti} je Reynoldsom a Elrickom (1990) definovaný:

$$G_{ti} = 0,316 \frac{d}{a} + 0,184 \quad (14)$$

d – hĺbka zaradenia infiltračného valca do pôdy (L),
 a – polomer infiltračného valca (L).

Na základe rovnice (13) a ďalších rovníc (Elrick a Reynolds, 1989), je odvodená rovnica pre výpočet nasýtenej hydraulickej vodivosti K z infiltračného experimentu tlakovým infiltrometrom v tvare:

$$K = \frac{(Q_{ti} G_{ti})}{(aH + \alpha^2 G_{ti} \pi + \frac{d}{a})} \quad (15)$$

Rovnica (15) sa použije pre vyhodnotenie infiltračných testov, kde je α (m^{-1}) a Q_{ti} ($cm^3 min^{-1}$) sa spočíta ako:

$$Q_{ti} = \frac{V_{cal} \backslash cm \ h}{\Delta t} \quad (16)$$

h – pokles hladiny v infiltrometre za Δt .

Meranie hydraulickej vodivosti na zariadení s premenlivým hydraulickým sklonom – falling head metóda. Meranie prebieha na neporušených vzorkách, odobratých z pôdy do odberných Kopeckého valčekov. Vzorky pôdy odoberáme do nehrdzavejúcich valčekov alebo valčekov z umelej hmoty veľkosti 100 cm^3 . Valček zatlačíme do pôdy ručne, pomocou pákového zdviháka alebo hydraulickeho mechanizmu miernym tlakom (Šurda et al., 2013). Pri prevoze do laboratória treba zabrániť mechanickému porušeniu vzorky. Pred samotným meraním musíme pôdne vzorky nasýtiť vodou. Odberné valčeky položené na filtračnom papieri a drôtenom site vkladáme do vodného kúpeľa. Hladina vody vo vodnom kúpeli má siahať 5 mm pod horný okraj valčeka. Nasycovanie podľa druhu pôdy a výšky valčeka má trvať 6-24 h. Odobraté vzorky pokrývkových horizontov sa nasycovali podstatne dlhsie (1-9 týždňov) kvôli prítomnej vodoodpudivosti. Meranie s premenlivým hydraulickým sklonom (nad meranou pôdnou vzorkou sa hladina vody v čase mení – klesá). Metóda falling head na meranie nasýtenej hydraulickej vodivosti je zložená z pôdnej vzorky v Kopeckom valčeku, ktorá je ponorená 1cm v nádobe s vodou a na ktorý sa zhora pripojí prázdny Kopeckého valček. Do prázdneho valčeka sa naleje voda ktorá infiltruje do pôdy. Meria sa čas infiltrácie a výšky h_2 horná hladina vody začiatok infil-

trácie a h_1 dolná hladina po infiltrácii za určitý čas. Na výpočet nasýtenej hydraulickej vodivosti použijeme rovnicu (17):

$$K = \frac{l}{t} \cdot \ln \frac{h_2}{h_1} \quad (17)$$

K – nasýtená hydraulická vodivosť,
 l – výška Kopeckého valčeka,
 t – čas, za ktorý klesne hladina z výšky h_2 na h_1 ,
 h_2 – výška hladiny na začiatku merania,
 h_1 – výška hladiny na konci merania.

Výsledky a diskusia

Zhodnotenie výsledkov meraní rôznymi metódami

Výsledky meraní nasýtenej hydraulickej vodivosti pokrývkových organických horizontov lesnej pôdy rôznymi metódami možno zhodnotiť nasledovne.

Variabilita medzi jednotlivými použitými metódami prevyšuje vnútornú variabilitu v rámci jednej použitej metódy (tab. 1, obr. 1). Táto metodologická variabilita v rozsahu dvoch rádov má dôležité konsekvencie z hľadiska interpretácie nameraných dát vo vzťahu k čiastkovým hydrologickým procesom.

Metóda premenlivého sklonu (falling head) produkuje málo realistické hodnoty K_S , pohybujúce sa v rozsahu niekoľkých desiatok metrov za hodinu. Toto zjavné nadhodnotenie K_S oproti iným metódam je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené hranovým efektom, ktorý môže reprezentovať 50 až 70 % nameranej hodnoty K_S (Fodor a kol., 2011).

Uvážením lokálnych vlastností systému pôda-porast dáva metóda diskového permeametra podľa nás najrealistickejšie hodnoty (tab. 1). Metóda totiž nie je ovplyvnená vlastnosťami nižšie ležiaceho organominerálneho A horizontu, ktorý permanentne vykazuje vysoký stupeň vodoodpudivosti a aplikovaný podtlak zabráňuje nadmernému horizontálnemu roztekaniu vody makropórmí do všetkých strán mimo plochu, na ktorej je permeameter inštalovaný. Namerané výsledky diskového permeametrom sú porovnateľné aj s výsledkami hydraulickej vodivosti (285 a 447 $cm \cdot hod^{-1}$) pokrývkového organického horizontu, ktoré uvádza z podobnej lokality vo svojom článku Hlaváčiková a kol. (2014).

Naopak merania jednovalcovou metódou, pri ktorej bol infiltračný valec osadený 10 cm hlboko, sú už ovplyvnené vlastnosťami organominerálneho A horizontu, vyskytujúceho sa cca 12–15 cm pod povrchom, ktorého priemerná nasýtená hydraulická vodivosť je 84,3 $cm \cdot hod^{-1}$ (tab. 2) a miera stálosti vodoodpudivosti (WDPT – water drop penetration time) v priemere 100 sekúnd (Orfánus a Fodor, 2011).

Nasycovanie neporušených vzoriek meliny a A-horizontu pre metódu premenlivého sklonu trvalo až 9 týždňov, čiže za sucha možno tento horizont považovať takmer za nevodivý.

V súlade s očakávaním sa preukázalo, že s rastúcim

stupňom rozkladu a agregácie organickej hmoty pokrývkových horizontov, klesá jej hydraulická vodivosť v smere od opadanky ku meline. Metódou premenlivého hydraulického sklonu boli stanovené K_S 3265 cm.hod⁻¹ pre opadanku, 1836 cm.hod⁻¹ pre drvinu a 1320 cm.hod⁻¹ pre melinu.

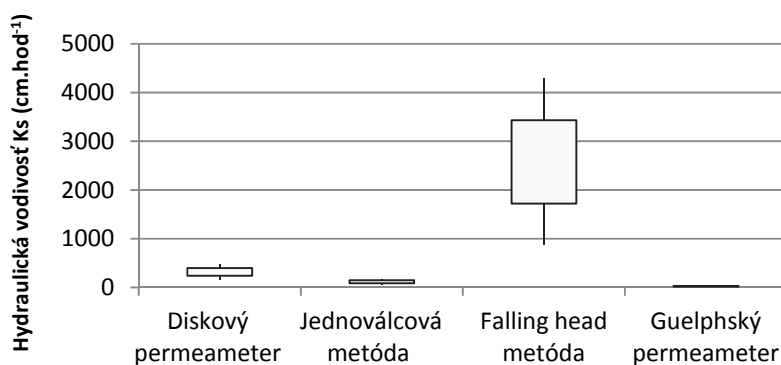
Merania guelfským permeametrom produkovali najnižšie hodnoty K_S . Meranie Guelphským permeametrom bolo realizované vo vŕtanej sonde vyhlbenej do úrovne rozhrania pokrývkového a organominerálneho A-hori-

zontu, cca 12 – 15 centimetrov pod povrchom pôdy. Vplyvom rozhrania medzi pokrývkovým horizontom a organominerálnym A-horizontom dochádza k výraznému spomaleniu vertikálnej zložky hydraulickéj vodivosti (tabuľka 2) vplyvom prítomnej extrémnej vodoodpudivosti A-horizontu a preto namerané hodnoty K_S guelfským permeametrom môžeme považovať za virohodné odhady (iba) horizontálnej zložky K_S pokrývkového horizontu. Priemerne sa teda horizontálna hydraulická vodivosť rovná 20 cm.h⁻¹.

Tabuľka 1. Výsledky merania hydraulickej vodivosti K_S rôznymi metódami. Číslo meraní pre jednotlivé metódy nezodpovedajú tomu istému miestu merania na lokalite

Table 1. Results of measurements of hydraulic conductivity K_S various methods. Number of measurements for each method do not correspond to the same measurement to location

Miesto merania	Diskový permeameter K_S (cm.hod ⁻¹)	Jednoválcová metóda K_S (cm.hod ⁻¹)	Falling head metóda K_S (cm.hod ⁻¹)	Guelphský permeameter K_S (cm.hod ⁻¹)
1.	283,29	102,71	Opadanka 2920,35 Drvina 1272,77 Melina 1332,09	27,06
2.	414,07	165,54	Opadanka 3201,22 Drvina 2578,33 Melina 866,52	6,04
3.	478,80	58,45	Opadanka 2565,71 Drvina 1504,01 Melina 1588,58	5,71
4.	220,87	113,11	Opadanka 4289,02 Drvina 2036,65 Melina 1778,72	30,72
5.	290,42	78,26	Opadanka 3417,34 Drvina 1820,02 Melina 1060,09	42,48
6.	161,13	176,75		9,01
PRIEMER	308,1	115,8	2148,8	20,2



Obr. 1. Výsledky merania hydraulickej vodivosti lesnej pôdy rôznymi metódami.

Fig. 1. Measurement results of hydraulic conductivity of forest-floor soil horizons by different methods.

Tabuľka 2. Výsledky merania hydraulickej vodivosti K_S A-horizontu pod pokrývkovým organickým horizontom metódou Falling head

Table 2. Results of measurements of hydraulic conductivity K_S A-horizont under superimposed organic horizon Falling head method

Miesto merania	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	ø
K_S (cm.hod ⁻¹)	60,6	15,75	35,36	59,8	79,4	43,3	20,7	88,8	56,5	197,9	134,5	218,8	84,28

Interpretácia meraných výsledkov hydraulickej vodivosti vo vzťahu k hydrologickým procesom

Priemerná hodnota K_S nameraná metódou diskového permeametra je $308 \text{ cm}\cdot\text{hod}^{-1}$. Odhad K_S touto metódou je vhodný pre napodobenie prirodzených meteorologických podmienok za dažďa, s pomerne nasýteným pôdnym profilom v povodí a bez tvorby výtopy na povrchu pôdy. Keďže hodnoty K_S sú oveľa vyššie ako akékoľvek reálne známe zrážkové úhrny v našich klimatických podmienkach je možno konštatovať, že na danom študovanom území prakticky nedochádza k plošnému povrchového odtoku (overland flow), aj keď dočasne sa môže objaviť efemérny stružkový povrchový odtok na miestach s výraznou vodoodpudivosťou, ktorý však cez makropóry rýchlo vsakuje do opadu. Naopak, výrazné spomalenie infiltrácie na rozhraní pokrývkového a organominerálneho A-horizontu, môže pri výdatnejších zrážkových úhrnoch spôsobovať vznik plytkého podpovrchového odtoku, ktorý akceleruje odtokový proces počas povodní a spôsobuje výrazný transport (zmyv) organickej pokrývkovej vrstvy, ktorý je možné v lese opticky pozorovať po extrémnych zrážkových udalostiach. Možno konštatovať, že podstatne väčšia časť vody prúdi makropórami a preferovanými cestami ako pôdnou maticou.

Záver

Z nameraných a vypočítaných výsledkov hydraulickej vodivosti pokrývkových organických horizontov vyplývajú dôležité skutočnosti z hľadiska štúdia hydrologických procesov v zalesnených povodiach.

Vysoké rozdiely v nasýtenej hydraulickej vodivosti pri meraní diskovým permeametrom a metódou falling head determinuje vysoký obsah makropórov a preferovaných ciest v pokrývkovom organickom horizonte.

Meranie metódou falling head je ovplyvňované stenovým efektom a čistočným porušením pôdných vzoriek pri ich odbere čo zapríčiňuje výrazne nadhodnotenie hydraulickej vodivosti. Tiež reprezentatívnosť hydraulickej vodivosti 100 cm^3 pôdnej vzorky v Kopeckom valčeku a zovšeobecnenie na celý pokrývkový organický horizont je otáznou. Doporučujeme preto použiť pre pokrývkové organické horizonty radšej metódu, ktorá používa neporušené vzorky s väčším objemom a s elimináciou hranového efektu tesniacou hmotou.

Z rozdielných nameraných hodnôt hydraulickej vodivosti metódou falling head pre rôzne vrstvy pokrývkového horizontu možno konštatovať, že hydraulická vodivosť nie je rovnaká v celom pokrývkovom horizonte ale klesá smerom zhora nadol, tak ako sa zvyšuje stupeň dekompozície a agregácie organického materiálu (opadanka, drvina, melina).

Kombinácia stanovení K_S viacerými poľnými aj laboratórnymi metódami umožňuje identifikovať spôsob realizácie iniciačných procesov na povrchu lesnej pôdy pri transformácii zrážok na infiltráciu a odtok.

Podakovanie

Príspevok bol podporený grantovou agentúrou VEGA grantom č. 2/0152/15, MAD, GWP grantom č. 35-IDMP-2014. Táto publikácia vznikla aj použitím prístrojov zakúpených v rámci projektu ITMS 26240120004 Centrum excelentnosti integrovanej protipovodňovej ochrany územia, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- Bátková, K., Matula, S., Miháliková, M. (2013): Multi-mediální učebnice hydropedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká zemědělská univerzita. Praha. Dostupné na internete: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz>.
- Bútorová, J. (2013): Contribution to particle density determination issues of forest soils litter subhorizons. Lesnícky časopis - Forestry Journal. 59(1): 2013. tab. 3. ref. 16. ISSN 0323 – 1046. Original paper. 38 – 43.
- Curtis, M. J., Claasen (2007): V. P. Using Compost to Increase Infiltration and Improve the Revegetation of a Decomposed Granite Roadcut. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 133. No. 2. ISSN 1090-0241. 215 – 218.
- Elrick, D. E., and Reynolds, W.D. (1989) Water Flux Components and their measurements. Proc. App. Soil Physics in Stress Enviroments. Jan 22-26 NARC. Islamabad, Pakistan
- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. (1992) Methods for analysing constant head well permeameter data. Soil Science Society of America Journal, 56, 309 – 312.
- Fodor, N., Sándor, R., Orfánus, T., Lichner, L., Rajkai, K. (2011): Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. Geoderma. Vol. 165. No. 1. ISSN-00167061. 60 – 68.
- Hlaváčiková, H., Novák, V., Orfánus, T., Danko, M., Hlavčo, J. (2014): Hydrofyzikálne charakteristiky skeletnatých pôd. I. Hydraulické vodivosti. Acta Hydrologica Slovaca. roč. 15. č. 1. ISSN 1335-6291. 24 – 34.
- Hlásny, T., Sitková, Z., Barka, I. (2013): Regional assessment of forest effects on watershed hydrology: Slovakia as a case study. Journal of forest science. 59. 2013 (10): 405 – 415
- Konôpka, J. (2012): Forest hydric-water management. Lesn. Čas. – Forestry Journal. 58(2): 2012. ref. 26. ISSN 0323 – 1046. Discussion paper. 129 – 135.
- Kosugi, K. (1997): New Diagrams to Evaluate Soil Pore Radius Distribution and Saturated Hydraulic Conductivity of Forest Soil. Journal of Forest Research. . roč. 2. ISSN 1610-7403. 95 – 101.
- Matula, S., Semotán, J., Veselá, J. (1989): Hydropedologie – praktikum. Praha: Edičné stredisko ČVUT. 144 s. ISBN 80-01 – 00031-1.
- Orfánus, T., Fodor, N. (2011): K problematike protipovodňovej funkcie lesa v Tatrách. In Štúdie o Tatranskom národnom parku : monografická štúdia o dôsledkoch vetrovej kalamity z roku 2004 na prírodné prostredie Vysokých Tatier. - Tatranská Lomnica: Štátne lesy TANAP-u. ISBN 978-80-89309-09-2. 99 – 108.

- Orfánus, T., Bedrna, Z. (2012): Nová klasifikácia pôdnej textúry a jej význam pre hydropedológiu. Časť II. Hydropedologické aplikácie. Acta Hydrologica Slovaca. roč. 13. č. 1. ISSN 1335-6291. 9 – 18.
- Orfánus, T., Dlapa, P., Fodor, N., Rajkai, K., Sandor, A., Nováková, K. (2014): How severe and subcritical water repellency determines the seasonal infiltration in natural and cultivated sandy soils. In Soil & Tillage Research. vol. 135. no. 1. (2.575 - IF2013). (2014 - Current Contents). ISSN 0167-1987. 49 – 59.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Clothier, B.E. (1985) The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. Soil Science, 139, 172 – 180.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. (1991): Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. Soil Science Society of America Journal, 55, 633 – 639.
- Štekauerová, V., Šútor, J., Nagy, V., Breziarska, K. (2010): Meranie nasýtenej hydraulickej vodivosti Guelphským permeametro. Acta Hydrologica Slovaca. roč. 11. č. 2. ISSN 1335-6291. 349 – 352.
- Štekauerová, V., Šútor, J., Nagy, V., Breziarska, K. (2010): Meranie nasýtenej hydraulickej vodivosti Diskovým permeametro. Acta Hydrologica Slovaca. roč. 11. č. 2. ISSN 1335-6291. 345 – 348.
- Šurda, P., Štekauerová, V., Nagy, V. (2013): Štatistická analýza hydraulickej vodivosti pôdy v povodí rieky Hron. In: Rožnovský, J., Litschmann, T., Sťahová, H., Sťahoda, T. (eds): Voda. pôda a rastliny Křtiny. 29. – 30.5. 2013. ISBN 978-80-87577-17-2.
- Šútor, J., Gomboš, M., Tall, A. (2003): Assessment of the water content of heavy soil by means of soil surface fluctuation in the East Slovakia Lowland. Journal of Hydrology and Hydromechanics, roč. 51. č.1. ISSN 0042-790X. 7 – 15.

HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF FOREST FLOOR SOIL LAYER

Dead parts of plant and animal bodies are deposited on the forest soil surfaces forming the so called forest-floor organic horizons with very low mineral soil component. The high content of organic matter of these horizons is responsible for their specific hydro-physical properties. Deep forest-floor organic horizons have very high porosity, which determines their typically higher values of hydraulic conductivity (Kosugi, 1997). On the other hand, the dead organic matter is a source of leached waxes and other hydrophobic compounds which may cause an increase of wetting contact angle and consequently decrease in hydraulic conductivity of organo-mineral A-horizon (Orfánus and Bedrna, 2012). Such soils are then called water repellent soils or hydrophobic soils.

Saturated hydraulic conductivity is a quantitative characteristic for the ability of porous system to transfer water in a saturated state. In case of soil, this characteristic depends mainly on its structure and texture. The heterogeneity of soil significantly influences the spatial manifestation of hydraulic conductivity in both vertical and horizontal directions. On the other hand, the transformation of organic matter causes the changes of hydraulic conductivity in time. Besides the mentioned spatial and temporal variability there is also one more type of variability induced by using of different measurement methods and calculation formulas as was for instance reported by Fodor et al. (2011).

The aim of this paper is to present results of hydraulic conductivity measurements performed on forest floor organic soil horizon by different field and laboratory methods and to try to interpret the differences in values gained by using of these various methods in context of hydrological processes in forested catchments. There is a real knowledge gap within literature when hydro-physical properties of organic soil horizons are concerned. The study research area is located in Kokavské

lúky (Western Tatra Mts.) on the hillslope with well-developed deep forest-floor organic horizon under the spruce canopy cover (Orfánus et al., 2011). The field measurements of hydraulic conductivity were realized in uneven spatial pattern on the slope area of 15m x 45m following naturally horizontal (not inclined) segments of relief. Particular field measurements with different methods had roughly the same areal extent and similar spacing but not overlapping each other.

The methods used in the field were: 1. Guelph permeameter for the integral (horizontal + vertical) hydraulic conductivity of upper 10 cm organic horizon layered according to the degree of decomposition and under fully saturated conditions, 2. The Tension disk permeameter for the measurement of close-to-saturation hydraulic conductivity, since the infiltration ran under negative tension applied on the disk-soil interface, thus excluding the largest macropores from the process. 3. Single-ring method was used to measure the vertical component of the integral hydraulic conductivity under shallow-pond conditions. The laboratory methods used here was the falling head method. Unlike the other methods this one enabled to measure the hydraulic conductivity for different layers of the forest-floor horizon characterized by different degree of mechanical and biochemical decomposition and physical aggregation.

The methodological variability of saturated hydraulic conductivity exceeds the spatial variability of a single method (tab. 1, fig. 1). This methodological variability moves in a range of two orders and has impact on the interpretation of measured values in context of particular hydrological processes.

The falling head method provides little realistic values of K_S moving in a range of several tens of meters per hour. These values differ by more than order from all the other methods what is caused by the “wall effect”, i.e. the preferential and rapid flow of water along the

inner walls of the sample cylinder. Such wall effect may represent up to 50 or even 70 % of the measured K_S value (Fodor et al., 2011).

Considering the local character of the soil-plant system we consider the most realistic results to be those of tension disk permeameter (tab. 1) as the method avoids influence of underlying organomineral A-horizon (in depth of 12 cm), which is most of the year strongly water repellent. Moreover, the applied tension prevents rapid runoff of water horizontally around the installed infiltrometer.

The values gained from the tension disk permeameter method (average value equals 308 cm.hod^{-1}) are also comparable to those measured with minidisk infiltrometer on the similar location by Hlaváčiková et al. (2014), who state the values 285 and 447 cm.hod^{-1} .

On the other hand the measurements by single-ring method (infiltration cylinder mounted in depth of 10 cm) are already influenced by the properties of organomineral A-horizon with its average saturated hydraulic conductivity of 84 cm.hod^{-1} (tab. 2) and mean WDPT equal to 100 seconds (Orfánus and Fodor, 2011). The saturation of the A-horizon samples took even 9 weeks, and therefore we can consider this horizon under the unsaturated conditions hydraulically almost non-conductive.

The level of biochemical and mechanical decomposition and physical aggregation increased with depth within the forest floor organic horizon. As was expected the saturated hydraulic conductivity determined by the falling head method was decreasing with depth within the organic horizon. Average values of K_S were 3265 cm.hod^{-1} for the very top litter layer, 1836 cm.hod^{-1} for the moderately decomposed material layer and 1320 cm.hod^{-1} for the intensively decomposed and aggregated organic layer.

The Guelf permeameter measurements provided the lowest values of K_S . Actually, the measurements were done within the hole drilled down to the interface between the organic forest-floor horizon and the organomineral A-horizon of the soil profile. This strongly water repellent interface makes the vertical component of the hydraulic conductivity substantially retarded and therefore in studied location we can consider the determined values of K_S by Guelf permeameter as good estimates of the K_S horizontal component. The average value was 20 cm.h^{-1} .

The average K_S value determined by tension disk

permeameter was 308 cm.hod^{-1} . This measurement method can be likened to natural conditions during the intensive rainfall situations but without ponding. Since these values are much higher than any realistic rainfall intensity in this climatic conditions we can state that in the studied area there is almost no chance for the overland runoff generation although temporarily the local ephemeral rivulet runoff could be formed on areas with strong water repellency. Such rivulet runoff however quickly infiltrates via macropores into the forest-floor horizon. On the other hand the substantial retardation of infiltration on the interface between A-horizon and the organic forest-floor horizon may trigger the shallow subsurface runoff, which during the extreme storm events may accelerate the runoff process and wash-down of the forest-floor material.

The results of various measurement/calculation methods used to determine the hydraulic conductivity of forest-floor organic soil horizon point to certain important facts relevant for the hydrological processes in forested catchments:

1. The high differences in hydraulic conductivity determined with disk permeameter and the falling head method points to the high volume of macropores and preferential flow paths within the organic litter horizon.
2. The falling head method is substantially influenced by the "wall-effect" (the water flows preferentially along the walls of the sample cylinder when not sealed. The representativeness of the 100 cm^3 soil sample in Kopecky cylinder for characterizing the whole horizon is questionable. We therefore recommend to use method described in Fodor et al. (2011), which uses much larger samples and eliminates the wall-effect by sealing matter.
3. From clear differences in hydraulic conductivity (measured by falling head method) in different depths of the forest floor horizon it can be stated that the hydraulic conductivity decreases with depth as the degree of mechanical and biochemical decomposition and physical aggregation of organic matter increases.
4. The combination of different field and laboratory methods to determine K_S enables to identify the way of realization of initiation processes on soil surface when transforming precipitation into evaporation, infiltration and runoff.

Mgr. Anton Zvala
RNDr. Tomáš Orfánus PhD.
RNDr. Dagmar Stojkovicová PhD.
Ing. Viliam Nagy PhD.
Ústav hydrologie SAV
Dúbravská cesta 9,
84104 Bratislava 4
E-mail: zvala@uh.savba.sk