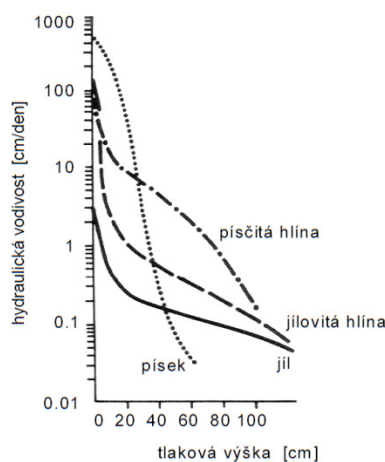


Stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti pomocí mini-diskových podtlakových infiltrometrů

Teoretický úvod – nenasyčená hydraulická vodivost

Pro řešení mnoha úloh v oblastech vodního hospodářství, ochrany životního prostředí nebo zemědělství je nezbytná znalost infiltrační schopnosti půdy. Infiltrační schopnost půdy je předurčena geometrií půdních pórů a dalšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi půdního prostředí. Pro potřeby detailního numerického modelování infiltrace do půdy modely založenými na řešení Richardsovy rovnice (Warrick, 2000) je nutná znalost hydraulických charakteristik půdy: retenční čáry $\theta(h)$ a funkce nenasyčené hydraulické vodivosti - $K(h)$. Průběh funkce nenasyčené hydraulické vodivosti vztahuje rychlost proudění vody půdou při jednotkovém gradientu celkového potenciál k aktuální vlhkosti (θ), a zároveň (přes retenční křivku konkrétní půdy) k tlakové výšce (h), která této vlhkosti odpovídá (Císlerová, 1989). Typické průběhy funkce nenasyčené hydraulické vodivosti jsou zobrazeny na obr. 1.



Obr. 1 – Funkce nenasyčené hydraulické vodivosti pro různé materiály

Alternativou ke standardním laboratorním metodám, které bývají časově velmi náročné z důvodu prodlevy potřebné k opakovanému ustanovení ustáleného proudění - $K(h)$, je vyšetření průběhu funkce nenasyčené hydraulické vodivosti pomocí terénních infiltračních experimentů. V terénu se často provádí měření 1) nasycené hydraulické vodivosti K_s a 2) nenasyčené hydraulické vodivosti $K(h)$ při různých tlakových výškách - h . Nasycená hydraulická vodivost se v terénu běžně měří provedením výtopové infiltrace jednoválcovou nebo dvouválcovou metodou. Nasycená hydraulická vodivost je často ovlivněna výskytem preferenčních cest (trhlina, cestičky po žížalách apod.), ve kterých je proudění vody často mnohonásobně rychlejší než v půdní matici. Tento jev lze eliminovat použitím takzvaného podtlakového diskového infiltrometru (Hillel, 1998). Nastavením určitého podtlaku (záporné tlakové výšky) na půdní povrch jsou z procesu infiltrace vody do půdy vyloučeny póry s menší vstupní hodnotou vzduchu (preferenční cesty) než je aplikovaný podtlak a voda tak proudí především půdní maticí. Obecně se tedy dá tvrdit, že s rostoucím podtlakem, aplikovaným na půdní povrch, se snižuje množství pórů, zapojených do infiltrace a hodnota nenasyčené hydraulické vodivosti klesá. Výsledkem měření je pak jeden bod nenasyčené hydraulické vodivosti pro nastavenou tlakovou výšku. Opakováním měření pro další tlakové výšky je získána posloupnost nenasyčených hydraulických vodivostí, které dohromady (vč. nasycené hydraulické vodivosti) tvoří funkci nenasyčené hydraulické vodivosti.

Teoretický úvod – řídicí rovnice proudění vody v proměnlivě nasyceném prostředí

V nenasyčeném půdním prostředí, kde je část pórů vyplněna vzduchem a část se dosycuje vodou, dochází k tzv. nenasyčenému proudění, které je v přírodních podmínkách téměř vždy neustálené (tok q je proměnlivý v čase). V takovémto prostředí je hnací silou proudění gradient potenciálu a hydraulická vodivost nenasyčeného půdního prostředí je funkcí vlhkostního potenciálu (nebo vlhkosti). Pro popis neustáleného nenasyčeného proudění se používá tzv. Richardsova rovnice proudění [1] (zde se zanedbáním propadu r), která vznikne sloučením rovnice kontinuity [2] a Darcy-Buckinghamovy rovnice [3] (Marshall, et. al, 1996). Uvedené rovnice mají pro 1D proudění tvaru:

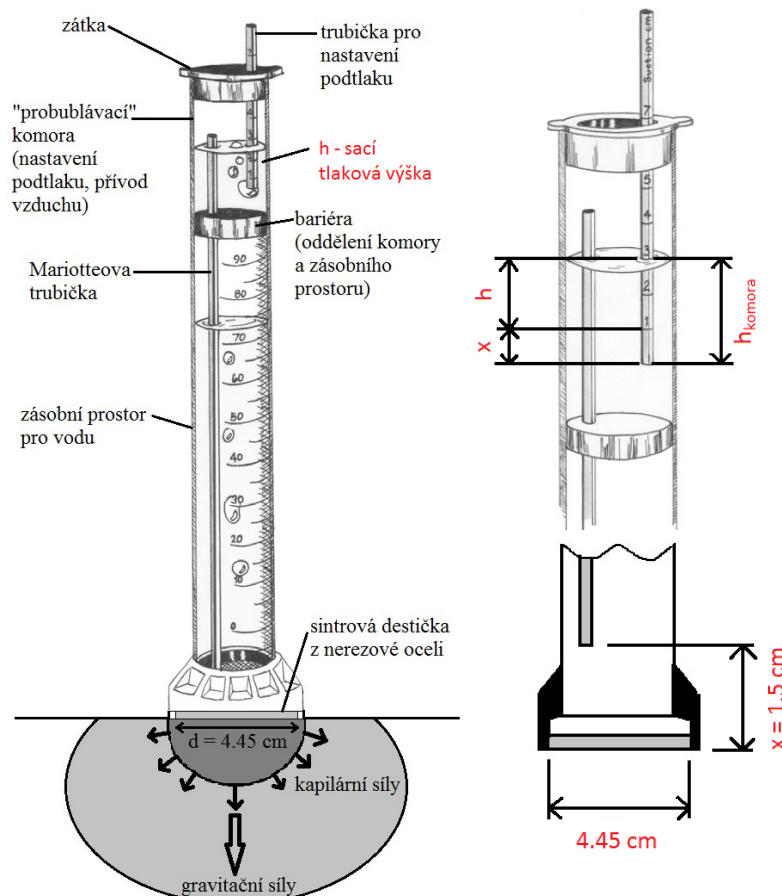
$$\frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} + r = 0 \quad [1]$$

$$q = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad [2]$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad [3]$$

Podtlakový mini-diskový infiltrometr firmy Decagon

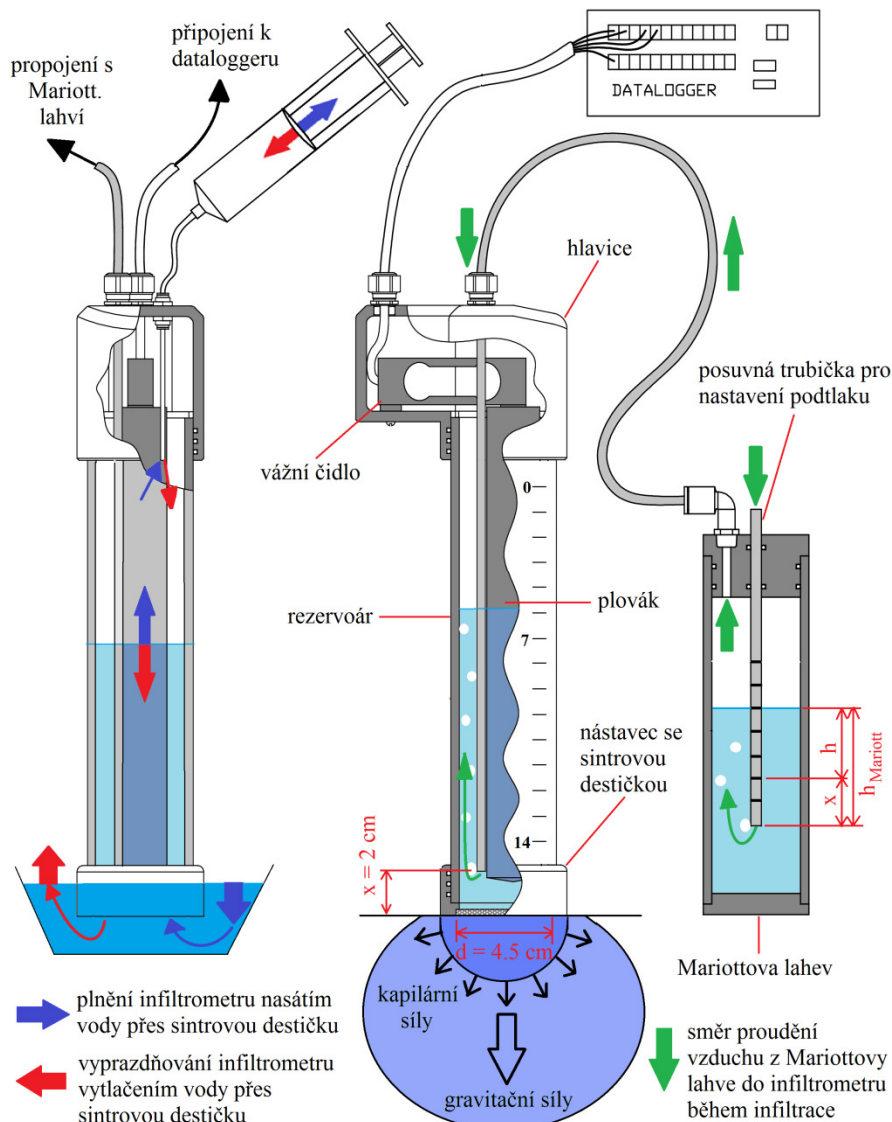
- Nastavení **tlakové výšky** (podtlaku) je nutné provést **dle obr.2 (vpravo)!!!** - v komoře je nutné nastavit hodnotu h_{komora} , aby měření probíhalo při zvolené tlakové výšce h .
- Infiltrometr se po naplnění vodou pokládá na povrch půdy urovnaný do roviny a doplněný o (zvlhčenou) tenkou vrstvou kontaktního písku (pro zajištění dokonalého hydraulického propojení půdy se sintrovou destičkou)
- Měření se provádí manuálně odečtem objemu vody na stupnici v čase (zapište do formuláře „Vyhodnocení podtlakové infiltrace (Decagon)“)



Obr. 2 – podtlakový mini-diskový infiltrometr Decagon

Podtlakový automatizovaný mini-diskový infiltrometr (Fsv, ČVUT v Praze)

- Nastavení **tlakové výšky** (podtlaku) je nutné **provést dle obr.3 (vpravo)!!!** - v Mariottově lahvi je nutné nastavit hodnotu h_{Mariott} , aby měření probíhalo při zvolené tlakové výšce h .
- Infiltrometr se po naplnění vodou pokládá na povrch půdy urovnaný do roviny a doplněný o (zvlhčenou) tenkou vrstvou kontaktního písku (pro zajištění dokonalého hydraulického propojení půdy se sintrovou destičkou)
- Měření se provádí automaticky na základě změny vztlakové síly působící na plovák uvnitř rezervoáru. Plovák je fixně upevněn na vážní čidlo, které reaguje na změnu sil působících na plovák během poklesu hladiny vody v rezervoáru. Změny jsou zaznamenávány dataloggerem ve formě výstupního napětí ($\text{mV} \cdot 1000$) a následně podle lineárního kalibračního vztahu přepočítány pomocí softwaru na hodnoty poklesu hladiny v rezervoáru (z_w). Pro stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti na základě automaticky naměřených dat použijte excelovskou výpočtovou tabulku „Výuka v terénu – stanovení $K(h)$ “
- Pro možnost provedení kalibrace nebo kontrolního měření je na rezervoáru umístěna stupnice, která slouží k manuálnímu odečtu poklesu hladiny v rezervoáru během infiltrace



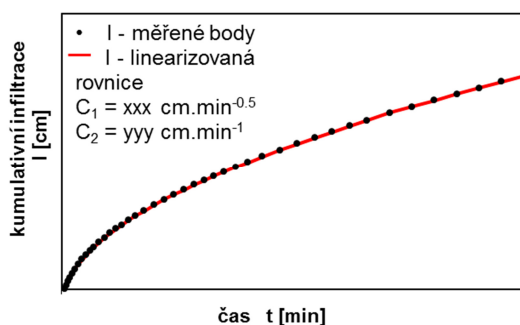
Obr. 3 – Schéma plnění (vyprazdňování) infiltrometru (vlevo) a procesu infiltrace (vpravo)

Vyhodnocení podtlakových infiltračních pokusů

Úkoly:

- Připravte povrch půdy a přístrojové vybavení k zahájení podtlakové infiltrace
- Z naměřených dat získajte, a vynesťe do grafu, kumulativní infiltraci
- určete koeficienty C_2 (výpočet dle rovnice [5]), A_2 (odečet z tabulky 1) a stanovte $K(h)$ (výpočet dle rovnice [6]). Pro výpočty lze využít excelovská výpočtový sešit "Výuka v terénu – stanovení $K(h)$ "
- Vyměňte si s dalšími skupinami hodnoty $K(h)$ měřené oběma přístroji při různých tlakových výškách a vynesťe je do grafu „funkce nenasycené hydraulické vodivosti“ spolu Vámi naměřenou hodnotou K_s (úloha s výtopovou infiltrací)
- Výše uvedené výstupy zapracujte do závěrečného protokolu

Na základě naměřených dat (objem vody – Decagon; poklesk hladiny vody – automatizovaný infiltrometr) je získán průběh kumulativní infiltrace (obr. 4), který je v případě této úlohy prokládán Philipovou rovnicí [4] odvozenou ze semianalytického řešení Richardsovy rovnice (Philip, 1957).



Obr. 4 – Graf kumulativní infiltrace

Pro stanovení nenasycené hydraulické vodivosti $K(h)$ modifikovanou Zhangovou metodou (Dohnal et al. 2010) je nutné získat první dva členy Philipovy rovnice [4], popisující kumulativní infiltraci – C_1 a C_2 [5], použitím metody nejmenších čtverců (pro výpočet $K(h)$ se používá pouze koeficient C_2). Nenasycená hydraulická vodivost se následně vypočítá ze vztahu [6], kde A_2 [7], [8], [9] je empirický koeficient závislý na velikosti van Genuchtenova parametru retenční křivky n . Pro stanovení koeficientu A_2 pro různé půdy a tlakové výšky použijte v případě infiltrometru Decagon tabulku 1 (v případě automatizovaného infiltrometru je koeficient dopočítán automaticky

$$I = C_1 t^{1/2} + C_2 t \quad [4]$$

$$C_2 = \frac{\sum t_i \sum I_i t_i - \sum I_i t_i^{1/2} \sum t_i^{3/2}}{\sum t_i \sum t_i^2 - \left(\sum t_i^{3/2}\right)^2} \quad [5]$$

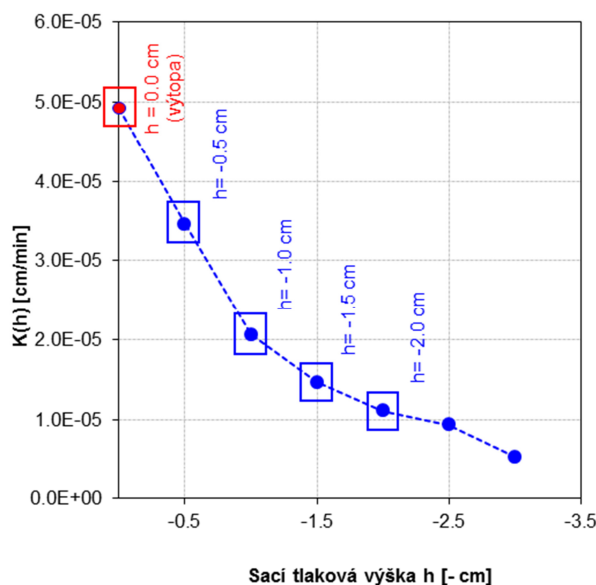
$$K(h) = \frac{C_2}{A_2} \quad [6]$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[2.92(n - 1.9)\alpha h]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \rightarrow n \geq 1.9 \quad [7]$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[7.5(n - 1.9)\alpha h]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \rightarrow 1.35 \geq n < 1.9 \quad [8]$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.82} - 1) \exp[34.65(n - 1.19)\alpha h]}{(\alpha r_0)^{0.6}} \rightarrow n < 1.35 \quad [9]$$

Získáním několika bodů nenasyčené hydraulické vodivosti (pro různé tlakové výšky) dostaneme její funkci v blízkosti nasycení (obr. 5). První bod grafu je roven nasycené vlhkosti K_s , které odpovídá tlaková výška $h = 0$ cm (viz obr. 5 - červený bod).



Obr. 5 - Funkce nenasyčené hydraulické vodivosti v blízkosti nasycení

Tabulka 1 – Hodnoty koeficientu A_2 pro různé půdy a tlakové výšky

TEXTURA	van Genuchten		h (cm)							Pozn.:
	α	n	-0.5	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	
			A_2							
písek	0.145	2.68	2.84	2.40	1.73	1.24	0.89	0.64	0.46	
hlinitý písek	0.124	2.28	2.99	2.79	2.43	2.12	1.84	1.61	1.40	
písčítá hlína	0.075	1.89	3.88	3.89	3.91	3.93	3.95	3.98	4.00	
hlína	0.036	1.56	5.46	5.72	6.27	6.87	7.53	8.25	9.05	Srbsko
prach	0.016	1.37	7.92	8.18	8.71	9.29	9.90	10.55	11.24	
prachovitá hlína	0.020	1.41	7.10	7.37	7.93	8.53	9.19	9.89	10.64	
písčito-jílovitá hlína	0.059	1.48	3.21	3.52	4.24	5.11	6.15	7.41	8.92	
jílovitá hlína	0.019	1.31	18.40	17.69	16.34	15.10	13.95	12.89	11.91	
prachovito-jílovitá hlína	0.010	1.23	20.85	20.71	20.43	20.14	19.87	19.59	19.32	
písčitý jíl	0.027	1.23	11.36	11.15	10.74	10.34	9.96	9.60	9.24	
prachovitý jíl	0.005	1.09	12.71	12.82	13.04	13.27	13.50	13.74	13.98	
jíl	0.008	1.09	9.63	9.77	10.04	10.33	10.62	10.91	11.22	

Literatura:

- Císlerová, M. *Inženýrská hydropedologie*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. ISBN 80-01-00052-4.
- Dohnal, M., Dusek, J., Vogel, T., 2010. *Improving hydraulic conductivity estimates from minidisk infiltrometer measurements for soils with wide pore-size distributions*. Soil science society of america journal 74(3), 804-811.
- Hillel, D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, c1998. ISBN 0-12-348525-8.
- Marshall, T.J., Holmes, J.W., Rose, C.W. *Soil Physics*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, c1996. ISBN 978-0-521-45151-2.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. 84:257–264.
- Warrick, A.W. *Soil Physics companion*. Boca Raton: CRC Press, c2002. ISBN 0-8493-0837-2