

POROVNÁNÍ SEZÓNŇNÍCH ZMĚN NENASYCENÉ HYDRAULICKÉ VODIVOSTI NA DVOU ZEMĚDĚLSKY OBDĚLÁVANÝCH POVODÍCH

COMPARISON OF SEASONAL CHANGES OF UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY ON TWO AGRICULTURAL CATCHMENTS

Vladimír Klípa¹, David Zumr¹, Michal Sněhota¹, Pavel Tachecí²

**¹ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství,
Thákurova 7, 166 29 Praha, Česká republika**

²DHI a.s., Na Vrších 1490/5, 100 00 Praha 10, Česká Republika

E-mail: vladimir.klipa@fsv.cvut.cz

Abstract

Hydraulic conductivity of soil in arable land is strongly dependent on agrotechnological procedures, soil compaction, plant growth etc. This contribution is focused on measurement of the unsaturated hydraulic conductivity of the topsoil using newly designed automated multipoint tension infiltrometer on two agricultural catchments Nučice and Kopaninský stream. Thirteen infiltration campaigns were carried out during three years. All tension infiltration experiments were performed using pressure head of -3 cm. Initial and saturated water contents and bulk density were measured on undisturbed samples collected during each measuring campaign. The main goal of the contribution is to describe the seasonal changes the unsaturated hydraulic conductivity on arable land. Results show that unsaturated hydraulic conductivity was significantly affected by soil compaction. Lowest unsaturated conductivity was observed in spring.

1. Úvod

V průběhu roku se struktura orniční vrstvy značně mění v závislosti na periodickém obdělávání půdy a hnojení, zhutňování půdy, růstu plodin a jejich kořenového systému, vlivu klimatu atd. Půdy s dobře vyvinutými agregáty lze pro potřeby modelování pohybu vody a látek aproximovat duálním systémem dvou propojených typů porézních medií: (a) preferenční domény (b) matriční domény (Gerke a Köhne, 2004, Klípa a kol., 2014 nebo Zumr a kol., 2014). Preferenční proudění probíhá v prostorách mezi agregáty, které tvoří dobře propojenou síť hydraulicky vodivých pórů. Preferenční proudění převládá během nasycených a téměř nasycených podmínek proudění, kdy voda obtéká půdní agregáty a prosakuje přes síť preferenčních cest do hlubších horizontů. Současně, a bezprostředně po ukončení infiltrace, dochází k pomalejšímu sycení matriční domény z preferenčních cest v důsledku gradientu vodního potenciálu mezi makropóry nebo jinými meziagregátovými prostory a půdními agregáty. Vertikální průtok matriční doménou (tj. agregáty) je velmi pomalý v důsledku její nízké hydraulické vodivosti a malé kontaktní plochy mezi sousedními agregáty (Carminati et al., 2007, Carminati et al., 2008). Jak se ornice postupně zhutňuje, poměr a propojení preferenčních cest se postupně zmenšuje, což vede ke snížení nasycené hydraulické vodivosti. Agregáty v tuto chvíli už nejsou odděleny dutinami a styčná plocha mezi nimi je větší. Berli et al. (2008) představili hydromechanický model, který ukazuje, že na jedné straně rozpad půdní struktury způsobuje snížení retenční schopnosti půdy, ale na druhou stranu větší kontaktní plochy umožňují lepší proudění vody v nenasyčených podmínkách.

Nenasycená hydraulická vodivost se v terénu běžně měří pomocí podtlakových infiltrometrů. Do současnosti byla vyvinuta a je běžně používána celá řada různých typů zařízení k provádění

podtlakových infiltračních experimentů. V praxi jsou nejčastěji používány diskové infiltrometry odvozené od verze, kterou v roce 1988 představili Perroux a White. Existuje ovšem i varianta podtlakového infiltrometru bez disku jakým je takzvaný Hood infiltrometr (Schwarzel a Punzel, 2007). Dnešní diskové infiltrometry se liší především průměrem disku a také způsobem automatizace měření, které poskytuje přístroji potřebnou efektivitu. Základní verze diskových infiltrometrů umožňují pouze manuální čtení kumulativní infiltrace, které může být neúčinné zejména v případech dlouhotrvajících experimentů v půdách s nízkou hydraulickou vodivostí, nebo pokud je zapotřebí velké množství dat. Jednu z prvních a dnes zřejmě nejběžněji používanou metodu automatizace navrhli Ankeny a kol. (1988). Jími navržená metoda automatizace využívá jeden nebo dva tlakové snímače. Tlakový snímač monitoruje změnu tlaku vzduchu nad hladinou vody v infiltrometru a na základě této změny je určena poloha hladiny vody v reservoáru infiltrometru. Použití diferenčního tlakového snímače (měření tlaku nad vodní hladinou a ve vodě) do určité míry snižuje šum měření způsobený kolísáním tlaku v souvislosti s uvolňováním bublin z provzdušňovací trubičky (Madsen a Chandler, 2007). Alternativní způsob automatizace diskového infiltrometru byl navržen například Moretem a kol. (2004), který pro měření polohy hladiny v zásobníku použil TDR (Time Domain Reflectometry). Gordon a Hallet (2014) navrhli zajímavý způsob automatizace mikroinfiltrometru, která využívá jednoduchého principu změny elektrického odporu při průchodu bublinky, uvolněné z provzdušňovací trubičky v Mariottově lahvi, přes vodič. Na základě změřené frekvence bublání je následně určen zainfiltrovaný objem vody. Další metoda automatizace podtlakového infiltrometru představená Rodným a kol. (2013) je založena na principu průběžného / sekvenčního snímání poklesu hladiny vody v reservoáru podtlakového infiltrometru pomocí digitálního fotoaparátu integrovaného v chytrém telefonu. Získaný digitální záznam je následně vyhodnocen pomocí analýzy obrazu s využitím principu sledování částic.

V poslední době jsou hojně používány takzvané mini-diskové infiltrometry s průměrem disku okolo 5 cm, které si získaly oblibu především díky kompaktní konstrukci, snadné přenositelnosti, malé spotřebě vody a snadné přípravě měření. Příkladem je komerčně dostupný Mini Disk Infiltrometer od firmy Decagon (Decagon Devices, Inc., Pullman, USA). Tento přístroj je v základní verzi manuální, ale může být automatizován instalací tlakového snímače (Madsen a Chandler, 2007).

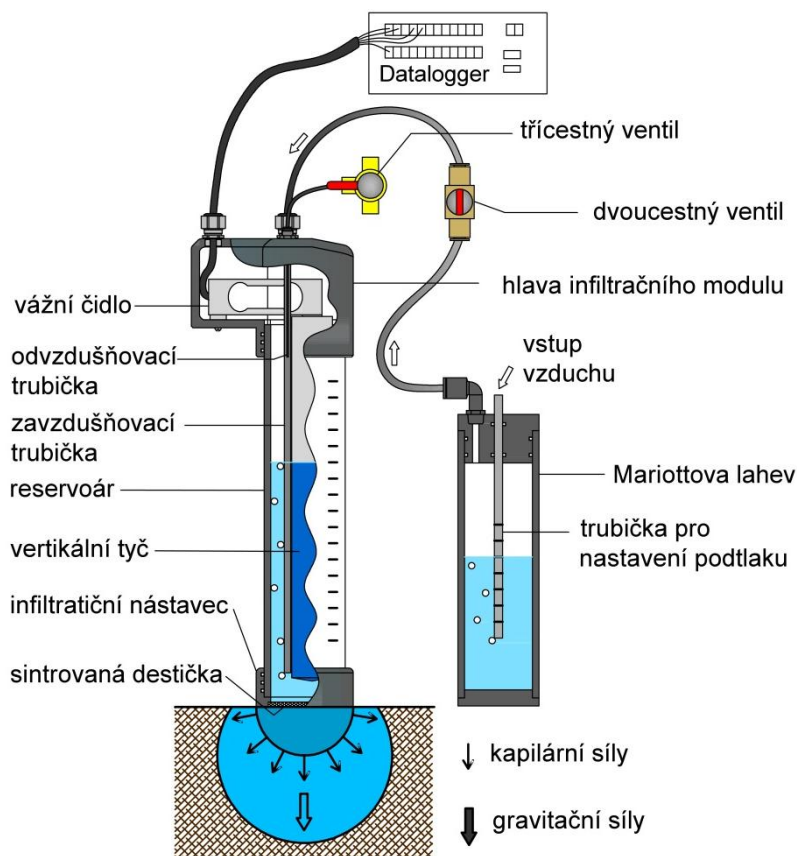
V této studii je představena nová varianta automatizovaného mini-diskového podtlakového infiltrometru, vyvinutá na Fakultě stavební ČVUT v Praze, která k automatickému měření kumulativní infiltrace využívá vážní čidlo. Prezentovaný přístroj byl využit k sledování vývoje nenasyčené hydraulické vodivosti v zemědělských povodích.

Hlavním cílem této práce bylo zhodnotit časovou variabilitu nenasyčené hydraulické vodivosti ornice v zemědělském povodí a pokusit se najít závislost mezi vlastnostmi půdního prostředí a jeho hydraulickou vodivostí.

2. Materiál a metody

2.1 Automatizovaný podtlakový infiltrometr

Nově vyvinutý přístroj použitý v této studii registruje kumulativní infiltraci prostřednictvím měření poklesu hladiny v zásobní nádobě. Automatizace měření, spočívá ve snímání změny vztlakové síly působící na vertikální tyč, připojenou na vážní čidlo, během poklesu hladiny v zásobní části přístroje (Klípa a kol., 2012). Změna vztlakové síly vyvolává změnu napětí na analogovém výstupu vážního čidla, která je zaznamenávána datastanicí a převedena na kumulativní infiltraci ve zvoleném časovém kroku, popřípadě je v závislosti na typu softwaru použita pro automatické stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti přímo v terénu. Princip měření a popis konstrukce podtlakového infiltrometru jsou schematicky znázorněny na Obrázku 1.



Obr.1 – Schéma infiltračního modulu

Konstrukce představeného podtlakového infiltrometru se v zásadě příliš neliší od běžně používaných přístrojů a se sestává ze tří základních částí: Mariottovy lahve, pomocí které se nastavuje velikost podtlaku (tj. tlakové výšky) aplikovaného na povrch půdy, zásobníku na vodu (v principu také Mariottova lahev) a infiltračního disku. Přístroj vyvíjený na Fsv, ČVUT v Praze je konstruován jako minidiskový podtlakový infiltrometr s kontaktní destičkou ze sintrované nerezové oceli o průměru disku 44.5 mm. Podobně jako u přístroje Mini Disk Infiltrometer, model S (Decagon Devices, Inc., Pullman, USA). Na rozdíl od tohoto přístroje je však od počátku navrhován jako automatický a vícebodový přístroj, což v praxi znamená začlenění více infiltrometrů (modulů) do jednoho kompaktního celku. Toto řešení poskytuje v terénu vyšší efektivitu měření.

Pro potřeby prezentované studie byly zkonstruovány dva vícebodové podtlakové infiltrometry lišící se prostorovým uspořádáním rámu pro upevnění jednotlivých minidiskových infiltračních modulů. Další odlišností obou prototypů je využitelný objem rezervoáru, který u prvního prototypu činí 190 ml a druhého 175 ml vody. První prototyp vícebodového podtlakového infiltrometru (Obr. 2) je konstruován jako jediný, výškově nastavitelný hliníkový rám, do kterého je v přesných rozestupech upevněno celkem šest samostatných podtlakových infiltračních modulů v kluzných pouzdrech. Skupina tří infiltrometrů na obou stranách rámu je připojena na společnou Mariottovu lahev, pro nastavení tlakové výšky, přičemž každý infiltrační modul je možné od zdroje podtlaku odpojit uzavřením kohoutu. V praxi je tedy možné provést až šest měření pro jednu hodnotu tlakové výšky nebo tři a tři měření pro dvě různé tlakové výšky. Sběr dat z jednotlivých infiltračních modulů je následně zajištěn datastanicí s integrovaným zdrojem energie, které jsou umístěny ve středové části rámu.



Obr. 2 – První prototyp vícebodového podtlakového infiltrometru

Druhý prototyp přístroje se od prvního liší především konstrukcí rámu, který byl rozdělen na dvě samostatné části připojené pomocí kabelu k datastanici (Obr. 3), která je umístěna v transportním boxu. Oba rámy jsou, principiálně stejně jako u prvního prototypu, osazeny trojicí infiltračních modulů a jednou Mariottovou lahví a je možné je urovnat do roviny pomocí tří stavěcích šroubů. Druhé provedení vícebodového infiltrometru je výhodnější především z pohledu snadnější manipulace s přístrojem a z části také vzhledem k času potřebného k přípravě měření.



Obr. 3 – Druhý prototyp vícebodového podtlakového infiltrometru

2.2 Podtlakové infiltrační experimenty

První série podtlakových infiltračních experimentů byla provedena v experimentálním povodí Nučice (okres Praha-východ, Česká republika). Půda v tomto povodí je klasifikována jako typická kambizem s hlinitou až jílovitohlinitou půdní texturou (Zumr a Dostál, 2014). Parametry van Genuchtenova modelu (van Genuchten, 1980) retenční křivky, potřebné pro vyhodnocení experimentů, svrchního půdního horizontu jsou: $\alpha = 0.048 \text{ cm}^{-1}$ a $n = 1.312$. Tyto parametry byly stanoveny na základě standardního měření drenážní větve retenční křivky na neporušených půdních vzorcích o objemu 100 cm^3 s použitím pískového tanku a přetlakového aparátu (Klute, 1986). Druhá série podtlakových infiltračních experimentů byla provedena v experimentálním povodí Kopaninského potoka (Vysočina, Česká republika). Typologicky zapadá půda v tomto povodí převážně do kambizemí mesobasických (Tachecí et al., 2013) s převážně písčitohlinitou texturou. Van Genuchtenovy parametry retenční křivky byly stanoveny stejnou metodou jako v případě povodí Nučice a pro svrchní horizont nabývají hodnot $\alpha = 0.043 \text{ cm}^{-1}$, $n = 1.545$.

V zájmových územích byl kontinuálně sledován vývoj nenasycené hydraulické vodivosti zemědělské půdy v průběhu sledovaného období. Změna vlastností půdy v průběhu roku je v rámci tohoto příspěvku charakterizována především vývojem objemové hmotnosti půdy ρ_a a nasycené objemové vlhkosti θ_s , kterou lze v případě dodržení nezbytných procedur, vedoucích k dokonalému nasycení vzorku, přirovnat k pórovitosti neporušeného půdního vzorku. V souvislosti s těmito dvěma charakteristikami byl sledován vývoj nenasycené hydraulické vodivosti $K(h_0)$. Celkem bylo v těchto povodích v letech 2012 – 2014 provedeno třináct infiltračních kampaní, z toho deset v Nučicích a tři v povodí Kopaninského potoka. Obě povodí jsou intenzivně zemědělsky využívána k pěstování plodin, a proto byly termíny infiltračních kampaní, zejména v experimentálním povodí Nučice, voleny s ohledem na agrotechnické postupy a životní cyklus plodin (tabulka 1). Každá infiltrační kampaň zahrnovala šest podtlakových infiltračních experimentů (tj. jeden běh přístroje) s nastavenou tlakovou výškou $h_0 = -3.0 \text{ cm}$, celkově tedy bylo provedeno 78 podtlakových infiltračních experimentů, přičemž vyhodnoceno bylo 68 infiltračních experimentů (z toho Nučice 56 a Kopaninský potok 12). Konkrétní počty infiltračních experimentů m pro jednotlivé kampaně jsou uvedeny v tabulce 1. V rámci každé kampaně byly také odebírány tři neporušené půdní vzorky o objemu 100 cm^3 pro stanovení objemové hmotnosti a také počáteční a nasycené objemové vlhkosti půdy. Všechny veličiny měřené na neporušených půdních vzorcích byly stanoveny standardní gravimetrickou metodou a jejich průměrné hodnoty ze tří opakovaných měření jsou taktéž uvedeny v tabulce 1.

Před každým měřením byl upraven povrch půdy, tak aby bylo dosaženo dokonalého hydraulického propojení půdy se sintrovou destičkou infiltrometru. Povrch půdy proto byl seříznut pro odstranění největších nerovností (maximálně však několik centimetrů podle charakteru nerovností) a plocha, kde dochází ke kontaktu půdy s destičkou, byla upravena do vodorovné roviny. Pro dosažení optimálního kontaktu mezi půdou a destičkou byla na povrch urovnané půdy aplikována tenká vrstva kontaktního písku (max 1-2 mm) s velikostí zrna 0.10 až 0.63 mm (ST01/06 PAP, Sklopísek Střeleč, Česká republika).

2.3 Vyhodnocení podtlakových infiltračních experimentů

Výsledkem každého podtlakového infiltračního experimentu je průběh kumulativní infiltrace v čase, který je potřebný pro stanovení nenasycené hydraulické vodivosti. Hodnota nenasycené hydraulické vodivosti $K(h_0)$ (cm min^{-1}) při zvolené tlakové výšce h_0 (cm) je výsledkem řešení Philipovy rovnice (Philip, 1957) (1), popisující infiltrační proces pod diskem (upraveno pro

třírozměrné proudění), v kombinaci s metodou Zhanga (1997), respektive její modifikací (Dohnal a kol, 2010). Prvním krokem, nutným pro stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti, je nalezení koeficientů C_1 ($m s^{-1/2}$) a C_2 ($m s^{-1}$) v prvních dvou členech Philipovy aproximace (1) v našem případě metodou nejmenších čtverců. Dalším krokem vyhodnocení experimentu je samotné stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti použitím Zhangovy metody (dosazení koeficientů C_2 a A_2 do vztahu (2)).

$$I = C_1 t^{1/2} + C_2 t \quad (1)$$

$$C_2 = K_{h0} A_2 \quad (2)$$

Volba způsobu výpočtu bezrozměrného koeficientu A_2 ve vztahu [2] závisí na hodnotě van Genuchtenova parametru retenční křivky n (-) podle pravidel, uvedených v článku Dohnala a kol. (2010):

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp \left[-0.92(n - 1.9)\alpha h_0 \right]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad (n \geq 1.9) \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp \left[-0.5(n - 1.9)\alpha h_0 \right]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad (1.35 \geq n < 1.9) \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{11.65(n^{0.82} - 1) \exp \left[-4.65(n - 1.19)\alpha h_0 \right]}{(\alpha r_0)^{0.6}} \quad (n < 1.35) \quad (5)$$

kde: α (cm^{-1}) a n (-) jsou parametry retenční křivky (van Genuchten, 1980), h_0 (cm) je nastavená tlaková výška a r_0 (cm) je poloměr infiltračního disku.

3. Výsledky a diskuse

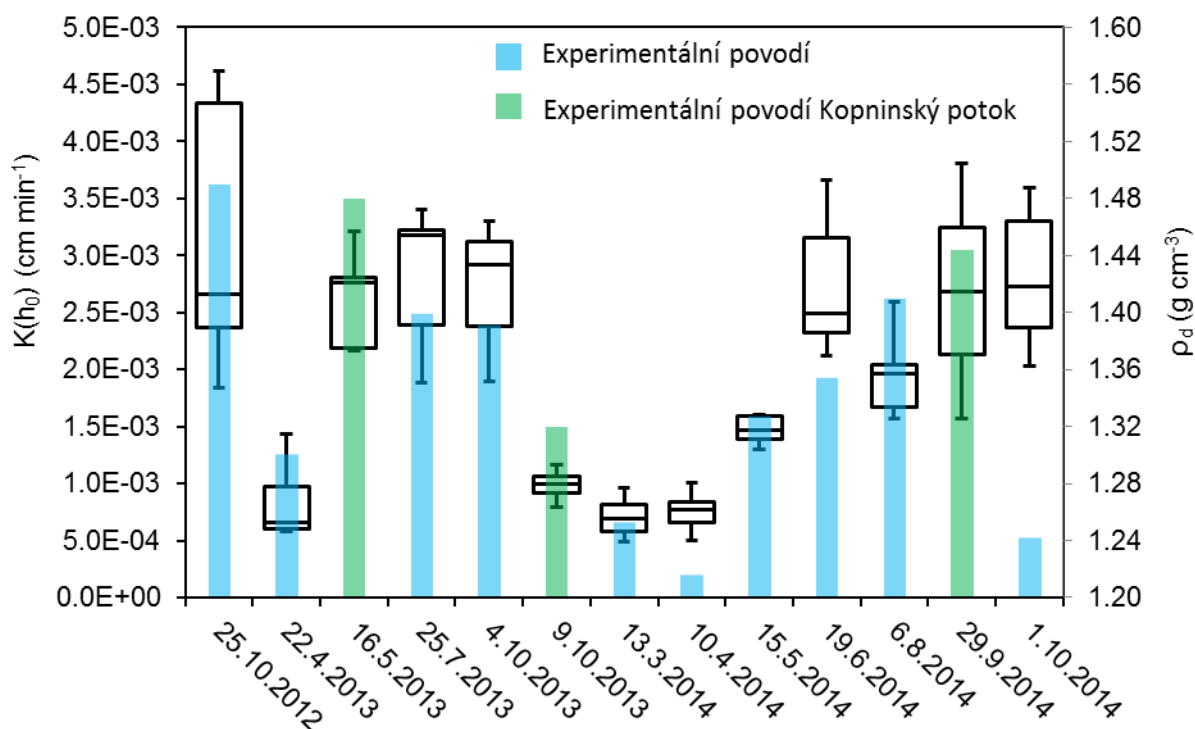
Tabulka 1 shrnuje průměrné hodnoty veličin získané pro jednotlivé infiltrační kampaně. Doplnujícím údajem, popisujícím počáteční podmínky měření, je v této tabulce počáteční objemová vlhkost vzorku θ_{init} . Vzhledem k lišícímu se počtu vyhodnocených podtlakových infiltračních experimentů a následně stanovených nenasyčených hydraulických vodivostí je v tabulce ve sloupci „ m “ uveden skutečný počet vyhodnocených měření. Nejnižší hodnoty hydraulické vodivosti byly pozorovány v Nučicích v dubnu 2013 a březnu/dubnu 2014 a na Kopaninském potoce v říjnu 2013. Kromě nízkých hodnot $K(h_0)$ byly v těchto termínech rovněž zjištěny nízké hodnoty objemové hmotnosti půdy a zároveň vysoké hodnoty nasycené objemové vlhkosti. Ve zbývajícím souboru dat je nenasyčená hydraulická vodivost o jeden řád vyšší. Níže uvedené hodnoty nasycených objemových vlhkostí jsou ve většině případů nepřímo úměrné objemovým hmotnostem. To znamená, že menší objemová hmotnost poukazuje na zvýšenou přítomnost preferenčních cest a meziagregátových prostor, což se zároveň promítne také ve zvýšené hodnotě pórovitosti půdy. Hodnota pórovitost půdy je v tabulce 1 vyjádřena pomocí nasycené objemové vlhkosti za předpokladu, že při dokonalém nasycení vzorku jsou obě hodnoty přibližně stejné. Nejvyšší objemová hmotnost, způsobená pravděpodobně válčováním ornice po zasetí, byla pozorována v říjnu 2012.

Tab. 1 – Porovnání počáteční a nasycené objemové vlhkosti, objemové hmotnosti a nenasyčené hydraulické vodivosti pro specifické podmínky měření.

Experimentální povodí Nučice						
datum	Stav plodiny / agrotechnické zásahy	θ_{mit} (-)	θ_s (-)	ρ_d (g cm ⁻³)	$K(h_0)$ (cm min ⁻¹)	m
25.10.2012	mladý ozimý ječmen, po osetí válcováno	0.33	0.43	1.49	3.16 10 ⁻³	5
22.4.2013	před setbou (orba provedena na podzim)	0.23	0.50	1.30	8.49 10 ⁻⁴	5
25.7.2013	vzrostlý ječmen (několik týdnů před sklizní)	0.15	0.45	1.40	2.83 10 ⁻³	6
4.10.2013	orná půda připravená k osetí	0.37	0.44	1.39	2.74 10 ⁻³	6
13.3.2014	mladá ozimá pšenice	0.27	0.53	1.25	7.08 10 ⁻⁴	4
10.4.2014	mladá ozimá pšenice	0.23	0.54	1.22	7.55 10 ⁻⁴	6
15.5.2014	vzrostlá ozimá pšenice	0.25	0.47	1.33	1.47 10 ⁻³	6
19.6.2014	dozrávající ozimá pšenice	0.11	0.45	1.35	2.73 10 ⁻³	6
6.8.2014	zralá ozimá pšenice před sklizní	0.24	0.42	1.41	1.95 10 ⁻³	6
1.10.2014	čerstvě zasetá obilovina	0.31	0.49	1.24	2.80 10 ⁻³	6
Experimentální povodí Kopaninský potok						
datum	Stav plodiny / agrotechnické zásahy	θ_{mit} (-)	θ_s (-)	ρ_d (g cm ⁻³)	$K(h_0)$ (cm min ⁻¹)	m
16.5.2013	mladá jarní obilovina, po osetí válcováno	0.33	0.44	1.48	2.19 10 ⁻³	5
9.10.2013	strniště prorostlé travami, po hnojení	0.27	0.46	1.32	9.86 10 ⁻⁴	5
29.9.2014	mladá ozimá obilovina	0.36	0.47	1.44	2.69 10 ⁻³	2

Statistické vyhodnocení zjištěných hodnot nenasyčené hydraulické vodivosti v porovnání se zjištěnou objemovou hmotností půdy pro dosud provedená měření je uvedeno na obrázku 4, kde spodní a horní části boxu jsou první a třetí kvartil a pruh uvnitř krabice představuje medián. Konce fousků představují minimální a maximální hodnoty nenasyčené hydraulické vodivosti pro dané infiltrační kampaně. Výsledky měření na jednotlivých povodích jsou odlišeny prostřednictvím barevných sloupců (modrý – Nučice; zelený – Kopaninský potok), které znázorňují aktuální hodnoty objemových hmotností půdy. Na základě průběžného monitorování byla pozorována souvislost mezi objemovou hmotností a nenasyčenou hydraulickou vodivostí. Nižší objemová hmotnost, která klesá s rostoucí pórovitostí (respektive θ_{sat}), vede k poklesu nenasyčené hydraulické vodivosti. Výjimkou je pouze měření v Nučicích z října 2014, kde byla zjištěna vyšší hydraulická vodivost a zároveň nízká objemová hmotnost půdy. Tento jev může být způsoben charakterem půdního prostředí, které bylo tvořeno kompaktními hroudami půdy, proloženými vrstvami posklizňových zbytků. Zatímco infiltrace probíhala především do půdních útvarů, neporušené půdní vzorky byly odebrány včetně vrstev obsahujících posklizňové zbytky. Konečným důsledkem je mírné nadhodnocení nenasyčených hydraulických vodivostí a současně podhodnocení objemových hmotností. Největší rozptyl naměřených hodnot s extrémy 1.83 10⁻³ až 4.62 10⁻³ cm min⁻¹ byl pozorován v říjnu 2012, což v tomto případě může být vedle heterogenity půdního prostředí částečně ovlivněno i komplikacemi se spuštěním přístroje. Velkou variabilitu nenasyčené hydraulické vodivosti lze také pozorovat v září 2014 v povodí Kopaninského potoka, ale v tomto případě je potřeba brát v úvahu malý počet měření. Na druhou stranu, nejnižší rozdíly mezi měřenými hodnotami byly zaznamenány především v jarních měsících (2013 a 2014) v povodí Nučice a v říjnu 2013 v povodí Kopaninského potoka. Pro povodí Nučice platí, že v létě a na podzim je hydraulická vodivost vyšší, zatímco na jaře nabývá spíše nižších

hodnot. V obou případech se však hodnoty v létě a na podzim a obdobně i na jaře pohybují ve srovnatelných mezích. V povodí Kopaninského potoka je pozorován spíše opačný jev, ovšem je potřeba přihlídnout k nízkému počtu měření, které zatím nedovoluje v tomto případě vytvářet konečné závěry. Jak je patrné z obrázku 4, nenasycená hydraulická vodivost je do značné míry prostorově (i v malém měřítku) a časově proměnlivá. Z tohoto důvodu je nutné provádět dostatečná množství měření pro stanovení reprezentativní hodnoty hydraulické vodivosti a jejího vývoje v průběhu roku.



Obr. 4 – Nenasycená hydraulická vodivost při nastaveném podtlaku $h_0 = -3$ cm ve vztahu k objemové hmotnosti půdy v letech 2012 – 2014

4. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo zhodnotit časovou variabilitu nenasycené hydraulické vodivosti ornice v zemědělském povodí. Pro tento účel bylo provedeno deset infiltračních kampaní v povodí Nučice a tři v povodí Kopaninského potoka. Na základě deseti měření v Nučicích, bylo zjištěno, že nenasycená hydraulická vodivost je nižší na jaře a vyšší v létě a na podzim. V případě Kopaninského potoka se trend zdá být spíše opačný, což je ale vzhledem k nízkému počtu měření obtížně potvrditelné. Je také potřeba podotknout, že zmiňovaný vývoj se do značné míry odvíjí od zemědělské činnosti, tj. od termínů a typů agrotechnických zásahů.

Časové změny nenasycené hydraulické vodivosti jsou pravděpodobně spojeny s postupným zhutňováním půdy v průběhu roku a zvyšující se kontaktní plochou mezi agregáty (jak je například popsáno Carminatim a kol. (2007), nebo Carminatim a kol. (2008)). Snížení hydraulické vodivosti půdy v jarních měsících je nejspíše způsobeno působením mrazu přes zimu a následnému nakypření půdy, dále k ovlivnění vodivosti může přispívat také oživení půdy řasami a plísněmi. Tento jev nebyl ovšem doposud potvrzen žádnými zkouškami nebo biologickými analýzami půdy. Další výzkum časové variability nenasycené hydraulické vodivosti počítá s dlouhodobějším pozorováním a podle

možností s vyšším počtem měření na jednu měřicí kampaň. Dále je v plánu doplnit měření svrchní vrstvy půdy v lokalitě Nučice i o měření vodivosti půdy na přechodu do B-horizontu.

Všechny infiltrační experimenty uvedené v tomto příspěvku byly provedeny s využitím nového vícebodového podtlakového infiltrometru, který se osvědčil jako spolehlivý a efektivní nástroj pro stanovení nenasyčené hydraulické vodivosti orné půdy.

5. Poděkování

Tento výzkum vznikl v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky č.: TA01021844, projektu Grantové agentury České republiky č.: 13-20388P a Studentské grantové soutěže ČVUT č.: SGS14/131/OHK1/2T/11.

6. Literatura

- Ankeny, M.D., Kaspar, T.C., Horton, R., 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 52(3), 893-896.
- Berli, M., Carminati, A., Ghezzehei, T.A., Or, D., 2008. Evolution of unsaturated hydraulic conductivity of aggregated soils due to compressive forces, *Water Resources Research* 44 (5)
- Carminati A., Kaestner, A., Hassanein, R., Ippisch, O., Vontobel, P., Flühler, H., 2007. Infiltration through series of soil aggregates: Neutron radiography and modeling, *Advances in water resources* 30 (5), 1168-1178
- Carminati A., Kaestner, A., Lehmann, P., Flühler, H., 2008. Unsaturated water flow across soil aggregate contacts, *Advances in water resources* 31 (9), 1221-1232
- Dohnal, M., Dušek, 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.
- Gerke, H.H., Köhne, J.M., 2004 Dual-permeability modeling of preferential bromide leaching from a tile-drained glacial till agricultural field. *Journal of Hydrology*, 289, (1-4), 239-257.
- Gordon, D. C., Hallett, P. D., 2014. An automated microinfiltrometer to measure small-scale soil water infiltration properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62(3), 252-256.
- Klípa, V., Zumr, D., Sněhota, M. (2012). Automated minidisk infiltrometer module with an immovable float and a load cell water level logging. In EGU General Assembly 2012: Geophysical Research Abstracts, Volume 14, EGU2012-1002, ISSN 1607-7962.
- Klípa, V., Zumr, D., Sněhota, M. (2014): Seasonal variability of near-saturated hydraulic conductivity on cultivated soil. In EGU General Assembly 2014: Geophysical Research Abstracts, Volume 16, EGU2014-6568, ISSN 1607-7962.
- Klute, A. (1986), Water Retention: Laboratory Methods, in *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods.*, edited by A. Klute, pp. 635-662, American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin.
- Madsen, M.D., Chandler, D.G., 2007. Automation and use of mini disk infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* 71(5), 1469-1472.
- Moret, D., Lopez, M.V., Arrue, J.L., 2004. TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *Journal of Hydrology* 297(1-4), 229-235.
- Perroux, K.M., White, I., 1988. Designs for disk permeameters. *Soil Science Society of America Journal* 52(5), 1205-1215.

- Rodny, M., Rodny, P., Surda, P., Matula, S., Mihalikova, M., Chala, A. T., 2013. Automation of mini disk infiltrometer based on particle tracking principle. *Acta Hydrologica Slovaca* 14(2), 460-465.
- Schwarzel, K., Punzel, J., 2007: Hood Infiltrometer – A New Type of Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 71(5), 1438-1447.
- Tachecí, P., Žlábek, P., Kvítek, T., Peterková J., 2013. Analysis of Rainfall-runoff events on four subcatchments of Kopaninsky tok (Czech Republic), *Die Bodenkultur* 64 (3-4) p. 105-111.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892–898.
- Zhang, R.D., 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61(4), 1024-1030.
- Zumr, D., Dostál, T., 2014. Vliv zhutnělého podorničí na formování podpovrchového odtoku na měřítku experimentálního povodí. In *Hydrologie malého povodí 2014*, Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i. a Český hydrometeorologický ústav, 584-590,. ISBN 978-80-02-02525-2.
- Zumr, D., Klípa, V., Sněhota, M., Dohnal, M., 2014. Temporal Changes of Near-Saturated Hydraulic Conductivity in a Small Arable Catchment. In *15th Biennial Conference - Euromediterranean Network of Experimental and representative Basins Book of Abstracts*. Coimbra: Department of Civil Engineering of the University of Coimbra, 2014, p. 69. ISBN 978-989-98435-6-1.