

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Bakalářská práce

Změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti půd s různým podílem biocharu
při opakovaných měření laboratorním permeametrem

Vypracoval: Pavel Bočinský

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka

2016 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavel Bočinský

Vodní hospodářství

Název práce

Změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti půd s různým podílem biocharu při opakovaných měření laboratorním permeametrem

Název anglicky

Changes of saturated hydraulic conductivity values of soils with different percentages of biochar during recurrent laboratory measurements

Cíle práce

- 1) Stanovit časové změny nasycené hydraulické vodivosti (K_s) na sypaných půdních vzorcích s různým obsahem biocharu.
- 2) Vyhodnotit možnou kolmataci ve vzorcích (změny objemové hmotnosti, obsahu celkového uhlíku, bobtnání)
- 3) Určit vliv zastoupení biocharu na tuto kolmataci.

Metodika

Rešerše vlivu kolmatace (biologická, chemická, fyzikální) na nasycenou hydraulickou vodivost.

Provedení laboratorních měření K_s na uměle připravených půdních vzorcích s obsahem 2 % biocharu, 5 % biocharu a bez biocharu. Sledování změn hodnot K_s v průběhu déle trvajících měření. Vyhodnocení vlivu obsahu biocharu na okamžité hodnoty K_s a časové změny K_s . Vyhodnocení možné kolmatace ve vzorcích (změny objemové hmotnosti, obsahu celkového uhlíku, bobtnání).

Doporučený rozsah práce

30

Klíčová slova

kolmatace, biochar, nasycená hydraulická vodivost, časové změny, laboratorní měření

Doporučené zdroje informací

- GUPTA R. et SWARTZENDRUBER D., 1962: Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand. Soil Science Society of America Proceedings, number 26, 9-12.
- Lim T.J., Spokas K.A., Feyereisen G., Novak J.M., 2016: Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. Chemosphere 142, 136–144.
- MLEJNSKÁ E., 2013: Kolmatace – Významné omezení funkčnosti umělých mokřadů. VTEI, Praha.
- SIRIWARDENE N., DELETIC A., FLETCHER T., 2007: Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. Water Research, Vol. 41, Issue 7.
- VANDEVIVERE P. et BAVEYE P., 1992: Saturated Hydraulic Conductivity Reduction Caused by Aerobic Bacteria in Sand Columns. Soil Science Society of America Journal, Vol. 56, 1-13.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 5. 1. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 1. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 04. 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Praze dne 12.4.2016

Podpis :

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukášovi Jačkovi za odborné vedení, velikou ochotu a trpělivost při vypracování bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich podporu při tvorbě této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem biocharu na nasycenou hydraulickou vodivostí (K_s) a časovými změnami K_s v průběhu měření. Reprezentativní hodnoty K_s jsou základním vstupem při popisu a modelování proudění vody v půdě. Vzorky v této práci reprezentovala laboratorně upravená půda (nivní půda s přidavkem 20 % kaolínového jílu). Do této půdy bylo přidáno 0, 2, a 5 % biocharu. Pro tyto různé materiály byly stanoveny hodnoty K_s a změny hodnot v čase při opakovaném měření. Biochar (materiál používaný ke zlepšení sorpční kapacity a dalších půdních vlastností) byl pro tuto práci vytvořen pyrolýzou ze stopek vinné révy.

Měření probíhalo ve dvou sériích, v lednu a únoru roku 2016. V každé sérii bylo deset vzorků, celkově dvacet vzorků. Vzorky byly sypané do Kopeckého válečků (100 cm^3). První série obsahovala pět vzorků s jemnou zeminou a s přidavkem 5% biocharu a 20% jílu, zbylých pět vzorků obsahovalo jemnou zeminu s přidavkem 20% jílu. Druhá série obsahovala pět vzorků s jemnou zeminou a s přidavkem 2% biocharu a 20% jílu, zbylých pět vzorků obsahovalo jemnou zeminu s přidavkem 20% jílu. Sycení vzorků probíhalo postupně, pomocí regulátoru v laboratorním permeamtru. Vzorky byly měřeny laboratorním permeamtrům metodou konstantního spádu.

Průměrné hodnoty K_s se v první sérii pro vzorky bez biocharu pohybovaly v rozmezí od $1,00 \cdot 10^{-7}$ do $3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$. Pro 5% biochar se průměrná hodnota K_s pohybovala v rozmezí od $6,49 \cdot 10^{-8}$ do $9,20 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Průměrné hodnoty K_s se v druhé sérii pro vzorky bez biocharu pohybovaly v rozmezí od $1,21 \cdot 10^{-7}$ do $1,84 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$. Pro 2% biochar se průměrná hodnota K_s pohybovala v rozmezí od $9,78 \cdot 10^{-8}$ do $1,64 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$.

Klíčová slova: Vliv biocharu, laboratorní permeametr, hydraulická vodivost, časové změny, změny půdních vlastností, konstantní spád

Abstract

This thesis deal with the influence of biochar on the saturated hydraulic conductivity (K_s) and time changes of K_s during the recurrent of measurement procedure. Representative values of K_s are crucial for description and modeling of the water flow in the soil. Samples used in this thesis represent laboratory-prepared soil (fluvial soil fine grained soil with the addition of 20% kaolin clay). This soil has been enriched by 0, 2 and 5% of biochar. For these different materials, values of K_s and its time changes were determined values using recurrent laboratory measurements. Biochar (material used for improvement of sorption capacity and other soil properties) was made by pyrolysis of grape stalk.

Measurements were performed in two series, in January and February 2016. Every series contains ten samples, therefore, twenty samples in two series were measured. Samples were poured into Kopeckeho sampling rings (100cm³). First series contains five samples of fine soil, each sample with 5% addition of biochar to reference soil; the remaining five samples contain reference soil (fluvial soil with 20% addition of clay). Second series contains five samples of fine soil, each sample with 2 % addition of biochar to reference soil; the remaining five samples contain reference soil. Saturation of samples was done gradually by a regulator of laboratory permeameter. Samples were measured using the laboratory permeameter by constant head method.

Average values of K_s for samples without biochar (first series), were in range from $1,00 \cdot 10^{-7}$ until do $3,53 \cdot 10^{-7}$ m.s⁻¹. Average values of K_s for 5% biochar, were in range from $6,49 \cdot 10^{-8}$ until $9,20 \cdot 10^{-8}$ m.s⁻¹. For the first series, the mean K_s values of the samples with the 5% biochar addition were every time distinctly lower than mean K_s values for the reference soil. Average values of K_s for samples without biochar (second series), were in range from $1,21 \cdot 10^{-7}$ until $1,84 \cdot 10^{-7}$ m.s⁻¹. Average values of K_s for 2% biochar, were in range from $9,78 \cdot 10^{-8}$ until $1,64 \cdot 10^{-7}$ m.s⁻¹.

Keywords: influence of biochar, laboratory permeameter, hydraulic conductivity, time changes, changes of soil properties, constant head

Obsah

Obsah.....	8
1. Úvod	9
2. Cíle práce.....	10
3. Literární rešerše	11
3.1. Hydrodynamika půdní vody.....	11
3.1.1. Darcyho zákon.....	11
3.1.2. Meze platnosti Darcyho zákona	16
3.2. Nasycená hydraulická vodivost	17
3.2.1. Vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti – metodou konstantním spádem	18
3.3. Metody měření nasycené hydraulické vodivosti.....	18
3.3.1. Laboratorní metody	18
3.3.2. Terénní metody.....	20
3.4. Biochar – Vliv na K_s	23
4. Metodika	25
4.1. Charakteristika měřeného materiálu.....	25
4.2. Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků	29
4.2.1. Příprava a plnění vzorků	29
4.2.2. Sycení a měření vzorků	33
5. Výsledky	35
5.1. Série I– vzorky s nivní zeminou a 20% jílu	35
5.2 Série I– vzorky s nivní zeminou, 5% biocharem a 20%jílu	37
5.3. Série II– vzorky s nivní zeminou a 20% jílu	38
5.4. Série II– vzorky s nivní zeminou, 2% biocharem a 20%jílu	40
6. Závěr.....	42
7. Přehled literatury a použitých zdrojů	43

1. Úvod

Mezi hlavní hydrologické vlastnosti patří bezesporu nasycená hydraulická vodivost K_s , která vyjadřuje schopnost vést vodu půdou. Hodnota K_s závisí na charakteristických vlastnostech půdy a na charakteristických vlastnostech proudící kapaliny. Vlastnosti kapaliny ovlivňující K_s jsou viskozita a hustota. Mezi charakteristické vlastnosti půdy, které významně ovlivňují K_s patří zrnitostní složení půdy, struktura půdy a zastoupení organické hmoty.

Využití znalostí o K_s , využíváme především v hydropedologii, hydrogeologii a při ochraně půdy a podzemní vody před znečištěním, dále také při závlahách a pro odvodnění. Znalost K_s se využívá i v transportních modelech.

Biochar, který je v podstatě organickým materiálem (Verheijen et al., 2010), mění výrazně sorpční kapacitu, Ph a řadu dalších půdních vlastností (Amonette et Joseph, 2009). Efekt biocharu na hodnoty K_s a její časové změny není zatím objasněn a závisí zřejmě na kvalitě a kvantitě aplikovaného biocharu i na půdních vlastnostech (zrnitost, struktura, objemová hmotnost, a zřejmě na řadě dalších půdních vlastností), viz například aktuálně publikované práce v této oblasti (Lim et al., 2016; Castellini et al., 2015; Jeffery et al., 2015)

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá popisem proudění vody v půdě, definováním a odvozením Darcyho zákona. Popsána je zde také nasycená hydraulická vodivost a její metody stanovení v laboratorním a terénním prostředí a jejich výhody a nevýhody. Rešeršní část uzavírá popis efektu biocharu na hodnoty K_s pro různé půdy na základě aktuálních případových studií. Praktická část se zaměřuje na charakteristiku použitých materiálů. Zahrnuje přípravu a plnění sypaných vzorků, sycení vzorků a stručný popis měření. V hlavní části práce, kterou tvoří výsledky a diskuze, jsou vyhodnocena měření K_s a časový efekt přidání biocharu na hodnoty K_s .

2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je určit vliv biocharu na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (K_s) nivní půdy obohacené o jíl (referenční půda) a popsat časové změny K_s .

První dílčím cílem bylo určit časové změny K_s půdy obohacené o 2 % biocharu a porovnat měřené hodnoty s referenční půdou.

Druhým dílčím cílem bylo určit časové změny K_s půdy obohacené o 5 % biocharu a porovnat měřené hodnoty s referenční půdou.

Třetím dílčím cílem bylo vyhodnotit možné příčiny (bobtnání, vyplavování biocharu ze vzorku, kolmatace pórů) rozdílných hodnot K_s mezi referenční půdou a půdou obohacenou o biochar.

3. Literární řešerše

3.1. Hydrodynamika půdní vody

Půdu si můžeme představit jako porézní prostředí, které umožňuje proudění vody. Mezi půdními částicemi je prostor, který vytváří maximální objem pórů, ve kterém se může pohybovat voda. Pokud je půda plně nasycená vodou a voda vyplňuje při proudění veškeré póry, jedná se o nasycené proudění. Pokud není půda plně nasycena vodou a vlhkost je menší než pórovitost, jedná se o nenasyčené proudění.

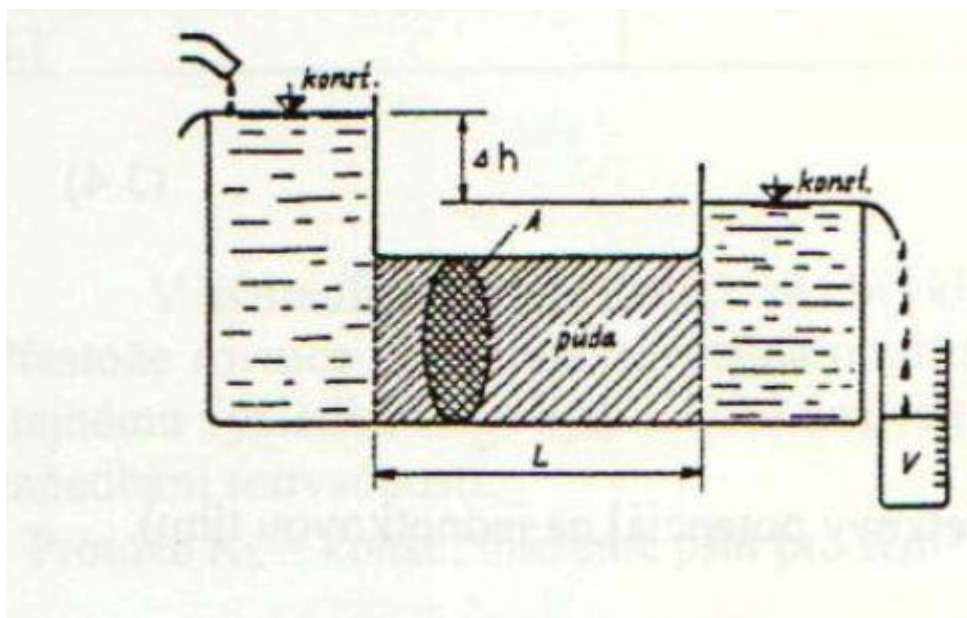
Spád potenciálu je hlavní hnací silou pro oba typy proudění. Rychlost proudění můžeme vyjádřit pomocí lineárního tvaru transportní rovnice. Z mechaniky tekutin lze odvodit zásady potenciálního proudění pro matematicko-fyzikální popis. Plynulý přechod mezi matematickým popisem proudění v nasycené a nenasyčené půdě si můžeme představit, jako když přecházejí vodní částice z nasycené do nenasyčené zóny.

Velká část transportních procesů v přírodě patří k nestacionárním, rychlost přenosu a popřípadě další fyzikální veličiny se mění v čase. Tyto situace jsou velmi komplikované a dají se náročně vyjádřit matematickými modely. Pro získání první informace o probíhajícím procesu, je vhodné problematiku zjednodušit tak, že místo skutečného nestacionárního proudění využijeme úvahu o nenasyčeném stacionárním proudění (Kutílek et al., 2004).

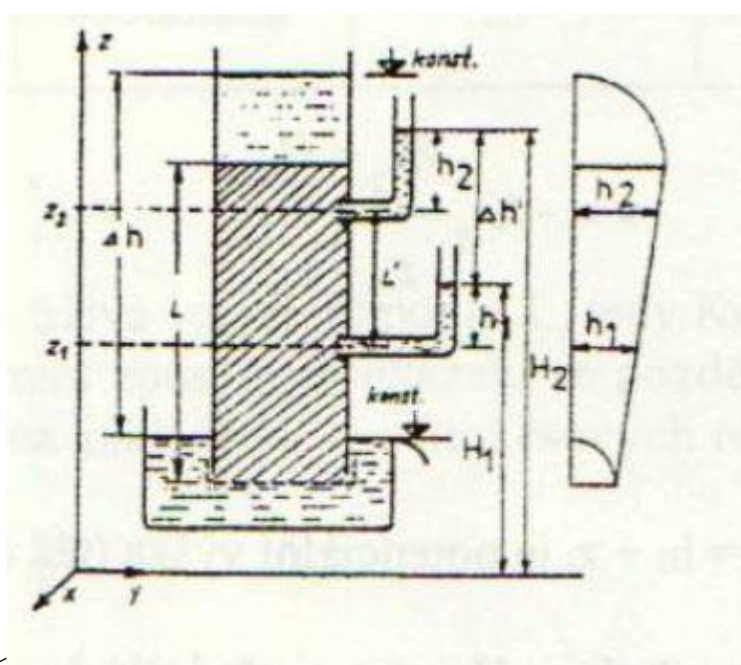
3.1.1. Darcyho zákon

Vycházíme z předpokladu, že $h \geq 0$ voda proudí ve všech půdních pórech. Dále víme, že v polních situacích je že $h \geq 0$ je $\Theta = mP$, přičemž m je v rozmezí 0,8 až 0,95. Uzavřený vzduch $P(1-m)$ je hodnota, kterou v této části zanedbáme a tedy budeme uvažovat $\Theta_s = P$.

Proudění vody v pórech půdy můžeme vyjádřit pomocí makroskopicky pozorovaných veličin. Pro lepší pochopení jak voda proudí v pórech, si ukážeme na dva pokusy, které jsou znázorněné na obrázku 1 a 2.



Obr. 1 – Stacionární proudění sloupcem půdy o průřezové ploše (kolmé na směr proudění) A (Převzato z: Kutílek et al., 2004)



Obr. 2 – Tlakové poměry při proudění vody sloupcem homogenní půdy (Převzato z: Kutílek et al., 2004)

Na obr. 1 můžeme vidět dvě konstantní hladiny v rozdílných výškách (Δh), které jsou sledovány přepadem. Zde se jedná o stacionární proudění (nemění se v čase). Voda proudí z levé do pravé části a protéká přes vodorovnou trubici o průřezové ploše A , která je vyplněna půdou. V pravé části, nám voda přepadá přes

přepad, kde měříme objem vody, který protekl půdou. Rychlost, kterou voda proudí, vyjádříme vztahem:

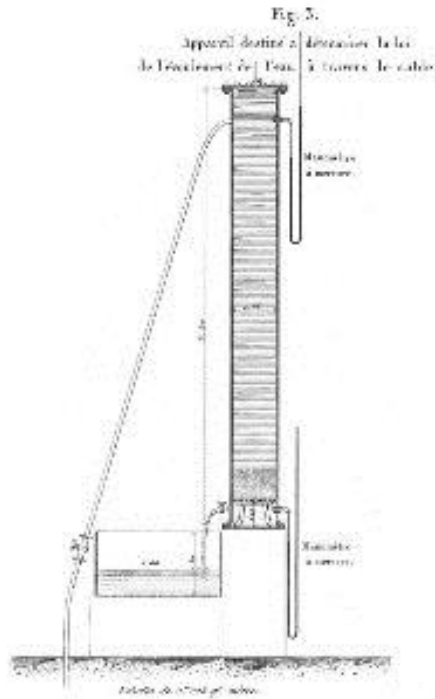
$$v = \frac{V}{A \cdot t} \quad [L \cdot T^{-1}] \quad (1)$$

Kde, v je makroskopická nebo-li darcyovská rychlost, A je průtočná plocha, t je čas, V je proteklý objem. Skutečná rychlost vody v pórech je ovlivněna především tvarem pórů. Střední rychlost v_p vyjádříme podílem makroskopické rychlosti v k pórovitosti P .

$$v_p = \frac{v}{P} \quad (2)$$

Rychlost se zvyšuje se zvětšujícím se Δh (viz obr.1), a naopak se snižuje při rostoucí délce L . Darcy dokázal lineární závislost, a tak se jmenuje jím dedukování transportní rovnice Darcyho zákon. (Kutílek et al., 2004)

Darcyho zákon je platný v nasyceném proudění podzemní vody a popisuje proudění vody v půdě, která protýká přes porézní materiály. Takovéto proudění v půdě můžeme popsat za pomoci makroskopicky pozorovaných fyzikálních veličin. Henry Darcy v roce 1856 v Dijon, provedl experiment (viz obr.3), ve kterém filtroval protékající vodu přes písek a další různé materiály o rozdílné zrnitosti. Hlavním důvodem proč Henry Darcy dělal tyto experimenty, byl požadavek na zlepšení čištění pitné vody v městě Dijon.



Obr.3 – Schéma Darcyho experimentu (Převzato z: Darcy (1856))

Na obrázku 3 je schéma Darcyho experimentu, ze kterého Henry Darcy zjistil přímo úměrnou závislost mezi průtokem vody Q a průřezové ploše S . Dále zjistil, že rozdíl tlakových výšek na vstupu a výstupu je nepřímo úměrný výšce zeminy L . Z těchto vztahů lze Darcyho zákon vyjádřit touto rovnicí:

$$Q = K_s S \frac{\Delta H}{L} \quad (3)$$

V rovnici (3) je K_s nasycená hydraulická vodivost, ΔH je rozdíl tlakové výšky. Rovnici (3) můžeme jiným způsobem vyjádřit jako makroskopickou rychlost proudění $v = Q/S$.

$$v = K_s \frac{\Delta H}{L} \quad (4)$$

Pokud budeme uvažovat proudění podle vertikální osy z (viz obr.4), kde Δz je limita blíží k nule můžeme rovnici (4) zapsat v diferenciálním tvaru takto:

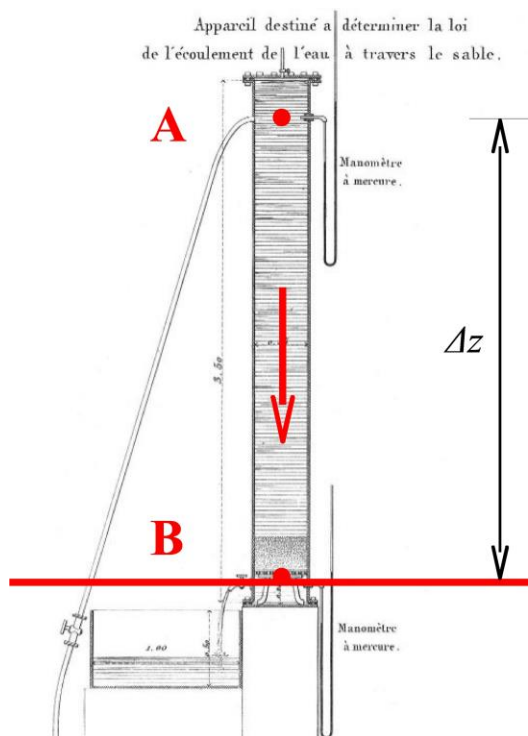
$$v = -K_s \frac{dH}{dz} \quad (5)$$

Kde poměr $\Delta H/L$ neboli dH/dz nazýváme hydraulický gradient. Záporné K_s v rovnici 5 nám určuje opačný směr proudění k ose z , pokud uvažujeme kladný směr vzhůru.

Obecný tvar Darcyho zákona, který je více rozměrný můžeme zapsat tímto způsobem:

$$v = -K_s \nabla H \quad (6)$$

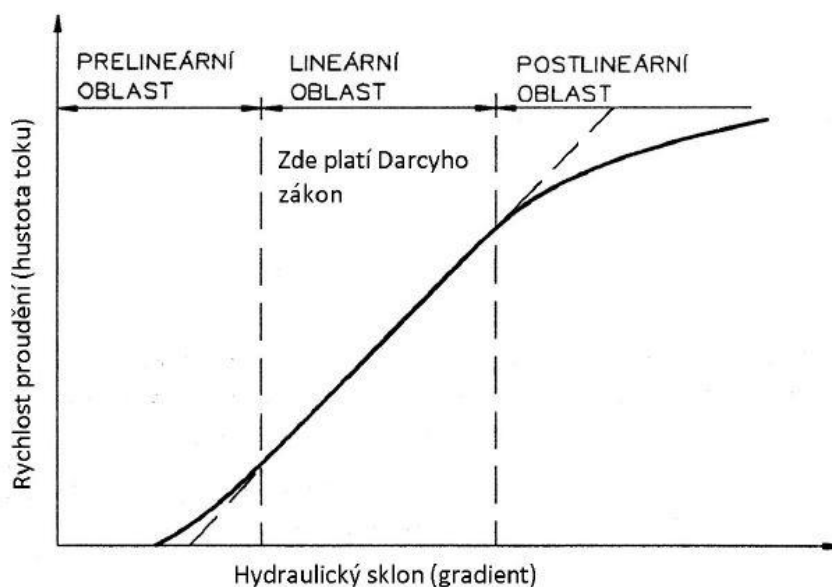
Kde H značí gradient celkového potenciálu, který je vyjádřený v jednotkách délky. (Pavlásek et Jačka, 2014)



Obr. 4 – Směr proudění při Darcyho experimentu z místa s vyšším (bod A) do místa s nižším (bod B) potenciálem (Převzato z: Pavlásek et Jačka, 2014; Upraveno z: Darcy (1856)).

3.1.2. Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon popisuje lineární závislost mezi rychlostí proudění nasyceným prostředím a hydraulickým (piezometrickým) gradientem. Darcyho zákon tedy platí pouze v lineární oblasti, kterou můžeme vidět na obrázku 5.



Obr.5 – Meze platnosti Darcyho zákona (Převzato z: Pavlásek et Jačka , 2014)

V prelineární oblasti je rychlost proudění vody velmi pomalá až nulová, příčinou toho jsou jemnozrné materiály. Nelineární závislost mezi hydraulickým gradientem a rychlostí proudění má za následek, že v této oblasti neplatí Darcyho zákon. Další příčinou, kdy neplatí Darcyho zákon, když jsou použity hrubozrné materiály. Tato oblast se nazývá postlineární a převažují zde setrvačné síly nad viskózními. Darcyho zákon tedy platí pouze v lineární oblasti proudění. Abychom zjistili, v jaké oblasti se proudění pohybuje, používáme Reynoldsovo číslo Re , které je bezrozměrné. Reynoldsovo číslo je pro nasycenou zónu vyjádřeno tímto vztahem:

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu} \quad (7)$$

Kde ρ je hustota kapaliny, μ je dynamická viskozita, v je makroskopická rychlost proudění kapaliny, d je efektivní průměr zrna. Reynoldsovo číslo je vyjádřeno jako poměr mezi viskózní silou a setrvační silou působící na kapalinu. V půdním prostředí je horní mez Darcyho zákona těžce realizovaná, tuto mez určuje kritická hodnota Reynoldsova čísla. Obtížně se také definuje hodnota efektivního

průměru zrna. Podle Hillel (1998) můžeme uvažovat lineární proudění v půdě, pokud je Reynoldsovo číslo menší než jedna. Naopak při hodnotách vyšších než jedna nastává postlineární proudění. (Pavlásek et Jačka, 2014)

3.2. Nasycená hydraulická vodivost

Nasycená hydraulická vodivost je charakteristická hydraulická vlastnost porézního prostředí, která umožňuje proudění vody v půdě. (Pokorná et Zábranská, 2007)

Nasycená hydraulická vodivost K_s má jednotky rychlosti a je závislá na vlastnostech kapaliny a vlastnostech porézního prostředí kterým kapalina protéká. Velikost nasycené hydraulické vodivosti ovlivňuje především viskozita μ a hustota kapaliny ρ . Dalším faktorem, který ovlivňuje hydraulickou vodivost je tvar pórů a zrn, a především zrnitostní složení porézního prostředí. Hydraulickou vodivost pak stanovujeme takto:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (8)$$

Kde g je gravitační zrychlení [$L \cdot T^{-2}$], k je propustnost půdy [L^2], μ je viskozita kapaliny [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$] a ρ je hustota kapaliny [$M \cdot L^{-3}$]. (Valentová, 1994)

Zemina	K_s (m/den)
Hrubozrný písek	100-200
Písek středního zrna	20-100
Jemný písek, písčité hlína	1-10
Hlinitý písek	0,1-2
Hlína ulehlá	0,01-0,1
Jíl	0,0000001-0,001
Hlína písčité ulehlá	0,1-0,5

Tab.1 – hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (Převzato z: Pokorná et Zábranská, 2007)

3.2.1. Vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti – metodou konstantním spádem

Při vyhodnocování dat nasycené hydraulické vodivosti vycházíme z Darcyho zákona. Hodnotu K_s , při použití metody s konstantním spádem, vypočítáme přímou úpravou Darcyho zákona. Při měření s konstantním spádem se hydraulický gradient nemění. Zjišťuje se objem vody V , který proteče přes zkoumaný vzorek do byrety za určitý čas t . (Šráček et Kuchovský, 2003).

Pro výpočet K_s touto metodou platí:

$$K_s = \frac{V_p * L}{t * \Delta H * S} \quad (9)$$

Kde V_p je proteklý objem vody, L je délka měřeného vzorku, t je čas za který protekl objem vody V_p , S je průřezová plocha vzorku.

3.3. Metody měření nasycené hydraulické vodivosti

3.3.1. Laboratorní metody

Pokud není možné měřit nasycenou hydraulickou vodivost přímo v terénu, musíme K_s měřit pomocí laboratorních metod, jsou provázeny chybami při měření.

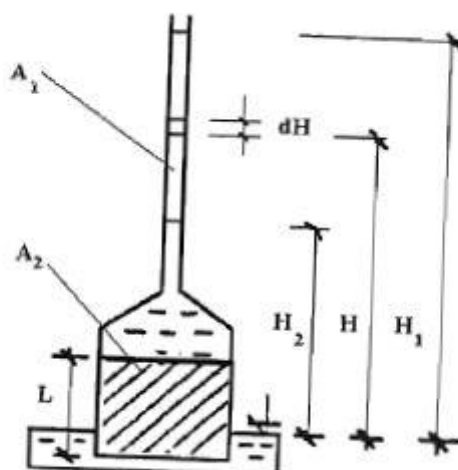
Jednou z hlavních nevýhod laboratorních metod patří výrazně menší objem vzorku oproti terénnímu měření. Takto malý objem nemusí vždy dostatečně reprezentovat správnost měření (Pavlásek et Jačka, 2014). Pokud bychom objem zvětšili, zlepšení výsledku nemusíme dosáhnout z těchto důvodů. Při odběru a transportu vzorků se mohou vzorky poškodit, případně může dojít ke zhutnění, nebo mohou vzniknout preferenční cesty podél vnitřní stěny válečku. Preferenční cesty podél stěny válečků můžeme odstranit tak, že potřeme vnitřní stěny válečku silikonem. Další chybou mohou být půdy s velmi jemnou půdní frakcí, kde dochází k vyplavování nejjemnějších půdních zrn. Pokud nezabráníme tomuto vyplavování zrn a budeme měřit opakovaně, docílíme větších hodnot K_s , naopak pokud zabráníme vyplavování zrn z válečku a budeme opakovaně měřit na stejném vzorku, hodnoty K_s se budou postupem času čím dál více snižovat. Wessolek et al. (1994) potvrzuje, že laboratorní metody jsou méně přesné než ty terénní, ale rozdíly mezi nimi byly poměrně malé. K inženýrsky podobným, i když statisticky významně vyšším hodnotám K_s u laboratorních metod ve srovnání s metodami terénními dospěl (Jačka

et al., 2014). Mezi hlavní výhody laboratorních metod je výpočet podle Darcyho zákona, a stanovení okrajových podmínek, mezi které patří teplota, jednosměrné proudění a hydraulický spád. Další výhodou laboratorních metod je postupné sycení. (Kutílek et al., 2004).

Laboratorní metody se dělí na metody s konstantním a metody s proměnným spádem. Přístroje s konstantním hydraulickým spádem jsou stejně jako ostatní laboratorní metody přímo vázány na Darcyho zákon. Konstantní hladina, kterou udržujeme například pomocí Mariottovy lahve nebo pomocí jiného regulátoru výšky hladiny (Eijkelkamp, 2013). Pokud je hydraulická vodivost větší můžeme průtok měřit za pomoci odběrných kalibrovaných nádob, naopak u nižších hodnot hydraulické vodivosti měříme pomocí kapilár. (Pokorná et Zabranská, 2007). Princip této metody je založen na udržování konstantního hydraulického gradientu (daného konstantním rozdílem hladin působícím na vzorek) po celou dobu měření.

Přístroj s proměnným hydraulickým spádem je zobrazen na obrázku 6. Proměnný spád můžeme měřit i pomocí laboratorního permeometru. Princip je založen na měnícím se hydraulickém gradientu v průběhu měření a vyhodnocení vychází opět stejně jako u metody s proměnným spádem z Darcyho zákona (Kutílek et Nielsen, 1994).

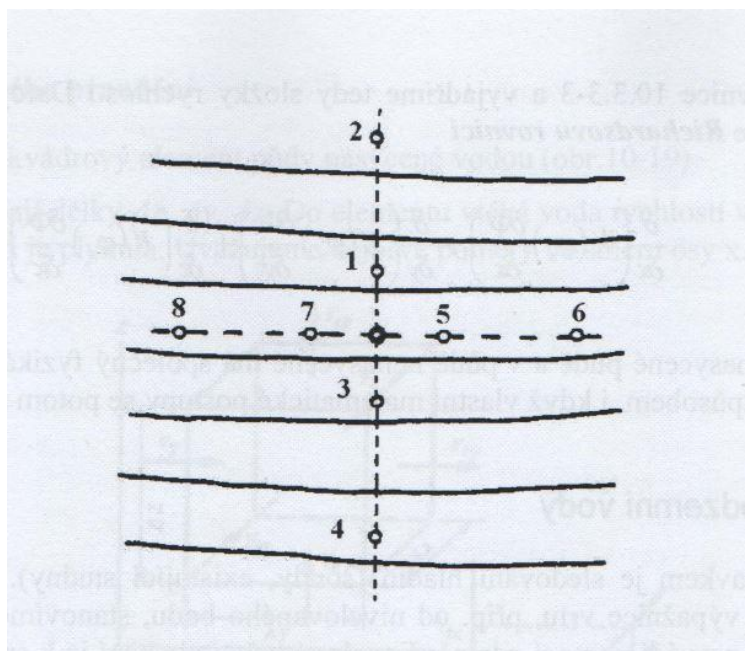
Nedostatečnou reprezentativnost laboratorního měření způsobuje především nedostačující velikost neporušeného půdního vzorku (většinou se používají Kopeckého válečky o objemu 100 cm^3). Konečné hodnoty dvou souběžně odebraných vzorků jsou často velmi rozdílné a proto je doporučený větší odběr vzorků, nebo zvolit terénní měření. (Pokorná et Zabranská, 2007).



Obr.6 – Schéma zařízení na měření hydraulické vodivosti zařízením s proměnným hydraulickým spádem (Převzato z: Pokorná et Zábranská, 2007)

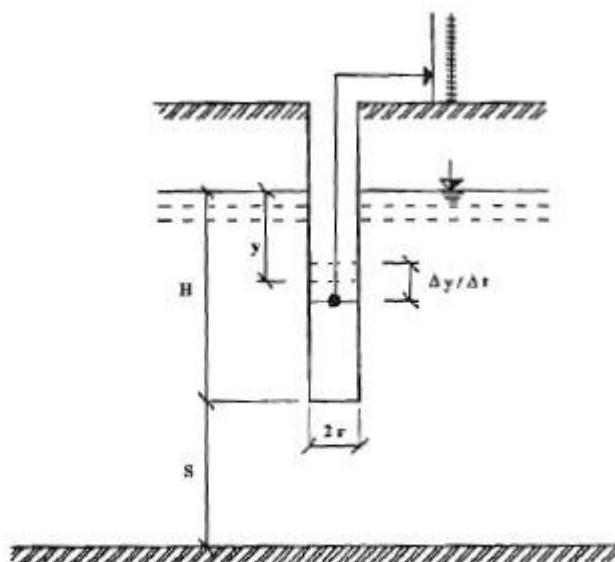
3.3.2. Terénní metody

S hladinou podzemní vody – základní metodou zjištění K_s v momentě, kdy je přítomna podzemní voda se považuje metoda čerpacího pokusu nebo-li čerpací zkouška. Zkoušku je vhodné provádět na podzim, z důvodu, že v tomto období jsou minimální výkyvy v hydrologickém cyklu. Pozorovací sondy umístíme do hydrologické kříže (viz. obr.7). Ve středu hydrologického kříže je umístěna čerpací studna. Čerpání probíhá konstantně a nepřetržitě po celou dobu čerpací zkoušky a měříme čerpané množství. Úroveň hladin odečítáme alespoň jedenkrát denně, ze studny a pozorovacích sond. Po určité době, kdy nepřetržitě čerpáme, konstantní množství se ustálí poměry a čerpané množství se rovná přítoku vody ze zvodnělé vrstvy do studny. (Pokorná et Zábranská, 2007).



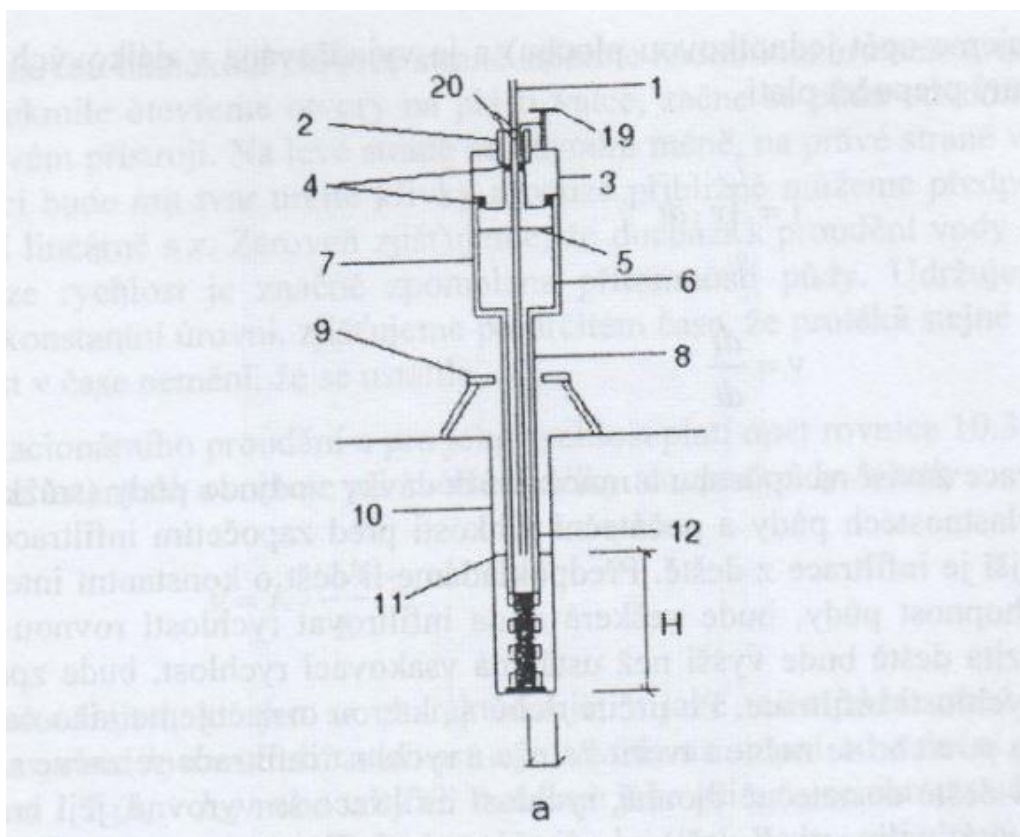
Obr.7- Hydrologický kříž (Převzato z: Pokorná et Zabranská, 2007)

Druhou metodou v případě kdy je přítomná podzemní voda je jednosondová metoda. Měření probíhá v nezapažené vrtané sondě. Před začátkem měření, vyhladíme stěny vrtu odčerpáním vody. Zjistíme ustálenou výšku hladiny H a čerpadlem snižujeme hladinu vody v sondě a poté sledujeme rychlost stoupání hladiny v sondě. Výsledné hodnoty charakterizují horizontální rychlost proudění, ale pokud je půdní prostředí heterogenního původu a pokud je zapažená sonda, lze zjistit i vertikální rychlost proudění. Na obrázku 8 můžeme vidět schéma jednosondové metody.



Obr.8 - Schéma jednosondové metody (Převzato z: Pokorná a Zabranská, 2007)

Bez podzemní hladiny vody – v momentě kdy není přítomna podzemní voda určujeme hydraulickou vodivost metodou guelpského permeamtru, kdy měříme stálý výtok Q , při konstantní výšce H . Guelpský permeametr (viz obr.9) je založen na principu Marriottovy lahve.



Obr.9- Guelpský permeametr (Převzato z: Pokorná et Zabranská, 2007)

1 – zavzdušňovací trubička, 2 – těsnicí objímka, 3 – vyjímatelná zátka s ventilem (19), 4 – těsnicí kroužky, 5 – hladina vody v zásobní nádržce, 6 – odečet hladiny vody v nádržce, 7 – zásobní nádržka, 8 – výtoková část permeamtru, 9 – fixovací trojnožka, 10 – vrtaná sonda o poloměru a , 11 – ustálená hladina vody v sondě H , 12 – perforovaná výtoková část, 13 – čidlo permeamtru, 20 – kalibrační značky pro nastavení hladiny vody v sondě

3.4. Biochar – Vliv na K_s

Biochar je organický materiál vyrobený pomocí pyrolýzy z biomasy. (Verheijen et al., 2010). Aplikováním biocharu do půdy ovlivňuje např. půdní pH, elektrická vodivost, katexová kapacita a úroveň živin. (Amonette and Joseph, 2009) Současně, aplikace biocharu zlepšuje celkovou sorpční kapacitu půdy (Uchimyia et al., 2011) a v důsledku toho snižuje toxicitu a mobilitu těžkých kovů. (Trakal et al., 2011; Trakal et al., 2014). V poslední době se vlivem aplikování biocharu na K_s , zabývají v těchto článcích. (Peake et al., 2014; Jeffery et al., 2015; Lim et al., 2016). Biochar významně ovlivňuje nasycenou hydraulickou vodivost a různými způsoby zadržování vody (bod vadnutí, polní vodní kapacitu). Biochar obecně zvyšuje polní vodní kapacita bod vadnutí, v závislosti na půdních vlastnostech a vlastnostech biocharu o 5 až 20%. (Laghari et al., 2015; Eibish et al., 2015). Účinek na K_s není plně prozkoumán a pravděpodobně závisí na velikosti částic, objemové hmotnosti půdy a poměru, velikosti a struktuře biocharu. (Castellini et al., 2015; Jeffery et al., 2015; Lim et al., 2016). Podle Lim et al. (2016) biochar zvyšuje hodnotu K_s v jílovitých půdách, ale v hrubých jemně písčítých půdách K_s klesá.

Podle Lim et al., (2016) biochar ovlivňuje nasycenou hydraulickou vodivost. Míra ovlivnění závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech biocharu. V tomto článku byl testován biochar získaný pyrolýzou a je tvořen z různých materiálů (dub letní, borovice, javor cukrový, ovesné slupky). Cílem toho výzkumu bylo vyvinout podpůrný nástroj, který předpovídá účinek přidaného biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost. Byly přidány čtyři rozdílné druhy biocharu do čtyř rozdílných zrnitostí půd (hrubý písek, jemný písek, hlína a jíl) k posouzení těchto účinků v poměru 0%, 1%, 2% a 5%. K_s bylo sníženo, když se přidal biochar do hrubého a jemného písku. Metodou, kterou Lim et al.,(2016) použili, byla metoda proměnného spádu. Nad vzorkem vytvořili 20 cm sloupec vody, který se postupně snižoval a protékal vzorkem. Tato metoda byla opakována 3-4 krát. U dvou písčítých vzorků biochar s větší velikostí částic (60%, > 1mm) snížil nasycenou hydraulickou vodivost mnohem více než menší částice (60%, <1mm). Na druhou stranu, po přidání biocharu (1% a 2%) do jílovitých hlín se K_s zvýšila. (Lim et al., 2016)

Podle Jeffery et al.,(2015) aplikování biocharu do písčítých půd nezlepšuje hydrologické funkce. V současné době se předpokládá, že biochar je prostředek ke zlepšení kvality půdy a tím zvýšit půdní živiny. Vedle blahodárných účinků na půdní

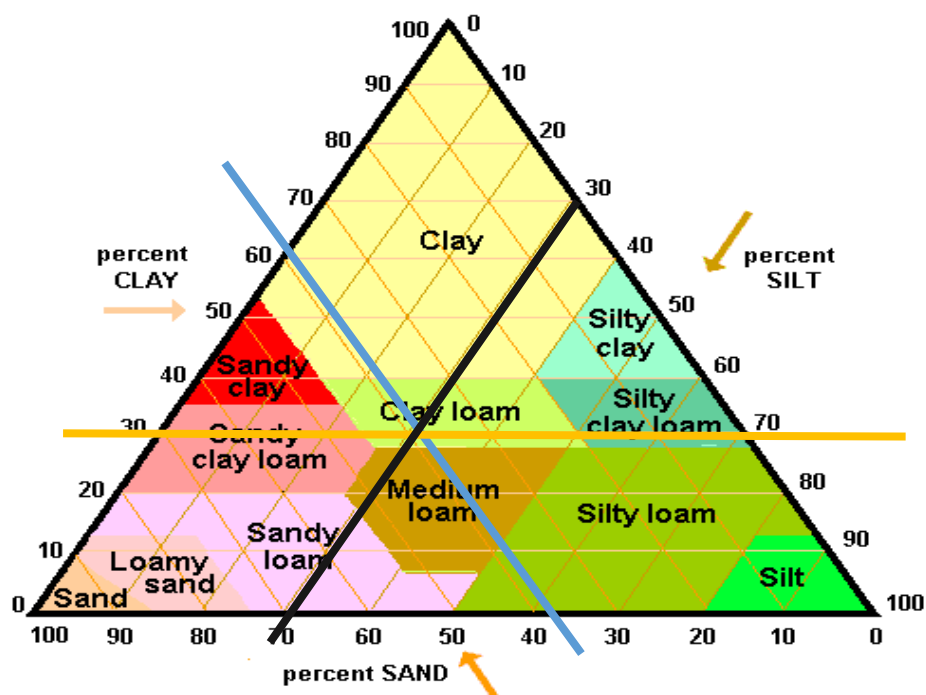
živiny se předpokládá, že biochar zlepšuje zadržování vody v půdě. Zatím ale není jasný důkaz pro toto tvrzení. Proto se Jeffery et al.,(2015) se rozhodli udělat dva experimenty na písčité půdě v Nizozemsku. V prvním experimentu Jeffery et al.,(2015) získali biochar pomalou pyrolýzou ze sena, ze severní Evropy kde bylo na jednom metru čtverečním přes dvanáct druhů travního porostu. Pomalá pyrolýza probíhala při dvou teplotách (400 °C a 600 °C) a byla aplikována na půdě v poměru 10 t.ha⁻¹. Ve druhém experimentu byl 400 °C biochar aplikován v poměru 1,5,20 a 50 t.ha⁻¹. Půdy byly analyzovány na zadržení vody v půdě, agregátní stabilitu a další fyzikální parametry půd. U druhého experimentu byla pro zjištění nasycené hydraulické vodivosti použita metoda dvouválcového infiltrometru pro jedno vegetační období. Jeffery et al.,(2015) nezjistili žádný významný dopad při použití biocharu na zadržování vody v půdě ani v jednom z experimentů. Ani u agregátní stabilita nebyla nijak významně ovlivněna. Jeffery et al.,(2015) použili analýzu XRT ke zjištění pórovitosti biocharu. Tato analýza ukázala, že pórovitost u 400°C biocharu je 48% a u 600°C je pórovitost 57%. Více než 99% vnitřních pórů biocharu bylo spojeno s povrchem, což naznačuje potenciální roli biocharu pro zlepšení retenční schopnosti půdy. Nicméně, biochar byl velmi hydrofobní a Jeffery et al.,(2015) předpokládají, že tato vlastnost brání vodě v infiltraci do částic biocharu. (Jeffery et al.,2015)

Vliv biocharu na jílovité půdy je popsán v Castellini et al., (2015). Hlavním cílem této studie bylo vyhodnotit vliv účinků biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost K_s , na nenasycenou hydraulickou vodivost K_h , zadržování vody, kapacitní ukazatele například makroporozitu, vzdušnou kapacitu a relativní polní kapacity, objemovou hmotnost v jílovitých půdách. Biochar byl vytvořený metodou pomalé pyrolýzy při teplotě 500°C, z prořezaných ovocných stromů. Půda byla odebrána v Itálii v oblasti Foggia a byla klasifikována jako jemná půda, která obsahovala 42,7% jílu, 27,7% prachu a 29,6% písku. Bylo použito pět sloupců zeminy v poměru 0-5-10-20-30 g biocharu na 1kg půdy. Sloupce byly vloženy do půdy na 30 měsíců, dokud nebylo dosaženo rovnovážných půdních podmínek. Nebyly zjištěny žádné významné rozdíly mezi hodnotami K_s , která byla měřena metodou proměnného spádu a bylo měřeno v šesti sériích, kde doba jedné série byla tři měsíce.

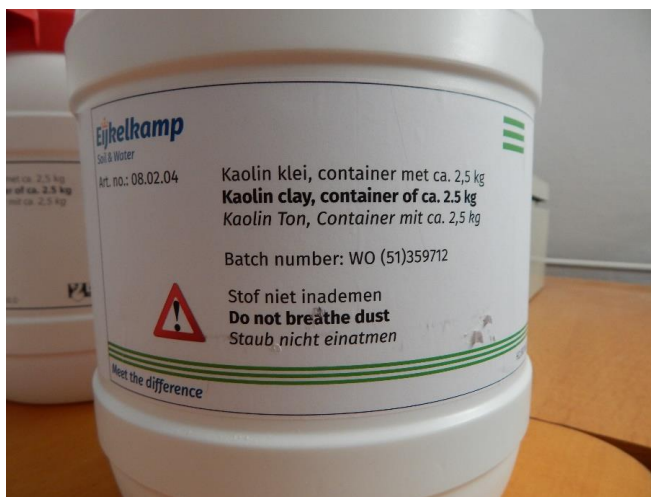
4. Metodika

4.1. Charakteristika měřeného materiálu

V této práci byla použita jemnozem (0,05-2mm), která byla získána z Litavky. Zemina z Litavky obsahovala 2,15% uhlíku. Kolegové z katedry zaznamenali, že celkové změny uhlíku jsou zanedbatelné, to je předmětem dalšího výzkumu. Pro jemnozem byla stanovena čára zrnitosti, kterou můžeme vidět na grafu č.1. Vlivem přidání 20% jílu, došlo ke změně procentuálního složení půdy. Postup přípravy je popsán v kapitole 4.2.1. Konečné procentuální složení pak vypadalo následovně 30% jílu (<0,002 mm), 31,1% prachu (0,002-0,05 mm) a 38,9% písku (0,05-2 mm), ze kterého jsme zjistili, že půdním druhem je jílovitá hlína (angl. Clay loam, viz obr. 10). Do této půdy byl v různém množství aplikován biochar, který byl získán ze stopek vinných hroznů. Biochar byl získán pomocí pyrolýzy a obsahoval 1,45% dusíku, 1,7% vodíku a 12,5% kyslíku. Velikost částic biocharu byla menší než 0,5 mm. Celkový obsah uhlíku je 60 až 70 % hmotnosti (dle dvou různých analýz). Podrobnou charakteristiku testovaného biocharu uvádí Trakal et al. (2014). Dále byl použitý jíl (Kaolin clay) od nizozemské firmy Eijkelkamp (viz obr. 11).



Obr. 10 – Trojúhelníkový klasifikátor Amerického Ministerstva zemědělství (upraveno z: Hillel, 1998)



Obr. 11 – jíl od firmy Eijkelkamp

V tabulce číslo 2 můžeme vidět objemové hmotnosti, hmotnost zůstatkové vody, hmotnostní vlhkost půdy, pórovitost, poměr vody a pórovitosti a rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti pro první sérii měření. Objemová hmotnost vzorků s biocharem byla nevýrazně nižší než u vzorků bez biocharu, z toho důvodu, že biochar má velmi malou objemovou hmotnost a to $0,16 \text{ g.cm}^{-3}$. Biochar má větší schopnost sorpce vody a proto si biocharem obohacené vzorky udržely více vody než vzorky bez biocharu. Pórovitost vzorků s biocharem a bez biocharu je prakticky shodná. Z důvodu bobtnání vzorků s biocharem je hodnota odhadované pórovitosti na základě objemové hmotnosti a hustoty pevných částic výrazně nižší než objem vody ve vzorku. Ukázka bobtnání vzorku s 5 % biocharu je zobrazena na obr.12.

V tabulce číslo 3 můžeme vidět objemové hmotnosti, hmotnost zůstatkové vody, hmotnostní vlhkost půdy, pórovitost, poměr vody a pórovitosti a rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti pro druhou sérii měření. Objemová hmotnost vzorků s biocharem byla velmi podobná i u vzorků bez biocharu, i přesto že biochar má velmi malou objemovou hmotnost a to $0,16 \text{ g.cm}^{-3}$. To, že objemová hmotnost je velmi podobná u obou typů vzorků, je zapříčiněno, že přídavek biocharu byl pouze 2%. Pórovitost vzorků s biocharem a bez biocharu je opět prakticky shodná. Vzorky s přídavkem 2 % biocharu si udržely také více vody než vzorky bez biocharu, ale výrazně méně než vzorky s 5 % biocharu. Z důvodu bobtnání vzorků s biocharem je opět pórovitost nižší (i když ne tak výrazně jako u 5 % biocharu) než objem vody ve vzorku. Ukázka méně výrazného bobtnání vzorku s 2 % biocharu je zobrazena na obr.13.

Tab č.2 – charakteristické vlastnosti vzorků v první sérii po měření

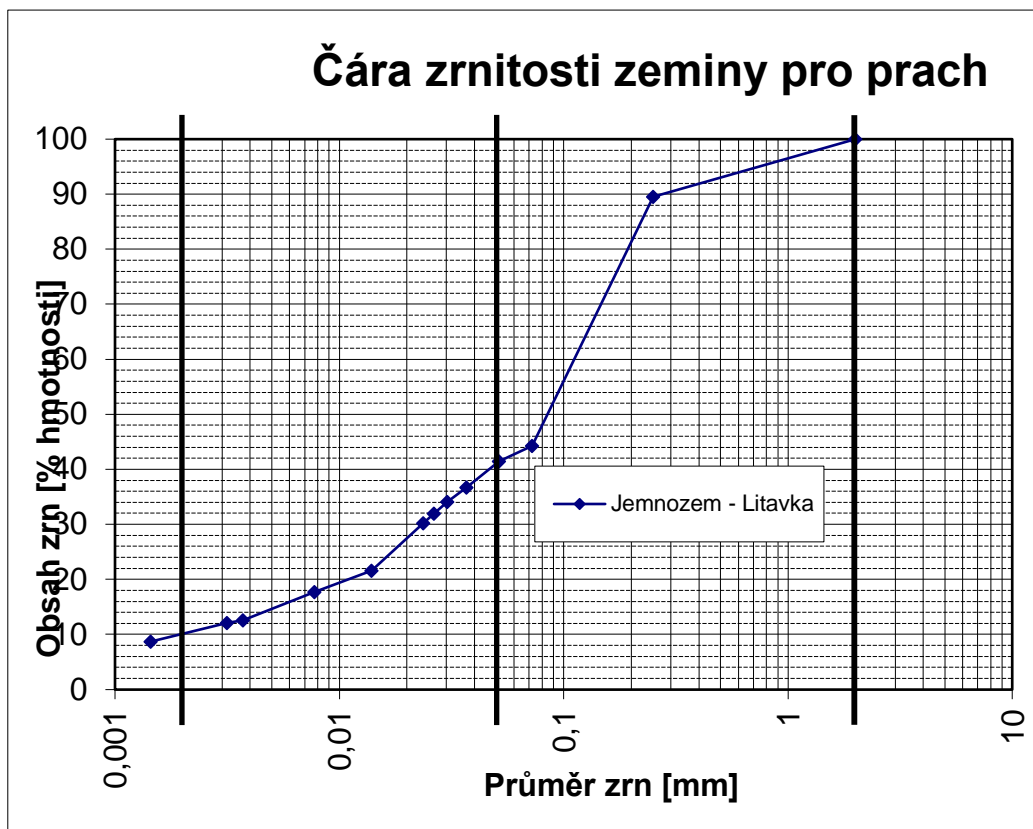
Objemová hmotnost suchého vzorku	Hmotnost zůstatkové vody=maximální objemová vlhkost [%]	Hmotnostní vlhkost půdy	Pórovitost	Poměr hmotnosti vody a pórovitosti	Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti	číslo válečku
[g/cm ³]	[g]=cm ³	[%]	[-]			[-]
1,139	59,75	52,46	0,546	1,095	5,17372881	89*
1,1407	59,26	51,95	0,545	1,087	4,75152542	81*
1,1389	60,06	52,74	0,546	1,100	5,47974078	92*
1,143	60,46	52,90	0,544	1,111	6,04325025	73*
1,1382	58,21	51,14	0,546	1,066	3,60182453	95*
1,1425	54,99	48,13	0,554	0,993	-0,38109375	80
1,1451	55,22	48,22	0,553	0,999	-0,04953125	94
1,1432	55,67	48,70	0,553	1,006	0,32625000	76
1,1468	54,98	47,94	0,552	0,996	-0,22312500	83
1,1467	56,12	48,94	0,552	1,017	0,91296875	77

*vzorky s přídavkem 5 % biocharu

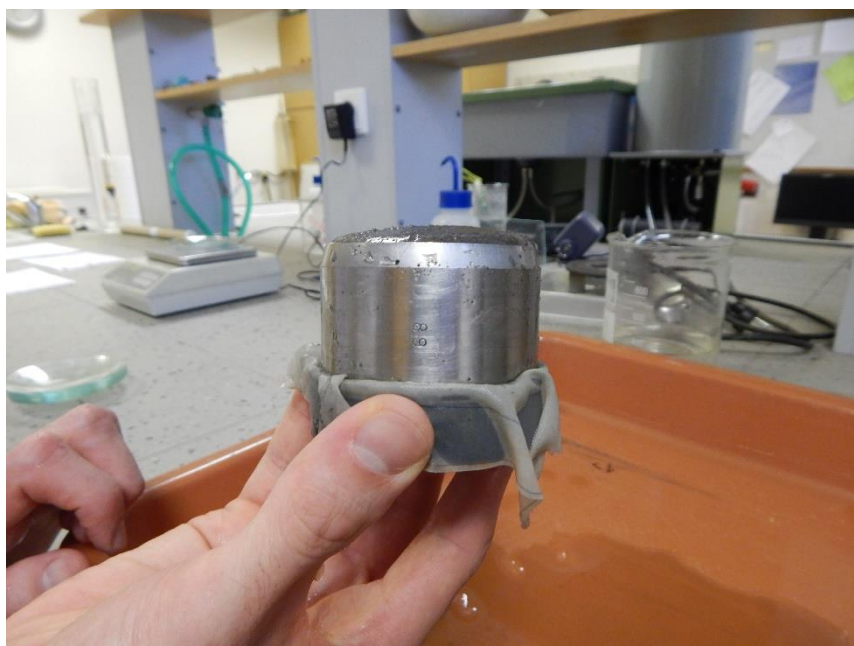
Tab č.3 – charakteristické vlastnosti vzorků v druhé sérii po měření

Objemová hmotnost suchého vzorku	Hmotnost zůstatkové vody=maximální objemová vlhkost [%]	Hmotnostní vlhkost půdy	Pórovitost	Poměr hmotnosti vody a pórovitosti	Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti	číslo válečku
[g/cm ³]	[g]=cm ³	[%]	[-]			[-]
1,1415	56,04	49,09	0,550	1,018	0,999	68*
1,1422	56,98	49,89	0,550	1,036	1,966	63*
1,1384	56,93	50,01	0,552	1,032	1,767	51*
1,1392	56,73	49,80	0,551	1,029	1,598	53*
1,1438	56,83	49,69	0,550	1,034	1,879	49*
1,146	55,71	48,61	0,552	1,009	0,476	56
1,1448	55,05	48,09	0,553	0,996	-0,231	66
1,1429	54,84	47,98	0,554	0,991	-0,515	67
1,1426	54,65	47,83	0,554	0,987	-0,717	72
1,1472	55,82	48,66	0,552	1,011	0,632	69

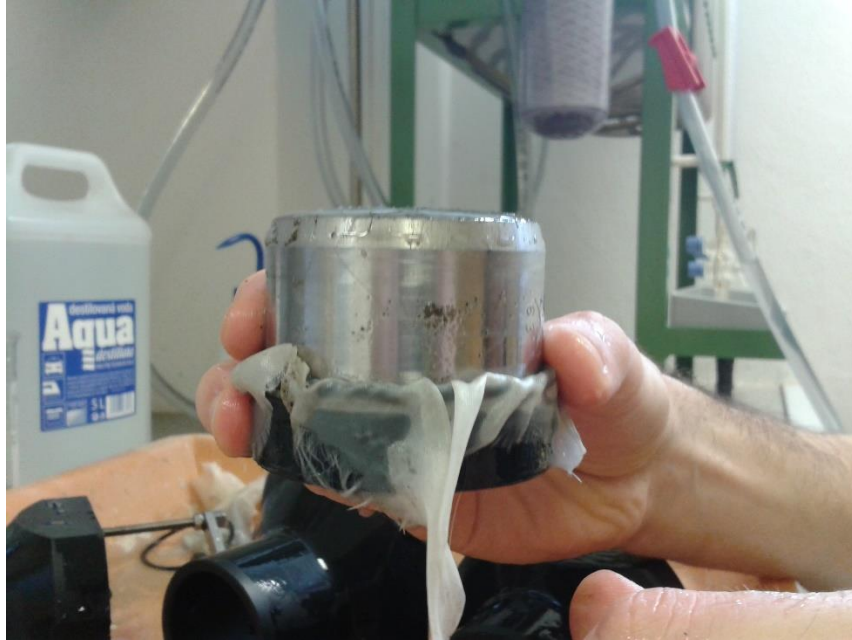
*vzorky s přídavkem 2 % biocharu



Graf č.1 – Čára zrnitost zeminy pro prach



Obr. 12 – vzorek č.89 (I. Série), výrazné bobtnání 5% biocharu



Obr. 13 – vzorek č.63 (II. Série), méně výrazné, skoro zanedbatelné bobtnání 2% biocharu

4.2. Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků

4.2.1. Příprava a plnění vzorků

Přípravu a plnění vzorků jsem prováděl společně s mým vedoucím bakalářské práce Ing. Lukášem Jačkou v laboratoři Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování.

Vzorky jsme připravili pro dvě série měření. U první série měření se měřilo s 20% jílu a 5% biocharu. Příprava probíhala tak, že jsme proseli zeminu na částičky menší než 2mm a připravili jsme si potřebný objem. Potřebný objem pro naplnění jednoho Kopeckého válečku byl zhruba 130g. Z celkové hmotnosti zeminy jsme si zjistili přesnou hmotnost 20% jílu a 5% biocharu. Tyto dvě složky jsme poté přidali do zeminy a bylo důležité, aby směs byla důkladně promíchána (viz obr. 14). Při míchání bylo dobré použít roušky, proti jemným částičkám jílu a biocharu. Důkladným promícháním jsme dosáhli homogenní směsi, kde jsou vlastnosti v celé směsi. Tuto směs jsme poté vkládali do pěti Kopeckých válečků z nerezů o výšce 4cm a objemu 100 cm³. Každý z válečků má na vnější straně vyryté identifikační číslo, které slouží ke snadnému rozeznání vzorků. Předtím než jsme začali válečky

plnit směsí, bylo nutné každý z válečků očistit a zvážit na velmi přesné váze s přesností na setinu (viz obr. 15). Zváženy byly také páry plastových víček, kde každý pár byl přiřazen jednomu válečku. Plnění vzorků (viz obr. 16) probíhalo tak, že směs byla vkládána do válečků a následně poklepáním jsme směs ve válečku hutnili, aby nedocházelo k preferenčním cestám a následnému ovlivnění proudění. Poklepání jsme provedli zhruba desetkrát a poté jsme doplnili směs. Vzorky byly plněny téměř vyschlou směsí s hmotnostní vlhkostí nižší než 1 %. Naplněné válečky jsme zvážili i s oběma víčky. Pro pět válečků, kde byla zemina, 20% jílu a 5% biocharu jsme hutnili vzorky na velmi podobnou hmotnost a to na 113,99g. Stejný postup plnění byl proveden i u zbylých pěti vzorků, které obsahovaly zeminu a 20% jílu. Opět jsme se snažili dosáhnout velmi podobné hmotnosti u všech pěti vzorků a to na 114,48g. Přebytečný materiál nebyl vyhozen, nýbrž uchován pro možnost dalšího měření. Stejný postup přípravy a plnění byl použit i pro druhou sérii vzorků, s tím rozdílem, že v druhé sérii vzorků byl obsah u pěti vzorků složen ze zeminy, 20% jílu a 2% biocharu a zbylých pět vzorků obsahoval zeminu a 20% jílu. Průměrná hmotnost pro zeminu, 20% jílu a 2% biocharu byla 114,10g a pro zeminu a 20% byla průměrná hmotnost 114,47g.



Obr. 14 – Směs nivní zeminy 5% biocharu a 20% jílu



Obr. 15 – Vážení na velmi přesné váze



Obr. 16 – Plnění vzorků

Před začátkem měření jsme museli vložit vzorky do držáků. K tomu jsme potřebovali držáky vzorků, hydrofilní gázu, gumičky, sítko a samotné vzorky. Vzorky jak už bylo řečeno v předchozím odstavci, byly vloženy do Kopeckého válečků. Horní hrana válečku je lehce seříznuta do špičky a dolní hrana je zarovnána (tupá). Spoj mezi horní hranou válečku a držákem byl vymazán silikonem. Před vymazáním silikonem, bylo důležité pořádně držák vyčistit, aby spoj mezi držákem a horní hranou válečku byl dobře utěsněný, aby nedocházelo k nepatřičnému proudění.

Umístění válečku do držáku probíhalo tak, že nejprve jsme odstranili víčko z tupé hrany válečku. Víčka musela být odstraněna velmi opatrně, aby nevytáhla směs ven z válečku a nedošlo tak k poškození vzorku. Na tupou hranu válečku se položila gáza a přes ni gumička pro upevnění gázy (viz obr. 17). Na gázu jsme položili sítko a poté vzorek pomalu otočili a opatrně odstranili i druhé víčko. Seříznutou hranou válečku jsme vložili do držáku a pečlivě dotáhli, aby vzorek dobře držel v držáku (viz obr. 18). Poté jsme celý držák se vzorkem, vložili do laboratorního permeometru na očíslanou pozici. V první sérii byly vzorky s biocharu na pozicích jedna až pět a vzorky bez biocharu byly na pozicích šest až deset. V druhé sérii jsme vzorky rozmístili náhodně, abychom vyloučili možnou chybu vlivem rozdílné průtočnosti trubiček přístroje.



Obr. 17 – Připevněná gáza gumičkou



Obr. 18 – Pevně připevněný vzorek v držáku

4.2.2. Sycení a měření vzorků

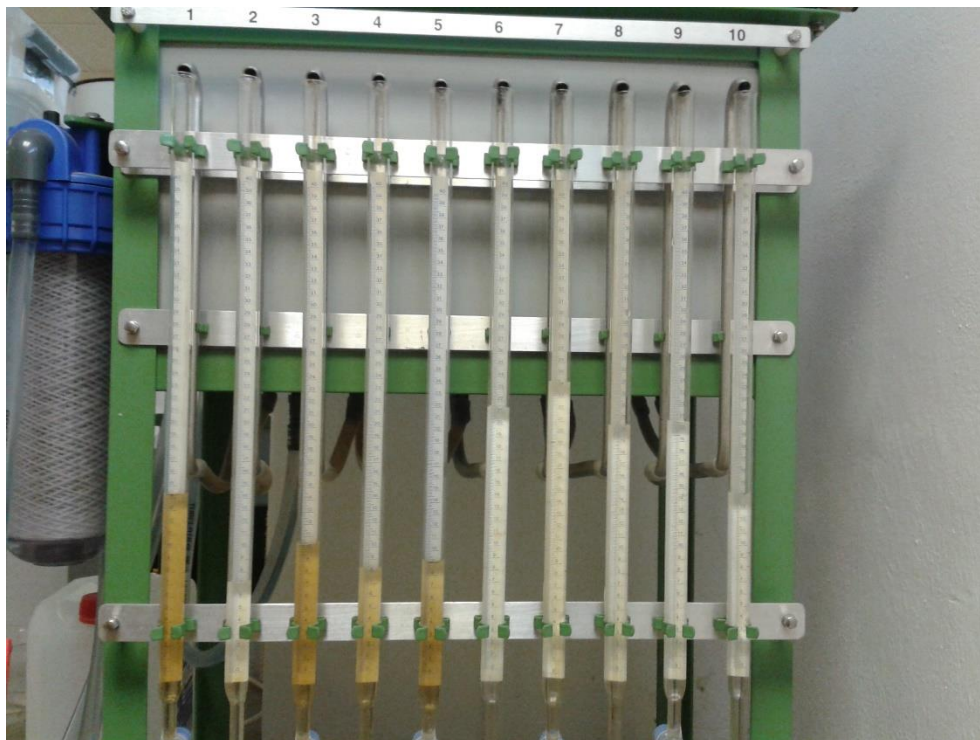
Sycení a měření vzorků probíhalo na laboratorním permeamtru od nizozemské firmy Eijkelkamp (viz obr. 19) známou metodou konstantním spádem. Držáky byly vloženy do laboratorního permeamtru. Do laboratorního permeamtru jsme nalili destilovanou vodu, pod dolní okraj válečku. V tuto chvíli nastala doba sycení, která závisí na druhu použitého materiálu. V našem případě, jsme se rozhodli nastavit dobu sycení na jeden týden. Každý den byla hladina zvednuta zhruba o 0,7 cm. Sycení se provádělo z toho důvodu, aby voda přitékající zespodu do vzorku vytlačila vzduchové bubliny a nedocházelo k negativnímu ovlivnění měření.



Obr. 19 – laboratorní permeametr od firmy Eijkelkamp

Nasyčená hydraulická vodivost byla měřena ve dvou časově rozdílných sériích. Jak již bylo dříve řečeno, tak první série byla měřena na deseti vzorcích, z nichž polovina obsahovala zeminu, 20% jílu a 5% biocharu, druhá polovina vzorků obsahovala zeminu a 20% jílu. Před samotným měřením, jsme ještě museli dát do držáků plastové násosky, které odváděly prosakující vodu do byrety. Aby násosky prováděly vodu správně, bylo nutné je naplnit vodou, aby v nich nebyly vzduchové bubliny. Násosky se používají jenom u měření konstantním spádem. Byrety jsou opatřeny kohoutkem, který je před začátkem měření uzavřený. Před každým měřením bylo potřeba změřit teplotu vody a odečíst výšku hladiny vně a uvnitř

držáku. Tuto hladinu jsem odečetl z mikrometru, kde se rozsvítila červená kontrolka po dotyku hrotu s hladinou. Nejdůležitějším údajem měření je však jaký objem vody, nateče do byrety za daný čas (viz obr. 20). Všechny tyto hodnoty jsem si zaznamenal do zápisníku.



Obr. 20 – Byrety laboratorního permeamtru naplněné vodou (snímek z první série měření)

První sérii jsem začal měřit od 21.1.2016 po dobu čtrnácti dnů. Měření druhé série bylo započato o měsíc později. Časový krok mezi jednotlivými měřeními byl střídavý, první týden muselo být měření podrobnější k zachycení snížení K_s . Jelikož průtočnost touto směsí nebyla příliš vysoká, nechal jsem měřit K_s i přes noc a tím jsme dosáhli navýšení dat a zpřesnění výsledků. Druhý týden byl již trochu volnější a stačilo naměřené hodnoty odečíst jednou za zhruba dvacet čtyři hodin.

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru MS Excel 2013 a hodnoty nasycené hydraulické vodivosti byly vypočítány podle vzorce číslo 9, který je popsán v kapitole 3.2.1.

5. Výsledky

Měření probíhalo ve dvou sériích, v lednu a únoru roku 2016. V obou sériích bylo deset vzorků (celkem 20 měření). I přes maximální snahu se mohou u některých vzorků vyskytnout chyby měření.

5.1. Série I– vzorky s nivní zeminou a 20% jílu

V tabulce číslo 4 můžeme vidět výsledné hodnoty K_s jednotlivých vzorků. U prázdných buněk došlo k tomu, že doba trvání měření byla moc dlouhá a obsah vody proteklý vzorkem se již do byrety nevešel. Na grafu číslo 2 můžeme hezky vidět jak K_s prudce klesá a s přibývajícím časem postupně klesá s daleko nižším spádem. K prudkému poklesu dochází právě na začátku měření, kdy se měří menší časové intervaly, kdy jsou vzorky nejvíce průtočné. Zprůměrované hodnoty K_s se pohybují od $3,53 \cdot 10^{-7}$ do $1,00 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$.

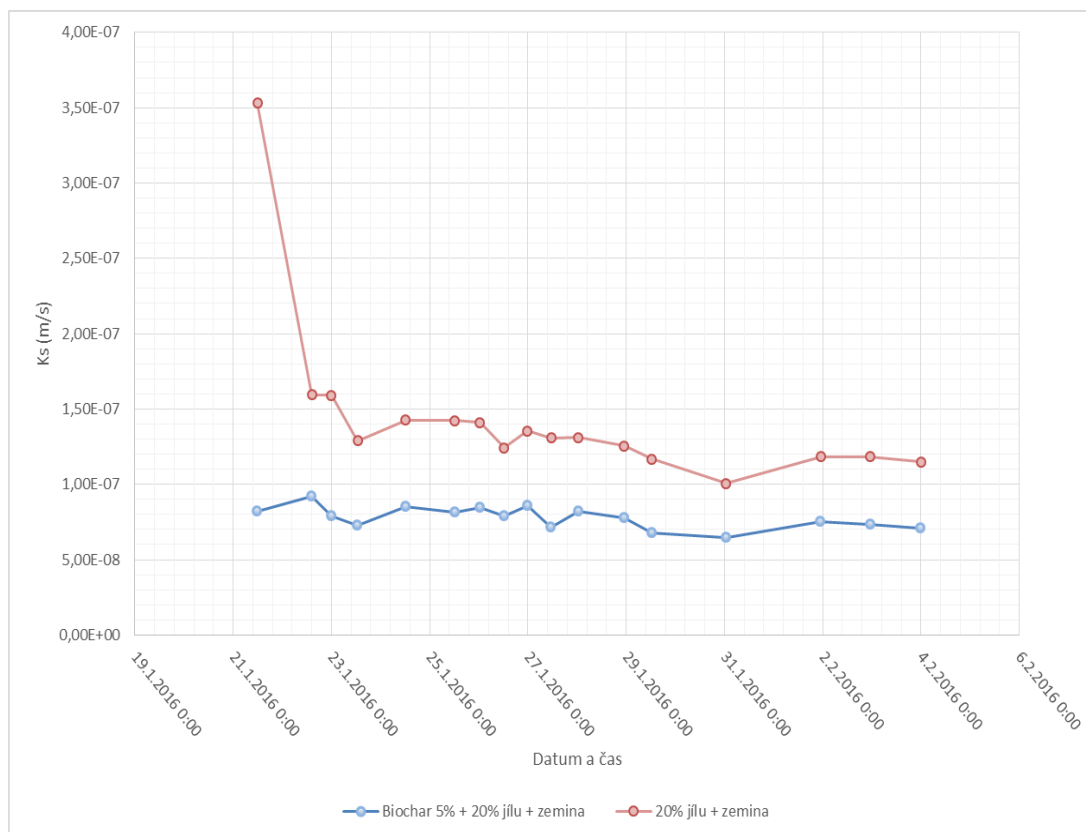
Pro každý den měření byla vytvořena popisná statistika (viz tab.5), která obsahuje směrodatnou odchylku, koeficient variace, minimální a maximální hodnoty a rozsah. Koeficient variace značně klesá. Maximální hodnota koeficientu variace je více než sedmkrát vyšší než minimální hodnota.

Tab.4 – Hodnoty K_s pro vzorky se zeminou a 20% jílu, série I

Vzorky s 20% jílu + zemina							
	pozice na per.	6	7	8	9	10	Průměr [m.s-1]
m.č	Datum	K_s vz č.80	K_s vz č.94	K_s vz č.76	K_s vz č.83	K_s vz č.77	
1	21.1.2016 11:50	0,0000272	0,0000597	0,0000200	0,0000145	0,0000551	3,53E-07
2	22.1.2016 14:30	0,0000143	0,0000123	0,0000258	0,0000137	0,0000137	1,60E-07
2 3	23.1.2016 0:00	0,0000170	0,0000178	0,0000183	0,0000152	0,0000114	1,59E-07
3	23.1.2016 12:45	0,0000167	0,0000003	0,0000196	0,0000143	0,0000136	1,29E-07
3 4	24.1.2016 12:15		0,0000156		0,0000136	0,0000136	1,43E-07
4	25.1.2016 12:15	0,0000147	0,0000149	0,0000173	0,0000121	0,0000122	1,42E-07
4 5	26.1.2016 0:30	0,0000144	0,0000144	0,0000166	0,0000126	0,0000125	1,41E-07
5	26.1.2016 12:15	0,0000143	0,0000040	0,0000162	0,0000163	0,0000113	1,24E-07
5 6	26.1.2016 23:45	0,0000144	0,0000143	0,0000156	0,0000117	0,0000117	1,36E-07
6	27.1.2016 11:17	0,0000114	0,0000146	0,0000163	0,0000119	0,0000111	1,31E-07
6 7	28.1.2016 0:37	0,0000132	0,0000136	0,0000161	0,0000117	0,0000109	1,31E-07
7	28.1.2016 22:57	0,0000127	0,0000133	0,0000157	0,0000103	0,0000108	1,26E-07
8	29.1.2016 12:30	0,0000117	0,0000133	0,0000127	0,0000102	0,0000106	1,17E-07
8 9	31.1.2016 0:52		0,0000133		0,0000085	0,0000084	1,00E-07
9	1.2.2016 23:00	0,0000118	0,0000114	0,0000157	0,0000105	0,0000098	1,18E-07
10	2.2.2016 23:10	0,0000115	0,0000118	0,0000161	0,0000103	0,0000095	1,18E-07
11	3.2.2016 23:52	0,0000111	0,0000114	0,0000159	0,0000095	0,0000096	1,15E-07

Tab. 5 – Popisná statistika pro vzorky se zeminou a 20% jílu

Popisná statistika				
Směrodatná odchylka [m.s-1]	Koeficient variace [%]	min	max	rozsah
2,07E-05	58,74	1,45E-07	5,97E-07	4,52E-07
5,53E-06	34,64	1,23E-07	2,58E-07	1,34E-07
2,80E-06	17,55	1,14E-07	1,83E-07	6,88E-08
7,40E-06	57,39	3,39E-09	1,96E-07	1,92E-07
1,19E-06	8,35	1,36E-07	1,56E-07	2,08E-08
2,17E-06	15,27	1,21E-07	1,73E-07	5,21E-08
1,69E-06	11,97	1,25E-07	1,66E-07	4,15E-08
5,12E-06	41,20	4,00E-08	1,63E-07	1,23E-07
1,74E-06	12,86	1,17E-07	1,56E-07	3,89E-08
2,26E-06	17,28	1,11E-07	1,63E-07	5,14E-08
2,01E-06	15,36	1,09E-07	1,61E-07	5,21E-08
2,17E-06	17,23	1,03E-07	1,57E-07	5,39E-08
1,34E-06	11,50	1,02E-07	1,33E-07	3,13E-08
2,82E-06	28,07	8,37E-08	1,33E-07	4,94E-08
2,28E-06	19,29	9,83E-08	1,57E-07	5,85E-08
2,56E-06	21,62	9,46E-08	1,61E-07	6,62E-08
2,59E-06	22,55	9,49E-08	1,59E-07	6,36E-08



Graf č.2 – Naměřené hodnoty K_s

5.2 Série I– vzorky s nivní zeminou, 5% biocharem a 20% jílu

U této série mají všechna měření předpokládané nižší hodnoty (viz tab.6), než u vzorků bez biocharu. Žádný ze vzorků nevykazuje vyšší hodnoty, tudíž můžeme říct, že se nevyskytla žádná chyba při měření. Hodnoty K_s pro jednotlivé vzorky, mírně klesají, to může být příčinou postupného bobtnání biocharu, což způsobuje uzavírání pórů a snižuje průtočnost půdy. V grafu číslo 1 můžeme vidět porovnání se vzorky bez biocharu, které vykazovaly vyšší hodnoty K_s . Zprůměrované hodnoty K_s se pohybují od $6,49 \cdot 10^{-8}$ do $9,20 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$.

Pro každý den měření byla vytvořena popisná statistika (viz tab.7), která obsahuje směrodatnou odchylku, koeficient variace, minimální a maximální hodnoty a rozsah. Koeficient variace značně klesá a vzhledem ke vzorkům bez biocharu v I sérii dosahuje většinou nižší hodnoty. Maximální hodnota koeficientu variace je až osmkrát vyšší než minimální hodnota.

Tab.6 - Hodnoty K_s pro vzorky se zeminou, 5% biocharu a 20% jílu

Vzorky s 5% biocharu + 20% jílu + zemina							
	pozice na per.	1	2	3	4	5	Průměr [m.s-1]
m.č	Datum	K_s vz č.89	K_s vz č.81	K_s vz č.92	K_s vz č.73	K_s vz č.95	
1	21.1.2016 11:50	0,0000107	0,0000108	0,0000077	0,0000065	0,0000053	8,21E-08
2	22.1.2016 14:30	0,0000098	0,0000066	0,0000164	0,0000074	0,0000058	9,20E-08
2 3	23.1.2016 0:00	0,0000105	0,0000069	0,0000084	0,0000067	0,0000070	7,90E-08
3	23.1.2016 12:45	0,0000095	0,0000024	0,0000085	0,0000072	0,0000088	7,28E-08
3 4	24.1.2016 12:15	0,0000101	0,0000077	0,0000084	0,0000087	0,0000079	8,54E-08
4	25.1.2016 12:15	0,0000121	0,0000047	0,0000103	0,0000064	0,0000073	8,15E-08
4 5	26.1.2016 0:30	0,0000093	0,0000100	0,0000070	0,0000083	0,0000076	8,44E-08
5	26.1.2016 12:15	0,0000077	0,0000090	0,0000064	0,0000098	0,0000064	7,87E-08
5 6	26.1.2016 23:45	0,0000099	0,0000080	0,0000081	0,0000083	0,0000086	8,61E-08
6	27.1.2016 11:17	0,0000083	0,0000056	0,0000080	0,0000073	0,0000067	7,16E-08
6 7	28.1.2016 0:37	0,0000096	0,0000075	0,0000078	0,0000087	0,0000076	8,22E-08
7	28.1.2016 22:57	0,0000079	0,0000080	0,0000083	0,0000073	0,0000073	7,76E-08
8	29.1.2016 12:30	0,0000073	0,0000057	0,0000066	0,0000078	0,0000064	6,76E-08
8 9	31.1.2016 0:52	0,0000082	0,0000062	0,0000059	0,0000061	0,0000060	6,49E-08
9	1.2.2016 23:00	0,0000089	0,0000067	0,0000078	0,0000072	0,0000069	7,50E-08
10	2.2.2016 23:10	0,0000087	0,0000068	0,0000073	0,0000072	0,0000067	7,34E-08
11	3.2.2016 23:52	0,0000084	0,0000063	0,0000073	0,0000068	0,0000065	7,07E-08

Tab. 7 – Popisná statistika pro vzorky se zeminou, 5% biocharu a 20% jílu

Popisná statistika				
Směrodatná odchylka [m.s-1]	Koeficient variace [%]	min	max	rozsah
2,48E-06	30,15	5,30E-08	1,08E-07	5,48E-08
4,27E-06	46,45	5,80E-08	1,64E-07	1,06E-07
1,59E-06	20,19	6,74E-08	1,05E-07	3,76E-08
2,83E-06	38,94	2,44E-08	9,50E-08	7,05E-08
9,45E-07	11,06	7,66E-08	1,01E-07	2,41E-08
2,99E-06	36,69	4,70E-08	1,21E-07	7,36E-08
1,23E-06	14,53	7,03E-08	1,00E-07	3,00E-08
1,49E-06	18,98	6,44E-08	9,78E-08	3,34E-08
7,63E-07	8,86	8,04E-08	9,91E-08	1,87E-08
1,08E-06	15,04	5,59E-08	8,27E-08	2,67E-08
8,91E-07	10,84	7,49E-08	9,58E-08	2,09E-08
4,48E-07	5,77	7,29E-08	8,30E-08	1,02E-08
8,16E-07	12,07	5,70E-08	7,83E-08	2,13E-08
9,70E-07	14,96	5,89E-08	8,21E-08	2,32E-08
8,67E-07	11,57	6,72E-08	8,88E-08	2,17E-08
8,34E-07	11,35	6,66E-08	8,74E-08	2,08E-08
8,52E-07	12,05	6,31E-08	8,44E-08	2,13E-08

5.3. Série II– vzorky s nivní zeminou a 20% jílu

V tabulce číslo 8 můžeme vidět výsledné hodnoty K_s jednotlivých vzorků. Hodnoty K_s mají velmi podobný průběh s první sérií, jelikož jde o stejný materiál. Rozdíl je pouze na začátku měření, kde oproti první sérii došlo ke změně metodiky měření, zvýšil se časový interval měření, a proto nebyl zachycený prudký pokles K_s . Průběh klesajících hodnot K_s můžeme vidět na grafu číslo 3. Zprůměrované hodnoty K_s se pohybují od $1,21 \cdot 10^{-7}$ do $1,84 \cdot 10^{-7}$ m.s⁻¹.

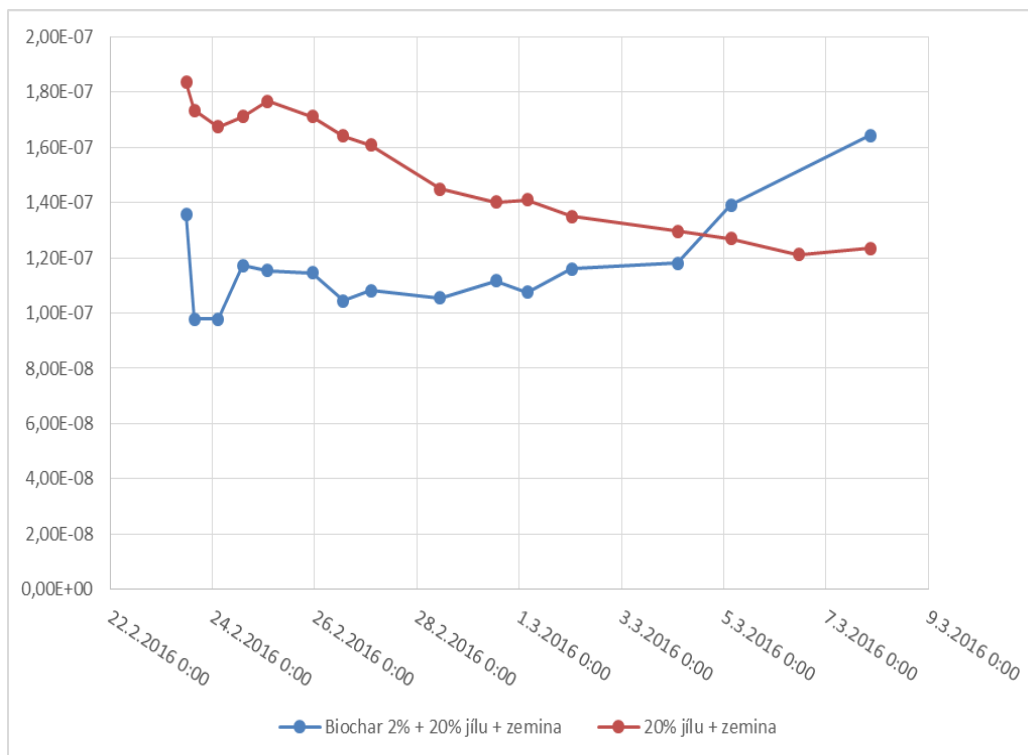
Pro každý den měření byla vytvořena popisná statistika (viz tab.9), která obsahuje směrodatnou odchylku, koeficient variace, minimální a maximální hodnoty a rozsah. Průměrný koeficient variace byl ve druhé sérii jednou tak menší oproti první sérii.

Tab. 8 - Hodnoty K_s pro vzorky se zemínou a 20% jílu, série II

Vzorky s 20% jílu + zemina							
	pozice na per.	1	3	6	7	10	Průměr
m.č	Datum	Ks vz č.56	Ks vz č.66	Ks vz č.67	Ks vz č.72	Ks vz č.69	[m.s-1]
1	23.2.2016 11:45	0,0000200	0,0000204	0,0000203	0,0000160	0,0000152	1,84E-07
1 2	23.2.2016 15:30	0,0000197	0,0000178	0,0000187	0,0000132		1,73E-07
2	24.2.2016 2:40	0,0000186	0,0000177	0,0000172	0,0000137	0,0000165	1,67E-07
3	24.2.2016 14:17	0,0000199	0,0000175	0,0000166	0,0000140	0,0000176	1,71E-07
3 4	25.2.2016 1:57	0,0000190	0,0000204	0,0000165	0,0000148	0,0000178	1,77E-07
4	25.2.2016 22:57	0,0000180	0,0000198	0,0000155	0,0000143	0,0000180	1,71E-07
5	26.2.2016 13:22	0,0000180	0,0000156	0,0000159	0,0000141	0,0000184	1,64E-07
5 6	27.2.2016 2:32	0,0000178	0,0000162	0,0000154	0,0000139	0,0000171	1,61E-07
6	28.2.2016 10:52	0,0000153	0,0000150	0,0000146	0,0000127	0,0000149	1,45E-07
7	29.2.2016 13:05	0,0000152	0,0000142	0,0000141	0,0000110	0,0000156	1,40E-07
7 8	1.3.2016 3:47	0,0000153	0,0000140	0,0000142	0,0000120	0,0000150	1,41E-07
8	2.3.2016 0:45	0,0000143	0,0000139	0,0000137	0,0000117	0,0000140	1,35E-07
9	4.3.2016 2:15	0,0000149	0,0000137	0,0000124	0,0000112	0,0000127	1,30E-07
9 10	5.3.2016 3:25	0,0000139	0,0000135	0,0000127	0,0000109	0,0000124	1,27E-07
10	6.3.2016 11:10	0,0000141	0,0000127	0,0000114	0,0000099	0,0000125	1,21E-07
10 11	7.3.2016 20:42	0,0000143	0,0000128	0,0000111	0,0000100	0,0000135	1,23E-07

Tab.9 - Popisná statistika pro vzorky se zemínou a 20% jílu

Popisná statistika				
Směrodatná odchylna [m.s-1]	Koeficient variace [%]	min	max	rozsah
2,54E-06	13,83	1,52E-07	2,04E-07	5,17E-08
2,88E-06	16,59	1,32E-07	1,97E-07	6,49E-08
1,88E-06	11,23	1,37E-07	1,86E-07	4,93E-08
2,12E-06	12,40	1,40E-07	1,99E-07	5,89E-08
2,18E-06	12,36	1,48E-07	2,04E-07	5,65E-08
2,20E-06	12,84	1,43E-07	1,98E-07	5,50E-08
1,79E-06	10,92	1,41E-07	1,84E-07	4,35E-08
1,51E-06	9,42	1,39E-07	1,78E-07	3,88E-08
1,02E-06	7,04	1,27E-07	1,53E-07	2,58E-08
1,78E-06	12,72	1,10E-07	1,56E-07	4,51E-08
1,27E-06	9,02	1,20E-07	1,53E-07	3,26E-08
1,03E-06	7,64	1,17E-07	1,43E-07	2,59E-08
1,39E-06	10,69	1,12E-07	1,49E-07	3,68E-08
1,15E-06	9,07	1,09E-07	1,39E-07	2,98E-08
1,56E-06	12,89	9,89E-08	1,41E-07	4,16E-08
1,76E-06	14,23	1,00E-07	1,43E-07	4,28E-08



Graf č.3 - Naměřené hodnoty K_s

5.4. Série II– vzorky s nivní zeminou, 2% biocharem a 20% jílu

Hodnoty K_s můžeme vidět v tabulce číslo 10. Průběh hodnot K_s nejdříve naznačoval pokles, zhruba po týdnu měření, kdy hodnoty kolísaly, se hodnoty K_s začaly zvyšovat a ke konci byly vyšší než vzorky bez biocharu, to můžeme vidět na grafu číslo 3. Zvyšování hodnot K_s zapříčinilo pravděpodobně vyplavování částic biocharu ze vzorku, případně vznikly ve vzorcích preferenční cesty. Zprůměrované hodnoty K_s se pohybují od $9,78 \cdot 10^{-8}$ do $1,64 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pro každý den měření byla vytvořena popisná statistika (viz tab.11), která obsahuje směrodatnou odchylku, koeficient variace, minimální a maximální hodnoty a rozsah. Průměrný koeficient variace byl u 2% biocharu byl více než dvojnásobně vyšší než u 5% biocharu.

Tab.10 - Hodnoty K_s pro vzorky se zeminou, 2% biocharu a 20% jílu

Vzorky s 2% biocharu + 20% jílu + zemina							
	pozice na per.	2	4	5	8	9	Průměr
m.č	Datum	Ks vz č.68	Ks vz č.63	Ks vz č.51	Ks vz č.53	Ks vz č.49	[m.s-1]
1	23.2.2016 11:45	0,0000063	0,0000121	0,0000063	0,0000147	0,0000284	1,36E-07
1 2	23.2.2016 15:30	0,0000050	0,0000122	0,0000103	0,0000154	0,0000061	9,78E-08
2	24.2.2016 2:40	0,0000071	0,0000078	0,0000102	0,0000163	0,0000076	9,79E-08
3	24.2.2016 14:17	0,0000096	0,0000136	0,0000103	0,0000176	0,0000075	1,17E-07
3 4	25.2.2016 1:57	0,0000097	0,0000123	0,0000105	0,0000181	0,0000070	1,15E-07
4	25.2.2016 22:57	0,0000096	0,0000115	0,0000101	0,0000161	0,0000100	1,15E-07
5	26.2.2016 13:22	0,0000094	0,0000110	0,0000102	0,0000152	0,0000065	1,04E-07
5 6	27.2.2016 2:32	0,0000090	0,0000110	0,0000094	0,0000166	0,0000081	1,08E-07
6	28.2.2016 10:52	0,0000084	0,0000111	0,0000086	0,0000171	0,0000075	1,06E-07
7	29.2.2016 13:05	0,0000096	0,0000116	0,0000077	0,0000186	0,0000084	1,12E-07
7 8	1.3.2016 3:47	0,0000080	0,0000110	0,0000085	0,0000194	0,0000069	1,08E-07
8	2.3.2016 0:45	0,0000083	0,0000099	0,0000089	0,0000233	0,0000077	1,16E-07
9	4.3.2016 2:15	0,0000075	0,0000152	0,0000086	0,0000205	0,0000072	1,18E-07
9 10	5.3.2016 3:25	0,0000081	0,0000205	0,0000093	0,0000232	0,0000084	1,39E-07
10 11	7.3.2016 20:42	0,0000078	0,0000299	0,0000116	0,0000229	0,0000099	1,64E-07

Tab. 11 – Popisná statistika pro vzorky se zeminou, 2% biocharu a 20% jílu

Popisná statistika				
Směrodatná odchylna [m.s-1]	Koeficient variace [%]	min	max	rozsah
9,08E-06	66,95	6,30E-08	2,84E-07	2,21E-07
4,32E-06	44,20	4,96E-08	1,54E-07	1,04E-07
3,82E-06	39,04	7,09E-08	1,63E-07	9,20E-08
3,92E-06	33,42	7,53E-08	1,76E-07	1,00E-07
4,15E-06	36,02	7,04E-08	1,81E-07	1,11E-07
2,73E-06	23,83	9,56E-08	1,61E-07	6,59E-08
3,15E-06	30,17	6,47E-08	1,52E-07	8,71E-08
3,41E-06	31,52	8,05E-08	1,66E-07	8,57E-08
3,87E-06	36,68	7,55E-08	1,71E-07	9,51E-08
4,42E-06	39,58	7,69E-08	1,86E-07	1,09E-07
5,04E-06	46,84	6,95E-08	1,94E-07	1,24E-07
6,58E-06	56,73	7,69E-08	2,33E-07	1,56E-07
5,89E-06	49,90	7,15E-08	2,05E-07	1,34E-07
7,35E-06	52,84	8,12E-08	2,32E-07	1,51E-07
9,54E-06	58,04	7,83E-08	2,99E-07	2,21E-07

6. Závěr

Bakalářská práce studuje změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti K_s při aplikaci biocharu a jílu do nivní zeminy. Stanovení hodnot K_s a jejich časových změn probíhalo za použití laboratorního permeometru. Po ukončení měření byly vzorky zváženy a dopočítána byla objemová hmotnost vzorku, hmotnost zůstatkové vody, hmotnostní vlhkost půdy a pórovitost.

Průměrná hodnota nasycené hydraulické vodivosti se lišila podle použitého materiálu. V první sérii pro vzorky bez biocharu se průměrná hodnota K_s pohybovala v rozmezí od $1,00 \cdot 10^{-7}$ do $3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. 4). Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 8,35% do 58,74%. Průměrná hodnota K_s u 5% biocharu v první sérii se pohybovala v rozmezí od $6,49 \cdot 10^{-8}$ do $9,20 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. 6). Průměrné hodnoty K_s byly u vzorků s 5 % biocharu u všech časových kroků nižší než u vzorků bez biocharu. Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 5,77% do 46,45%. U 5% biocharu došlo k malému snížení K_s , což mohlo být zapříčiněno vlastnostmi biocharu, který má lepší sorpční vlastnosti. Dalším faktorem, který mohl snížit K_s může být bobtnání biocharu (viz obr. 12), což zapříčinilo uzavírání pórů.

Ve druhé sérii pro vzorky bez biocharu se průměrná hodnota K_s pohybovala v rozmezí od $1,21 \cdot 10^{-7}$ do $1,84 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. 8). Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 7,04% do 16,59%. Průměrná hodnota K_s u 2% biocharu v druhé sérii se pohybovala v rozmezí od $9,78 \cdot 10^{-8}$ do $1,64 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab.10). Průměrné hodnoty K_s byly u vzorků s 2 % biocharu u prvních 8 časových kroků (prvních 9 dní měření) nižší než u vzorků bez biocharu. U 2% biocharu došlo na rozdíl od 5% biocharu ke zvýšení hodnot K_s (poslední dvě měření, po více než 10 dnech), příčinou toho mohlo být vyplavování biocharu ze vzorku, tudíž nedocházelo k tak velikému bobtnání a uzavírání pórů (viz obr.13) jako u 5% biocharu. Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 23,83% do 66,83%. Koeficienty variace hodnot K_s dosahoval u 2% biocharu větších hodnot než u 5% biocharu.

7. Přehled literatury a použitých zdrojů

Amonette, J.E., Joseph, S. 2009. Characteristics of biochar, microchemical properties. In: Lehmann J., Joseph S. (eds.): Biochar for Environmental Management, Science and Technology. Earthscan, London, 33–43.

Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A.D., Ventrella, D. 2015. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. Soil and Tillage Research 154: 1–13.

Darcy, H., 1856. Les fontaines publique de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.

Eibish, N., Durner, W., Bechtold, M., Fuß, R., Mikutta, R., Woche, S.K., Helfrich, M. 2015. Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties? Geoderma 245–246: 31–39.

Eijkelkamp, 2013. Operating instructions – 09.02 laboratory-permeameters. online: <https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0902elab-permeameters.pdf> (cit 10/4/2016)

Hillel, D., 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, USA.

Jačka, L., Pavlásek, J., Kurát, V., Pech, P., 2014. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. Geoderma 219 – 220, 82 – 88.

Jeffery, S., Meinders, M.B.J., Stoof, C.R., Bezemer, T.M., van de Voorde, T.F.J., Mommer, L., van Groenigen, J.W. 2015. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. Geoderma 251–252: 47–54.

Kutílek M., 2004. Hydropedologie 10. ČVUT, Praha.

Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. Soil hydrology. Catena Verlag, Cremlingen - Destedt, Germany.

Laghari, M., Mirjat, M.S., Hu, Z., Fazal, S., Xiao, B., Hu, M., Chen, Z., Guo, D. 2015. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. Catena 135: 313–320.

Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G., Novak, J.M. 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. Chemosphere 142: 136–144.

- Pavlásek, J., Jačka, L., 2014.** *Hydropedologie*. ČZU, Praha.
- Peake, L.R., Reid, B.J., Tang, X. 2014.** Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma* 235–236: 182–190.
- Pokorná D., Zábranská J. 2007.** *Hydrologie a hydropedologie*. VŠCHT Praha. ISBN 978-80-7080-707-1
- Šráček, O., Kuchovský, T., 2003.** *Základy hydrogeologie*. 1. vyd. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, 177 s.
- Trakal, L., Bingol, D., Pohorely, M., Hruska, M., Komarek, M. 2014.** *Bioresource Technology* 171:422–451.
- Trakal, L., Komárek, M., Száková, J., Tlustoš, P., Tejnecký, V., Drábek, O. 2011.** *International Journal of Phytoremediation* 14(8): 806–819.
- Uchimiya, M., Klasson, K.T., Wartelle, L.H., Lima, I.M. 2011.** Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 1. Copper sorption isotherms and the release of cations. *Chemosphere* 82: 1431–1437.
- Valentová J. 1994.** *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT Praha. ISBN 80-01-01167-4
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., Van der Velde, M., Diafas, I. 2010.** *Biochar Application to Soils: A Critical Scientific Review of Effects of Soil Properties, Processes and Functions*. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24099 – EN, Italy
- Wessolek, G., Plagge, R., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 1994.** Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. *Geoderma* 64: 93-110.