

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIROMENTÁLNÍHO
MODELOVÁNÍ



**VLIV BIOCHARU NA NASYCENOU HYDRAULICKOU
VODIVOST KONTAMINOVANÉ NIVNÍ PŮDY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Tomáš Tomáš

2016 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tomáš Tomáš

Krajinné inženýrství

Název práce

Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost kontaminované nivní půdy

Název anglicky

Influence of biochar on saturated hydraulic conductivity of contaminated fluvisol

Cíle práce

Stanovit vliv biocharu na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti měřením na laboratorním permeamtru.

Stanovit vliv biocharu na časové změny nasycené hydraulické vodivosti.

Metodika

Stručně charakterizovat biochar a jeho význam na základě současné literatury.

Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu biocharu na hydraulické charakteristiky.

Provést opakovaná měření nasycené hydraulické vodivosti na půdě s biocharem a na referenční půdě. Statisticky vyhodnotit data a určit vliv biocharu na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro testovanou půdu.

Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

Biochar, vliv sorbentu, nasycená hydraulická vodivost, laboratorní permeametr

Doporučené zdroje informací

Ayodele, A, Oguntunde, P, Joseph, A and de Souza Dias Junior, M, 2009. Numerical analysis of the impact of charcoal production on soil hydrological behavior, runoff response and erosion susceptibility. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:137-145.

Eijkelkamp, 2013. Operating instructions. 09.02 Laboratory-permeameters. <https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0902elab-permeameters.pdf>, cit. 30.7. 2013.

Gerardo Ojeda, Stefania Mattana, Anna Àvila, Josep Maria Alcañiz, Martin Volkmann, Jörg Bachmann, Are soil–water functions affected by biochar application?, 2015, *Geoderma* 249–250, 1-11.

Jačka, L., Pavlásek, J., Kuráž, 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.

Simon Jeffery, Marcel B.J. Meinders, Cathelijne R. Stoof, T. Martijn Bezemer, Tess F.J. van de Voorde, Liesje Mommer, Jan Willem van Groenigen, Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil, 2015, *Geoderma* 251–252, 47-54.

Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., Diafas, I., 2010. Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 ZS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 10. 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma „Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost kontaminované nivní půdy“ vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. a použil pouze pramenů, které cituji v seznamu literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Česká zemědělská univerzita v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Česká zemědělská univerzita v Praze oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla naložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Praze dne 15. 12. 2016

.....

Tomáš Tomáš

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D. vedoucímu mé diplomové práce za jeho čas, pomoc, ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou nejen po celou dobu tvorby této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s) kontaminované nivní půdy. Měřené hodnoty K_s jsou důležitým vstupem pro modelování proudění vody v půdě. V této práci byly hodnoty K_s naměřeny na kontaminované nivní půdě a na této půdě obohacené 2 a 5 % biocharu. Pro tyto půdy byly stanoveny hodnoty K_s a následné změny K_s v čase při opakovaném měření. Biochar je materiál, kterým se zlepšuje sorpční kapacita a další vlastnosti půdy. Vliv aplikace biocharu na K_s ale ještě není dostatečně objasněn. Pro práci byl použit biochar vytvořený pyrolýzou ze stopek vinné révy.

Měření byla provedena ve dvou sériích v rozmezí měsíců říjen až prosinec roku 2015. V každé sérii bylo měřeno deset vzorků, 5 kontrolních a 5 s příměsí biocharu. To je celkem 20 vzorků. Měření každého vzorku probíhalo přibližně 14 dní a vzorky byly měřeny v deseti časových krocích. Současně byly změřeny také související fyzikální vlastnosti (objemová hmotnost, pórovitost, obsah vody v blízkosti nasycení) a byly provedeny zrnitostní rozbory hustoměrnou metodou. Vzorky byly uměle připraveny nasypáním homogenizované zeminy do Kopeckého válečku (100 cm^3). V první sérii měření bylo porovnáváno 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou a pět vzorků této půdy s přídavkem 5 % biocharu. V druhé sérii bylo porovnáváno znovu pět vzorků s kontaminovanou nivní půdou a pět vzorků obohacených o 2 % biocharu. Sycení vzorků probíhalo postupně a všechny vzorky byly syceny stejně dlouhou dobu. Měření bylo prováděno na laboratorním permeamtru metodou konstantního spádu.

Pro kontroly v měření I byly průměrné hodnoty K_s ze všech kroků $4,818 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ a pro vzorky s 5% biocharem byly průměrné hodnoty ze všech kroků $2,254 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. V měření II pro kontroly byly průměrné hodnoty ze všech kroků $6,435 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ a pro vzorky s 2% biocharem byly průměrné hodnoty $4,211 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.

Použitý biochar na testované půdě snižuje hodnoty K_s oproti kontrole. Hodnoty K_s jsou více sníženy při aplikaci 5% biocharu než při aplikaci 2% biocharu. Biochar také koeficient variace u většiny časových kroků. U kontrolních měření jsou také změny hodnot K_s mezi jednotlivými časovými kroky výraznější než u vzorků obohacených o biochar.

Klíčová slova: Biochar, vliv sorbentu, nasycená hydraulická vodivost, laboratorní permeametr

Abstrakt

This thesis deals with the influence of biochar on saturated hydraulic conductivity (K_s) of contaminated fluvisol. Values of K_s are key inputs for modeling of water flow in soils. Contaminated fluvisol and this soil enriched by 2 and also 5% of biochar were studied in this thesis. These differently treated soils were gauged to find out differences in K_s and changes of K_s time. Biochar improves sorption capacity and other soil properties. The influence of biochar application on K_s it not fully revealed. We used biochar which was made by pyrolysis of stalks of grapevine.

Measurements were made in two series since October to December in 2015. For both series, 10 samples, (5 in reference and 5 enriched by biochar) were measured. A total of 20 samples were measured in each series. Every sample was measured for 14 days in 10 time steps (10 recurrent measurements). Physical properties (bulk density, porosity, saturated water content) and particle size analysis using hydrometer method were also measured. Homogeneous soil mixtures of the soils were packed in Kopeckého sampling rings (100 cm³). In first series, 5 reference samples and 5 samples with 2% content of biochar were compared. Saturation of the samples was made gradually and slowly and takes 1 week. Measurement was made by laboratory permeameter (hydraulic gradient about 0.5).

For reference samples of first series, mean K_s value was $4,818 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. For samples enriched by 5% biochar mean K_s value was $2,254 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. For reference of second series, mean K_s value was $6,435 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. For samples enriched by 2% biochar mean K_s value was $4,211 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.

Application of biochar on tested soil decrease K_s in comparison with reference soil. Decrease of K_s value was more distinct for soil enriched 5% of biochar than for soil enriched by 2% of biochar. Application of biochar also decrease coefficient of variation of measured K_s in most of the time steps. Reference samples exhibited larger differences of K_s among time steps than biochar enriched soils.

Keywords: Biochar, effect of sorbent, saturated hydraulic conductivity, laboratory permeametr

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle.....	11
3	Literární rešerše	12
3.1	Nasycená hydraulická vodivost.....	12
3.2	Stanovení nasycené hydraulické vodivosti.....	13
3.3	Výpočet nasycené hydraulické vodivosti	15
3.4	Darcyho zákon.....	16
3.5	Meze platnosti Darcyho zákona	17
3.6	Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s).....	18
4	Metodika	24
4.1	Charakteristika měřeného materiálu.....	24
4.2	Použité vzorce a metody pro charakteristiky materiálu	30
4.3	Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků	31
4.3.1	Příprava a plnění vzorků pro měření	31
4.3.2	Sycení a měření vzorků	33
4.3.3	Vyhodnocení měření a statistické porovnání	35
5	Výsledky a diskuze	36
5.1	Měření I	36
5.2	Měření II.....	40
5.3	Porovnání kontrolních půd	44
5.4	Porovnání obohacených půd	46
6	Závěr	48
7	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	50
8	Seznam příloh	52

1 Úvod

Jedna z hlavních hydraulických vlastností půdy, kterou dnes používáme a která vyjadřuje schopnost půdy vést vodu je nasycená hydraulická vodivost (K_s). Výsledné hodnoty K_s jsou závislé na charakteristických vlastnostech půdy a vlastnostech proudící kapaliny. Vlastnostmi půdy ovlivňující hodnoty K_s jsou např. zrnitost půdy, zastoupení organické hmoty, struktura půdy a další. Společně tyto půdní vlastnosti ovlivňují objem a velikost pórů, které určují hodnoty K_s . Vlastnosti kapaliny, které ovlivňují K_s jsou viskozita a hustota použité kapaliny.

Poznatky o K_s můžeme poté využít v ochraně půdy a podzemní vody před znečištěním, při závlahách, odvodnění a v řadě dalších inženýrských aplikací. Také je můžeme využít v hydropedologii, hydrogeologii a dalších vědních oborech. Znalosti K_s se využívají i v modelech proudění vody a transportu kontaminantů v půdě.

Biochar je organický materiál, který je vyrobený pyrolýzou (Verheijen et al., 2010). Pyrolýza je postup, při kterém je materiál (např. odpad) tepelně zpracován s vyloučením přístupu kyslíku, vzduchu či jiných zplyňovacích látek. Aplikací do půdy mění půdní vlastnosti jako je např. pH a jiné (Amonette et Joseph, 2009). Zlepšuje sorpční vlastnosti půdy (Uchimyia et al., 2011) a tím snižuje toxicitu a transport těžkých kovů (Trakal et al., 2011, Trakal et al., 2014). Účinky biocharu na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti a její změny v časovém horizontu zatím nejsou plně objasněny. Tyto změny mohou být zapříčiněny zřejmě kvalitou (danou chemickým složením a sorpčním povrchem), strukturou, zrnitostí a množstvím používaného biocharu, ale také závisí na vlastnostech použité půdy (zrnitost, struktura, objemová hmotnost a na dalších půdních vlastnostech). Tato zjištění jsou popsána v publikacích (Lim et al., 2016; Castellini et al., 2015; Jeffery et al., 2015). Lim et al., (2016) konkrétně udávají, že aplikace biocharu u půd jílovitých spíše hodnoty K_s zvyšuje, ale naopak u půd písčitých aplikace biocharu hodnotu K_s snižuje.

Diplomová práce je rozdělena do teoretické a praktické části. V teoretické části (Kapitola 3) je popsán Darcyho zákon a jeho meze platnosti. Dále je zde popsána nasycená hydraulická vodivost (K_s), způsoby stanovení veličiny K_s a vliv různých

faktorů na K_s . Výhody a nevýhody měření K_s . Na konci teoretické části práce je popis efektu biocharu na K_s pro různé půdy na základě aktuálních studií. V praktické části (Kapitola 4) práce je popsána metodika laboratorního měření K_s a jeho vyhodnocení. Metodika obsahuje charakteristiku měřeného materiálu, stanovení K_s sypaných vzorků, přípravu a plnění vzorků, sycení a vlastní měření. V kapitole 5 jsou popsány výsledky a diskuze. Ty jsou rozděleny do podkapitol 5.1 Měření I, 5.2. Měření II, 5.3 Porovnání kontrolní půd, 5.4 Porovnání obohacených půd

2 Cíle

Hlavním cílem diplomové práce je stanovit vliv biocharu na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti měřením na laboratorním permeamtru.

Dílčím cílem práce je porovnání referenční půdy (kontaminované nivní půdy) s půdou obohacenou přídavkem různého množství biocharu (2 a 5% hmotností).

Dalším dílčím cílem je stanovení vlivu aplikace biocharu na časové změny nasycené hydraulické vodivosti v průběhu opakovaného měření.

3 Literární rešerše

3.1 Nasycená hydraulická vodivost

Veličina K_s v Darcyho rovnici je nazývána nasycená hydraulická vodivost. V základních jednotkách SI soustavy má rozměr $m \cdot s^{-1}$. Charakterizuje, jak porézní prostředí umožňuje proudění kapaliny. Její velikost je závislá na vlastnostech prostředí i na vlastnostech proudící kapaliny. V izotropním prostředí můžeme nasycenou hydraulickou vodivost definovat jako hustotu toku přes definovanou plochu při jednotkovém hydraulickém gradientu, (Darcyovská rychlost proudění při jednotkovém gradientu). Tato definice vychází z Darcyho zákona, který je základní rovnicí stanovující K_s . Termín nasycená hydraulická vodivost bývá nesprávně zaměňován s termíny propustnost, Darcyho koeficient nebo filtrační koeficient. Znalost hodnoty K_s je klíčová pro modelování pohybu vody a transportních procesů rozpuštěných látek v půdě. Parametr K_s je důležitým podkladem při návrhu závlah, odvodnění, sypaných hrázích vodních děl a dalších inženýrských aplikací (Pavlásek et Jačka, 2014).

Nasycenou hydraulickou vodivost K_s , můžeme vyjádřit jako hydraulickou vlastnost půdy, která je závislá přímo na její pórovitosti.

Fyzikální význam nasycené hydraulické vodivosti lze vyjádřit následovně (Valentová, 2007):

$$K_S = \frac{K * \rho * g}{\mu} \quad (1)$$

Kde K_s [$m \cdot s^{-1}$] vyjadřuje nasycenou hydraulickou vodivost, K [m^2] vyjadřuje propustnost porézního prostředí, ρ [$kg \cdot m^{-3}$] vyjadřuje hustotu kapaliny, g [$m \cdot s^{-2}$] vyjadřuje tíhové zrychlení a μ [$m^2 \cdot s^{-1}$] vyjadřuje dynamickou viskozitu.

Fyzikální vlastnosti, které ovlivňují hydraulickou vodivost, jsou hustota kapaliny ρ a její dynamická viskozita μ . Vlastnosti půdy, které charakterizují schopnost půdního prostředí propustnost vody, jsou zejména pórovitost, tvar a velikost póru, zrnitostní složení, vliv součinitele zakřivení (tortuozity) a měrný povrch. Orientační hodnoty hydraulické vodivosti jsou znázorněny v tabulce č. 1.

Tab. č. 1 Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro různé zeminy
(převzato z Valentová 2007)

Druh zeminy	Hydraulická vodivost K [m/s]
Jíl	$< 1 \cdot 10^{-8}$
Písčítá hlína	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Hlinitý písek ulehlý	$(1 - 5) \cdot 10^{-6}$
Písek s příměsí jílu	$(1 - 2) \cdot 10^{-6}$
Hlinitý a jemný písek	$(1 - 5) \cdot 10^{-5}$
Hrubozrný písek	$(1 - 5) \cdot 10^{-4}$
Štěrkopísek	$(2 - 10) \cdot 10^{-4}$
Štěrk	$(1 - 5) \cdot 10^{-4}$

3.2 Stanovení nasycené hydraulické vodivosti

Nasycená hydraulická vodivost je jednou z hlavních půdních charakteristik a její stanovení se provádí přímými nebo nepřímými metodami měření (Pavlásek et Jačka, 2014).

Mezi přímé metody lze zařadit laboratorní měření, která se rozdělují na měření s konstantním nebo proměnlivým spádem a metody terénní nad hladinou nebo pod hladinou podzemní vody. (Pavlásek et Jačka, 2014)

Metoda měření K_s nad hladinou podzemní vody využívá infiltračních pokusů nebo guelphský permeametr, ten je založen na principu Marriotovy láhve. Tato láhev je tvořena ze zásobníku vody a výtokové trubice s perforací ve spodní části. Hladina vody ve vrtu se nastavuje pomocí zavzdušňovací trubičky, která spojuje obě části permeamtru. (Kutílek et al., 2004)

Metoda měření K_s pod hladinou podzemní vody se provádí pomocí čerpání vody ze studny. Zaznamenává se množství čerpané vody a pokles hladiny podzemní vody pomocí sond ve studni (Valentová, 2007). Metoda je velice časově i finančně náročná a proto se v praxi málo kdy používá. Výhradně se použije při měření mocných zvodnělých hrubozrných vrstev v hydrologii (Kutílek et al., 2004). V hydroopedologii je metoda prakticky nepoužitelná a proto se měření podzemní vody pod hladinou měří např. pomocí jednosondové metody.

Jednosondová metoda zjednoduší a hlavně zkrátí čas měření. Po ustálení hladiny vody v sondě se změří její hloubka. Následně se odstraní voda z vrtu a tím

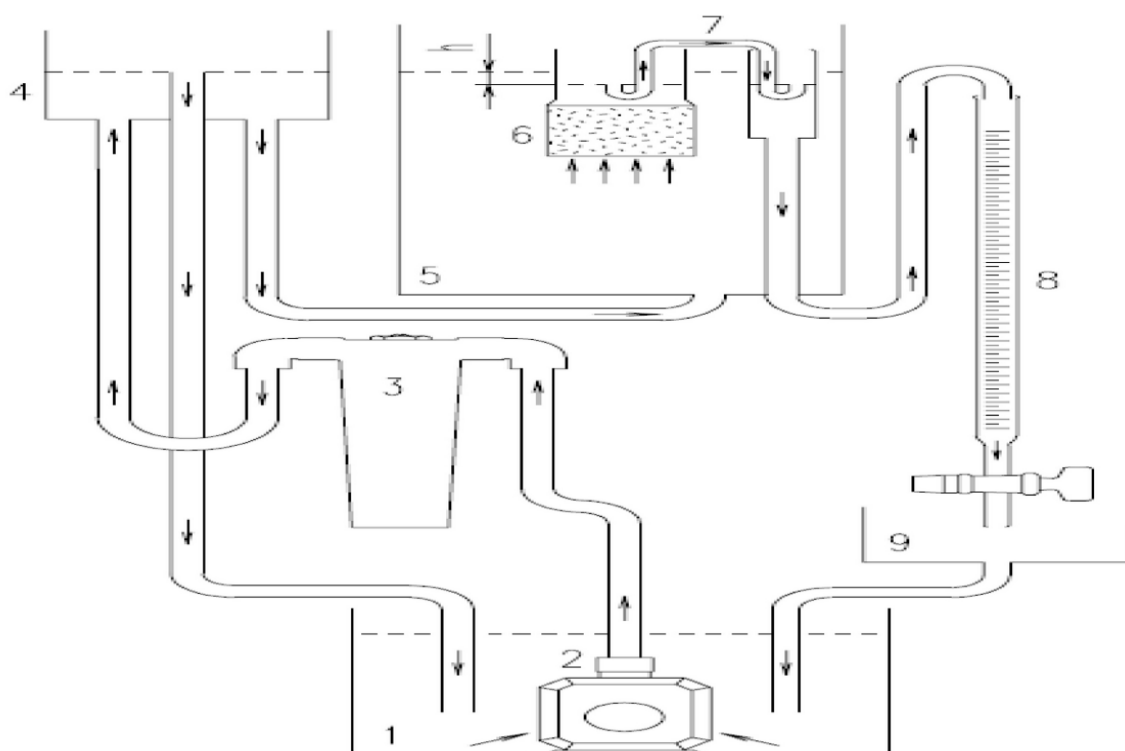
dojde ke snížení hladiny podzemní vody a následně se sleduje rychlost stoupání hladiny vody v sondě (Kutílek et Nielson, 1994).

Laboratorní měření se provádí na neporušených půdních vzorcích odebraných přímo v terénu nebo na uměle hutněných vzorcích v laboratoři. (Reynolds, 2000). Nejčastěji se používají Kopeckého válečky o objemu 100 cm^3 , ale mohou se také použít válečky až o objemu 500 cm^3 (Kutílek et al., 2004).

Nevýhodou laboratorních metod, je že se měří výrazně menší objemy než v porovnání s polní metodou (Pavlásek et Jačka, 2014).

Měření nasycené hydraulické vodivosti se měří s konstantním nebo proměnlivým spádem. Podle materiálu, který k laboratornímu měření bude použit, bude zvolena vhodná metoda.

Měření probíhá tak, že se měří horní a dolní hladina vody v permeamtru jak je znázorněno na obr. č. 1. Dolní hladina by měla být konstantní a horní hladina se může u vzorků lišit. Princip měření s konstantním spádem spočívá v udržování konstantního rozdílu tlakových výšek na dvou stranách vzorků a v měření objemu proteklé vzorkem za čas prostřednictvím byrety.



Obr. č. 1 Schéma laboratorního permeamtru (převzato z Pavlásek et Jačka, 2014)

Ve schématu značí číslo 1 – zásobní nádrž s vodou, 2 – vodní čerpadlo, 3 – filtr, 4 – posuvný výškový regulátor, 5 – plastový kontejner uzavíratelný víkem, 6 – nasycený neporušený vzorek v držáku, 7 – plastová nádoba (používá se pouze při měření s konstantním spádem), 8 – byreta sloužící pro měření objemu proteklé vody vzorkem, 9 – průtočná nádoba pro vodu vypuštěnou z byrety, šipky ukazují směr proudění vody a h v obrázku označuje ΔH v textu.

Nepřímé metody stanovení hydraulické vodivosti se používají z důvodu časové a finanční náročnosti přímého měření. Pro stanovení K_s se využívají snáze stanovitelné vlastnosti půdy, jako jsou textura (zrnitost), objemová hmotnost, body referenční čáry a jejich vztah ke K_s – tzv. pedotransferové funkce. Nepřímými metodami, ale ve většině případů (vyjma homogenních sypkých zemin) získáme pouze odhad hodnoty K_s . Nevýhodou většiny pedotransferových funkcí je velmi časté zanedbání závislosti K_s na půdní struktuře, obsahu organické hmoty a proto se tyto metody používají s dostatečnou přesností pouze u homogenních písčitých půd (Kutílek et al., 2004).

3.3 Výpočet nasycené hydraulické vodivosti

Výpočty hodnoty nasycené hydraulické vodivosti měřené v laboratoři vycházejí z Darcyho zákona. Hodnota K_s se při měření s konstantním a proměnlivým spádem vypočítá přímo z úpravy Darcyho zákona, a proto se také předpokládá jeho platnost. V této práci bylo měřeno jak s proměnlivým, tak i s konstantním spádem.

Měření s proměnlivým spádem je velice podobné měření s konstantním spádem. Na rozdíl od měření objemu vody, který nateče do byrety, je zde měřena změna hydraulického sklonu v čase. To znamená změna výšky hladiny v držáku na uchycení válečku. Měření K_s proměnlivým spádem je velice časově náročné z důvodu malé propustnosti vzorků a proto se doporučuje do výpočtu použít korekci o výpar. Korekci uvádí například v operačním manuálu pro laboratorní permeametr Eijkelkamp (Kutílek et Nielson, 1994; manuál Eijkelkamp, 2013) a má následující tvar:

$$K_S = \frac{A_d * L_v}{A_v * (t - t_1)} * \ln\left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}\right) \quad (2)$$

Kde ΔH_1 vyjadřuje rozdíl hladin měření v čase t_1 , ΔH_2 vyjadřuje rozdíl hladin měření v čase t_2 , A_d je průřezová plocha trubice držáku vzorků, ve které je měřena změna hladiny za čas (manuál Eijkelkamp, 2013).

U měření hydraulické vodivosti s konstantním spádem se měří objem vody V , který proteče vzorkem za čas t do byrety.

Pro výpočet K_s z měření s konstantním spádem platí:

$$K_S = \frac{V_p * L_v}{A_v * t * \Delta H} \quad (3)$$

Kde K_s je hodnota nasycené hydraulické vodivosti, V_p je objem vody proteklé vzorkem, L_v je označení délky měřeného vzorku (velikost válečku), A_v plocha příčného řezu vzorkem, t čas za který protekl určitý objem vody vzorkem a ΔH je rozdíl hydraulických výšek (manuál Eijkelkamp, 2013).

3.4 Darcyho zákon

Darcyho zákon platí pro nasycené proudění podzemní vody a popisuje pohyb vody přes jakékoliv porézní materiály a zeminy. Proudění vody půdou se určuje podle makroskopicky sledovaných fyzikálních veličin (Valentová, 2007).

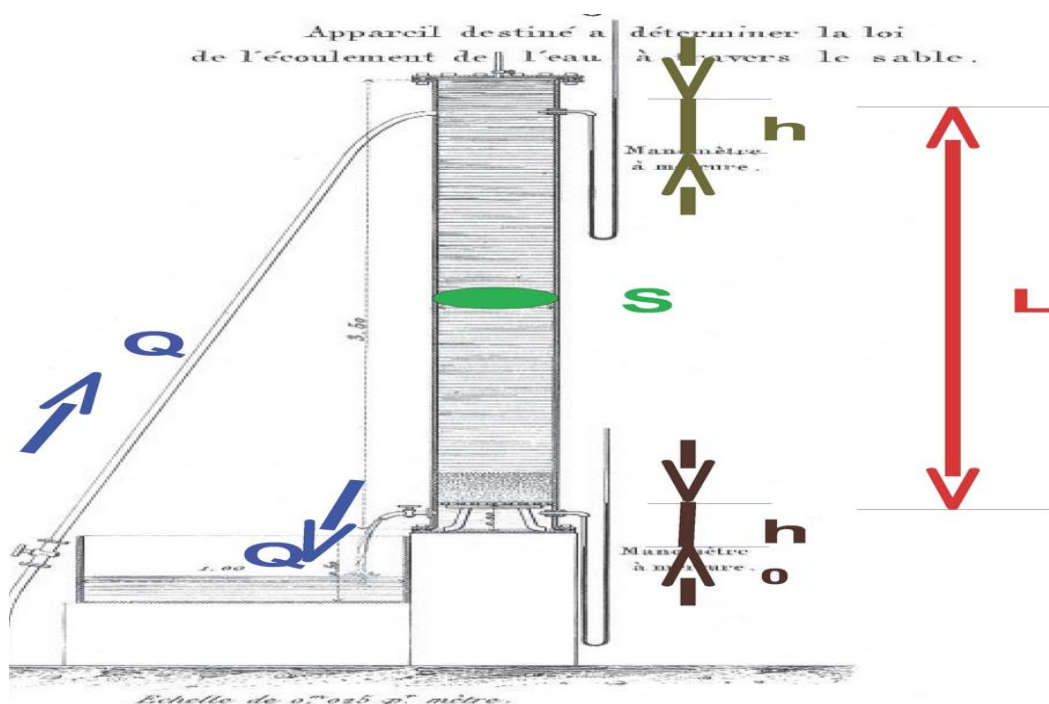
Proudění vody v půdě je nejčastěji popisováno pomocí makroskopicky pozorovaných fyzikálních veličin. Příkladem takovéhoto pozorování jsou pokusy prováděné Francouzským inženýrem Henrym Darcym v roce 1856 ve městě Dijon. Experiment byl proveden z důvodu malého množství vody v tomto městě. Při filtračních pokusech s vodou, které protékali skrze písek a jiné materiály objevil základní zákon půdní fyziky, hydrauliky a hydrologie (Darcy, 1856)

Schéma Darcyho zákona je zobrazeno na obr. č. 2. Darcy zjistil, že průtok vody Q je přímo úměrný průřezové ploše vzorku S a rozdílu tlakové výšky $\Delta H = h + L \pm h_0$ na vtoku a výtoku ze sloupce zeminy a nepřímo úměrný výšce sloupce L .

Darcyho zákon lze vyjádřit následovně:

$$Q = K_S * S * \frac{\Delta H}{L} \quad (4)$$

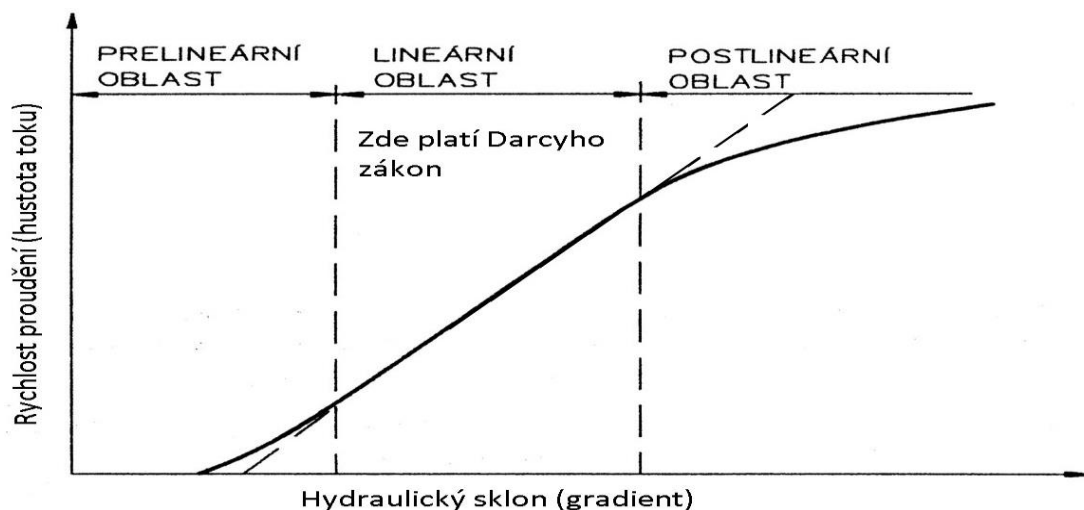
Kde Q [$L^3 \cdot T^{-1}$] vyjadřuje objemový průtok vody, K_S [$L \cdot T^{-1}$] je hydraulická vodivost, ΔH [L], je rozdíl hydraulických výšek, L [L], znázorňuje výšku sloupce zemin, poměr $\Delta H/L$ je také nazýván jako hydraulický sklon neboli hydraulický gradient, S [L^2] je průřezová plocha vzorku (Pavlásek et Jačka, 2014)



Obr. č. 2 Shéma Darcyho zákona (převato z Pavlásek et Jačka, 2014)

3.5 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi rychlostí proudění (hustotou toku) a hydraulickým gradientem. Tato lineární závislost neplatí pro celé rozmezí hodnot gradientu mezi nulou a nekonečnem a je omezena horní a dolní hranicí gradientu. Meze platnosti jsou znázorněny na obr. č. 3 (Valentová, 2007).



Obr. č. 3 Meze platnosti Darcyho zákona (převzato z Pavlásek et Jačka, 2014)

Když kapalina (voda) prosakuje velmi jemnozrnným materiálem při nízké propustnosti jako je např. jíl, existuje limitní hodnota hydraulického gradientu, při které dojde až k zastavení pohybu kapaliny. Omezení Darcyho zákona je také při průsaku velmi hrubozrnným materiálem, při tomto průsaku dochází k turbulentnímu proudění (Kutílek et al., 2004).

Pro rozdělení lineárního a turbulentního proudění se používá Reynoldsovo číslo Re . Toto číslo je bezrozměrné a vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a viskózními silami působící na kapalinu. Kritická hodnota Reynoldsova čísla při proudění vody v potrubí se pohybuje kolem 2000 (Valentova, 2007). Pro případ proudění v nasycené zóně je definováno:

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (5)$$

Kde Re [-] Reynoldsovo číslo, d [L] efektivní průměr póru nebo efektivní poměr zrn, v [$L \cdot T^{-1}$] rychlost proudění kapaliny (makroskopická), ρ hustota kapaliny, μ [$L^2 \cdot T^{-1}$] dynamická viskozita (Pavlásek et Jačka, 2014).

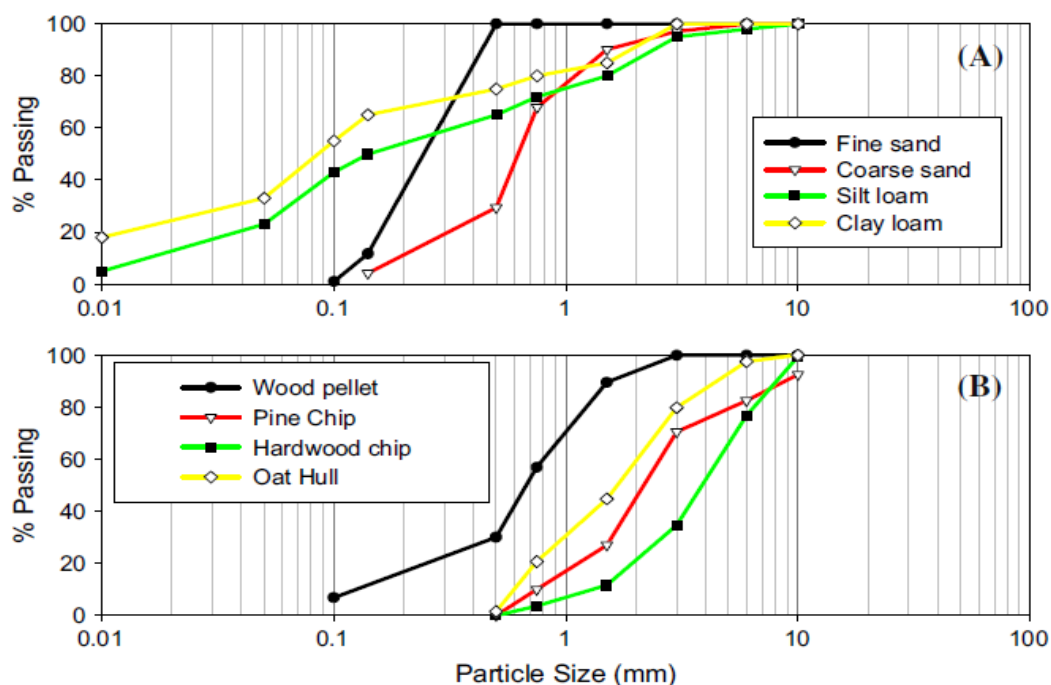
3.6 Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s)

Podle Lim et al., (2016), ovlivňuje biochar nasycenou hydraulickou vodivost. Ovlivnění závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech biocharu. Lim et al., (2016) testovali biochar získaný pomocí pyrolýzy, který byl získán z různých materiálů (borovice, dub, ovesné slupky a javor). Cílem výzkumu bylo vyvinout podpurný nástroj, který by předpověděl účinek aplikovaného biocharu do půdy na

nasycenou hydraulickou vodivost. K posouzení těchto účinků byly aplikovány čtyři různé biochary do čtyř různých půd (hrubý písek, jemný písek, hlína a jíl) v poměru 0%, 1%, 2% a 5%. Lim et al., (2016) vytvořili křivku zrnitosti (viz obr. č. 4) pro původní půdy a použité biochary. Pro zjištění nasycené hydraulické vodivosti použili Lim et al., (2016) metodu proměnného spádu. Metodu opakovali nezávisle 3 – 4 krát. Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti byly sníženy u biocharu, který byl přidán do hrubého nebo jemného písku. V půdě s příměsí biocharu o větší velikosti částic (60 % > 1 mm) došlo ke snížení hodnoty K_s mnohem více, než při aplikaci biocharu s menšími částicemi (60 % < 1 mm).

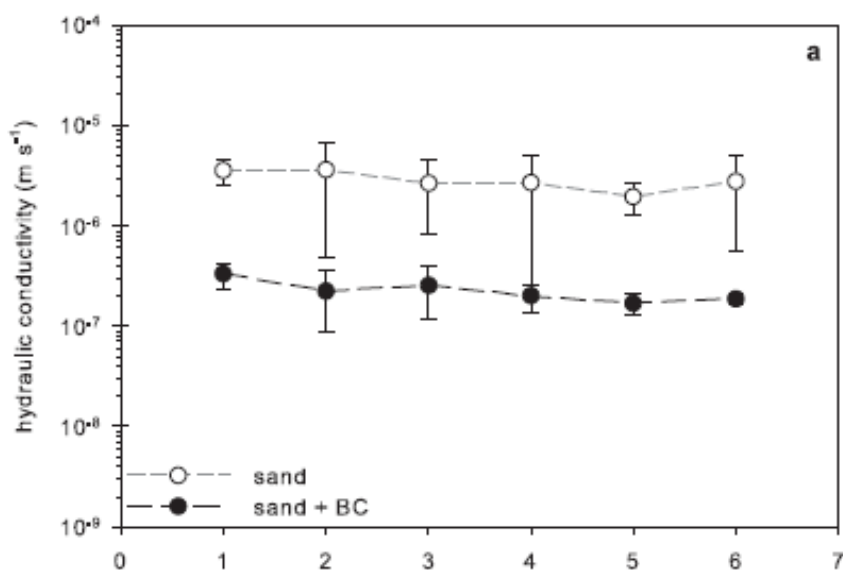
Vliv množství aplikovaného biocharu dle Lim et al., (2016) je popsáno níže. U hrubého a jemného písku, při zvýšeném množství aplikovaného biocharu se snižovala hodnota K_s . Ale na druhou stranu pokud jde o přidání 1% a 2% biocharu, tak tyto dávky jílových hlín hodnotu K_s zvyšovaly. Při aplikaci 5% biocharu již nezaznamenali žádný pokles nebo nárůst. Závěrem by se dalo říci, že nasycená hydraulická vodivost je ovlivněna velikostí částic a množstvím aplikovaného biocharu a samotnou půdou (zrnitostním složením) Lim et al., (2016).

T.J. Lim et al./Chemosphere 142 (2016) 136–144

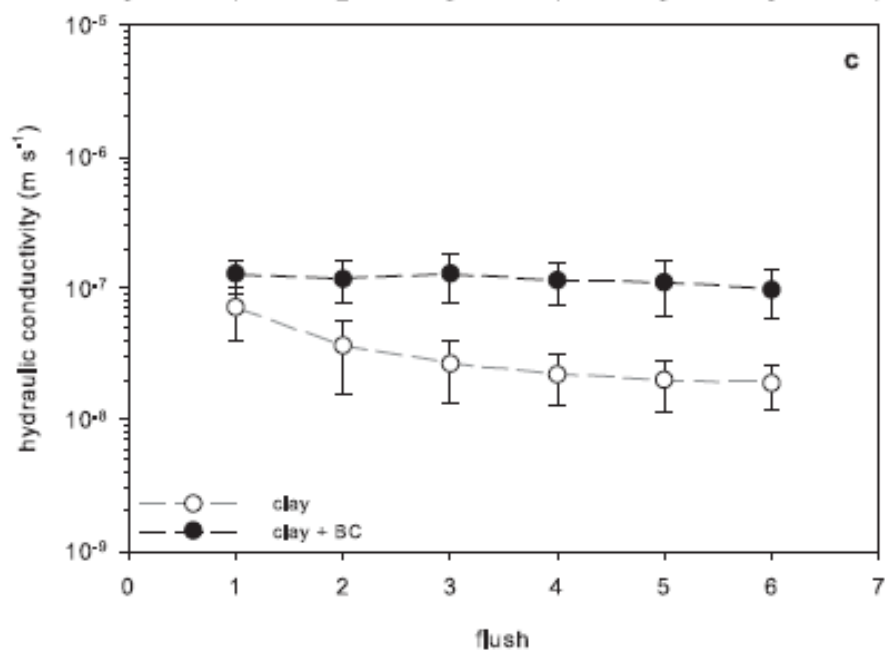


Obr. č. 4 Zrnitostní křivka pro různé půdy (převzato z Lim et al., 2016)

Podle Barnes et al., (2014) biochar vyvolává změny v nasycené hydraulické vodivosti. Barnes et al., (2014) testovali biochar získaný pomocí pyrolýzy, který byl získán ze stromu *prosopis*. Cílem experimentu bylo zjištění vlivu biocharu na uhlík v půdě a zemědělský potenciál půd. Měření bylo provedeno metodou válcových experimentů na odlišných půdách (písek, organický materiál a jíl). Barnes et al., (2014) použili biochar drcený z lusků ze stromu naditec a zjistili že, biochar u písčitéch půd snižuje hodnoty K_s v průměru o 92 % a u organické půdy o 62 %. Ale na druhou stranu u jílových půd zvýšil hodnoty K_s v průměru o 328 %. Změny v K_s má dopady na infiltraci a dostupnost vody pro rostliny. Experiment ukázal, že přidáním biocharu do hrubších půd hodnotu K_s snižuje (viz obr. č. 5). Naopak v jemnozrnném jílu biochar zvyšuje hodnoty K_s (viz obr. č. 6), pórovitosti a propustnost což je pro růst rostlin mnohem vhodnější. Barnes et al., (2014) zjišťovali i hodnoty uhlíku a dusíku pro měřené půdy. Změny hydraulických charakteristik, obsahu uhlíku a dusíku způsobené aplikací biocharu jsou závislé na chemickém složení půdy a zastoupení půdních částic podle velikosti.

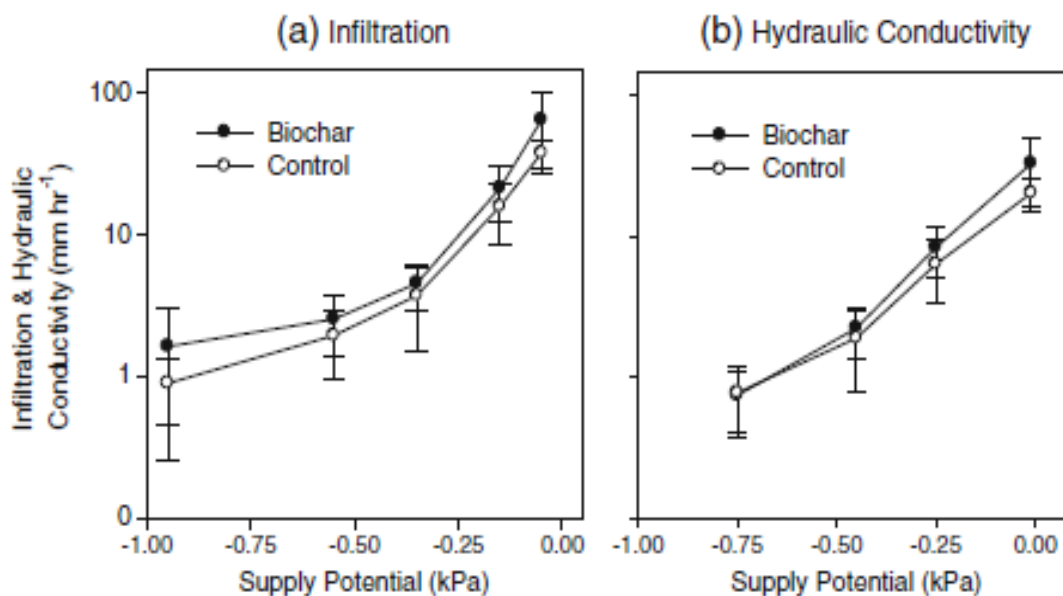


Obr. č. 5 Hydraulická vodivost pro písčitou půdu (převzato z Barnes et al., 2014)



Obr. č. 6 Nasycená hydraulická vodivost pro jíl (převzato z Barnes et al., 2014)

Podle Hardie et al., (2014) má biochar vliv na půdu a dostupnost vody. Cílem studie je (i) stanovení účinků biocharu z rodu *acacia* na základní fyzikální vlastnosti půdy včetně hydraulické vodivosti a za (ii) prozkoumat mechanismy, kterými biochar ovlivňuje pórovitost půdy. Hardie et al., (2014) použili biochar vytvořený pomocí pyrolýzy ze stromu akacie zelené. Při teplotě 300 – 1000 °C za nízkého nebo žádného přístupu kyslíku. Experiment byl v lokalitě Mounain v údolí Huon v Tanzanii. Měření probíhalo po dobu 30 měsíců a Hardie et al., (2014) zjistili že biochar neměl žádný význam na vlhkost půdy, ani obsah vody při podtlacích -1,0 až -10 kPa, polní vodní kapacitu, dostupnost vody rostlinami ani bod vadnutí. Půdy s příměsí biocharu měly vyšší hodnoty K_s (viz obr. č. 7), ale nižší objemovou hmotnost než půdy bez biocharu. Hardie et al., (2014) si mysleli, že biochar zvýší dostupnost vody v půdě a zvýší pórovitost, ale tento předpoklad se v tomto experimentu nepotvrdil.



Obr. č. 7 Infiltrace a nasycená hydraulická vodivost (převzato z Hardie et al., 2014)

Podle Herath et al., (2013) zkoumali vliv biocharu na fyzikální vlastnosti půdy ve dvou kontaminovaných půdách jílu a vulkanický popel. Cílem studie je zjistit vliv biocharu na fyzikální vlastnosti půdy. V experimentu byl použit biochar vytvořený pyrolýzou z kukuřice za teploty 350 – 550 °C. Měření bylo provedeno metodou konstantního spádu na permeamtru po dobu 295 dní. Podle Herath et al., (2013) biochar ovlivnil agregátní stabilitu, objemovou vlhkost a K_s . Agregátní stabilita byla ovlivněna tak, že byla zvýšena u obou zkoumaných půd. Objemová vlhkost byla také zvýšena, ale jen u jedné půdy. U obou půd byla zvýšena hodnota K_s . Herath et al., (2013) zjistili, že biochar zlepšuje pórovitost, objemovou vlhkost a zadržování vody ve zkoumaných půdách. Podle Herath et al., (2013) je biochar vhodný přidávat do chudých půd, ale také je důležité vliv biocharu dále testovat.

Podle Jeffery et al. (2015) aplikace biocharu do písčitých půd nezlepšuje hydrologické funkce. V dnešní době se předpokládá, že biochar je prostředek ke zlepšení kvality půdy a tímlepší také výnos plodin. Vedle blahodárných účinků na půdní živiny se předpokládá že biochar zlepšuje zadržování vody v půdě. V literatuře, ale zatím pro toto tvrzení není žádný důkaz. Proto se Jeffery et al., (2015) rozhodli udělat dva experimenty na písčité půdě v Nizozemsku. V prvním experimentu byl získán biochar pomalou pyrolýzou travní suroviny při dvou teplotách (400 °C a 600 °C) a byl aplikován do půdy v poměru 10 t.ha⁻¹. Ve druhém experimentu byl získán biochar při teplotě 400 °C a aplikován do půdy v poměru 1, 5, 20 a 50 t.ha⁻¹. Půdy byly analyzovány na zadržování vody v půdě, stabilitu

a další fyzikální parametry půd. Ani v jednom z experimentů Jeffry et al., (2015) nenašli žádné významné dopady používání biocharu na zadržení vody v půdě. Agregátní stabilita nebyla také výrazně ovlivněna. V experimentech byla ke zjištění pórovitosti biocharu použita analýza XRT. Tato analýza ukázala, že pórovitost u biocharu při teplotě 400 °C je 48 % a u biocharu s teplotou 600 °C je pórovitost 57 %. Více než 99 % vnitřních pórů biocharu bylo spojeno s povrchem, což naznačuje potenciální roli biocharu při zlepšení retenčních schopností půdy. Nicméně, biochar byl velice hydrofobní a Jeffry et al., (2015) předpokládali, že tyto silné hydrofobní vlastnosti brání vodě v infiltraci do částic biocharu.

4 Metodika

4.1 Charakteristika měřeného materiálu

Pro diplomovou práci, byla použita kontaminovaná nivní půda z Příbramska od řeky Litavka. Testovaná půda byla homogenizovaná a proseta na sítu o průměru oka 2 mm. Obsah skeletu částic nad dva milimetry byl v této zemině zanedbatelně malý. Zemina obsahovala 2,15 – 2,18 % celkového (organického + anorganického) uhlíku.

Pro série měření K_s byla stanovena zrnitostní křivka hustoměrnou metodou dále byla provedena klasifikace půdního druhu dle USDA.¹

Měření probíhalo v laboratoři KVHM². Pro hustoměrnou metodu byla zvážena kádinka, do které byla přidána zemina pro měření zrnitosti. Hmotnost zeminy pro měření I byla 40,34 g a pro měření II byla 40,40 g. K zemině bylo přidáno stejné množství dispergačního činidla v ml a bylo vše důkladně promícháno. Do kádinky byla přilita částečně demineralizovaná voda do objemu 200 ml a suspenze byla znovu důkladně promíchána. Nechala se uležet cca 2 hodiny, aby se činidlo spojilo se zeminou. Po uplynutí 2 hodin bylo možno dále pokračovat v měření.

Dalším postupem bylo vaření zeminy s dispergačním činidlem. Po zahřátí roztoku v kádince na bod varu bylo nutno kapalinu důkladně míchat (viz obr. č. 8). Jelikož při varu se nějaké množství kapaliny odpaří, bylo nutno dolévat částečně demineralizovanou vodu do objemu 200 ml. Vaření, důkladné míchání a doplňování kádinky s roztokem a zeminou probíhalo cca po dobu 1 hodiny. Následně kádinka vychladla na pokojovou teplotu. Během chladnutí kádinky byly připraveny dva válce o objemu 1 litr (viz obr. č. 9). Do jednoho válce byla nalita jen částečně demineralizovaná voda s dispergačním činidlem o stejném objemu jako do kádinky se zeminou. Toto bylo provedeno z důvodu zjištění hustoty částečně demineralizované vody, která byla potřeba do vzorce pro výpočet zrnitosti.

Do druhého válce byl nalit roztok z kádinky. Z kádinky bylo nutno odebrat její celý obsah. Jediné na co bylo potřeba dávat si pozor, že válce mají určitý objem, tak mohlo být nalito do válce pouze 1,5x objem kádinky.

¹ USDA - United States Department of Agriculture, trojúhelníkový klasifikátor půd

² KVHM – laboratoř katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování

Samotné měření probíhalo na obou válcích. Jen válec se zeminou musel být důkladně promíchán po dobu cca 1 minuty. A hned začít měřit. Měření probíhalo v časových intervalech (0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 15; 50; 120; 180; 300; 1 440 min). V těchto intervalech byla měřena speciálním hustoměrem (viz obr. č. 9) hustota suspenze a také její teplota.

Jako poslední byla proseta zemina přes síto o velikosti $< 0,25$ mm. Po prosetí bylo síto dáno se zeminou do sušárny na 60 °C do konstantní hmotnosti, aby byla zjištěna hmotnost zeminy, která zůstala na sítu. Pro měření I byla hmotnost 1,15 g a pro měření II byla hmotnost 1,45 g.

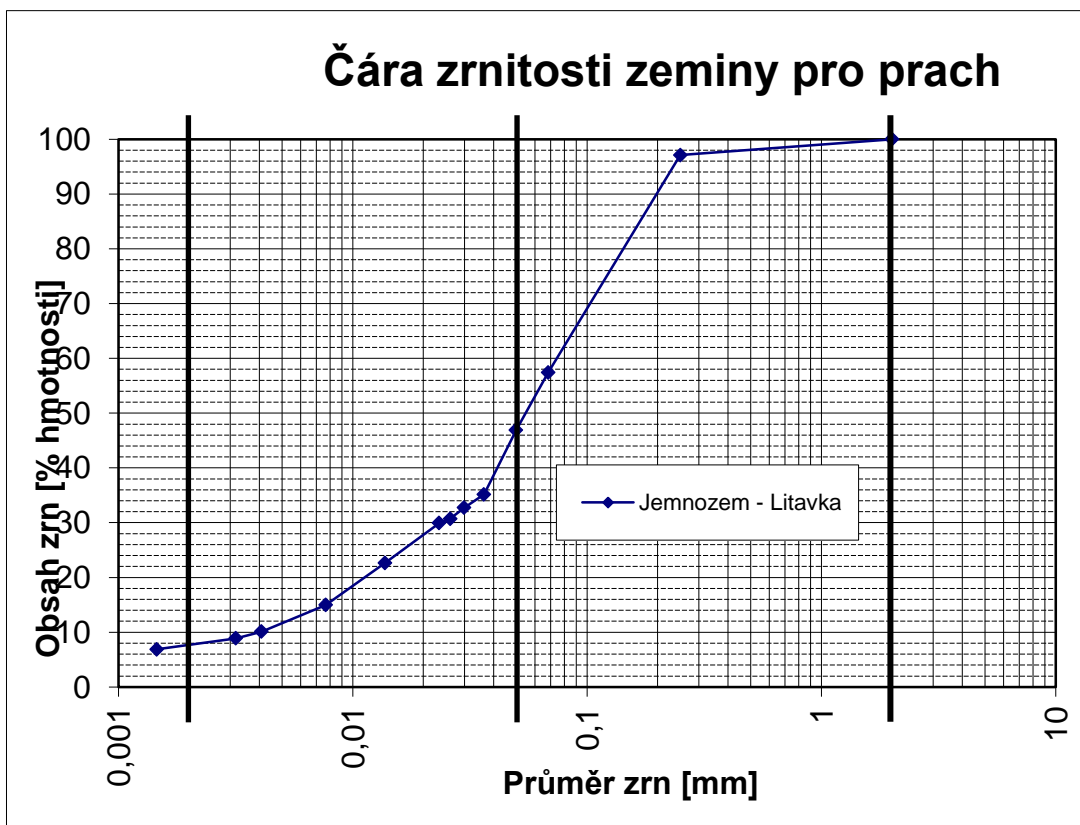


Obr. č. 8 Míchání a vaření roztoku pro měření zrnitosti

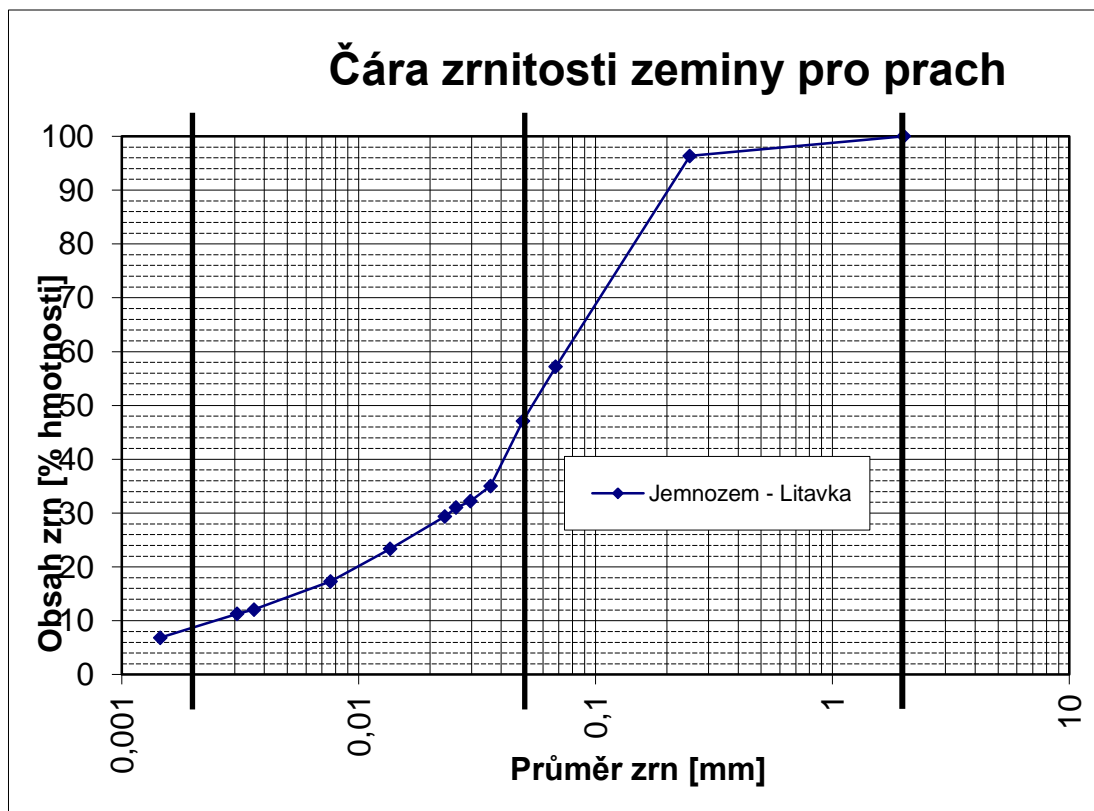


Obr. č. 9 Válce, hustoměry a teploměry pro měření zrnitostní křivky

Výsledné hodnoty zrnitosti (viz graf č. 1) pro měření I byly 8 % jílu (< 0,002 mm), 40 % prachu (0,002 – 0,05 mm) a 52 % písku (0,05 – 2 mm). Výsledné hodnoty zrnitosti (viz graf č. 2) pro měření II byly 9,5 % jílu (< 0,002 mm), 38,5 % prachu (0,002 – 0,05 mm) a 52 % písku (0,05 – 2 mm). Z výsledných hodnot pro obě série vyplývá, že se jedná o půdní druh sandy loam až loam (písčitá hlína až hlína).



Graf č. 1 Zrnitostní křivka kontaminované nivní půdy pro měření I.



Graf č. 2 Zrnitostní křivka kontaminované nivní půdy pro měření II

Do těchto půd byl v různém množství přidán biochar, který byl získán pyrolýzou ze stopek vinné révy. Velikost částic biocharu byla menší než 0,5 mm a obsahoval 1,45 % dusíku, 1,7 % vodíku a 12,5 % kyslíku. Celkový obsah uhlíku byl 60,69 %. Podrobnější charakteristiku testovaného biocharu uvádí Trakal et al., (2014).

V tabulce č. 2 jsou uvedeny objemové hmotnosti, hmotnost zůstatkové vody, pórovitost, poměr hmotnosti vody a pórovitosti, rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti pro měření I, které byly vypočteny podle vzorců 6 až 10. Objemová hmotnost vzorků s biocharem a vzorků bez biocharu byla téměř shodná a to z důvodu malé objemové hmotnosti biocharu, který má pouhých $0,16 \text{ g.cm}^{-3}$ (Johannes et al., 2009). Hmotnost zůstatkové vody u vzorků s biocharem je výrazně větší než u vzorků bez biocharu zřejmě z důvodu sorpce vody na částice biocharu a bobtnání biocharu. Vzorky s biocharem tedy při plném nasycení obsahovaly více vody než vzorky bez biocharu. Pórovitosti vypočteny z objemové hmotnosti a zdánlivé hustoty pevných částic zeminy jsou velice podobné a nejsou v nich výrazné rozdíly. Veliký rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti mohl být zapříčiněn bobtnáním vzorků s 5% biocharem

v neobohaceném vzorku. Srovnání bobtnání 5% biocharu a vzorku bez biocharu lze shlédnout na obr. č. 10.

V tabulce č. 3 jsou uvedeny objemové hmotnosti, hmotnost zůstatkové vody, pórovitost, poměr vody a pórovitosti, rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti pro měření II, které byly měřeny rovněž podle vzorců 6 až 10. Objemová hmotnost vzorků s biocharem a vzorků bez biocharu byla téměř shodná z důvodu, že biochar má malou objemovou hmotnost a to $0,16 \text{ g.cm}^{-3}$ (Johannes et al. 2009). Hmotnost zůstatkové vody je u vzorků s biocharem větší z důvodu lepších sorpčních schopností biocharu a proto si vzorky s biocharem udrží více vody než vzorky bez biocharu. Pórovitost pro všechny vzorky je velice podobná a není zde znát žádný výrazný nárůst nebo pokles. Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti byl zapříčiněn bobtnáním biocharu. Porovnání bobtnání 2% biocharu a vzorku bez biocharu je prezentováno na obr. č. 11.

Tab. č. 2 Charakteristiky měřeného materiálu.

Objemová hmotnost suchého vzorku	Hmotnost zůstatkové vody=maximální objemová vlhkost [%]	Pórovitost	Poměr hmotnosti vody a pórovitosti	Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti	Číslo válečku
[g.cm ⁻³]	[g]=cm ³	[-]			[-]
1.209	59.47	0.544	1.094	5.1032	92
1.208	59.23	0.544	1.088	4.8071	76
1.209	58.40	0.544	1.074	4.0224	94
1.212	57.76	0.543	1.064	3.4805	83
1.205	57.17	0.545	1.048	2.6184	73
1.216	62.77	0.532	1.180	9.5925	89*
1.207	63.27	0.535	1.182	9.7209	81*
1.204	62.95	0.536	1.173	9.2990	80*
1.205	63.68	0.536	1.187	10.0501	95*
1.207	63.01	0.535	1.177	9.4616	77*

*vzorky s 5% biocharem

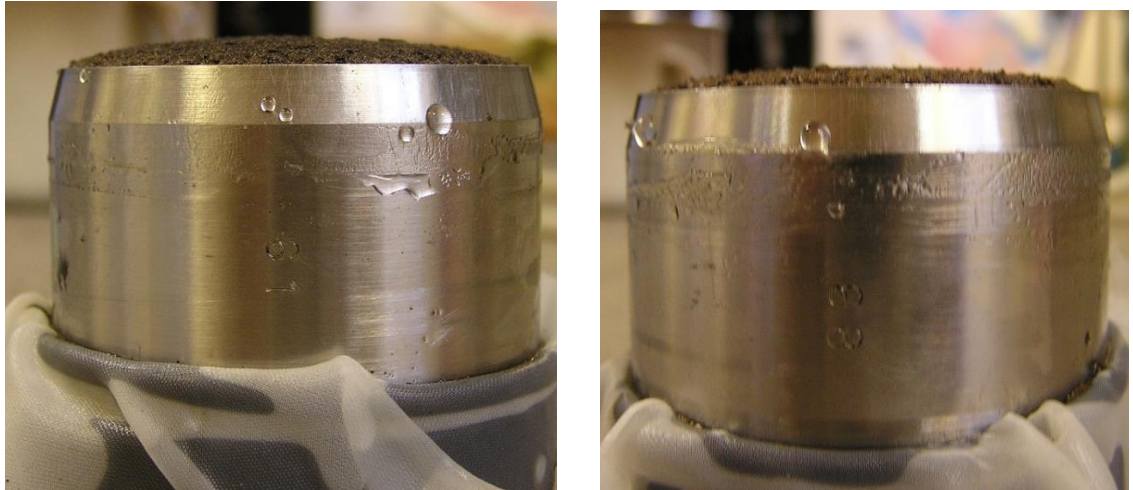


Obr. č. 10 Ukázka porovnání bobtnání 5% biocharu a vzorku bez biocharu.

Tab. č. 3 Charakteristiky měřeného materiálu.

Objemová hmotnost suchého vzorku	Hmotnost zůstatkové vody=maximální objemová vlhkost [%]	Pórovitost	Poměr hmotnosti vody a pórovitosti	Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti	Číslo válečku
[g.cm ⁻³]	[g]=cm ³	[-]			[-]
1.238	57.01	0.533	1.070	3.7175	83
1.237	57.68	0.533	1.081	4.3457	81
1.238	56.12	0.533	1.053	2.8451	95
1.238	57.07	0.533	1.071	3.8009	76
1.231	59.69	0.536	1.114	6.1297	92
1.242	57.76	0.527	1.095	5.0150	77*
1.230	59.57	0.532	1.119	6.3470	94*
1.230	61.23	0.532	1.151	8.0247	80*
1.231	57.93	0.532	1.090	4.7713	73*
1.235	58.41	0.530	1.102	5.4031	89*

*vzorky s 2% biocharem



Obr. č. 11 Ukázka porovnání 2% biocharu a vzorku bez biocharu.

4.2 Použité vzorce a metody pro charakteristiky materiálu

Objemová hmotnost (ρ_v):

$$\rho_v = \frac{m_z}{V_s} \quad (6)$$

Kde m_z je hmotnost vysušeného vzorku půdy [g], V_s je objem Kopeckého válečku [cm³]

Obsah vody ve vzorku při stavu blízkém nasycení (m_w):

$$m_w = m_{nas} - m_v - m_z \quad (7)$$

Kde m_{nas} je hmotnost téměř nasyceného vzorku [g], m_v je hmotnost Kopeckého válečku [g], m_z je hmotnost vysušeného vzorku půdy [g]

Pórovitost (P):

$$P = 1 - \frac{\rho_v}{\rho} \quad (8)$$

Kde ρ_v je objemová hmotnost [g.cm⁻³], ρ je zdánlivá hustota pevných částic zeminy [g.cm⁻³]

Poměr hmotnosti vody a pórovitosti:

$$U_{m_w/P} = \frac{m_w}{100 * P} \quad (9)$$

Kde P je pórovitost [-], m_w je hmotnost vody [g]

Rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti:

$$U_{m_w-P} = m_w - P * 100 \quad (10)$$

Kde P je pórovitost [-], m_w je hmotnost vody [g]

4.3 Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků

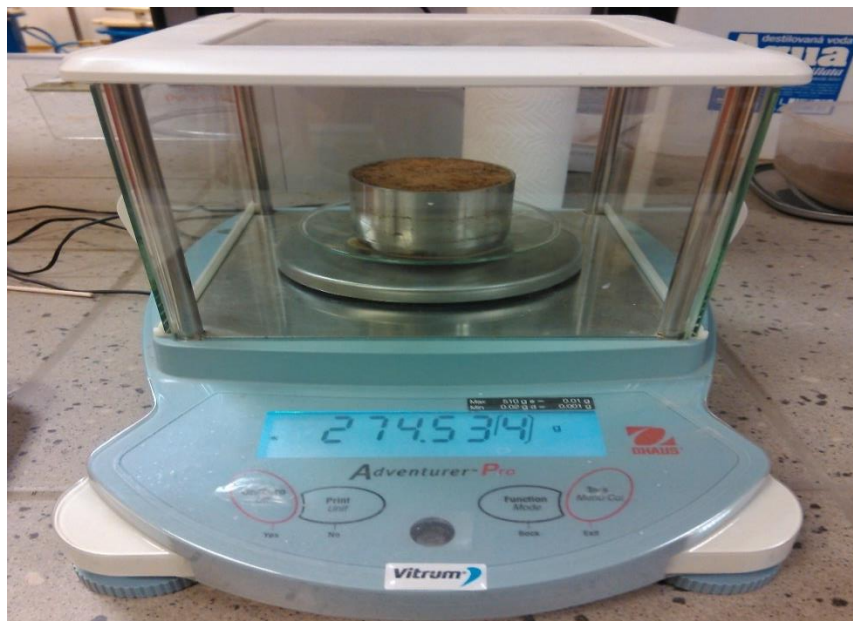
4.3.1 Příprava a plnění vzorků pro měření

Příprava a plnění vzorků probíhala v laboratoři KVHM za kontroly vedoucího diplomové práce Ing. Lukáše Jačky, Ph.D.

Vzorky byly připravovány pro dvě série měření. V prvním měření byla měřena kontaminovaná nivní půda a stejná půda obohacená o 5% složku biocharu. Příprava spočívala v prosetí zeminy na částičky menší než 2 mm a obsah skeletu. Poté byl odebrán vzorek zeminy, který byl zvážen a následně dán do sušičky a za malé teploty byl sušen. Usušený vzorek byl následně znovu zvážen k zjištění vlhkosti zeminy, která byla dávána do válečků. Výsledná vlhkost byla cca 1 % hmotnosti zeminy. Zemina byla postupně sypána do Kopeckého válečku o výšce 4 cm, objemu 100 cm³ a identifikačního čísla na vnější straně. Následně bylo z celkové hmotnosti zeminy vypočteno 5% zastoupení biocharu. Biochar byl následně přidán do zeminy a důkladně promíchán. Promíchání zeminy bylo nutné z důvodu homogenity zeminy. Takto promíchaná zemina byla vložena do Kopeckého válečku.

Před samotným naplněním bylo nutné nejdříve zvážit očištěné Kopeckého válečky a dvě víčka patřící ke každému válečku. Válečky a víčka byla vážena na váze (viz obr. č. 12). Plnění vzorků (viz obr. č. 13) probíhalo postupně, aby nevznikaly referenční cesty. Hutnění zeminy probíhalo 50-ti poklepaními na váleček. Průměrná hmotnost vzorků ve válečcích byla 128,78 g. Průměrná hmotnost vzorků s 5% biocharem byla 129,32 g. Stejný postup byl opakován i u druhé série měření. Průměrné hmotnosti vzorků bez biocharu byly 129,17 g a pro zeminu s biocharem

byly 128,92 g. Kompletní váhové údaje ke všem vzorků pro měření I jsou uvedeny v příloze č. 1 a kompletní váhové údaje k měření II jsou uvedeny v příloze č. 2.



Obr. č. 12 Ukázka měření skoro nasyceného vzorku.



Obr. č. 13 Plnění vzorků zeminou.

Před vložením jednotlivých vzorků do permeamtru a následného sycení a měření hodnoty K_s bylo nutné jednotlivé vzorky s půdou upevnit do držáků, které byly následně vkládány do permeamtru. K uchycení do permeamtru byl zapotřebí držák vzorků, hydrofilní gáza, sítko a vzorky. Uchycení do držáku probíhalo tak že se ze spodní hrany Kopeckého válečku sundalo opatrně víčko a následně byla dána gáza a ta byla upevněna gumičkou. Poté bylo na gázu upevněno sítko. Dále

bylo z horní hrany válečku sundáno víčko a hrana byla namazána silikonem a poté byl vzorek uchycen do držáku. Po upevnění vzorku do držáku byly vzorky uloženy do permeamtru. Tento postup byl opakován u všech vzorků.

4.3.2 Sycení a měření vzorků

Sycení a měření vzorků probíhalo na laboratorním permeamtru od nizozemské firmy Eijkelkamp (viz obr. č. 14) metodou konstantního spádu, která je popsána v kapitole 3. Držáky se vzorky byly vloženy do permeamtru (viz obr. č. 15). Následně byla pod dolní okraj válečku nalita částečně demineralizovaná voda (viz obr. č. 15). Dolitím začala doba sycení vzorků. Délka sycení závisí na použitém materiálu. Pro naše měření byla zvolena doba sycení pro obě měření 7 dní. Po tuto dobu bylo potřeba kontrolovat a zvedat hladinu vody pro postupné sycení vzorků až po určenou hodnotu. Postupné sycení bylo prováděno z důvodu vytlačení vzduchových bublin, aby nedošlo ke zkreslení měření K_s z důvodu uzavřeného vzduchu v pórech.



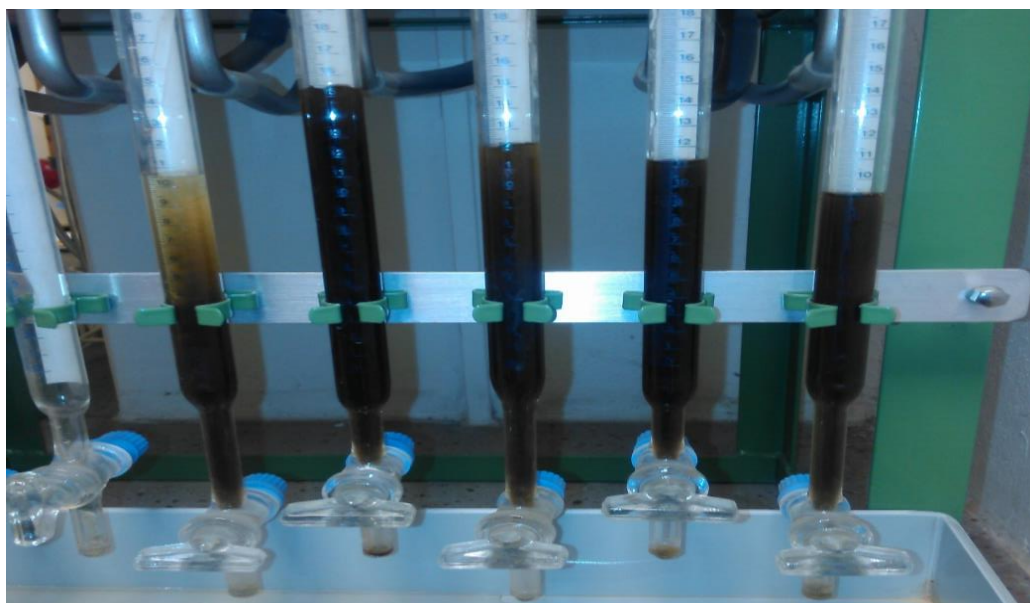
Obr. č. 14 Permeametr od společnosti Eijkelkamp.

Hodnoty K_s byly měřeny ve dvou různých sériích. Jak už bylo napsáno výše, první měření obsahovalo vzorky s kontaminovanou nivní půdou a vzorky obohacené o 5% biochar. Před samotným měřením byly dány do držáků plastové násosky, které odváděly prosakující vodu do byrety. Násosky byly používány pouze pro měření s konstantním spádem. Násosky jsou zobrazeny na obr. č. 15. Byrety jsou opatřeny

kohoutkem, který je před začátkem měření uzavřený. Před jednotlivými měřeními množství proteklé vody byla měřena teplota vody a výška hladiny v permeamtru nad vzorky (uvnitř držáků). Výška hladiny byla měřena mikrometrem, který je součástí permeamtru (viz obr. č. 15). Nejdůležitějším údajem měření je určitý objem vody, který nateče do byrety za měřený čas (viz obr. č. 16). Všechny naměřené hodnoty byly zaznamenávány do zápisníku měření.



Obr. č. 15 Ukázka hladiny částečně demineralizované vody s umístěním vzorků do permeamtru, dále jsou na obrázku zobrazeny násosky a mikrometr pro měření hladiny vody.



Obr. č. 16 Ukázka určitého objemu vody s 5% biocharem.

Doba měření K_s byla 14 dní. Začátek měření I probíhal v termínu od 29. 10. 2015 do 12. 11. 2015. Měření II proběhlo termínu od 7. 12. 2015 do 21. 12. 2015. V prvním týdnu měření bylo zapotřebí měřit hodnoty K_s v častějších intervalech z důvodu rychlého poklesu hodnot nasycené hydraulické vodivosti. To znamenalo např. první a druhé měření bylo provedeno v jeden den, další měření již za 24 hodin. Časové intervaly jsou v přílohách č. 3 až 6. V dalších dnech již nebylo zapotřebí měřit hodnoty tak často. V druhém týdnu bylo možné měřit hodnoty K_s za 2 až 3 dny.

4.3.3 Vyhodnocení měření a statistické porovnání

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí software MS Excel 2013 a hodnoty nasycené hydraulické vodivosti byly vypočteny podle vzorce č. 3. Pro porovnání výsledných hodnot K_s v sériích byly vytvořeny grafy z průměrných hodnot K_s . Dále byla vypočtena statistika pro jednotlivé série měření (směrodatná odchylka, koeficient variace, minimum, maximum a rozptyl). Následně byly tyto výsledné hodnoty porovnány mezi skupinami.

Statistické výpočty v příloze č. 7 byly pro kontrolu vypočteny v programovém rozhraní R (verze 3.2.4.) ovládaném z uživatelského rozhraní R-studio. V tomto programu byly vypočteny t-testy, anova oneway test a vykresleny boxploty.

T-testy byly vyhodnoceny na hladině pravděpodobnosti 0,05. Pokud průměrné hodnoty byly nižší než 0,05, pak je zamítnuta nulová hypotéza t-testu (skutečný rozdíl v průměrech je nulový) porovnávané průměry jsou statisticky významně rozdílné. Vstupními hodnotami pro t-testy jsou hodnoty K_s pro jednotlivé kroky měření.

ANOVA byla vyhodnocena na stejných parametrech jako t-testy. Vstupními hodnotami pro ANOVA test jsou hodnoty K_s pro celé měření (kontrolní vzorky a vzorky s biocharem).

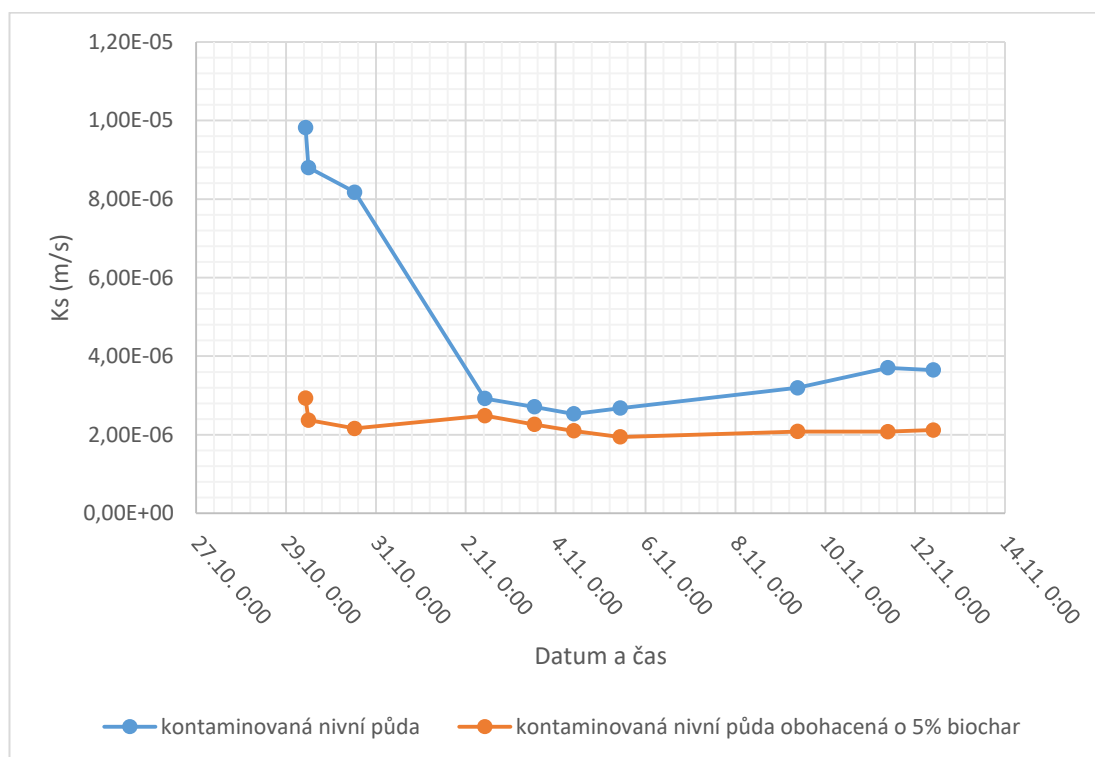
5 Výsledky a diskuze

Měření se konalo v říjnu a prosinci roku 2015. V každém z měření bylo deset vzorků, tj. celkem 20 vzorků.

5.1 Měření I

V měření I bylo měřeno 10 vzorků. Z toho 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou, které jsou brány jako kontrolní a 5 vzorků obohacené o 5% biochar. Pro jednotlivé vzorky jsou hodnoty K_s v přílohách č. 3 a č. 4.

V tabulce č. 4 jsou výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti a popisná statistika pro 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou. Průměrné hodnoty K_s pro kontaminovanou nivní půdu se pohybovaly v rozmezí od $9,817 \cdot 10^{-6}$ do $2,533 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V tabulce č. 5 jsou uvedeny výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti a popisná statistika pro 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou obohacenou o 5% biochar. Průměrné hodnoty K_s pro kontaminovanou nivní půdu obohacenou o 5% biochar se pohybovaly v rozmezí od $2,93 \cdot 10^{-6}$ do $1,945 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V grafu č. 3 jsou průměrné hodnoty K_s pro měření I.



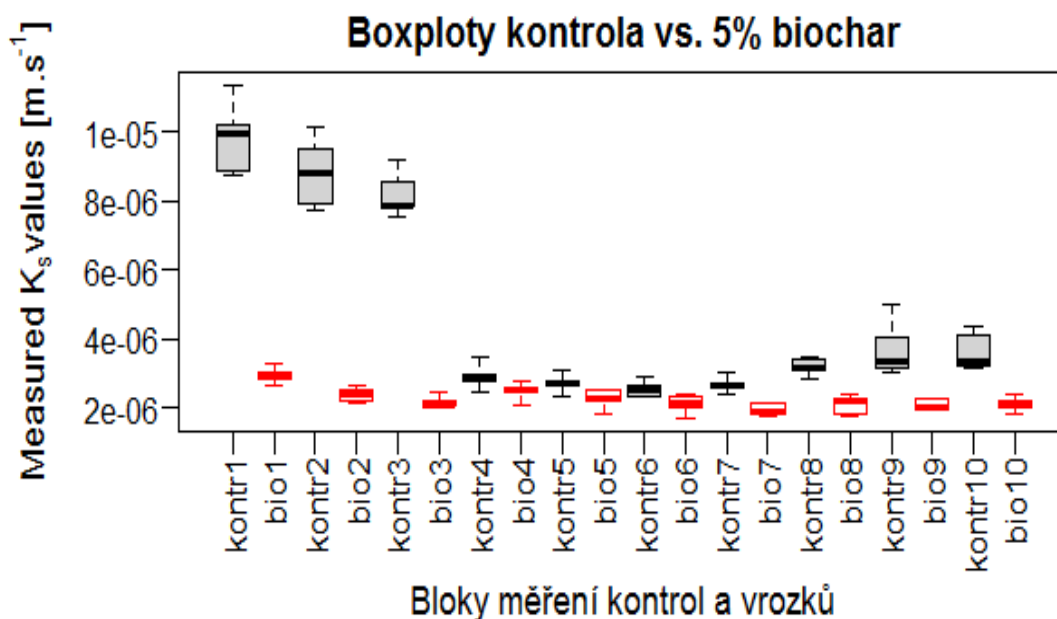
Graf č. 3 Výsledné hodnoty K_s pro měření I.

Tab. č. 4 Průměrné hodnoty kontaminované nivní půdy.

Popisná statistika kontaminované nivní půdy							
m.č.	datum a čas měření	průměr (m.s ⁻¹)	směrodatná odchylka (m.s ⁻¹)	koef. variace (%)	minimum	maximum	rozsah
1	29.10. 10:30	9.817E-06	1.07E-06	10.90	8.75E-06	1.13E-05	2.59E-06
2	29.10. 12:00	8.801E-06	1.04E-06	11.76	7.71E-06	1.01E-05	2.42E-06
3	30.10. 12:45	8.174E-06	6.54E-07	8.00	7.52E-06	9.15E-06	1.63E-06
4	2.11., 10:15	2.92E-06	3.72E-07	12.73	2.48E-06	3.49E-06	1.02E-06
5	3.11. 12:45	2.709E-06	2.78E-07	10.25	2.31E-06	3.08E-06	7.77E-07
6	4.11. 9:45	2.533E-06	2.36E-07	9.33	2.3E-06	2.87E-06	5.67E-07
7	5.11. 10:30	2.677E-06	2.30E-07	8.58	2.41E-06	3.04E-06	6.31E-07
8	9.11. 9:15	3.194E-06	2.43E-07	7.62	2.84E-06	3.44E-06	5.97E-07
9	11.11. 9:30	3.705E-06	8.16E-07	22.02	3.03E-06	4.97E-06	1.94E-06
10	12.11. 9:45	3.648E-06	5.59E-07	15.32	3.17E-06	4.37E-06	1.2E-06

Tab. č. 5 Průměrné hodnoty kontaminované nivní půdy obohacené o 5% biochar.

Popisná statistika pro kontaminovanou nivní půdu obohacenou o 5% biochar							
m.č.	datum a čas měření	průměr (m.s ⁻¹)	směrodatná odchylka (m.s ⁻¹)	koef. variace (%)	minimum	maximum	rozsah
1	29.10. 10:30	2.93E-06	2.37E-07	8.09	2.62E-06	3.26E-06	6.41E-07
2	29.10. 12:00	2.374E-06	1.94E-07	8.18	2.16E-06	2.61E-06	4.55E-07
3	30.10. 12:45	2.159E-06	1.70E-07	7.88	2E-06	2.43E-06	4.31E-07
4	2.11. 10:15	2.487E-06	2.49E-07	10.03	2.09E-06	2.77E-06	6.78E-07
5	3.11. 12:45	2.261E-06	3.07E-07	13.58	1.79E-06	2.54E-06	7.48E-07
6	4.11. 9:45	2.098E-06	2.84E-07	13.53	1.67E-06	2.37E-06	7.03E-07
7	5.11. 10:30	1.945E-06	1.80E-07	9.24	1.75E-06	2.16E-06	4.12E-07
8	9.11. 9:15	2.084E-06	2.60E-07	12.49	1.79E-06	2.37E-06	5.79E-07
9	11.11. 9:30	2.079E-06	1.79E-07	8.60	1.92E-06	2.29E-06	3.69E-07
10	12.11. 9:45	2.118E-06	2.04E-07	9.62	1.84E-06	2.38E-06	5.47E-07



Graf č. 4 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, druhý kvartil a maximum) pro porovnání kontaminované nivní půdy a půdy obohacené 5% biocharem.

Z výsledných hodnot v tabulkách č. 4 a č. 5 je patrné, že u vzorků s biocharem jsou hodnoty K_s nižší než u vzorků bez biocharu. Tento výsledek je nejlépe ukázán v grafu č. 3. Z něho je zřejmé, že u vzorků bez biocharu (kontrolních vzorků) jsou hodnoty K_s na počátku měření vyšší než na jeho konci. Z grafu č. 3 a tabulky č. 4 vyplývá pokles hodnot K_s v prvních čtyřech měření je pokles veliký. Až od pátého měření se hodnoty ustálí a jsou více konstantní až do konce měření. U hodnot s 5% biocharem tabulka č. 5 a graf č. 3, jsou hodnoty K_s jen u prvních dvou měření v poklesu a v průběhu měření jsou hodnoty skoro konstantní. Větší příměs biocharu v našem případě 5 % značně i měnil barvu proteklé vody (viz obr. č. 16). U vzorků s 5% biocharem se zjistilo, že vzorky si udrželi 2 krát více vody než vzorky bez biocharu (viz tab. č. 2). Na obr. č. 10 je ukázka srovnání bobtnání vzorku s 5% biocharem a vzorku bez biocharu.

Průměrné statistické hodnoty vypočtené ze všech časových kroků z tabulky č. 4 a znázorněné v grafu č. 4 pro kontaminovanou nivní půdou jsou minimum $4,25 \cdot 10^{-6}$, maximum $5,59 \cdot 10^{-6}$, koeficient variace 11,65 %, směrodatná odchylka $5,49 \cdot 10^{-7}$ a rozsah $1,34 \cdot 10^{-6}$. Průměrné statistické hodnoty pro kontaminovanou nivní půdu obohacenou o 5% biochar jsou minimum $1,96 \cdot 10^{-6}$, maximum $2,52 \cdot 10^{-6}$, koeficient variace 10,12%, směrodatná odchylka $2,26 \cdot 10^{-7}$ a rozsah $5,56 \cdot 10^{-7}$.

Výsledky párových testů pro jednotlivé kroky (viz tab. č. 6). Z tabulky č. 6 pro výsledné hodnoty t-testu vyplývá, že průměrné hodnoty K_s při aplikaci 5% biocharu jsou téměř ve všech krocích statisticky významně nižší.

Výsledné hodnoty pro vyhodnocení časových změn ANOVA (viz tab. č. 7). Z tabulky č. 7 vyplývá, že jak vzorky s aplikovaným biocharem, tak vzorky bez biocharu jsou nižší než hodnota $> 0,05$. Z výsledků je tedy patrné, že jak kontroly, tak vzorky s biocharem jsou statisticky významné.

Tab. č. 6 Výsledné p-value párových testů.

29.10. - 12.11.2015	
t-test	
krok1	0,000081
krok2	0,000110
krok3	0,000014
krok4	0,067210
krok5	0,042110
krok6	0,030712
krok7	0,000607
krok8	0,000121
krok9	0,009857
krok10	0,002161

Tab. č. 7 Výsledné hodnoty ANOVA oneway.

ANOVA		p-value
29.10-12.11.2015	kontroly	1,14E-10
	biochar	0,000848

Nižší hodnoty K_s u vzorků použité půdy s aplikací biocharu pravděpodobně byly zapříčiněny tím, že biochar udrží více vody a bobtná ve vzorcích (viz obr. č. 10). Tento efekt je způsoben jemnější zrnitostí biocharu, než půda do které byl aplikován. Dokáže vyplnit póry, které má samotná půda. V těchto pórech se uchytlí, nabobtná a tím je ucpe. Voda z těchto důvodů nemůže proudit tak rychle, jako je tomu u vzorků bez biocharu. Odhad pórovitosti (viz tab. č. 2) u vzorků s biocharem nebyl tak ovlivněn, protože je vypočten z objemové hmotnosti měřené před sycením vzorků vodou podle vzorce č. 8 a bobtnání zde není započteno. Herath et al., (2013) také zkoumaly vliv biocharu na K_s a fyzikální vlastnosti, ale u jílových půd. U vzorků s biocharem se hodnota K_s zvýšila, ale pórovitost také nebyla ovlivněna.

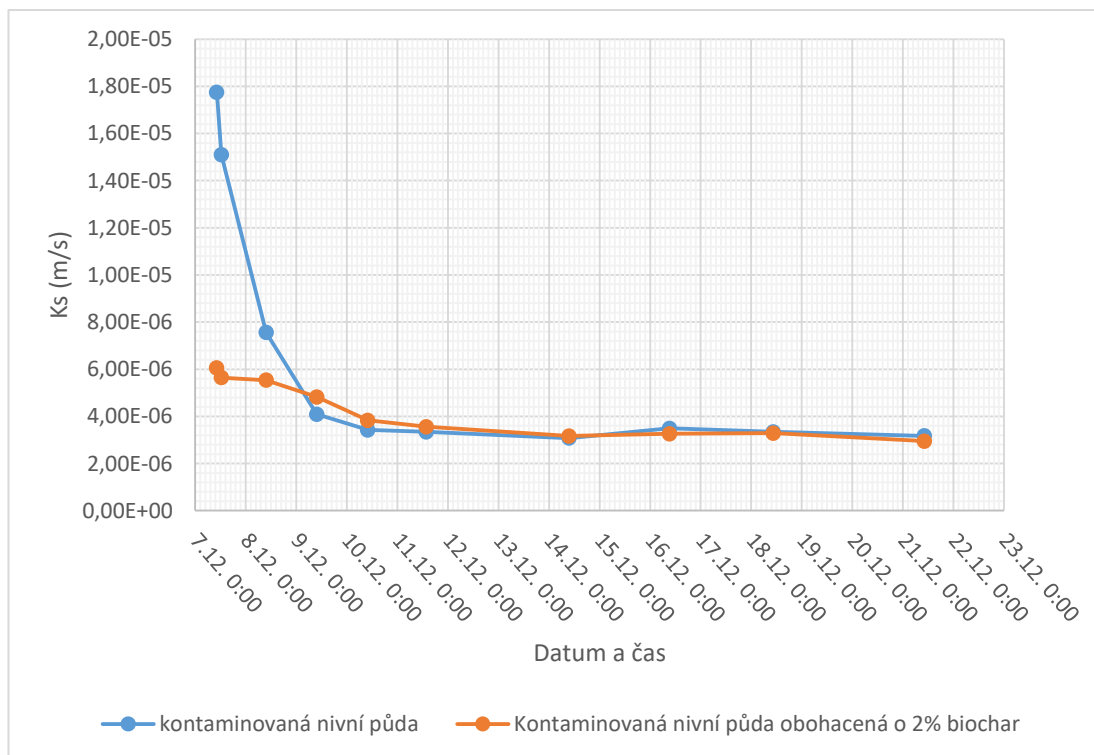
Hardie et al., (2014) rovněž zkoumaly vliv biocharu na K_s a pórovitost. Výsledkem bylo, že K_s se u jílových půd změnila, ale pórovitost také bez výrazné změny. Barnes et al., (2014) u písčité půdy a u organické půdy naměřili hodnoty K_s nižší než u vzorků bez biocharu, ale pórovitost se také nezměnila. Lim et al., (2016) rovněž zjistili, že biochar u hrubého a jemného písku hodnoty K_s snižuje.

U statistických údajů jsou hodnoty u vzorků s biocharem nižší nebo blíže průměru než hodnoty u vzorků bez biocharu. Směrodatná odchylka je u vzorků s biocharem blíže průměru než je tomu u vzorků bez biocharu (viz tab. č. 4 a č. 5). Koeficient variace je u vzorků s biocharem v průměru o 1,53 % nižší než je tomu u vzorků bez biocharu. Rozsah je nižší u vzorků s biocharem než u vzorků bez biocharu. Tyto výsledky mohou být zapříčiněny aplikací biocharu do vzorků (viz graf č. 4).

5.2 Měření II

V měření II bylo měřeno 10 vzorků. Z toho 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou, které jsou brány jako kontrolní a 5 vzorků obohacené o 2% biochar. Pro jednotlivé vzorky jsou hodnoty K_s v přílohách č. 5 a č. 6.

V tabulce č. 8 jsou uvedeny výsledné hodnoty K_s a popisná statistika pro 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou. Průměrné hodnoty K_s se pohybovaly v rozmezí od $1,775 \cdot 10^{-5}$ do $3,49 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. V tabulce č. 9 jsou průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti a popisná statistika pro 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou obohacenou o 2% biochar. Průměrné hodnoty K_s se pohybovaly v rozmezí od $6,051 \cdot 10^{-6}$ do $2,95 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. V grafu č. 5 jsou zaznamenány průměrné hodnoty K_s pro měření II.



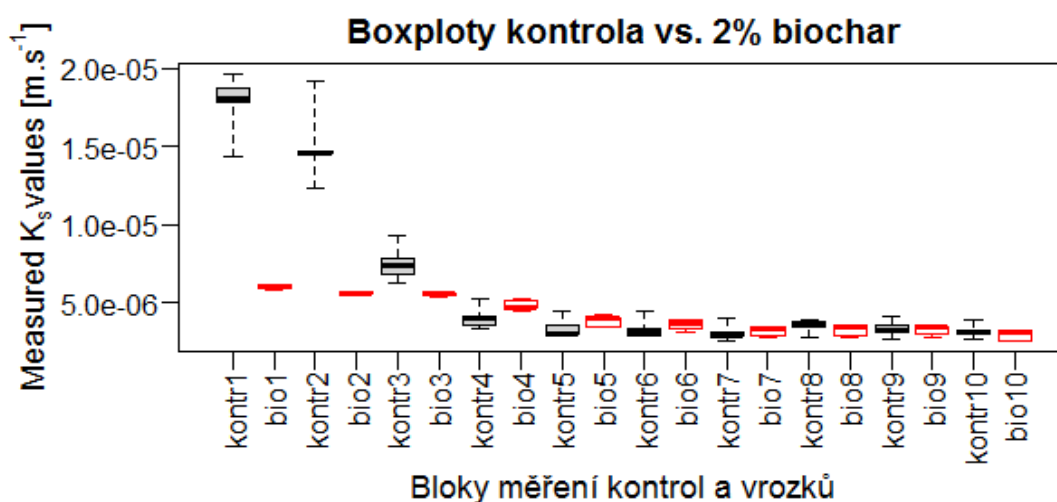
Graf č. 5 Průměrné hodnoty K_s pro měření II.

Tab. č. 8 Průměrné hodnoty kontaminované nivní půdy.

Popisná statistika kontaminované nivní půdy							
m.č.	datum a čas měření	průměr (m.s ⁻¹)	směrodatná odchylka (m.s ⁻¹)	koef. variace (%)	minimum	maximum	rozsah
1	7.12. 10:15	1.78E-05	2.00E-06	11.25	1.44E-05	1.97E-05	5.24E-06
2	7.12. 12:30	1.51E-05	2.53E-06	16.75	1.23E-05	1.93E-05	6.92E-06
3	8.12. 9:45	7.56E-06	1.15E-06	15.22	6.29E-06	9.33E-06	3.04E-06
4	9.12. 9:45	4.09E-06	7.50E-07	18.35	3.37E-06	5.31E-06	1.94E-06
5	10.12. 10:00	3.43E-06	6.45E-07	18.82	3.01E-06	4.51E-06	1.49E-06
6	11.12. 13:45	3.34E-06	6.74E-07	20.17	2.88E-06	4.51E-06	1.64E-06
7	14.12. 9:30	3.08E-06	5.55E-07	18.04	2.51E-06	4E-06	1.48E-06
8	16.12. 9:15	3.49E-06	4.25E-07	12.16	2.8E-06	3.9E-06	1.1E-06
9	18.12. 10:30	3.34E-06	5.74E-07	17.18	2.62E-06	4.18E-06	1.55E-06
10	21.12. 10:15	3.17E-06	4.44E-07	14.00	2.68E-06	3.88E-06	1.2E-06

Tab. č. 9 Průměrné hodnoty kontaminované nivní půdy obohacené o 2% biochar.

Popisná statistika pro kontaminovanou nivní půdu obohacenou o 2% biochar							
m.č.	datum a čas měření	průměr (m.s ⁻¹)	směrodatná odchylka (m.s ⁻¹)	koef. variace (%)	minimum	maximum	rozsah
1	7.12. 10:15	6.05E-06	1.52E-07	2.51	5.87E-06	6.21E-06	3.32E-07
2	7.12. 12:30	5.64E-06	9.06E-08	1.61	5.5E-06	5.74E-06	2.38E-07
3	8.12. 9:45	5.54E-06	1.08E-07	1.94	5.4E-06	5.67E-06	2.72E-07
4	9.12. 9:45	4.82E-06	3.22E-07	6.67	4.44E-06	5.22E-06	7.76E-07
5	10.12. 10:00	3.83E-06	3.70E-07	9.67	3.43E-06	4.22E-06	7.87E-07
6	11.12. 13:45	3.56E-06	3.59E-07	10.08	3.08E-06	3.89E-06	8.14E-07
7	14.12. 9:30	3.17E-06	3.32E-07	10.47	2.75E-06	3.46E-06	7.1E-07
8	16.12. 9:15	3.26E-06	3.57E-07	10.93	2.83E-06	3.55E-06	7.19E-07
9	18.12. 10:30	3.29E-06	3.47E-07	10.54	2.82E-06	3.61E-06	7.98E-07
10	21.12. 10:15	2.95E-06	3.22E-07	10.93	2.59E-06	3.25E-06	6.57E-07



Graf č. 6 Boxploty(minimum, 1. Kvartil, medián, druhý kvartil, a maximum) pro porovnání kontaminované nivní půdy a půdy obohacené o 2% biocharem.

Z výsledných hodnot v tabulkách č. 8 a č. 9 je patrné, že u vzorků s biocharem jsou hodnoty K_s na začátku měření nižší, než u vzorků bez biocharu. To je nejlépe prezentováno v grafu č. 5. V grafu č. 5 a průměrných hodnot v tabulce č. 8 si můžeme všimnout, že vzorky bez biocharu mají na začátku měření pokles a ke konci měření už jsou hodnoty konstantní. U vzorků s biocharem není na začátku měření tak výrazný pokles, ale spíše pozvolný a mezi časovými kroky jsou hodnoty méně rozkolísané (podobně jako při aplikaci 5% biocharu). U vzorků s 2%

biocharem bylo zjištěno, že vzorky si udržely více vody než vzorky bez biocharu, ale méně než při aplikaci 5% biocharu (viz tab. č. 3). Následné bobtnání těchto vzorků bylo větší než bobtnání vzorků bez biocharu (viz obr. č. 11).

Průměrné statistické hodnoty pro všechny časové kroky z tabulky č. 8 a znázorněné v grafu č. 6 pro kontaminovanou nivní půdou jsou minimum $5,25 \cdot 10^{-6}$, maximum $7,85 \cdot 10^{-6}$, koeficient variace 16,20 %, směrodatná odchylka $9,77 \cdot 10^{-7}$ a rozsah $2,56 \cdot 10^{-6}$. Průměrné statistické hodnoty z tabulky č. 9 pro kontaminovanou nivní půdu obohacenou o 2% biochar jsou minimum $3,87 \cdot 10^{-6}$, maximum $4,48 \cdot 10^{-6}$, koeficient variace 7,54 %, směrodatná odchylka $2,79 \cdot 10^{-7}$ a rozsah $3,10 \cdot 10^{-7}$.

Výsledky párových testů pro jednotlivé kroky (viz tab. č. 10). Z těchto hodnot v tabulce č. 10 vyplývá, že pro první tři kroky měření průměrné hodnoty při aplikaci 2% biocharu jsou statisticky významně nižší než je tomu v dalších krocích. Pro další kroky jsou průměrné hodnoty při aplikaci 2% biocharu statisticky méně významné.

Výsledné hodnoty pro vyhodnocení časových změn ANOVA (viz tab. č. 11). Z tabulky č. 11 vyplývá, že jak vzorky s aplikovaným biocharem, tak vzorky bez biocharu jsou nižší než hodnoty $> 0,05$. Z výsledků je tedy patrné, že jak kontroly, tak vzorky s biocharem jsou statisticky významné.

Tab. č. 10 Výsledné p-value párových testů.

7.-21.12.2015	
t-test	
krok1	0,000184413
krok2	0,001111224
krok3	0,017008156
krok4	0,094884682
krok5	0,271416493
krok6	0,55246701
krok7	0,761271809
krok8	0,383182617
krok9	0,867796109
krok10	0,394898672

Tab. č. 11 Výsledné hodnoty ANOVA oneway .

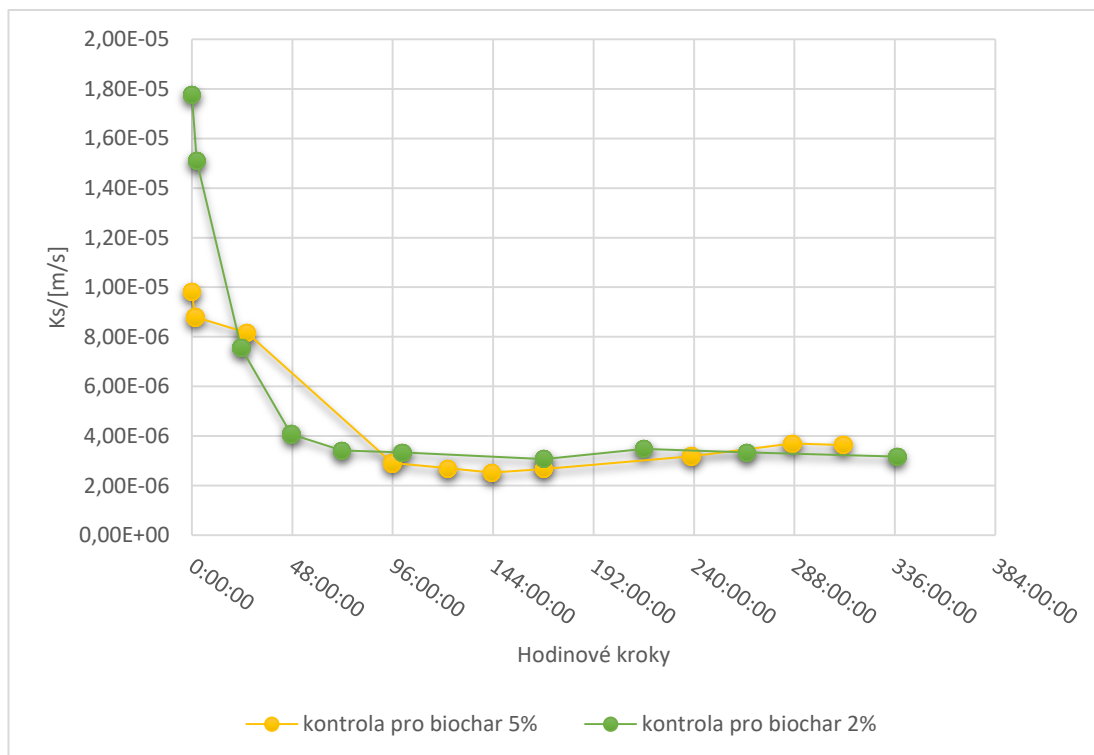
ANOVA		p-value
7.12.–21.12.2015	kontroly	5,62E-09
	biochar	2,12E-12

Nižší hodnoty K_s u vzorků s biocharem budou zapříčiněny pro použitou půdu tím, že biochar udrží více vody a bobtná ve vzorcích (viz obr. č. 11). Tento efekt je zapříčiněn tím, že biochar je jemnější, než půda do které byl aplikován, dokáže vyplnit póry, které samotná půda má. V těchto pórech se uchytlí, sorbuje vodu pevnými vazbami a nabobtná a tím póry ucpe. Voda nemůže proudit tak rychle, jako je tomu u vzorků bez biocharu. Pórovitost (viz tab. č. 3) u vzorků s biocharem nebyla tak ovlivněna, což je dáno metodou výpočtu (viz vzorec č. 8), kde se jako vstup zadává objemová hmotnost před bobtnáním. Porovnání objemu vody při nasycení a pórovitosti je tedy ukazatelem míry bobtnání. Důvody pro snížení K_s na počátku měření jsou zmíněny v předchozí kapitole 5.1.

5.3 Porovnání kontrolních půd

V kontrolním měření bylo porovnáváno 10 vzorků s kontaminovanou nivní půdou. Jednalo se o 5 kontrolních vzorků z měření I a 5 kontrolních vzorků z měření II.

Průměrné hodnoty byly pro měření I v rozmezí od $9,817 \cdot 10^{-6}$ do $2,533 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. a pro měření II v rozmezí od $1,775 \cdot 10^{-5}$ do $3,490 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.



Graf č. 7 Výsledné hodnoty K_s v časových krocích.

V tabulkách č. 4 a č. 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty K_s pro kontrolní vzorky. V grafu č. 7 jsou tyto výsledky prezentovány graficky. Z grafu č. 6 vyplývá, že první dvě průměrné hodnoty jsou pro kontrolní vzorky odlišné a již od třetího měření se tyto hodnoty skoro shodují.

Pro kontrolní měření byly vypočteny párové t-testy (viz tab. č. 12), tyto testy byly provedeny jen pro měření, které byly v podobných časech od počátku měření. Z tabulky č. 12 je patrné, že na začátku měření byly hodnoty $< 0,05$. To znamená, že průměrné hodnoty jsou od sebe výrazně rozdílné. Od kontrol 3-3, kde byly porovnávány kroky v podobných časových dobách, jsou hodnoty $> 0,05$. To znamená, že průměrné hodnoty jsou velmi podobné.

Tab. č. 12 Párové testy pro kontrolních měření.

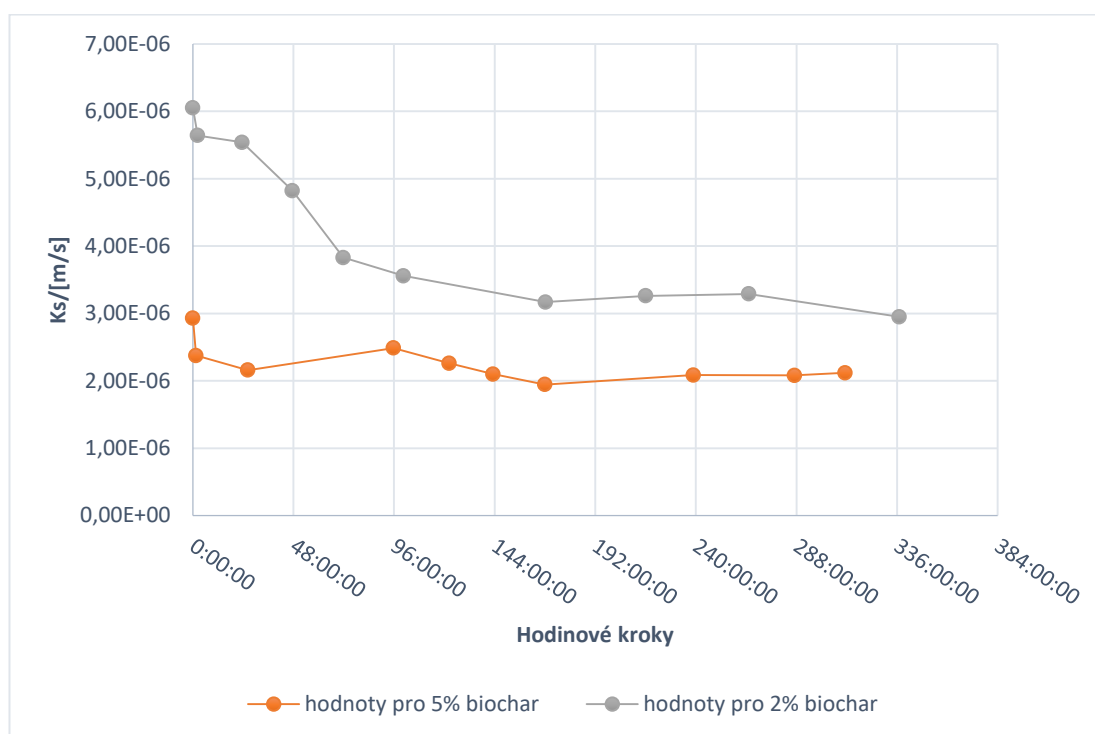
kontrola 5% a 2% bez vrácení vody	
	t-test-p-value
kontr1-1	0,0002075
kontr2-2	0,003043
kontr3-3	0,3348
kontr7-7	0,1928

Výrazné rozdíly v průměrných hodnotách K_s mezi kontrolami na začátku měření byly způsobeny nejspíše delší dobou protékání u vzorků s příměsí 2% biocharu, než u vzorků s 5% biocharem.

5.4 Porovnání obohacených půd

V porovnání obohacených půd bylo srovnáváno celkem 10 vzorků obohacených o biochar. Jednalo se o 5 vzorků obohacených o 5% biochar a 5 vzorků obohacených o 2% biochar.

Průměrné hodnoty K_s pro vzorky s 5% biocharem se pohybovaly v rozmezí od $2,93 \cdot 10^{-6}$ do $1,945 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ a pro vzorky s 2% biocharem se pohybovaly v rozmezí od $6,051 \cdot 10^{-6}$ do $2,95 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$.



Graf č. 8 Průměrné hodnoty K_s pro vzorky s biocharem.

V tabulkách č. 5 a č. 9 jsou průměrné hodnoty K_s pro vzorky obohacené o 5% a 2% biochar. V grafu č. 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty K_s pro kontaminované nivní půdy obohacené o biochar. Z výsledných hodnot je zřejmé, že vzorky s 5% biocharem měly nižší hodnoty K_s , než vzorky s 2% biocharem.

Nižší hodnoty u vzorků s aplikací 5% biocharu byly způsobeny větším množstvím aplikovaného biocharu než je 2 %. To se projeví na větším bobtnání 5% biocharu než je tomu u vzorků bez biocharu (viz obr. č. 10 a č. 11), také na tom

že vzorky s 5% biocharem si dokázaly udržet více pevně navázané vody. Z tohoto důvodu voda protékala přes tyto vzorky pomaleji (viz tab. č. 2 a č. 3).

Rovněž Lim et al., (2015) zjistili, že 2% biochar snižuje hodnoty K_s a 5% biochar hodnoty K_s ještě také snížil. I když Lim et al., (2016) porovnávali hrubý a jemný písek a jiný biochar.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá změnami v hodnotách nasycené hydraulické vodivosti v čase, při aplikaci biocharu do kontaminované nivní půdy. Pro stanovení výsledných hodnot K_s byl použit laboratorní permeametr od společnosti Eijkelkamp. Po ukončení měření byly vzorky zváženy a vysušeny v sušičce za nízké teploty z důvodu zachování uhlíku ve vzorcích. Následně byly dopočteny objemová hmotnost, hmotnost zůstatkové vody, pórovitost, poměr hmotnosti vody a pórovitosti, nakonec rozdíl hmotnosti vody a pórovitosti.

Výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se lišily podle přidaného množství biocharu do vzorků.

V měření I bylo měřeno celkem 10 vzorků z toho 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou (kontrolní vzorky) a 5 vzorků s přidáním 5% biocharu. Průměrné hodnoty K_s pro kontrolní vzorky se pohybovaly v rozmezí od $9,817 \cdot 10^{-6}$ do $2,533 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. č. 4). Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 7,62 % do 22,00 %. Průměrné hodnoty K_s pro vzorky s 5% biocharem se pohybovaly v rozmezí od $2,93 \cdot 10^{-6}$ do $1,945 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. č. 5). Hodnoty K_s u vzorků s 5% biocharem se v celém měření byly v nižších hodnotách než kontrolní vzorky (viz graf č. 3) Koeficient variace u vzorků s 5% biocharem byl v rozmezí od 7,88 % do 13,58 %. U vzorků s 5% biocharem mohlo snížit hodnoty K_s sorpce vody na částice biocharu a zvýšení zakřivenosti porézního prostředí (tortuozity), kterým proudí voda. Retence vody v blízkosti nasycení u vzorků bez biocharu byla výrazně nižší. Další faktor, který mohl snížit hodnoty K_s je bobtnání vzorků s biocharem (viz obr. č. 10). Bobtnání mohlo zapříčinit uzavření pórů či zmenšení průřezové plochy pórů.

V měření II bylo měřeno celkem 10 vzorků z toho 5 vzorků s kontaminovanou nivní půdou (kontrolní vzorky) a 5 vzorků s přidáním 2% biocharu. Průměrné hodnoty K_s pro kontrolní vzorky byly v rozmezí od $1,775 \cdot 10^{-5}$ do $3,490 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. č. 8). Koeficient variace se pohyboval v rozmezí od 11,25 % do 20,17 %. Průměrné hodnoty K_s pro vzorky s 2% biocharem byly v rozmezí od $6,051 \cdot 10^{-6}$ do $2,95 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (viz tab. č. 9). Průměrné hodnoty K_s u 2% biocharu byly na začátku měření nižší (tj. cca první 2 dny) než u kontrolních vzorků. Už ve čtvrtém měření kontrolní vzorky dosáhly na podobné hodnoty K_s (viz

graf č. 5) jako vzorky s 2% biochar. Koeficient variace byl v rozmezí od 1,61 % do 10,93 %.

Z výsledných hodnot tedy vyplívá, že vzorky s 5% biocharem mají po celou dobu měření pro použitou půdu (písčítá hlína až hlína) nižší hodnoty než vzorky kontrolní a vzorky s 2% biocharem (viz graf č. 8). Důvodem je množství aplikované dávky, kdy při vyšší dávce je zesílen efekt na bobtnání, retenci vody při nasycení a na nasycenou hydraulickou vodivost.

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.

Barnes., R.T., Gallagher, M.E., Masiello, C.A., Liu Z., Dugan. B., 2014. Biochar-Induced Changes in Soil Hydraulic Conductivity and Dissolved Nutrient Fluxes Constrained by Laboratory Experiments. PLoS ONE 9(9): e108340

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

Eijkelkamp, 2013. Operating instructions – 09.02 Laboratory-permeameters. Online: <https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0902elab-permeameters.pdf> (citováno 20. 4. 2016)

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.

Johannes, L., Stephen, J., 2009. Biochar for Environmental Management ISBN: 978-84407-658-1 (strana 28) online: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=w-CUty_JIfcC&oi=fnd&pg=PA13&dq=porosity+of+biochar&ots=cnh2JWTZG5&sig=56g_JVUmGXhj7ARtGHtvp0vDA8&redir_esc=y#v=onepage&q=density&f=false

Hardie, M., Cloithey, B., Bound, S., Oliver, G., Close, D., 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability. Plant and Soil 376: 347–361

Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., 2014. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: And Alfisol and an Andisol. Geoderma 209–210: 188–197

Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M., 2004: Hydropedologie 10. Skriptum ČVUT, Praha, 176 s.

Kutílek, M., Nielsen, D. R. 1994: Soil hydrology. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany, s. 370.

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.

Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R., Drury, C.F., Tan, C.S., 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 478 – 484.

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., 2007. *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha.

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

8 Seznam příloh

Příloha č. 1 Kompletní váhové údaje vzorků pro měření I

Příloha č. 2 Kompletní váhové údaje vzorků pro měření II

Příloha č. 3 Výsledné hodnoty K_s pro jednotlivé kontrolní vzorky měření I

Příloha č. 4 Výsledné hodnoty K_s pro jednotlivé vzorky s 5% biocharem

Příloha č. 5 Výsledné hodnoty K_s pro jednotlivé kontrolní vzorky měření II

Příloha č. 6 Výsledné hodnoty K_s pro jednotlivé vzorky s 2% biocharem

Příloha č. 7 Popisná statistika pro měření

Příloha č. 1 Kompletní váhové údaje vzorků pro měření I

číslo válečku	hmotnost válečku	hmotnost víček	celková hmotnost	vzorek bez biocharu	vzorek s 5% biocharem
[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
92	111.674	15.781	127.455	121.82	x
76	114.629	15.92	130.549	121.681	x
94	113.296	15.926	129.222	121.802	x
83	113.056	15.825	128.881	122.06	x
73	111.96	15.809	127.769	121.351	x
89*	110.88	15.784	126.664	x	122.527
81*	111.584	15.813	127.397	x	121.565
80*	111.481	15.754	127.235	x	121.301
95*	115.891	15.859	131.75	x	121.351
77*	117.74	15.789	133.529	x	121.572

Příloha č. 2 Kompletní váhové údaje vzorků pro měření II

číslo válečku	hmotnost válečku	hmotnost víček	celková hmotnost	vzorek bez biocharu	vzorek s 2% biocharem
[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
83	113.056	15.654	128.71	124.03	x
81	111.584	15.849	127.433	123.94	x
95	115.891	15.811	131.702	124.09	x
76	114.629	15.8	130.429	124.10	x
92	111.674	15.908	127.582	123.34	x
77*	117.74	15.808	133.548	x	124.5
94*	113.296	15.91	129.206	x	123.23
80*	111.481	15.912	127.393	x	123.29
73*	111.96	15.806	127.766	x	123.41
89*	110.88	15.773	126.653	x	123.81

Příloha č. 3 Výsledné hodnoty K_s pro kontrolní vzorky měření I

Vzorky s kontaminovanou nivní půdou							
m.č.	datum a čas měření	číslo válečku 92	číslo válečku 76	číslo válečku 94	číslo válečku 83	číslo válečku 73	průměr ($m.s^{-1}$)
1	29.10. 10:30	0.000997	0.001018	0.001134	0.000875	0.000884	9.817E-06
2	29.10. 12:00	0.000877	0.000950	0.001014	0.000789	0.000771	8.801E-06
3	30.10. 12:45	0.000786	0.000852	0.000915	0.000752	0.000782	8.174E-06
4	2.11. 10:15	0.000349	0.000277	0.000248	0.000297	0.000288	2.92E-06
5	3.11. 12:45	0.000308	0.000266	0.000231	0.000277	0.000272	2.709E-06
6	4.11. 9:45	0.000287	0.000230	0.000234	0.000249	0.000267	2.533E-06
7	5.11. 10:30	0.000304	0.000241	0.000268	0.000260	0.000265	2.677E-06
8	9.11. 9:15	0.000344	0.000311	0.000317	0.000284	0.000341	3.194E-06
9	11.11. 9:30	0.000407	0.000333	0.000303	0.000313	0.000497	3.705E-06
10	12.11. 9:45	0.000437	0.000317	0.000337	0.000321	0.000413	3.648E-06

Příloha č. 4 Výsledné hodnoty K_s pro vzorky s 5% biochar

Vzorky s kontaminovanou nivní půdou obohacené o 5% biochar							
m.č.	datum a čas měření	číslo válečku 89	číslo válečku 81	číslo válečku 80	číslo válečku 95	číslo válečku 77	průměr ($m.s^{-1}$)
1	29.10. 10:30	0.000326	0.000304	0.000288	0.000262	0.000286	2.93E-06
2	29.10. 12:00	0.000240	0.000261	0.000250	0.000220	0.000216	2.374E-06
3	30.10. 12:45	0.000209	0.000243	0.000222	0.000206	0.000200	2.159E-06
4	2.11. 10:15	0.000277	0.000253	0.000246	0.000209	0.000258	2.487E-06
5	3.11. 12:45	0.000254	0.000223	0.000253	0.000179	0.000221	2.261E-06
6	4.11. 9:45	0.000237	0.000212	0.000233	0.000167	0.000200	2.098E-06
7	5.11. 10:30	0.000187	0.000216	0.000211	0.000184	0.000175	1.945E-06
8	9.11. 9:15	0.000221	0.000223	0.000237	0.000179	0.000183	2.084E-06
9	11.11. 9:30	0.000201	0.000225	0.000229	0.000192	0.000192	2.079E-06
10	12.11. 9:45	0.000212	0.000221	0.000238	0.000203	0.000184	2.118E-06

Příloha č. 5 Výsledné hodnoty K_s pro kontrolní vzorky měření II

Vzorky s kontaminovanou nivní půdou							
m.č.	datum a čas měření	číslo válečku 83	číslo válečku 81	číslo válečku 95	číslo válečku 76	číslo válečku 92	průměr ($m.s^{-1}$)
1	7.12. 10:15	0.001881	0.001442	0.001804	0.001966	0.001783	1.775E-05
2	7.12. 12:30	0.001461	0.001233	0.001474	0.001926	0.001457	1.51E-05
3	8.12. 9:45	0.000629	0.000745	0.000688	0.000933	0.000783	7.556E-06
4	9.12. 9:45	0.000362	0.000414	0.000337	0.000531	0.000399	4.086E-06
5	10.12. 10:00	0.000302	0.000355	0.000301	0.000451	0.000304	3.425E-06
6	11.12. 13:45	0.000312	0.000329	0.000288	0.000451	0.000292	3.343E-06
7	14.12. 9:30	0.000289	0.000310	0.000251	0.000400	0.000289	3.077E-06
8	16.12. 9:15	0.000376	0.000344	0.000280	0.000390	0.000357	3.495E-06
9	18.12. 10:30	0.000325	0.000355	0.000262	0.000418	0.000311	3.343E-06
10	21.12. 10:15	0.000297	0.000321	0.000268	0.000388	0.000312	3.173E-06

Příloha č. 6 Výsledné hodnoty K_s pro vzorky s 2% biochar

Vzorky s kontaminovanou nivní půdou obohacené o 2% biochar							
m.č.	datum a čas měření	číslo válečku 77	číslo válečku 94	číslo válečku 80	číslo válečku 73	číslo válečku 89	průměr ($m.s^{-1}$)
1	7.12. 10:15	0,000621	0,000591	0,000618	0,000608	0,000587	6,051E-06
2	7.12. 12:30	0,000574	0,00055	0,00057	0,000564	0,000563	5,641E-06
3	8.12. 9:45	0,000559	0,00054	0,000567	0,000547	0,000558	5,539E-06
4	9.12. 9:45	0,000509	0,00047	0,000522	0,000444	0,000466	4,821E-06
5	10.12. 10:00	0,000401	0,000422	0,000405	0,000343	0,000343	3,829E-06
6	11.12. 13:45	0,000389	0,000385	0,000368	0,000329	0,000308	3,558E-06
7	14.12. 9:30	0,000331	0,000346	0,000345	0,000288	0,000275	3,168E-06
8	16.12. 9:15	0,000355	0,000347	0,000355	0,000283	0,000292	3,262E-06
9	18.12. 10:30	0,000348	0,000361	0,000351	0,000303	0,000282	3,29E-06
10	21.12. 10:15	0,000311	0,000325	0,000319	0,000261	0,000259	2,95E-06

Příloha č. 7 Popisná statistika pro měření

	29.10.- 12.11.	7.12.- 21.12.	29.10.- 12.11.	7.12.- 21.12.	29.10.- 12.11.	7.12.- 21.12.
	mean		coef. Var.		normtest.p	
kontr1	9,82E-06	1,78E-05	1,09E-01	1,12E-01	0,50	0,26
bio1	2,93E-06	6,05E-06	8,09E-02	2,55E-02	0,95	0,35
kontr2	8,80E-06	1,51E-05	1,18E-01	1,68E-01	0,62	0,17
bio2	2,37E-06	5,64E-06	8,18E-02	1,62E-02	0,60	0,63
kontr3	8,17E-06	7,56E-06	8,03E-02	1,52E-01	0,47	0,78
bio3	2,16E-06	5,54E-06	7,88E-02	1,92E-02	0,48	0,77
kontr4	2,92E-06	4,09E-06	1,27E-01	1,83E-01	0,74	0,38
bio4	2,49E-06	4,82E-06	1,00E-01	6,70E-02	0,57	0,58
kontr5	2,71E-06	3,43E-06	1,02E-01	1,89E-01	0,78	0,03
bio5	2,26E-06	3,83E-06	1,36E-01	9,71E-02	0,29	0,12
kontr6	2,53E-06	3,34E-06	9,37E-02	2,01E-01	0,61	0,04
bio6	2,10E-06	3,56E-06	1,35E-01	1,00E-01	0,55	0,35
kontr7	2,68E-06	3,08E-06	8,56E-02	1,81E-01	0,50	0,27
bio7	1,94E-06	3,17E-06	9,24E-02	1,05E-01	0,37	0,16
kontr8	3,19E-06	3,49E-06	7,67E-02	1,22E-01	0,56	0,41
bio8	2,08E-06	3,26E-06	1,25E-01	1,10E-01	0,23	0,05
kontr9	3,71E-06	3,34E-06	2,20E-01	1,72E-01	0,24	0,95
bio9	2,08E-06	3,29E-06	8,60E-02	1,05E-01	0,12	0,24
kontr10	3,65E-06	3,17E-06	1,53E-01	1,40E-01	0,14	0,59
bio10	2,12E-06	2,95E-06	9,62E-02	1,10E-01	1,00	0,08