

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv rozdílných biocharů na vybrané hydrofyzikální vlastnosti  
písčitohlinité půdy**

Vypracoval: Michaela Falcová

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

2018 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michaela Falcová

Vodní hospodářství

Název práce

**Vliv rozdílných biocharů na vybrané hydrofyzikální vlastnosti písčitohlinité půdy**

Název anglicky

**Effect of different biochars on selected hydrophysical properties of sandy loam soil**

---

### Cíle práce

Stanovit vliv kontrastních biocharů (z hlediska suroviny pro výrobu, textury a struktury) na hydraulické parametry a na související půdně-fyzikální vlastnosti.

### Metodika

Stručně charakterizovat biochar a jeho význam na základě současné literatury. Stručně definovat měřené hydraulické parametry a způsoby jejich stanovení.

Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu biocharu na hydraulické a související fyzikální vlastnosti.

Připravit vzorky zeminy s přídavkem různých biocharů (s různými vlastnostmi) a kontrolní neošetřené vzorky. Konsolidovat tyto vzorky jednotným způsobem. Provést měření nasycené hydraulické vodivosti laboratorním permeametrem a dalších souvisejících půdní vlastností (vlhkost při odběru, vlhkost v blízkosti nasycení, objemovou hmotnost).

Vyhodnotit naměřená data, statisticky porovnat výsledky a vyhodnotit vliv rozdílných biocharů na měřené hydraulické parametry a související půdní vlastnosti.

**Doporučený rozsah práce**

30 stran

**Klíčová slova**

biouhel, hydraulické vlastnosti půdy, vliv textury a struktury, změna půdních vlastností

---

**Doporučené zdroje informací**

- 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: e108340.
- Brassard, P., Godbout, S., Raghavan, V., 2016. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management* 181: 484–497.
- Glab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., Gondek, K., 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma* 281: 11 – 20.
- Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142: 136–144.
- 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. JRC Scientific and Technical Reports. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg 166pp.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

---

Elektronicky schváleno dne 27. 11. 2017

**doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 11. 2017

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 07. 02. 2018

---

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. a uvedla jsem všechnu odbornou literaturu a další informační zdroje ze kterých jsem čerpala.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V práci jsem neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Praze dne 24. 4. 2018

.....

Falcová Michaela

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala všem, kteří mi byli nápomocni při realizaci této bakalářské práce. Zejména bych chtěla poděkovat Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. vedoucímu mé bakalářské práce za jeho čas, pomoc, ochotu, cenné rady a trpělivost při jejím zpracování.

## Abstrakt

V bakalářské práci je řešen vliv přídavku biocharu o různé velikosti částic na nasycenou hydraulickou vodivost ( $K_s$ ), dále na nárůst objemu (bobtnání) půdního vzorku při sycení a na pokles objemu tohoto vzorku při konsolidaci vnějším zatížením.

Použitý biochar byl vytvořen pyrolýzou z měkkého dřeva při teplotě 480 °C. Pro práci byla použita nivní půda z Příbramska z okolí řeky Litavky, která byla homogenizována a proseta sítím o průměru ok 2 mm. Do této půdy byl přidán 0 nebo 1% (hmotnosti) biocharu. Připraveny byly celkem 4 druhy směsí půd: s obsahem 0% biocharu - kontrolní vzorky a 3 ošetření půdy vždy s obsahem 1% biocharu ale o různé zrnitosti - nativní, dále prosetý přes síto o průměru 2 mm a 0,5 mm. Zemina byla volně sypána do 2 spojených Kopeckého válečků a připraveno celkem 32 vzorků různé zrnitosti. Následně se připravené vzorky stabilizovaly v pískovém tanku po dobu 5 týdnů. 1. týden se vzorky postupně sytily, 2. a 3. týden byly vzorky vystaveny podtlaku 50 cm a 4. a 5. týden byla část vybraných vzorků vystavena konsolidaci.

Měření objemových změn pro stanovení výšky bobtnání proběhlo ve třech krocích měření: ihned po nasypání vzorku, po ukončení sycení, po konsolidaci. Nejvyšší efekt biocharu na bobtnání půdy byl pozorován u vzorků s nejjemnějším biocharem, kde průměrná hodnota vzrostla o 2,9 mm oproti kontrolním vzorkům, kde vzrostla pouze o 0,66 mm. U nejjemnějšího biocharu byl také zjištěn nejvyšší pokles po konsolidaci.

Měření  $K_s$  probíhalo ve čtyřech sériích v laboratorním permeamtru pomocí metody s konstantním spádem. Výsledky experimentu prokázaly vliv biocharu na  $K_s$ , ačkoliv většina změn nebyla při použití 1% biocharu statisticky významná. Statisticky významný rozdíl byl nalezen u skupiny vzorků 1BC\_2 v obou časových krocích, kde průměrná hodnota  $K_s$  oproti kontrole velmi vzrostla. Toto chování je pro nás neobjasněno a nemůžeme vyloučit výskyt systematické chyby.

Indikované poklesy  $K_s$  v biocharem obohacených vzorcích, ukazují na možné použití biocharu v praxi pro zlepšení hydro-fyzikálních vlastností propustných písčitých půd ohrožených suchem.

**Klíčová slova:** hydraulické vlastnosti půdy, vliv textury biocharu, konsolidace a bobtnání, změna půdních vlastností, nasycená hydraulická vodivost

## Abstract

This bachelor thesis deals with the effect of the addition of biochar (consisted of different particles sizes) on 1) saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), 2) the swelling of the sample during saturation and 3) the decrease of the volume of this sample after consolidation by external load.

The used biochar was made by a softwood pyrolysis at 480 °C. The soil used in this work was collected close to the river Litavka which is located in Příbram District. The soil was homogenized and sieved through a sieve of 2 mm diameter. This soil was enriched by 0 and 1 percentage of biochar. A total of 4 s soil treatments were prepared: 0% - control and 1% biochar-enriched soil - native sample and other two that had particles size less than 2 mm and less than 0.5 mm. The soil was packed into 2 joined Kopecky cylinders and a total of 32 samples of 4 different soil treatments were prepared. Subsequently, the prepared samples were stabilized in a sand tank for 5 weeks. First week, the samples were gradually saturated, for the next two weeks samples were subjected to a negative pressure of 50 cm and last two weeks portion of samples were exposed to consolidation.

Measurement of volume changes (to determine the swelling height) took place in three measurement steps: immediately after the sample was poured, after the saturation was complete, and after the consolidation. The highest soil-swelling biochar effect was observed in samples 1BC\_05, where the mean value was increased by 2.9 mm. For the control samples, the swelling effect was about 0.66mm. The 1BC\_05 treatment also exhibited the highest decline after consolidation.

Measurements of  $K_s$  were performed in four series in a laboratory permeameter by using a constant head method. The results of the experiment showed the effect of the biochar on  $K_s$ , although most of the changes were not statistically significant when using 1% biochar. A statistically significant difference was found in the sample group 1BC\_2 in both time steps, where the mean  $K_s$  was distinctly increased compared to the control samples. This behavior is unclear to us and we cannot exclude the occurrence of systematic error.

The results of this experiments (decrease in  $K_s$  after biochar enrichment) suggest that biochar application can help to improve the hydro-physical properties of sandy highly permeable soils threatened by drought.



**Keywords:** soil hydraulic properties, effects of biochar texture, consolidation and swelling, soil properties change, saturated hydraulic conductivity

# Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíle práce .....	13
3. Literární rešerše.....	14
3.1 Proudění vody v půdním prostředí .....	14
3.2 Nasycená hydraulická vodivost a její význam .....	14
3.3 Měření nasycené hydraulické vodivosti .....	16
3.3.1 Laboratorní metody.....	16
3.4 Darcyho zákon.....	19
3.5 Meze platnosti Darcyho zákona .....	20
3.6 Vliv biocharu na $K_s$ , bobtnání a konsolidaci.....	22
4. Metodika .....	24
4.1 Charakteristika měřené půdy a biocharu .....	24
4.2 Příprava a plnění vzorků.....	25
4.3 Sycení, stabilizace, měření bobtnání a konsolidace vzorků .....	29
4.4 Měření $K_s$ sypaných vzorků laboratorním permeametrem .....	30
5. Statistická analýza.....	35
6. Výsledky a diskuse.....	36
6.1 Půdní vlastnosti - bobtnání vzorků.....	36
6.2 Nasycená hydraulická vodivost.....	40
6.2.1 První časový krok.....	40
6.2.2 První časový krok – konsolidované vzorky .....	42
6.2.3 První časový krok – nekonsolidované vzorky .....	43
6.2.4 Druhý časový krok .....	44
6.2.5 Druhý časový krok – konsolidované vzorky.....	46
6.2.6 Druhý časový krok – nekonsolidované vzorky.....	47
6.3 Porovnání dosažených výsledků s ostatními autory .....	49
7. Závěr .....	51
8. Přehled literatury a použitých zdrojů .....	52
9. Seznam příloh.....	54

# 1. Úvod

Biochar je organický materiál, který je přeměněn z biomasy pomocí pyrolýzy. Pyrolýza je termochemický proces rozkladu surovin bez přístupu vzduchu za vysokých teplot (Verheijen et al., 2010). Aplikace biocharu do půdy může podle některých autorů ovlivňovat její vlastnosti. Například podle Uchimiya et al., (2010) zvyšuje sorpční kapacitu půdy a snižuje toxicitu kovů (Trakal et al., 2011, Trakal et al., 2014). Biochar mění půdní vlastnosti jako je pH (Amonette et Joseph, 2009), který vyvolává například u zásaditých půd negativní efekt (Verheijen et al., 2010). Brassard et al, (2016) vidí v biocharu nástroj ke zmírnění změn klimatu díky jeho schopnosti vázat uhlík v půdě po dlouhou dobu. Míra ovlivnění nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ) závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech biocharu, použitém množství a na vlastnostech půdy. Biochar může snižovat i zvyšovat hodnotu  $K_s$  (Lim et al., 2016; Barnes et al., 2014). Někteří autoři, jejichž studie jsou popsány v kapitole 3.6, nezjistili ve svých experimentech žádné výrazné změny hodnot  $K_s$  při použití biocharu. Vliv biocharu na hodnoty  $K_s$  zatím není plně vysvětlen, přestože již proběhlo velké množství experimentů s různými biochary, za odlišných podmínek v terénu i v laboratoři a s různým způsobem přípravy vzorků. Stále nejsou jasně popsány základní mechanismy způsobující změny hodnot hydraulických vlastností po aplikaci biocharu, (například bobtnání, adsorpce vody, vliv na pórovitost).

Nasycená hydraulická vodivost ( $K_s$ ) charakterizuje, jak porézní prostředí umožňuje proudění kapaliny v půdě, tedy schopnost půdy vést vodu (Pokorná et Záborská, 2007). Veličina  $K_s$  je jednou z hlavních hydraulických vlastností půdy. Vlastnostmi půdy, které ovlivňují  $K_s$  jsou například pórovitost, tvar a velikost pórů, zrnitostní složení a další (Pavlásek et Jačka, 2014). Hodnoty  $K_s$  můžeme využít v mnoha vědních oborech, například pro návrhy při závlahách, stavbě hrází, odvodnění a pro ochranu půdy a podzemní vody.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, na teoretickou a praktickou část. V první části – literární rešerši - je popsáno proudění vody v půdě, nasycená hydraulická vodivost ( $K_s$ ) a její metody stanovení v laboratorních podmínkách. Dále je zde popsán Darcyho zákon a meze platnosti Darcyho zákona a vliv biocharu na  $K_s$  pro různé druhy půd a uvedeny konkrétní studie některých autorů. V druhé části je

popsána metodika měření a jeho vyhodnocení. Metodika obsahuje charakteristiku měřené půdy a biocharu, popis přípravy, plnění vzorků, sycení a stabilizace vzorků, dále způsob měření vlivu biocharu na bobtnání půdy a postup měření  $K_s$  laboratorním permeametrem. Vyhodnocení měření je popsáno v kapitole 5, která slučuje výsledky spolu s diskuzí.

## **2. Cíle práce**

Cílem bakalářské práce je stanovit vliv přidaného biocharu o různých zrnitostech do půdy na klíčovou hydraulickou vlastnost půdy - nasycenou hydraulickou vodivost ( $K_s$ ).

Dalším cílem práce je stanovit vliv přidaného biocharu na bobtnání půdy a účinek konsolidace vnějším zatížením. Změna pórovitosti způsobená zhutněním při konsolidaci a bobtnáním vzorků půdy může úzce souviset se změnou  $K_s$ .

### 3. Literární rešerše

#### 3.1 Proudění vody v půdním prostředí

Půdu si je možné představit jako porézní prostředí, které umožňuje proudění vody. Voda se v půdě pohybuje v pórech. Prostor mezi částicemi půdy, v němž se voda může pohybovat, je limitován a maximálně odpovídá objemu pórů (Kutílek et al., 2004).

Proudění vody v půdě můžeme popsat v mikroskopickém a makroskopickém měřítku. Dále se budeme zabývat pouze popisem základní hydrodynamiky půdní vody v makroskopickém měřítku půdy v řádech  $\text{cm}^2$  až  $\text{m}^2$ . Pohyb vody v půdě je způsoben rozdílem v potenciální energii. Voda v půdě proudí z míst s vyšší potenciální energií do míst s nižší energií a je označována jako celkový potenciál. Hlavní hnací silou celkového potenciálu pro pohyb vody ve všech půdách jsou gravitační a tlakový potenciál (Pavlásek et Jačka, 2014).

Nasycené proudění je takové proudění, kde voda vyplňuje teoreticky všechny efektivní póry a půda je vodou nasycená. Stav zaplnění všech efektivních pórů však v přírodě prakticky nenastává, protože v některých pórech je uzavřen vzduch. Předpokládáme, že při  $h \geq 0$  voda proudí ve všech pórech a působení vlivu uzavřeného vzduchu v pórech zanedbáváme. Tlakový potenciál v pórech je kladný (Pavlásek et Jačka, 2014). Jestliže není půda vodou plně nasycená a objemová vlhkost je menší než pórovitost, označujeme toto proudění jako nenasycené (Kutílek et al., 2004). Na rozdíl od nasycené zóny se mohou v průběhu proudění póry dosycovat nebo odvodňovat (Pavlásek et Jačka, 2014).

#### 3.2 Nasycená hydraulická vodivost a její význam

Nasycená hydraulická vodivost ( $K_s$ ) charakterizuje, jak porézní prostředí umožňuje proudění kapaliny v půdě (Pokorná et Záborská, 2007). Můžeme ji charakterizovat jako rychlost proudění při jednotkovém hydraulickém gradientu. Nasycená hydraulická vodivost je koeficient vyskytující se v Darcyho rovnici. Používá se k vyjádření schopnosti prostředí vést vodu. Hodnota  $K_s$  závisí jak na půdním prostředí, tak na fyzikálních vlastnostech kapaliny. Fyzikálními vlastnostmi kapaliny, které ovlivňují hydraulickou vodivost, jsou hustota kapaliny ( $\rho$ ) a její dynamická viskozita ( $\mu$ ). Vlastnostmi půdy, které charakterizují schopnost půdního

prostředí propouštět vodu, jsou pórovitost, tvar a velikost pórů, zrnitostní složení, vliv součinitele zakřivení pórů (tortuozita) a měrný povrch (Pavlásek et Jačka, 2014). Orientační hodnoty  $K_s$  pro různé druhy zeminy jsou znázorněny v tabulce 1.

Tab. 1. Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy  
(převzato z: Valentová, 1998)

Druh zeminy	Hydraulická vodivost K [m/s]
Jíl	$< 1 \cdot 10^{-8}$
Písčitá hlína	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Hlinitý písek ulehý	$(1 - 5) \cdot 10^{-6}$
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	$(2 - 10) \cdot 10^{-4}$
Štěrka	$(1 - 5) \cdot 10^{-4}$

Nasycenou hydraulickou vodivost  $K_s$ , můžeme vyjádřit jako hydraulickou vlastnost půdy, která je přímo závislá na její pórovitosti. Nasycenou hydraulickou vodivostí lze vyjádřit následovně pomocí rovnice (Valentová, 2007):

$$K_s = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

Kde:

$K_s$  – nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$K$  – propustnost [ $m^2$ ]

$\rho$  – hustota kapaliny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$g$  – gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$\mu$  – dynamická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

### 3.3 Měření 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).

Metody přímé můžeme dělit na laboratorní a terénní. Laboratorní metody dělíme dále na metody s konstantním spádem a proměnným spádem. Podle materiálu, který k měření bude použit, bude zvolena vhodná metoda. Vysoce a středně propustné vzorky se měří s konstantní spádem. Rozsah hodnot  $K_s$  při použití této metody se pohybuje přibližně v rozmezí od  $10^{-2}$  do  $10^{-7}$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Málo propustné vzorky s nižší hodnotou  $K_s$  se měří s proměnným spádem. Jedná se většinou o vzorky s vysokým obsahem jílu. Terénní metody dělíme nad hladinou podzemní vody a pod hladinou podzemní vody (podrobně viz například Pavlásek et Jačka, 2014).

U metod nepřímých se na základě snáže stanovitelných půdních vlastností (textura, struktura, objemová hmotnost, obsah humusu, apod.) odvozuje hodnota  $K_s$ . Tyto metody slouží ve většině případů pouze jako přibližný odhad. Nepřímé metody se používají z důvodu časové a finanční náročnosti přímé metody (Kutílek et al., 2004).

#### 3.3.1 Laboratorní metody

Pro laboratorní měření a stanovení  $K_s$  se používá nejčastěji laboratorní permeametr. Měření se provádí na neporušených půdních vzorcích odebraných přímo v terénu nebo na uměle hutněných vzorcích v laboratoři. Nejčastěji se používají Kopeckého válečky o objemu  $100 \text{ cm}^3$ , ale takto malý objem nemusí vždy dostatečně reprezentovat správnost měření (Kutílek et al., 2004). Konečné hodnoty dvou souběžně odebraných vzorků jsou často velmi rozdílné, a proto se doporučuje větší odběr vzorků, nebo zvolit terénní měření (Pokorná et Zabranská, 2007). Nevýhodou laboratorních metod, je že se měří výrazně menší objemy vzorků v porovnání s polní metodou. Hlavními výhodami jsou určování nasycené hydraulické vodivosti dle základní definující rovnice Darcyho zákona, přesné stanovení a



kontrola okrajových podmínek jako hydraulický spád, jedno-dimenzionální proudění, teplota a vliv uzavřeného vzduchu v pórech je eliminován postupným sycením (Pavlásek et Jačka, 2014).

Podrobný popis a metodiku práce s laboratorním permeametroem lze nalézt například v manuálu firmy Eijkelkamp (2013). Principem měření s konstantním spádem je v udržování stálých rozdílů tlakových výšek na obou stranách vzorku a v měření proteklého objemu vody vzorkem za čas prostřednictvím byrety (Pavlásek et Jačka, 2014). Váleček se vzorkem zeminy se upevní do příslušného držáku a změní se pokles horní hladiny vody. Dolní hladina by měla být konstantní a horní hladina se může lišit (Kutílek et al., 2004). Princip měření s proměnným spádem je podobný jako u měření s konstantním spádem, ale měří se změna hydraulického sklonu v čase místo objemu vody proteklého byretou. Doba měření může být i několik dní z důvodu nízké propustnosti vzorků, doporučuje se použít korekci pro výpar (Pavlásek et Jačka, 2014). Schéma laboratorního permeametroem je znázorněno na obrázku 1.

Výpočet hodnoty  $K_s$  vychází z Darcyho rovnice jak pro měření s konstantním spádem, tak pro měření s proměnným spádem. Darcyho zákon a omezení jeho platnosti jsou popsány v kapitolách 3.4 a 3.5.

Pro měření s konstantním spádem platí (upraveno z Pavlásek et Jačka, 2014):

$$K_s = \frac{V_p \cdot L_v}{A_v \cdot t \cdot \Delta H} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

Kde:

$K_s$  – nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$V_p$  – objem vody proteklý vzorkem [ $cm^3$ ]

$L_v$  – délka válečku [cm]

$A_v$  – průtočná plocha válečku [cm]

$t$  – čas, za který proteče  $V_p$  vzorkem [s]

$\Delta H$  – rozdíl hladin vně a uvnitř vzorku [cm]

Pro měření s proměnným spádem platí (upraveno z Pavlásek et Jačka, 2014):

$$K_S = \frac{A_d \cdot L_v}{A_v \cdot (t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \right) \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Kde:

$K_S$  – nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$A_d$  – průřezová plocha trubice držáku vzorků [cm]

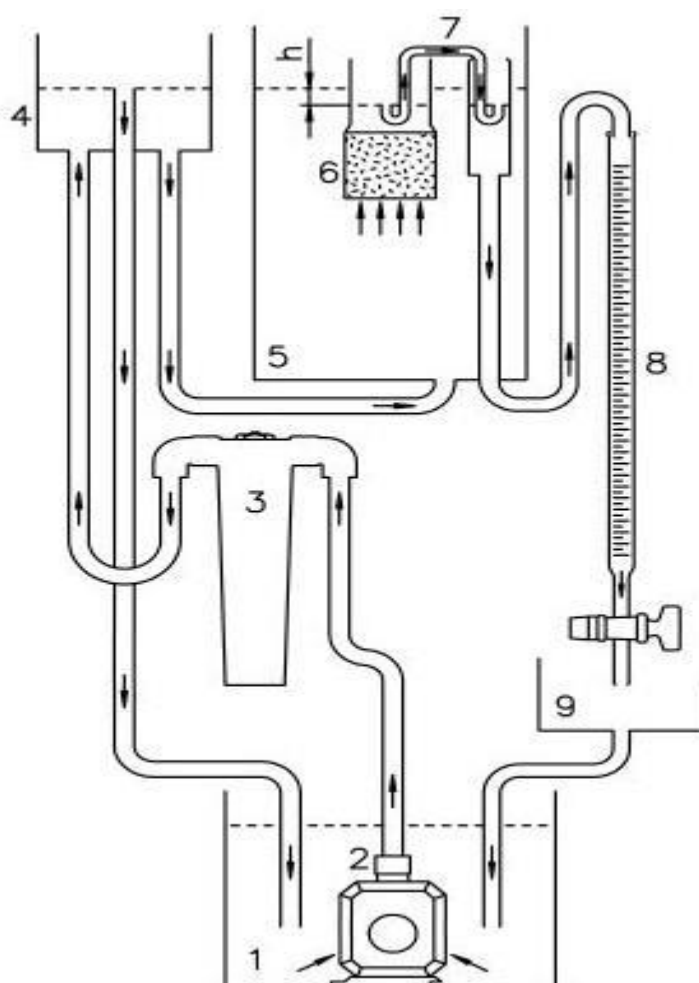
$L_v$  – délka válečku [cm]

$A_v$  – průtočná plocha válečku [cm]

$t_1, t_2$  – čas [s]

$\Delta H_1$  – značí rozdíl vodních hladin na počátku měření v čase  $t_1$  [cm]

$\Delta H_2$  – značí rozdíl vodních hladin měření v čase  $t_2$  [cm]



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

Popis permeamtru (upraveno z Pavlásek et Jačka, 2014):

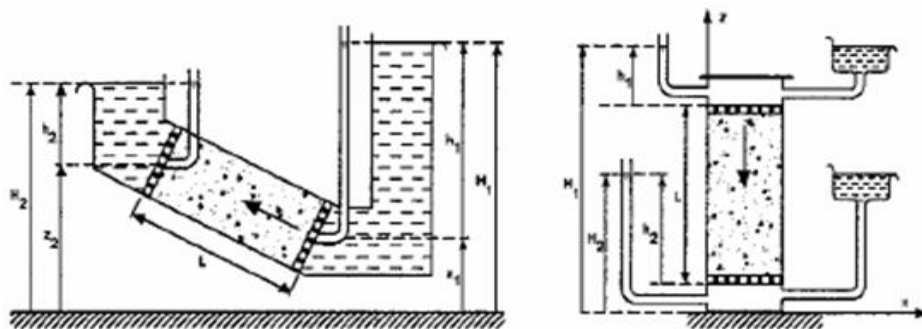
- 1 – zásobní nádrž s vodou
- 2 – vodní čerpadlo
- 3 – filtr
- 4 – posuvný výškový regulátor
- 5 – plastový kontejner s uzavíratelný víkem
- 6 – nasycený neporušený vzorek v držáku
- 7 – plastová nádoba (používá se pouze při měření s konstantním spádem)
- 8 – byreta (sloužící pro měření objemu proteklé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

### 3.4 Darcyho zákon

Definuje rychlost průtoku kapaliny nebo plynu pevným, homogenním, porézním prostředím. Patří mezi základní zákony popisující proudění podzemní vody. Darcyho zákon je založen na principu proudění vody ve válci naplněném pískem. Písek je zcela nasycen vodou a množství vody vtékající do válce za jednotku času se rovná množství vody z válce vytékajícímu.

Tento vztah experimentálně odvodilo Henry Darcy roku 1856 v Dijonu. Prováděl měření průtoku trubicí naplněnou porézním materiálem umístěnou mezi dvěma nádržemi s tekutinou. Zjistil, že průtok vody ( $Q$ ) je přímo úměrný nasycené hydraulické vodivosti ( $Ks$ ), průtočné ploše ( $S$ ) a rozdílu tlakových výšek ( $\Delta H$ ) a nepřímo úměrný délce sloupce ( $L$ ), (Pavlásek et Jačka, 2014).

Jako pohybová rovnice se v hydraulice podzemní vody běžně aplikuje empirický Darcyho zákon. Schéma, pomocí něhož byl odvozen, je znázorněno na obrázku 2.



Obr. 2. Schéma Darcyho experimentu (převzato z Valentová, 1998)

Závěry mohou být vyjádřeny pomocí rovnice označené jako Darcyho zákon (upraveno z Pavlásek et Jačka, 2014):

$$Q = K_s \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

Kde:

$Q$  – proteklé množství vody [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

$S$  – průřezová plocha [ $m^2$ ]

$L$  – délka válce [m]

$K_s$  – koeficient hydraulické vodivosti [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$\Delta H = (H_1 - H_2)$  – rozdíl hydraulické výšky [m]

$\frac{\Delta H}{L}$  – hydraulický sklon neboli hydraulický gradient [m]

Řídícími silami, které ovlivňují pohyb proudění podzemní vody v nasycené zóně, je gravitace a tlakový gradient. V hydraulice podzemní vody se pracuje s hydraulickou výškou (Valentová, 2007):

$$H = z + \frac{p}{\rho g} \quad [m] \quad (6)$$

Kde:

$H$  - hydraulická výška [m]

$z$  - geodetická výška [m]

$\rho$  – hustota vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$g$  – tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

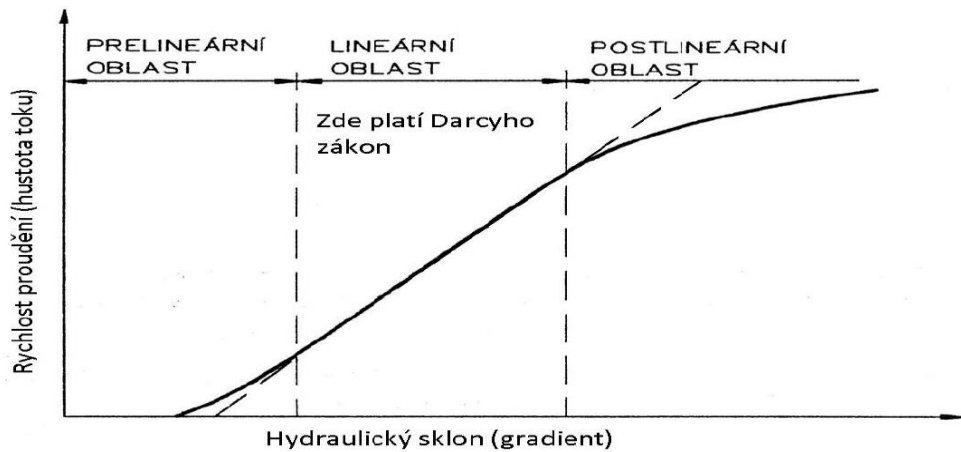
$p$  – tlak vody v daném bodě pod hladinou podzemní vody [ $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ ]

$p = h_p \rho g$  kde  $h_p$  je tlaková výška neboli hloubka daného bodu pod hladinou podzemní vody [m]

### 3.5 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi hustotou toku a hydraulickým gradientem (Valentová, 2007). Darcyho zákon neplatí při průsaku velmi hrubozrnným materiálem (Kutílek et al., 2004). V tomto případě převažují setrvačné síly nad viskózními a tento režim proudění se nazývá postlineární. Dále

neplatí v prelineární oblasti, kde je rychlost proudění vody velmi pomalá až nulová, příčinou toho jsou jemnozrnné materiály. Darcyho zákon je platný pouze pokud se jedná o lineární oblast proudění. Meze platnosti jsou znázorněny na obrázku 3.



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

Pro zjištění správné hodnoty, v které z oblastí se proudění vyskytuje, používáme Reynoldsovo číslo ( $Re$ ). Toto číslo je bezrozměrné a vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a viskózními silami působícími na kapalinu.

$Re$  je pro proudění v nasycené zóně definováno vztahem (Pavlásek et Jačka, 2014):

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (7)$$

Kde:

$Re$  – Reynoldsovo číslo [-]

$d$  – průměr efektivního zrna [m]

$v$  – rychlost proudící kapaliny [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$\rho$  – hustota kapaliny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\mu$  – dynamická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

Darcyho zákon je platný, pokud Reynoldsovo číslo nestoupne nad jistou hodnotu. Podle Valentova (2007) se kritická hodnota mezi přechodem laminárního a turbulentního proudění pohybuje kolem hodnoty 2000.

### 3.6 Vliv biocharu na Ks, bobtnání a konsolidaci

Biochar je organický materiál, který je přeměněn z biomasy pomocí pyrolýzy (termochemickým procesem rozkladu surovin bez přístupu vzduchu za vysokých teplot). Je to na uhlík bohatý produkt získaný tepelným rozkladem organického materiálu, např. dřevní nebo rostlinné biomasy, ale i hnoje, či digestátu a jehož obsah živin je téměř stejný, jako původní biomasa, až na snížený obsah dusíku (Verheijen et al., 2010). Brassard et al. (2016) vidí v biocharu nástroj ke zmírnění změn klimatu díky jeho schopnosti vázat uhlík v půdě po dlouhou dobu. Aplikace biocharu do půdy může zlepšovat její vlastnosti. Tyto vlastnosti půdy jsou ovlivňovány původním materiálem, podmínkami a teplotou, za kterých pyrolýza probíhala (Verheijen et al., 2010).

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 z různých materiálů (odštěpky z borovice, tvrdého dřeva jako dub lesní, javor cukrový, ovesné slupky, javor americký). Cílem tohoto výzkumu bylo vyvinout podpůrný nástroj, který by předpověděl účinek přidaného biocharu do půdy na Ks. V experimentu byly použity čtyři rozdílné druhy biocharu o poměru 0%, 1%, 2% a 5%, které byly přidány do čtyř rozdílných zrnitostí půd (hrubý písek, jemný písek, hlína a jíl). Pro měření byla použita metoda s proměnným spádem. Nad vzorkem nastavili 20 cm sloupec vody, který se postupně snižoval a protékal vzorkem. Tato metoda byla opakována 3-4 krát. Hodnoty Ks se snížily po přidání biocharu do hrubého i jemného písku. U vzorků měl biochar s větší velikostí částic (60%, > 1mm) vyšší účinek na snížení nasycené hydraulické vodivosti mnohem více než menší částice (60%, <1mm). Po přidání 1% a 2% biocharu do jílovitých hlín se hodnoty Ks zvýšily.

Podle Barnes et al. (2014) biochar ovlivňuje nasycenou hydraulickou vodivost a vyvolává v ní změny. Zjišťovali zde i hodnoty dusíku a uhlíku. Změny obsahu dusíku, uhlíku a hydraulických charakteristik jsou závislé na chemickém složení půdy a velikosti částic. V tomto článku byl testován biochar získaný pyrolýzou při teplotě 400 °C ze stromu prosopis-naditec z drcených lusků. Zkoumán byl na odlišných půdách (písek, jíl a organický materiál). Pro měření byla použita metoda válcových experimentů. Barnes et al. (2014) zjistili, že biochar snižuje

hodnotu  $K_s$  přibližně o 92 % u písčité půdy a přibližně o 62 % u půdy s vysokým podílem organické hmoty. Jako jeden z možných důvodů pro snížení  $K_s$  je zde zmiňováno bobtnání biocharem obohacené půdy a s tím související změny v porézním systému půdy. Naopak zjistili, že biochar zvyšuje hodnotu  $K_s$  přibližně o 328 % u jílovité půdy. Změny v hodnotách  $K_s$  po přidání biocharu mají tedy dopad na infiltrační charakteristiky a rychlost proudění vody v půdním profilu. Dle této studie může přidání biochar zlepšit hydrologický režim u vysýchavých písčitých půd (snížením  $K_s$ ) i jílovitých půd náchylných na převlhčení (zvýšením  $K_s$ ).

Podle Glab et al. (2016) biochar ovlivňuje nasycenou hydraulickou vodivost a výrazně zlepšuje fyzikální vlastnosti písčité půdy. V tomto článku byl testován biochar získaný pyrolýzou ze stébel stromů ozimé pšenice a ozdobnice. Pro měření byla použita metoda s konstantním spádem. Biochar byl rozdělen do různých skupin podle velikosti částic (0,5, 1, 2mm) a podle množství přidaného biocharu (0,5%, 1%, 2%, 4%). Glab et al. (2016) v tomto experimentu nezjistili žádné výrazné změny hodnot  $K_s$ , přestože byly očekávány. Bylo zjištěno, že objemová hmotnost a celková pórovitost půdy je závislá na velikosti přidaného biocharu. Malé částice biocharu snižují objem pórů s průměrem pod 0,5  $\mu\text{m}$ , ale zvýšil se objem větších pórů s rozsahem průměru 0,5 až 500  $\mu\text{m}$ . Přidáním biocharu se tedy zlepšila vlastnost půdy zadržovat vodu, zejména při použití nejjemnější frakce biocharu.

Podle Jeffrey et al. (2015) aplikace biocharu do písčitých půd neovlivňuje nasycenou hydraulickou vodivost, nemá na ni výrazný vliv. V tomto článku byly popsány dva odlišné experimenty na písčité půdy. V prvním experimentu byl biochar získán pyrolýzou z bylinných odřezků při teplotách 400 °C a 600 °C, poté byl přidán do půdy v poměru 10 t.ha<sup>-1</sup>. V druhém experimentu byl biochar získán pyrolýzou z bylinných odřezků při teplotě 400 °C, a poté přidán do půdy v poměrech 1, 5, 20 a 50 t.ha<sup>-1</sup>. Přestože se předpokládá, že biochar zlepšuje zadržování vody v půdě Jeffrey et al. (2015) nezjistili v těchto experimentech žádné výraznější změny ani na  $K_s$  ani na zadržení vody v půdě.

## 4. Metodika

### 4.1 Charakteristika měřené půdy a biocharu

Pro bakalářskou práci, byla použita nivní půda z Příbramska z okolí řeky Litavky.

Odebraná byla z okolí meteorologické stanice v blízkosti obce Trhové Dušníky z hloubky 10 – 30 cm pod povrchem terénu. Lokalita se nachází ve výšce asi 440 m n. m. na souřadnicích 49.7201722N, 14.0129314E. Pomocí hustoměrné metody z pěti rozborů byly stanoveny průměrné hodnoty zrnitostních frakcí. Jednotlivé hodnoty jsou znázorněny v tabulce 2. Zrna větší než 2 mm se v půdě nevyskytovala (převzato z Kubíková, 2017).

*Tab. 2. Průměrné hodnoty zrnitosti nivní půdy z pěti rozborů stanovených hustoměrnou metodou (převzato z Kubíková, 2017)*

	<b>jíl (&lt; 0,002mm) %</b>	<b>prach (0,002-0,05mm) %</b>	<b>písek 0,05-2mm) %</b>
průměr	8,7	34,8	56,5
směrodatná odchylka	0,975	4,339	4,387

Podle klasifikátoru USDA byl určen půdní druh jako písčité hlína (sandy-loam). Obsah uhlíku byl měřen pomocí analyzátoru SSM-5000A (Shimadzu, Japan) ve spolupráci s KGEV FŽP. Celkový průměrný obsah uhlíku představoval  $2,1512 \pm 0,0093$  %. Toto množství bylo zcela tvořeno organickým uhlíkem, anorganický uhlík nebyl v půdě detekován.

Použitý biochar, vyrobený AIT (Austrian Institute of Technology) ve Vídni, byl připraven z měkkého dřeva pyrolýzou při teplotě 480 °C. Jednotlivé parametry biocharu a obsažené látky jsou uvedeny v tabulce 3 (převzato z Kubíková, 2017).



Tab. 3. Vlastnosti a složení použitého biocharu (převzato z Kubíková, 2017)

Parametr	Hodnota	Jednotky
Organická hmota	82,3	g/100g
pH ve vodě	8,9	-
Organická uhlík	700	g/kg
Obsah vody	40,3	g/kg
Elektrická vodivost	0,0825	mS/cm

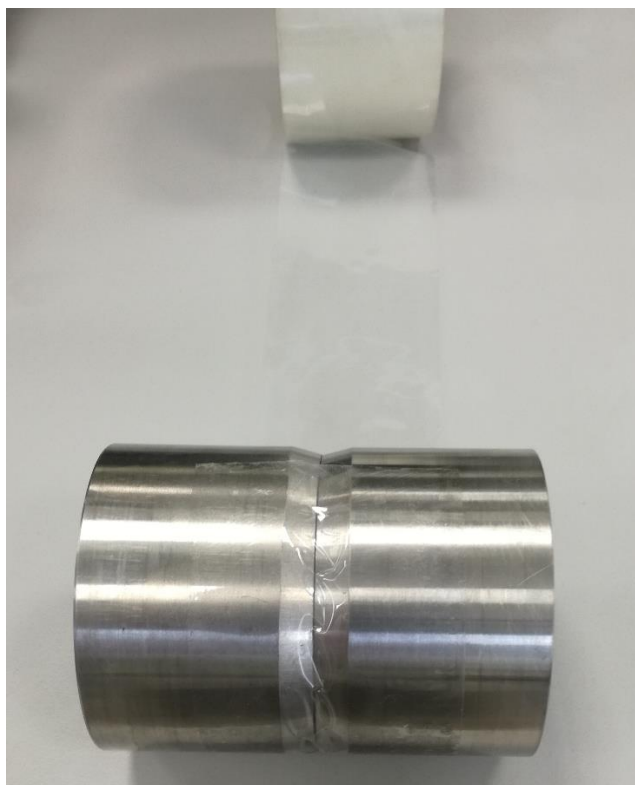
## 4.2 Příprava a plnění vzorků

Přípravy, plnění a měření vzorků probíhaly od října 2017 do ledna 2018 v laboratoři katedry KVHEM za kontroly vedoucího bakalářské práce Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. Celkem bylo měřeno 32 vzorků.

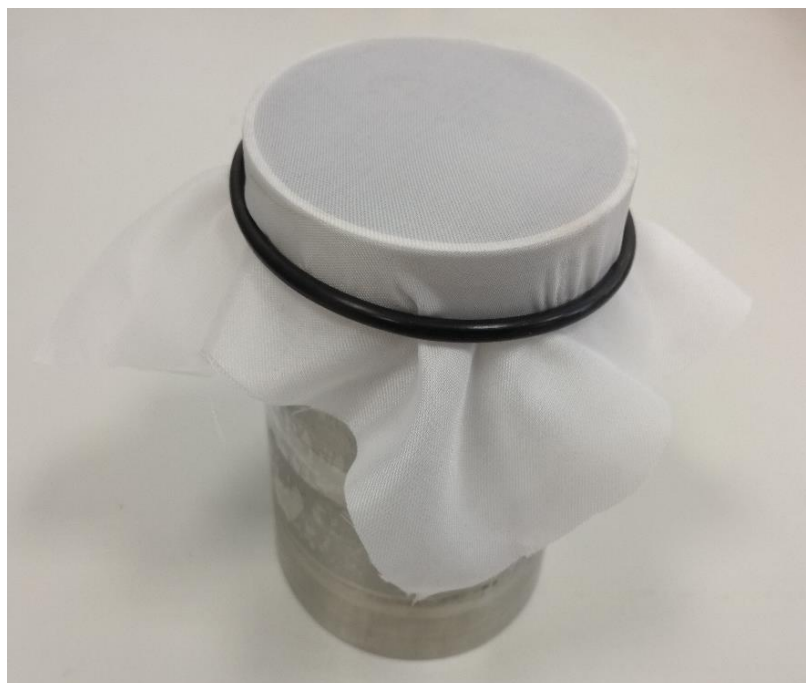
Byly použity 4 různé směsi (ošetření) půdy s biocharem: kontrola - 0% (hmotnosti) biocharu, 1% biocharu nativního, který nebyl poset (dále použito označení 1BC\_nat), 1% biocharu posetého sítím o průměru ok 2 mm (dále použito označení 1BC\_2) a 1% biocharu posetého sítím o průměru ok 0,5 mm (dále použito označení 1BC\_05). Směsi byly v připravených nádobách pečlivě promíchány pro zajištění co nejrovnoměrnějšího rozmístění biocharu.

Před plněním vzorků do Kopeckého válečků bylo zapotřebí dva válečky o objemu 100 cm<sup>3</sup> spojit. Válečky byly přiloženy ostrou hranou proti sobě a spojeny pomocí lepicí pásky (viz obr. 4). Poté se na jednu tupou hranu spojených válečků nasadila a upevnila za pomoci gumiček propustná látková membrána – gáza (viz obr. 5). Takto připravené válečky se nejprve zvažily a následně do nich byla nasypána zemina cca 5 mm pod okraj hrany horního válečku (viz obr. 6), tak aby čistá hmotnost takto přiloženého vzorku kolísala pro každé ošetření půdy do 3 g.

Celkově bylo naplněno 32 vzorků 4 připravenými směsmi popsány výše – 9 kontrolních - z toho 5 vzorků konsolidovaných (kontrola\_K) a 4 nekonsolidované (kontrola\_N), 9 nativních - z toho 5 vzorků konsolidovaných (1BC\_nat\_K) a 4 nekonsolidované (1BC\_nat\_N), 9 o zrnitosti menší než 0,5mm – z toho 5 vzorků konsolidovaných (1BC\_05\_K) a 4 nekonsolidované (1BC\_05\_N) a 5 vzorků o zrnitosti menší než 2 mm, které byly všechny vystaveny konsolidaci (1BC\_2). Naplněné válečky se opět zvažily na digitální váze (viz obr. 7) a hmotnosti byly zapsány do zápisníku. Naplněný vzorek můžeme vidět na obrázku 8.



*Obr. 4. Spojené Kopeckého válečky lepicí páskou*



*Obr. 5. Upevnění propustné látkové membrány (gázy) pomocí těsnící gumičky*



*Obr. 6. Plnění vzorků zeminou*



*Obr. 7. Vážení vzorků*



*Obr. 8. Naplněný vzorek zeminou*

Do váženky byl také odebrán vzorek zeminy ze zbytku směsi v nádobách, který byl zvážen a následně vložen do sušičky a za malé teploty sušen (viz obr. 9). Usušený vzorek byl poté znovu zvážen k zjištění vlhkosti zeminy, která byla dávana do válečků.



*Obr. 9. Vysoušení vzorků v sušičce*



### 4.3 Sycení, stabilizace, měření bobtnání a konsolidace vzorků

Připravené vzorky (všech 32 najednou) se po dobu 1 týdne postupně sytily (zvyšováním hladiny) v pískovém tanku (viz obr. 10). Po týdenním sycení byly vzorky odvodněny podtlakem 50cm a byly ponechány v pískovém tanku po dobu 4 týdnů z důvodu stabilizace vzorků s biocharem. Poslední 2 týdny stabilizace byla část vybraných vzorků (viz kap. 4.2) zatížena závažím o stejné hmotnosti 600g a vystavena konsolidaci (viz obr. 11) a část ponechána bez konsolidace pro následné porovnání. Konsolidace byla provedena dle upravené metodiky z článku Stock et Downes (2008). Důvodem použití je, že nasypané vzorky mají nízkou objemovou hmotnost a pórovitost, která neodpovídá půdě v přirozeném uložení. Způsob zatěžování odpovídá zatížení zeminy v hloubce 10 až 20 cm pod povrchem.



*Obr. 10. Usazení vzorků do pískového tanku*



*Obr. 11. Konsolidace vybraných vzorků závažím o hmotnosti 600g*

Měření výšky bobtnání biocharu probíhalo u náhodně vybraných vzorků všech zrnitostí (viz obr. 12). Vliv biocharu na bobtnání půdy byl celkem měřen na 21 vzorcích. Měření probíhalo před konsolidací i po konsolidaci. Měření byly 3 konsolidované a 3 nekonsolidované vzorky u všech čtyř druhů směsi. Hodnoty byly postupně a opakovaně odečítány pomocí milimetrového pravítka a zapisovány do zápisníku. Pomocí programu R-studio byly následně hodnoty statisticky vyhodnoceny.



*Obr. 12. Měření výšky bobtnání vzorků - nenasycený vzorek*

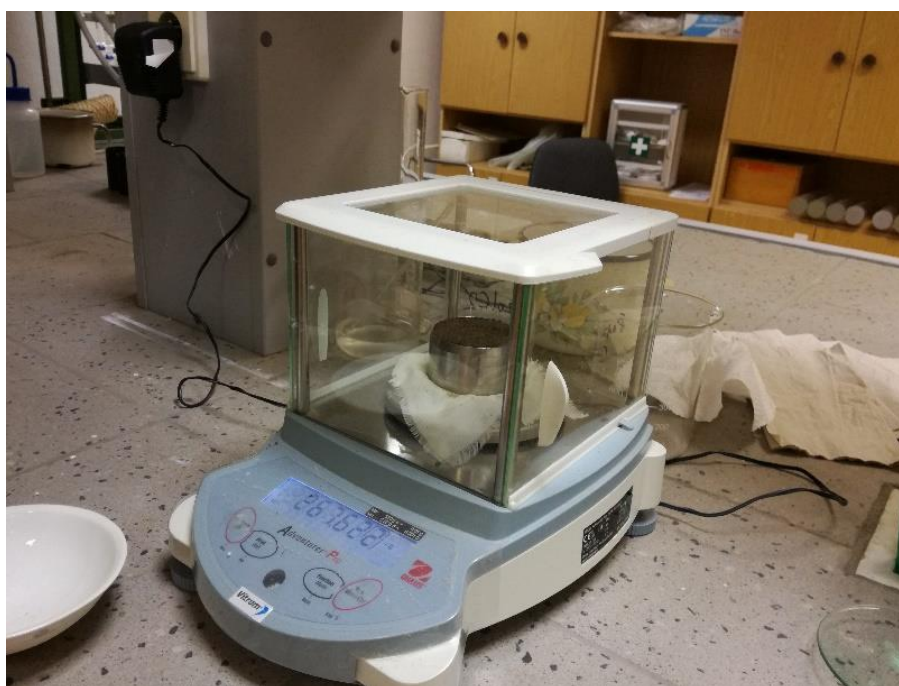
#### **4.4 Měření $K_s$ sypaných vzorků laboratorním permeametrem**

Před vložením vzorků do permeametru a měřením  $K_s$  bylo nutné vrchní Kopeckého váleček oddělit a zeminu seříznout. To se provádělo při částečně nasyceném vzorku pomocí vlasce a řezáku. Nejdříve byla rozříznuta lepicí páska, horní váleček byl opatrně nadzvednut, aby nedošlo k porušení a pomocí vlasce se vzorek rozpůlil. Poté byla ostrým nožem postupně odřezávána přebytečná zemina, dokud nezůstala rovně zarovnána na hranu spodního Kopeckého válečku (viz obr. 13). Oddělené a očistěné vzorky se položily na skleněné víčko a ihned

zvážily na digitální váze (viz obr. 14). Hodnoty vzorků a skleněného víčka byly zapsány do zápisníku a vzorky poté uloženy zpět do pískového tanku.



*Obr. 13. Postup odřezávání Kopeckého válečku*



*Obr. 14. Vážení odděleného vzorku před měřením  $K_s$*



Měření nasycené hydraulické vodivosti jednotlivých vzorků probíhalo na laboratorním permeamtru od nizozemské firmy Eijkelkamp (viz obr. 15) pomocí metody s konstantním spádem, která je popsána v kapitole 3.3.1. Měření probíhalo po dobu čtyř týdnů ve čtyřech sériích. Před vložením vzorků do permeamtru, následného sycení a měření hodnoty  $K_s$  bylo nutné jednotlivé vzorky s půdou upevnit do držáků jemným dotažením šroubu (viz obr. 16). U vzorků kde se vytvořily trhlinky a drobné mezery u okraje válečku bylo pro jejich vyplnění použito malé množství silikonu.



*Obr. 15. Permeametr od společnosti Eijkelkamp*





*Obr. 16. Upevněný vzorek v držáku*

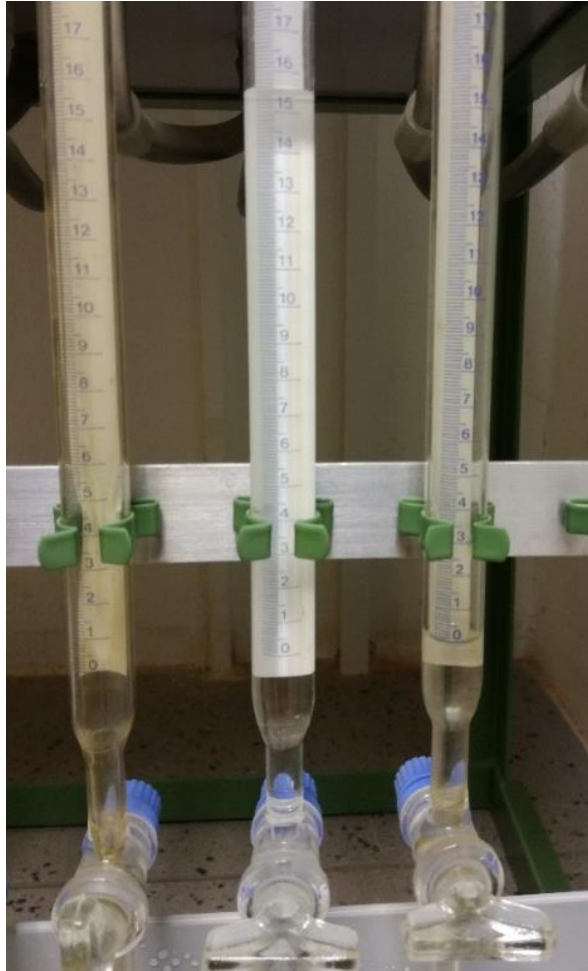
Vzorky upevněné v držáku byly postupně vkládány do připraveného permeamtru na jednotlivé pozice. Pro měření se použila destilovaná voda nalitá do zásobníku, která pomocí čerpadla protékala permeametrem a měřenými vzorky. Vzorky se ponechaly dva dny sytit za postupného zvedání hladiny vody, dokud hladina nevystoupala nad úroveň vzorků.

Začátkem měření jsme do držáku umístili plastové násosky jedním koncem dovnitř držáku a druhým koncem vně tak, aby odváděly prosakující vodu do byrety (viz obr. 17). Násosky byly před vložením naplněny vodou, aby v nich nezůstala žádná vzduchová bublina. Před každým měřením bylo zapotřebí změřit rtuťovým teploměrem teplotu vody a odečíst výšku hladiny vody uvnitř držáku a vně v těsné blízkosti vzorku. Tyto hladiny byly odečteny z mikrometru, který je součástí permeamtru. Na mikrometru se rozsvítila červená kontrolka signalizující dotyk hrotu s hladinou vody. Všechny naměřené hodnoty se zaznamenaly do zápisníku a ihned se vypočetl rozdíl naměřených hladin.



*Obr. 17. Umístění vzorků s násoskami v permeamtru, dále můžeme na obrázku vidět měření teploty vody pomocí rtuťového teploměru*

Po umístění násosky a zaměření výše zmíněných hodnot se uzavřel kohoutek na byretě a voda do ní začala natékat. Hlavním údajem měření  $K_s$  je určitý objem vody, který nateče do byrety za měřený čas (viz obr. 18). Jakmile voda v byretě dosáhla hodnoty 0 mm na stupnici, byly spuštěny stopky a zastaveny jakmile voda v byretě dosáhla určitého objemu (nejčastěji změřeno  $25 \text{ cm}^3$ ). Měření bylo opakováno třikrát za sebou u každého vzorku a naměřené časové hodnoty a určitý objem byly zapsány do zápisníku. Vždy byl také zapsán počátek a konec jednotlivého měření. Poté byl kohoutek byrety otevřen a voda se nechala volně protékat. Tento postup byl opakován u všech vzorků. Po ukončení celého měření byla horní nádrž permeamtru zakryta deskou proti výparu vody. Měření v každé sérii bylo opakováno ve dvou časových krocích. První a druhý časový krok byl měřen s odstupem cca 21 hodin.



*Obr. 18. Měření objemu vody v byretě*

## 5. Statistická analýza

Statistická analýza a výpočty byly provedeny v rozhraní R-studio pro programovací jazyk a prostředí R. Nejdříve byla vypočtena statistika pro jednotlivé série měření (minimum, maximum, rozptyl, průměr, směrodatná odchylka a koeficient variace). Poté byly výsledné hodnoty porovnány mezi skupinami. Dále byl proveden ANOVA test, Tukey test a graficky vykresleny boxploty.

Statistické testy byly vyhodnoceny na hladině významnosti 0,05. Pokud jsou průměrné hodnoty nižší než 0,05, pak je nulová hypotéza zamítnuta (skutečný rozdíl v průměrech je nulový) a porovnávané průměry jsou statisticky významné. ANOVA test nám zjistí, že některá hodnota je významná a Tukey test nám ukáže, o které konkrétní vzorky se jedná.

## 6. Výsledky a diskuse

Kompletní váhové údaje ke všem vzorkům (suchá zemina, ihned po nasypání do spojených válečků a bez hutnění) jsou uvedeny v příloze 1. Průměrná hmotnost vzorků bez biocharu byla 190,6 g, pro vzorky s příměsí 1% biocharu o zrnitosti pod 0,5 mm byla 192,4 g, o zrnitosti pod 2 mm byla 195,5 g a pro nativní vzorky byla 208 g. Důvodem pro rozdílné hmotnosti je, že při volném nasypání zeminy se biocharové částičky dostanou mezi volné póry v půdě, které jsou při tomto způsobu přípravy více porézní, z toho důvodu můžeme vidět vyšší hodnoty průměrné hmotnosti u vzorků s biocharem oproti kontrole. Nejhrubší biochar 1BC\_nat má nejvyšší průměrné hodnoty hmotnosti, protože obsahuje největší částičky, které se tak snadněji dostávají mezi póry.

Vzorky byly všechny stejně nasypány 5 mm pod okraj válečku (viz kap. 4.2) a podle přidaného biocharu si každá zemina přirozeně klesla bez hutnění (každý druh vzorku jinak). Biochar se dostal mezi volné částičky pórů v zemině a tím zamezil tolik výraznému samovolnému sedání zeminy. Kontrolní vzorky si samovolně klesly více, než vzorky s biocharem. Nejméně samovolně poklesly vzorky 1BC\_nat. Bobtnání bylo měřeno z již samovolného poklesu sedlých vzorků.

### 6.1 Půdní vlastnosti - bobtnání vzorků

V tabulce 4. můžeme vidět naměřené hodnoty bobtnání před konsolidací. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní data pro statistickou analýzu. Pomocí statistické analýzy byly zjištěny rozdíly v průměrech, které jsou významné na hladině významnosti 0,05. Výsledek ANOVA testu měl hodnotu 0,000449. Pomocí Tukey testu byly nalezeny statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými vzorky, které jsou znázorněny v tabulce 5. Na obrázku 19. můžeme vidět porovnání bobtnání vzorku 1BC\_05 oproti vzorku bez přidaného biocharu (kontrola).

Tab. 4. Naměřené rozdíly mezi minimální výškou půdy ve vzorku po nasypání (a samovolnému sesednutí před sycením) a maximální výškou po ukončení saturace půdy

	1BC_05 (mm)	1BC_nat (mm)	kontrola (mm)	1BC_2 (mm)
rozdíly ve výšce zeminy (nasycený - suchý vzorek)	1,5	1	1	1
	4,5	0	0	3
	2,5	1	1	3
	3	1	0	NA
	3	1	0	NA
	3	1	2	NA
průměr	<b>2,91666667</b>	<b>0,833333333</b>	<b>0,66666667</b>	<b>2,33333333</b>
směrodatná odchylka	0,97039511	0,40824829	0,81649658	1,1547005

\*tabulka obsahuje vzorky před konsolidací, proto není použito rozdělení K, N

\*NA – hodnoty nebyly měřeny (bobtnání bylo měřeno pouze u tří vzorků)

Tab. 5. Popisná statistika Tukey testu významného rozdílu bobtnání

porovnávané vzorky	p - hodnota (Tukey test)
1BC_nat - 1BC_05	0.0020964
kontrola - 1BC_05	0.0010087
1BC_2 - kontrola	0.0482685



Obr. 19. Porovnání výrazného bobtnání vzorku 1BC\_05 a kontrolního vzorku bez znatelného bobtnání před konsolidací

Nejvyšší efekt a vliv přidání biocharu na bobtnání půdy byl pozorován u vzorků 1BC\_05 (viz tab. 4. a 5.), kde docházelo k výrazným změnám. Nejjemnější biochar, měl největší vliv na bobtnání, tento efekt je způsoben jemnější zrnitostí biocharu, než má půda do které byl aplikován. Související výsledek byl například pozorován i u výzkumu autorů Barnes et al. (2014) kteří zjistili, že vyšší retenci vykazují vzorky s jemnější zrnitostí biocharu. Retence vody právě může úzce souviset s mechanismem bobtnání. Důvodem vlivu biocharu na bobtnání je, že dokáže vyplnit póry, které má samotná půda, v těchto pórech se uchytí, nabobtná a tím je ucpe. Dále byl pozorován výrazný efekt u vzorků 1BC\_2, ale nižší než u 1BC\_05. Naopak u vzorků 1BC\_nat, který obsahuje nejhrubší biochar nebyl pozorován významný vliv na navýšení objemu oproti kontrolním vzorkům. Zvýšení objemu bylo zaznamenáno u všech vzorků. Přidání biocharu je statisticky významným faktorem, který ovlivňuje velikost bobtnání.

V tabulce 6. můžeme vidět naměřené poklesy ve vzorku po konsolidaci oproti bobtnání. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní data pro statistickou analýzu. Mezi měřenými daty nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly. Výsledek ANOVA testu měl hodnotu 0,11.

Tab. 6. Naměřené poklesy ve vzorku po konsolidaci oproti bobtnání

	1BC_05_ K (mm)	1BC_05_ N (mm)	1BC_nat_ K (mm)	1BC_nat_ N (mm)	kontrola_ K (mm)	kontrola_ N (mm)	1BC_2 (mm)
rozdíl ve výšce zeminy ve vzorku (nabobtnalý vzorek při nasycení - konsolidovaný)	1	1,5	1,5	1	1,5	0,5	0
	3	1,5	2	1	1	0	2
	3	2	2	1	3	1	1
Průměrný pokles	<b>2,33333</b>	<b>1,66666</b>	<b>1,83333</b>	<b>1</b>	<b>1,83333</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>
směrodatná odchylka	1,15470	0,28867	0,28867	0	1,04083	0,5	1

Po ukončení sycení a následné konsolidaci vybraných vzorků došlo u nekonsolidovaných vzorků k nižšímu průměrnému poklesu ve vzorku, oproti vzorkům vystaveným konsolidaci. Nejvyšší pokles je patrný u vzorku s nejjemnějším biocharem 1BC\_05\_K, kde jsme naměřili i nejvyšší hodnoty bobtnání (viz tab. 4.). Dále můžeme vidět shodný pokles u vzorku 1BC\_nat\_K a kontrola\_K. Nejméně se u konsolidovaných vzorků pokles projevil u vzorku 1BC\_2.

*Tab. 7. Porovnání o kolik se výška vzorku změnila po bobtnání a konsolidaci oproti původní výšce suchého vzorku*

	1BC_05_K	1BC_05_N	1BC_nat_K	1BC_nat_N	kontrola_K	kontrola_N	1BC_2
průměrné hodnoty bobtnání	2,91666	2,91666	0,83333	0,83333	0,66666	0,66666	2,33333
průměrné hodnoty poklesu po konsolidaci	2,33333	1,66666	1,83333	1	1,83333	0,5	1
rozdíl průměrných hodnot	<b>0,58332</b>	<b>1,25</b>	<b>-1</b>	<b>-0,16667</b>	<b>-1,16667</b>	<b>0,16666</b>	<b>1,33333</b>

Z tabulky 7. můžeme vidět, že vzorek 1BC\_05\_K průměrně nabobtnal o 2,9 mm a po zatížení průměrně poklesl o 2,3 mm. Při porovnání s původní výškou suchého vzorku zůstala hodnota navýšena průměrně o 0,6 mm. Stejně tak vzorek 1BC\_2 měl výrazné bobtnání 2,3 mm, ale pokles po zatížení jen o 1 mm. Při porovnání s původní výškou suchého vzorku zůstala hodnota navýšena o 1,3 mm. Vzorek 1BC\_nat\_K nabobtnal o 0,8 mm, ale poklesl po konsolidaci o 1,8 mm, dostal se tedy pod původní průměrnou výšku suchého vzorku (pravděpodobným důvodem může být vysoká počáteční hmotnost, vzorek obsahuje největší - nejhrubší částičky a proto u něj oproti ostatním vzorkům nedošlo k tak velkému samovolnému poklesu, ale více poklesl až po zatížení). Kontrolní vzorky (kontrola\_K) nabobtnaly o 0,7 mm a po zatížení poklesly o 1,8 mm, dostaly se také pod původní průměrnou výšku suchého vzorku, což bylo předpokládáno. U nekonsolidovaných vzorků je vidět nižší pokles oproti konsolidovaným.

## 6.2 Nasycená hydraulická vodivost

Naměřené hodnoty  $K_s$  byly vypočteny podle vzorce 2, který je popsán v kapitole 3.3.1. a zpracovány pomocí softwaru MS Excel 2016. Pro vyjádření výsledků bylo zvoleno porovnání vzorků v jednotlivých časových krocích a porovnání konsolidovaných a nekonsolidovaných vzorků. Všechny naměřené hodnoty  $K_s$  jsou uvedeny v přílohách 2 až 5. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní data pro statistickou analýzu.

### 6.2.1 První časový krok

V tabulce 7. můžeme vidět popisnou statistiku pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v prvním časovém kroku. Minimální hodnota  $K_s$  byla zjištěna u nekonsolidovaného vzorku 1BC\_nat\_N, který měl i nejvyšší variabilitu. Maximální hodnota byla zjištěna u konsolidovaného vzorku 1BC\_2. V tomto kroku byly zjištěny statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl hodnotu  $3,68 \cdot 10^{-4}$ . Statisticky významné hodnoty Tukey testu můžeme vidět v tabulce 8. Boxploty jsou vykresleny v grafu 1.

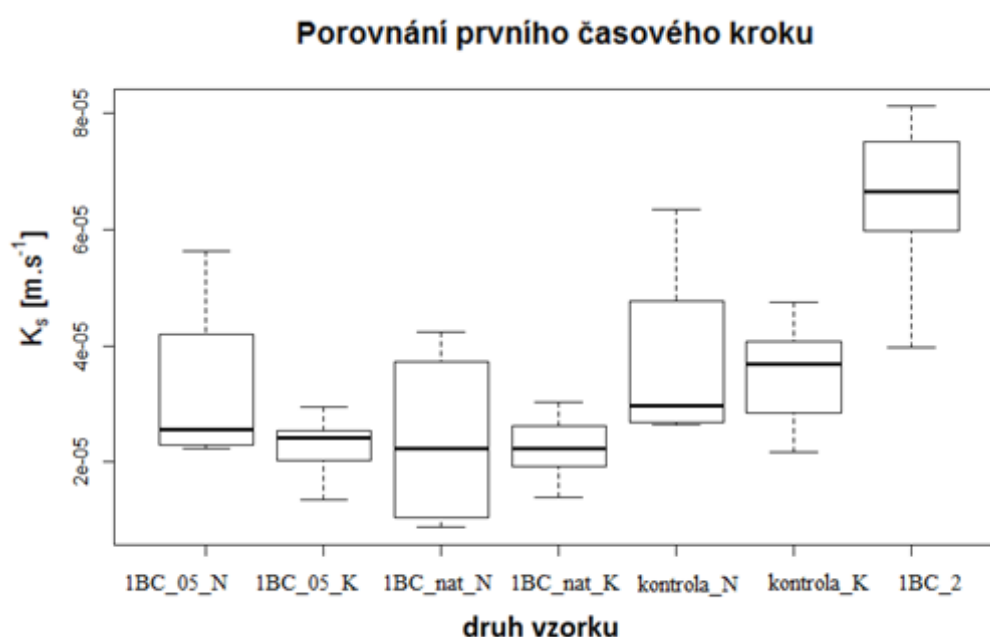
Tab. 8. Popisná statistika pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v prvním časovém kroku

Porovnání vzorků prvního časového kroku							
	1BC_0,5_N	1BC_0,5_K	1BC_nat_N	1BC_nat_K	kontrola_N	kontrola_K	1BC_2
Minimum	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$4,24 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-5}$	$4,74 \cdot 10^{-5}$	$8,11 \cdot 10^{-5}$
Medián	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-5}$	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$6,44 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-6}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Koeficient variace	0,49	0,27	0,67	0,28	0,47	0,29	0,25



Tab. 9. Popisná statistika Tukey testu pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v prvním časovém kroku

porovnávané vzorky	p - hodnota (Tukey test)
1BC_2 - 1BC_05_N	0.0172252
1BC_2 - 1BC_05_K	0.0005002
1BC_2 - 1BC_nat_N	0.0015599
1BC_2 - 1BC_nat_K	0.0004821
1BC_2 - kontrola_K	0.0210998



Graf 1. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v 1. časovém kroku

Při porovnání konsolidovaných a nekonsolidovaných vzorků 1. časového kroku můžeme vidět pokles průměrných hodnot  $K_s$  u všech vzorků, přestože je efekt konsolidace nízký a statisticky nevýznamný. Tento efekt je zřejmě zapříčiněn nízkou hodnotou zatížení a přidáním malé hodnoty biocharu (příměs pouze 1% biocharu). Dále můžeme z grafu 1. pozorovat snížení rozptylu konsolidovaných vzorků oproti nekonsolidovaným vzorkům.

U vzorku 1BC\_2 byl zjištěn velmi překvapivý nárůst hodnot  $K_s$  oproti kontrolním vzorkům. Předpokládáme, že se u těchto vzorků se vyskytla systematická chyba, která nebyla během práce zjištěna. Při přípravě vzorků a průběžné manipulaci mohlo přes veškerou opatrnost dojít k jejich poškození, které poté mohlo ovlivnit výsledky měření. Kromě vzorku 1BC\_2 byla zjištěna tendence snižování hodnoty  $K_s$

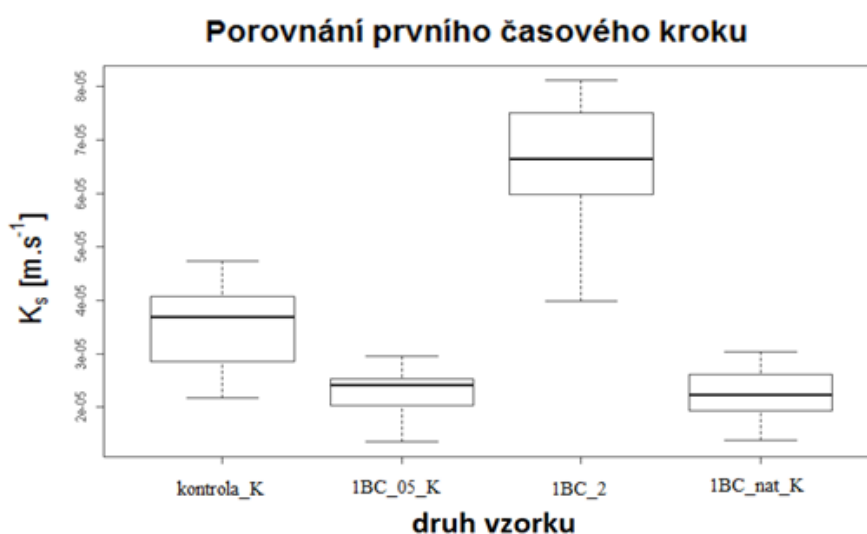
se zvyšováním zrnitosti části biocharu. Nejvyšší snížení bylo zjištěno o vzorku 1BC\_nat\_N. Stejný výsledek snižování hodnot pozorovali ve svých pracích také autoři Lim et al. (2016) nebo Barnes et al. (2014).

### 6.2.2 První časový krok – konsolidované vzorky

Při samostatném porovnání pouze konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku, byly zjištěny statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl hodnotu  $2,18 \cdot 10^{-5}$ . V tabulce 10. a 11. je vidět popisná statistika a významné hodnoty Tukey testu. Boxploty jsou vykresleny v grafu 2.

Tab. 10. Popisná statistika pro  $K_s$  konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku

Porovnání konsolidovaných vzorků prvního časového kroku				
	1BC_05_K	1BC_nat_K	Kontrola_K	1BC_2_K
Minimum	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$4,74 \cdot 10^{-5}$	$8,11 \cdot 10^{-5}$
Medián	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$6,44 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$6,03 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Koeficient variace	0,27	0,28	0,29	0,25



Graf 2. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  konsolidovaných vzorků v 1. časovém kroku

Tab. 11. Popisná statistika Tukey testu pro hodnoty Ks konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku

porovnávané vzorky	p - hodnota (Tukey test)
1BC_2 - 1BC_05_K	0.0000510
1BC_2 - 1BC_nat_K	0.0000494
1BC_2 - kontrola_K	0.0020035

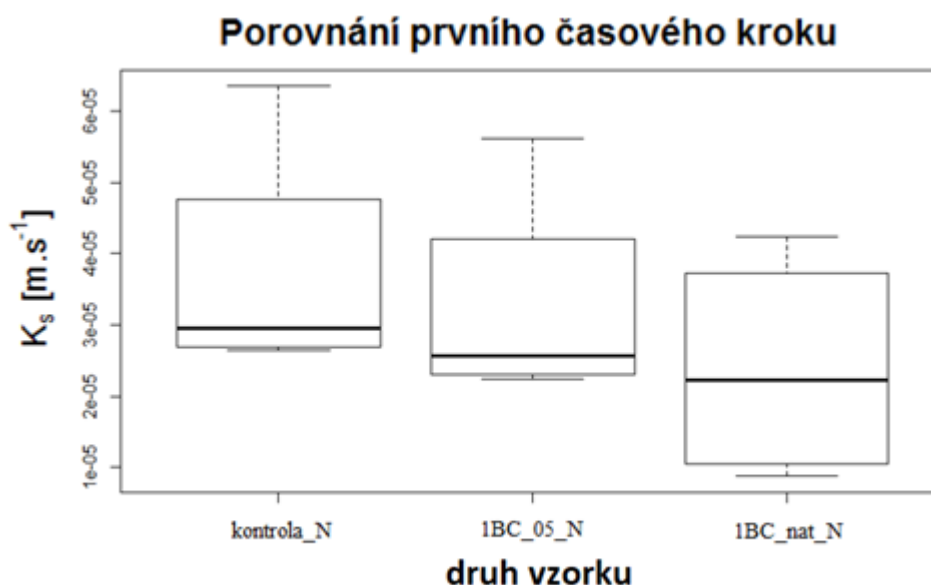
Z grafu 2. je vidět, že přidání biocharu nevýznamně snižuje hodnoty Ks oproti kontrolním vzorkům. Nejvyšší snížení bylo zjištěno o vzorku 1BC\_nat\_K. Překvapivý rozdíl byl zjištěn pouze u vzorku 1BC\_2, jak již bylo popsáno výše v kapitole 6.2.1 při porovnání všech druhů vzorků 1. časového kroku.

### 6.2.3 První časový krok – nekonsolidované vzorky

Při samostatném porovnání pouze nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku, nebyly zjištěny žádné statisticky významné rozdíly. ANOVA test měl hodnotu 0,538. V tabulce 12 můžeme vidět popisnou statistiku pro hodnoty Ks nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku. Boxploty jsou vykresleny v grafu 3.

Tab. 12. Popisná statistika pro hodnoty Ks nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku

Porovnání nekonsolidovaných vzorků prvního časového kroku			
	1BC_05_N	1BC_nat_N	Kontrola_N
Minimum	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$4,24 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-5}$
Medián	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$
Koeficient variace	0,49	0,67	0,47



Graf 3. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  nekonsolidovaných vzorků v 1. časovém kroku

Z výsledků je patrné, že přidání biocharu nevýznamně snižuje hodnoty  $K_s$  oproti kontrolním vzorkům. Největší variabilitu měly vzorky 1BC\_nat\_N, u kterých byla zjištěna i minimální naměřená hodnota  $K_s$ . Nejvyšší hodnota  $K_s$  byla zjištěna u kontrolních vzorků.

#### 6.2.4 Druhý časový krok

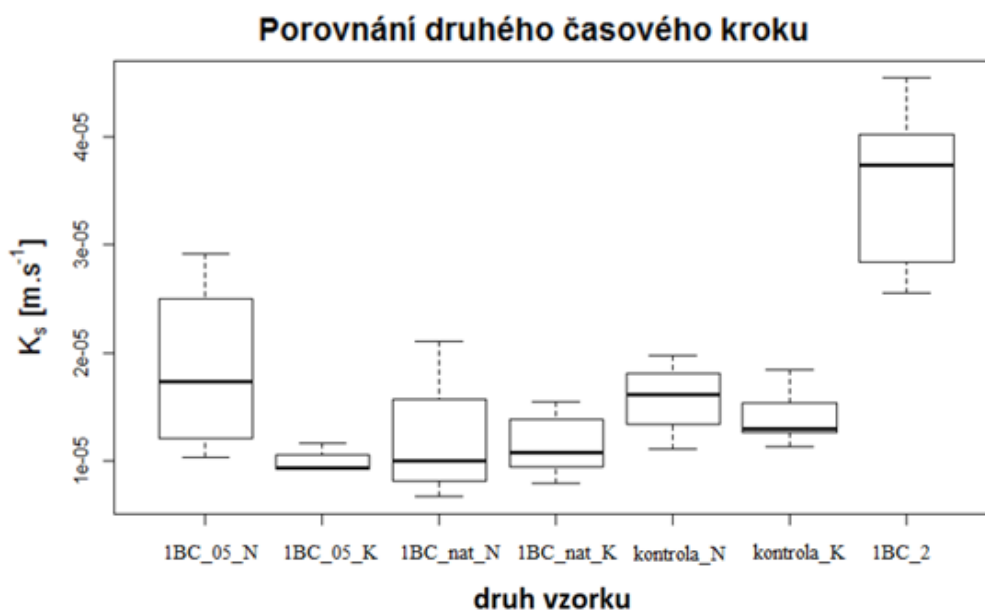
V tabulce 13. můžeme vidět popisnou statistiku pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v prvním časovém kroku. Minimální hodnota  $K_s$  byla zjištěna u vzorku 1BC\_05\_K. Maximální hodnota byla zjištěna u konsolidovaného vzorku 1BC\_2. Nejvyšší variabilitu měl konsolidovaný vzorek 1BC\_nat\_K. V tomto kroku byly zjištěny statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl hodnotu  $1,07 \cdot 10^{-6}$ . Statisticky významné hodnoty Tukey testu můžeme vidět v tabulce 14. Boxploty jsou vykresleny v grafu 4.

Tab. 13. Popisná statistika pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v druhém časovém kroku

Porovnání vzorků druhého časového kroku							
	1BC_0,5_N	1BC_0,5_K	1BC_nat_N	1BC_nat_K	kontrola_N	kontrola_K	1BC_2
Minimum	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$9,22 \cdot 10^{-6}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$	$7,95 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$
Medián	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$9,40 \cdot 10^{-6}$	$9,98 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$8,27 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$6,30 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,79 \cdot 10^{-6}$	$8,24 \cdot 10^{-6}$
Koeficient variace	0,45	0,11	0,53	0,27	0,23	0,20	0,23

Tab. 14. Popisná statistika Tukey testu pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v druhém časovém kroku

porovnávané vzorky	p - hodnota (Tukey test)
1BC_2 - 1BC_05_N	0.0013441
1BC_2 - 1BC_05_K	0.0000014
1BC_2 - 1BC_nat_N	0.0000133
1BC_2 - 1BC_nat_K	0.0000037
1BC_2 - kontrola_N	0.0001907
1BC_2 - kontrola_K	0.0000253



Graf 4. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  všech druhů vzorků v 2. časovém kroku

Při porovnání konsolidovaných a nekonsolidovaných vzorků 2. časového kroku můžeme opět vidět nevýznamný pokles průměrných hodnot  $K_s$  vlivem konsolidace, stejně jako je tomu u měření v prvním časovém kroku. Dále můžeme z grafu 4. pozorovat snížení rozptylu konsolidovaných vzorků oproti nekonsolidovaným vzorkům.

Výjimka oproti prvnímu časovému kroku byla pozorována u vzorku 1BC\_05\_N, který měl oproti kontrolní půdě lehce zvýšené hodnoty  $K_s$ . Vzorky 1BC\_nat\_N a 1BC\_nat\_K měli kromě této výjimky opět nejnižší hodnoty. Velkou výjimkou byl znovu vzorek 1BC\_2, kde byl zjištěn velmi překvapivý nárůst hodnot  $K_s$  oproti kontrolním vzorkům, jak již bylo zjištěno i v prvním časovém kroku a zdůvodnění popsáno v kapitole 6.2.1.

U obou časových krocích lze z výsledků pozorovat, že čím větší byly částice aplikovaného biocharu, tím nižší byla hodnota  $K_s$  až na výjimku u vzorku 1BC\_2.

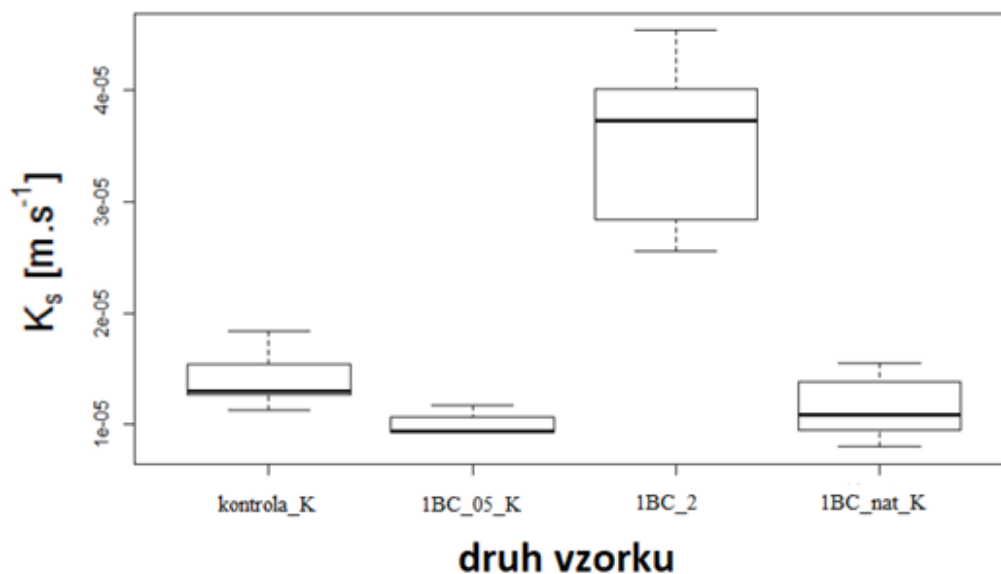
### 6.2.5 Druhý časový krok – konsolidované vzorky

Při samostatném porovnání pouze konsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku, byly také zjištěny statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl hodnotu  $4,85 \cdot 10^{-7}$ . V tabulce 15. a 16. je vidět popisná statistika a významné hodnoty Tukey testu. Boxploty jsou vykresleny v grafu 5.

*Tab. 15. Popisná statistika pro hodnoty  $K_s$  konsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku*

<b>Porovnání konsolidovaných vzorků druhého časového kroku</b>				
	1BC_05_K	1BC_nat_K	Kontrola_K	1BC_2
Minimum	$9,22 \cdot 10^{-6}$	$7,95 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$
Medián	$9,40 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$2,79 \cdot 10^{-6}$	$8,24 \cdot 10^{-6}$
Koeficient variace	0,11	0,27	0,20	0,23

## Porovnání druhého časového kroku



Graf 5. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  všech druhů konsolidovaných vzorků v 2. časovém kroku

Tab. 16. Popisná statistika Tukey testu pro hodnoty  $K_s$  konsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku

porovnávané vzorky	p - hodnota (Tukey test)
1BC_2 - 1BC_05_K	0.0000012
1BC_2 - 1BC_nat_K	0.0000025
1BC_2 - kontrola_K	0.0000113

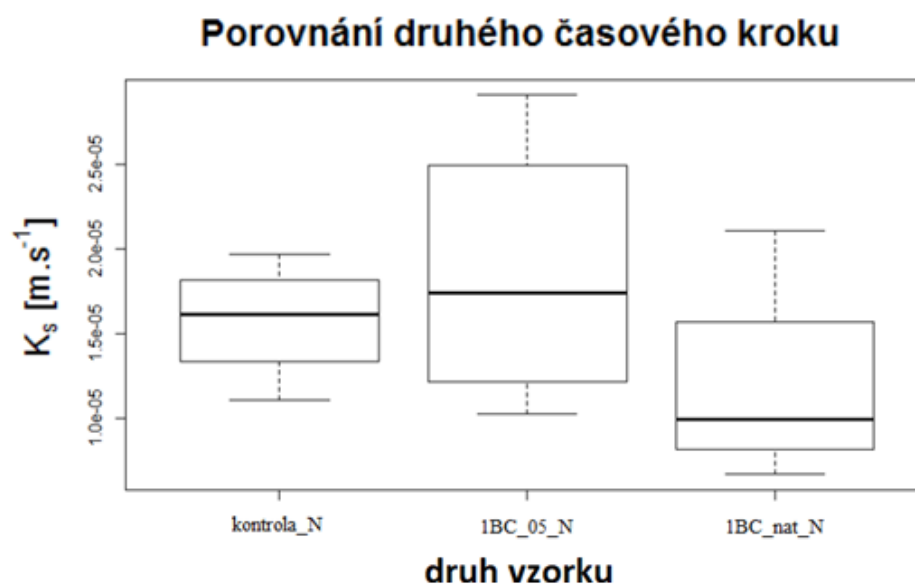
Z grafu 5. je vidět, že přidání biocharu nevýznamně snižuje hodnoty  $K_s$  oproti kontrolním vzorkům. Překvapivý rozdíl byl opět zjištěn pouze u vzorku 1BC\_2, kde byl pozorován nárůst hodnot  $K_s$ , jak již bylo zmíněno výše. Nejnižší hodnota byla zjištěna u vzorku 1BC\_05\_K.

### 6.2.6 Druhý časový krok – nekonsolidované vzorky

Při samostatném porovnání pouze nekonsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku, nebyly zjištěny žádné statisticky významné rozdíly. ANOVA test měl hodnotu 0,375. V tabulce 17. můžeme vidět popisnou statistiku pro hodnoty  $K_s$  nekonsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku. Boxploty jsou vykresleny v grafu 6.

Tab. 17. Popisná statistika pro hodnoty  $K_s$  nekonsolidovaných vzorků v druhém časovém kroku

Porovnání nekonsolidovaných vzorků druhého časového kroku			
	1BC_05_N	1BC_nat_N	Kontrola_N
Minimum	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$
Maximum	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
Medián	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$9,98 \cdot 10^{-6}$	$1,62 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$8,27 \cdot 10^{-6}$	$6,30 \cdot 10^{-6}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$
Koeficient variace	0,44	0,53	0,23



Graf 6. Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) pro hodnoty  $K_s$  všech druhů nekonsolidovaných vzorků v 2. časovém kroku

Z výsledků je patrné, že přidání biocharu nevýznamně snižuje hodnoty  $K_s$  oproti kontrolním vzorkům. Pouze vzorek 1BC\_05\_N vykazuje zvýšené průměrné hodnoty oproti kontrole a byla u něj zjištěna nejvyšší hodnota  $K_s$ . Nejnižší hodnota  $K_s$  byla pozorována u vzorku 1BC\_nat\_N, stejně jako u nekonsolidovaných vzorků prvního časového kroku.



Pro komplexní porovnání naměřených výsledků vyplývá, že nižší hodnoty  $K_s$  u vzorků s aplikací biocharu byly pravděpodobně zapříčiněny tím, že biochar udrží více vody a bobtná ve vzorcích. Tento efekt je způsoben jemnější zrnitostí biocharu, než půda do které byl aplikován. Dokáže vyplnit póry, které samotná půda obsahuje, uchytí se v nich, nabobtná a tím je ucpe. Voda z těchto důvodů nemůže proudit tak rychle, jako je tomu u kontrolních vzorků bez biocharu.

Hodnoty  $K_s$  pro jednotlivé vzorky obohacené o biochar mírně klesají, to může být zapříčiněno postupným bobtnáním biocharu, což způsobuje uzavírání pórů a snižuje průtočnost půdy.

Nebyl zjištěn významný vliv konsolidace na  $K_s$ , což by mohlo být zapříčiněno nízkou hodnotou zatížení a přidáním malé hodnoty biocharu (příměs pouze 1% biocharu). Průměrné hodnoty  $K_s$  po konsolidaci ale ve většině případech klesají (viz tab. 8. a 13.).

### **6.3 Porovnání dosažených výsledků s ostatními autory**

Podobnou studii se zabývala v roce 2017 Jitka Kubíková v bakalářské práci: Vliv kontrastní zrnitosti biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost laboratorně připravených půdních vzorků.

Zkoumány byly stejné druhy vzorků s příměsí 1% biocharu o různých zrnitostech (kontrola, 1BC\_05, 1BC\_2, 1BC\_nat) za použití rozdílného postupu přípravy, kdy byly válečky do připravené půdy v bedýnkách vtlačovány, oproti naší přípravě volného sypání zeminy do spojených válečků.

Kubíková (2017) zjistila podobné poklesy  $K_s$  oproti kontrole jako my (až na výjimku 1BC\_2, kde nemůžeme vyloučit systematickou chybu měření) a také pozorovala největší snížení vzorku 1BC\_nat oproti kontrole jako my. Pozorovány byly rozdílné hodnoty u vzorku 1BC\_05, kde nám oproti kontrole hodnoty klesaly, ale Kubíková (2017) zjistila nárůst oproti kontrole. Odlišný postup přípravy nejspíše umožňuje pravděpodobnější vznik preferenčních cest po stěnách válečku v práci Kubíkové (2017), a proto mohou vycházet vyšší výsledky. Vliv na bobtnání nebyl v této práci zkoumán.

Další podobné experimenty provedli Pavel Bočinský v roce 2016 v bakalářské práci: Změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti půd s různým podílem biocharu při opakovaných měření laboratorním permeametroem a Tomáš Tomáš v roce 2016 v diplomové práci: Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost kontaminované nivní půdy.

Oba autoři měřili v práci vliv 2% a 5% biocharu (odlišných vlastností než v této práci) a pozorovali snížení  $K_s$  vůči kontrole zřejmě kvůli výraznému bobtnání. Přípravované vzorky byly také volně nasypány do Kopeckého válečků, ale hutnily se rovnoměrným poklepáváním ze stran válečků určitým počtem poklepáním. Půda byla sycena v uzavřeném válečku a v obou případech se projevilo výrazné bobtnání, které bylo způsobeno vyšší dávkou přidaného biocharu oproti našemu případu, kdy bylo přidáno pouze 1% biocharu a nárůst nebyl tolik znatelný. Také zjistili, že u vzorků s biocharem jsou hodnoty  $K_s$  nižší než u vzorků bez biocharu.

Tomáš (2016) zjistil, že průměrné hodnoty  $K_s$  pro vzorky s 5% biocharu 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% biocharu se pohybovaly v rozmezí od  $6,051 \cdot 10^{-6}$  do  $2,95 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ , průměrné hodnoty kontrolních vzorků 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  $3,490 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ . Z výsledků je patrný pokles  $K_s$  po přidání biocharu.

Bočinský (2016) zjistil, že 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  $1,64 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$  z výsledků je patrný pokles  $K_s$  po přidání biocharu.

## 7. Závěr

Bakalářská práce se zabývá vlivem biocharu a konsolidace na nasycenou hydraulickou vodivost ( $K_s$ ) a na změny bobtnání půdy.

Výsledky experimentu prokázaly vliv biocharu na  $K_s$ , ačkoliv většina změn nebyla při použití 1% biocharu statisticky významná. Z výsledků obou časových kroků můžeme vidět pokles  $K_s$  oproti kontrole jak u konsolidovaných, tak nekonsolidovaných vzorků (s výjimkou 1BC\_2, viz níže). Tento pokles  $K_s$  může být zapříčiněn postupným bobtnáním biocharu, což způsobuje uzavírání pórů a snižuje průtočnost půdy. Nejvyšší snížení bylo zjištěno u vzorku 1BC\_nat\_K a 1BC\_nat\_N. Výjimka byla u vzorku 1BC\_05\_N, kde v druhém časovém kroku průměrná hodnota nepatrně vzrostla oproti kontrole z  $1,58 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  na  $1,86 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ . Významný statistický rozdíl byl nalezen u vzorků 1BC\_2, kde průměrná hodnota  $K_s$  v prvním časovém kroku vzrostla oproti konsolidovaným kontrolním vzorkům (kontrola\_K) z  $3,50 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  na  $6,65 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ . V druhém časovém kroku byl pozorován nárůst oproti kontrole z  $1,42 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  na  $3,54 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ . Toto chování je pro nás neobjasněno a nemůžeme vyloučit výskyt systematické chyby během měření, ačkoliv si jí nejsme vědomi. Z výsledků nebyl zjištěn významný vliv konsolidace na  $K_s$ , což by mohlo být zapříčiněno nízkou hodnotou zatížení a přidáním malé hodnoty biocharu (příměs pouze 1% biocharu).

Nejvyšší efekt biocharu na bobtnání půdy byl pozorován u vzorků 1BC\_05, kde docházelo k výrazným a statisticky významným změnám a hodnota průměrně vzrostla o 2,9 mm. U vzorku 1BC\_2 hodnota vzrostla o 2,3 mm, u vzorku 1BC\_nat o 0,8 mm a u kontroly o 0,66 mm. Nejjemnější biochar, měl největší vliv na bobtnání, tento efekt je způsoben jemnější zrnitostí biocharu, než má půda do které byl aplikován. Vliv konsolidace na bobtnání se projevil nejvíce u vzorku 1BC\_05\_K, kde průměrná hodnota po zatížení klesla o 2,3 mm.

Toto měření je součástí většího výzkumného záměru. Na změřených a zpracovaných vzorcích je v současnosti měřena retenční čára a dále je plánováno stanovit objemovou hmotnost. V současnosti probíhají měření na jiných biocharech a s vyšší aplikovanou dávkou biocharu. Můžeme předpokládat, že při vyšší aplikované dávce bude zesílen efekt na bobtnání i na nasycenou hydraulickou vodivost.

Důvodem záměru je vybrat vhodné směsi pro zlepšení hydro-fyzikálních vlastností půd ohrožených suchem (například půdy s vysokým podílem písku).

## 8. 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: e108340.

Bočinský, P., 2016: Změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti půd s různým podílem biocharu při opakovaných měření laboratorním permeametrem. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 44 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze

Brassard, P., Godbout, S., Raghavan, V., 2016. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. Journal of Environmental Management 181: 484 – 497.

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

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.

Glab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., Gondek, K., 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. Geoderma 281: 11 – 20.

Kubíková, J., 2017: Vliv kontrastní zrnitosti biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost laboratorně připravených půdních vzorků. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 55 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze

- Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M., 2004: *Hydropedologie 10. Skriptum* ČVUT, Praha, 176 s.
- Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142: 136 – 144.
- Pavlásek, J., Jačka, L., 2014: *Hydropedologie*. ČZU, Praha, 104 s.
- Pokorná D., Záborská J, 2007: *Hydrologie a hydropedologie*. Praha, 218 s.
- Stock, O., Downes, N.K., 2008: Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil and Tillage Research* 99: 191 – 201.
- Tomáš, T., 2016: Vliv biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost kontaminované nívné půdy. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 56 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze
- 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., Lima I. M., Klasson K. T., Wartelle L. H., 2010: Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter. *Chemosphere* 80: 935-940.
- Valentová J., 1998: *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha, 174 s.
- Valentová, J., 2007. *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha,
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., Dias, I., 2010. *Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*. JRC Scientific and Technical Reports. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg 166pp.

## **9. Seznam příloh**

Příloha č. 1 - Kompletní váhové údaje měřených vzorků měřené ihned po nasypání do spojených válečků

Příloha č. 2 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_2

Příloha č. 3 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_05

Příloha č. 4 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_nat

Příloha č. 5 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých kontrolních vzorků

**Příloha č. 1 - Kompletní váhové údaje měřených vzorků měřené  
ihned po nasypání do spojených válečků**

1BC_0 5mm			1BC_nat		
číslo vzorku	válečky + zemina + gumička + gáza [g]	čistá zemina [g]	číslo vzorku	válečky + zemina + gumička + gáza [g]	čistá zemina [g]
25 K	224,7	192,1	97 N	224,7	208,9
43 N	228,4	191,2	109 N	225,1	208,2
34 N	225,3	191,9	103 K	224,9	206,9
138 K	224,4	192,5	121 N	225,1	207,1
141 N	225,4	193,5	139 K	227,3	208,6
136 K	226,9	192,9	117 N	228,2	207,1
137 N	227,3	191,6	107 K	224,7	208,2
143 K	227,2	192,4	129 K	229,1	208,2
144 K	222,9	193,3	128 K	226,8	208,8

kontrola			1BC_2mm		
vzorek č. (spodní váleček)	válečky + zemina + gumička + gáza [g]	čistá zemina [g]	vzorek č. (spodní váleček)	válečky + zemina + gumička + gáza [g]	čistá zemina [g]
36 N	229,7	190,5	51 K	222,8	195,9
37 N	227,9	191,9	55 K	220,2	194,7
56 N	222,9	189,6	65 K	220,7	196,8
67 N	222,4	190,9	61 K	221,6	194,9
39 K	224,3	190,9	49 K	223,6	195
40 K	226,4	191,9			
42 K	223,9	188,6			
41 K	226,4	189,7			
44 K	226,3	191,4			

**Příloha č. 2 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_2**

Ks – vzorky 1BC_2			
Číslo válečku	konsolidace	Ks _ průměr (m/s) první časový krok	Ks _ průměr (m/s) druhý časový krok
61	K	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$
65	K	$8,11 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
55	K	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$
51	K	$6,65 \cdot 10^{-5}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$
49	K	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$

**Příloha č. 3 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_05**

Ks – vzorky 1BC_05			
Číslo válečku	konsolidace	Ks _ průměr (m/s) první časový krok	Ks _ průměr (m/s) druhý časový krok
138	K	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$9,22 \cdot 10^{-6}$
144	K	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$9,40 \cdot 10^{-6}$
143	K	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
136	K	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
25	K	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$9,29 \cdot 10^{-6}$
34	N	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$
141	N	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
43	N	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$
137	N	$5,62 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$

**Příloha č. 4 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých vzorků 1BC\_nat**

Ks – vzorky 1BC_nat			
Číslo válečku	konsolidace	Ks _ průměr (m/s) první časový krok	Ks _ průměr (m/s) druhý časový krok
103	K	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-6}$
107	K	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
129	K	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$
128	K	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$9,44 \cdot 10^{-6}$
139	K	$2,62 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$
97	N	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$
121	N	$3,22 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$
109	N	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$9,66 \cdot 10^{-6}$
117	N	$4,24 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$



## Příloha č. 5 - Výsledné hodnoty Ks jednotlivých kontrolních vzorků

Ks – kontrolní vzorky			
Číslo válečku	konsolidace	Ks _ průměr (m/s) první časový krok	Ks _ průměr (m/s) druhý časový krok
56	N	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$
67	N	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$
36	N	$6,35 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
37	N	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$
39	K	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$
40	K	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$
44	K	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$
42	K	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$
41	K	$4,07 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$