

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA

V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



VLIV KONTRASTNÍ ZRNITOSTI BIOCHARU NA
NASYCENOU HYDRAULICKOU VODIVOST
LABORATORNĚ PŘIPRAVENÝCH PŮDNÍCH VZORKŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

BAKALANT: Jitka Kubíková

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jitka Kubíková

Vodní hospodářství

Název práce

Vliv kontrastní zrnitosti biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost laboratorně připravených půdních vzorků

Název anglicky

Effect of contrasting texture of biochar on saturated hydraulic conductivity of laboratory prepared soil samples

Cíle práce

Stanovit vliv kontrastní zrnitosti biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost laboratorně upravené nivní půdy a na související půdně-fyzikální vlastnosti.

Metodika

Stručně charakterizovat biochar a jeho význam na základě současné literatury. Stručně definovat nasycenou hydraulickou vodivost a způsoby jejího měření.

Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost.

Připravit vzorky zeminy s přidavkem biocharu o třech různých zrnitostních složeních. Stabilizovat tyto vzorky ve speciálních nádobách, ve kterých je udržováno definované rozmezí vlhkosti. Provést měření nasycené hydraulické vodivosti laboratorním permeametrem na vzorcích odebraných ze stabilizačních nádob.

Stanovit související půdní vlastnosti (vlhkost při odběru, vlhkost v blízkosti nasycení, objemovou hmotnost).

Vyhodnotit naměřená data, statisticky porovnat výsledky a určit vliv zrnitostně různého biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost a související půdní vlastnosti.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

aplikace biocharu, hydraulické vlastnosti půdy, vliv zrnitosti biocharu, laboratorní měření, nivní půda

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, 1–9.
- Hardie, M., Clothier, 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., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An alfisol and an andisol. *Geoderma* 209–210, 188 – 197.
- 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. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 4. 12. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 12. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 24. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a uvedla jsem všechnu použitou odbornou literaturu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. 4. 2017

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D., za ochotu a pomoc při jejím zpracování, odborné vedení a cenné rady.

Abstrakt

Biochar je v poslední době testován jako přídavek v půdě, který by mohl pozitivně ovlivňovat její vlastnosti. Bakalářská práce se zabývá vlivem biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s) nivní půdy a na další půdní fyzikální vlastnosti - objemovou hmotnost, objemovou vlhkost při odběru a objemovou vlhkost blízko nasycení. V experimentu byla použita nivní půda (fluvizem) z blízkosti řeky Litavky. Biochar, vyrobený pyrolýzou z měkkého dřeva, byl aplikován do půdy s podílem 1 % ve třech zrnitostech: jako nativní, dále s velikostí částic pod 2 mm a pod 0,5 mm. Půda byla poté stabilizována v bedničkách za stálé vlhkosti.

Měřeny byly celkem čtyři druhy vzorků – kontrolní vzorky bez biocharu a tři druhy vzorků s biocharem o výše zmíněných zrnitostech. Měření K_s v laboratorním permeamtru proběhlo ve dvou sériích, v každé sérii byly měřeny dva druhy připravené půdy po pěti vzorcích. Po stanovení K_s byly vzorky váženy pro zjištění hodnot dalších fyzikálních vlastností. Bylo zjištěno, že biochar má určitý vliv na K_s , ačkoliv ve většině případů nebyl statisticky významný. Jediný významný rozdíl byl pozorován u vzorků s nativním biocharem, u nichž průměrná hodnota K_s klesla oproti kontrolním vzorkům o 76,6 % (z $1,42 \cdot 10^{-5}$ na $3,32 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Pravděpodobně se jedná o kombinaci několika důvodů, zejména blokaci pórů částicemi biocharu a zvýšenou retenci v důsledku adsorpce vody na tyto částice. Dále byl pozorován nárůst hodnot objemové vlhkosti při odběru i blízko nasycení. Určitý vliv měl biochar i na objemovou hmotnost.

Snížení hodnot K_s společně se zvýšením hodnot objemových vlhkostí by v praxi mělo velký význam v půdách, které jsou více propustné a náchylné na sucho, neboť by se zvýšila retence vody a došlo by ke zpomalení jejího odtoku.

Klíčová slova: aplikace biocharu, hydraulické vlastnosti půdy, vliv zrnitosti biocharu, laboratorní měření, nivní půda

Abstract

Biochar is recently being examined as a soil amendment which could have some positive effects on the amended soil. The aim of this bachelor thesis is to investigate the impact of biochar applied to fluvisol on saturated hydraulic conductivity (K_s) and other soil characteristics - bulk density, volumetric water content by sampling and near-saturated volumetric water content. The soil comes from the vicinity of the river Litavka. Biochar produced by pyrolysis from softwood was applied to this soil at the rate of 1% and was used in three size classes: native biochar, particles of the size less than 2 mm and less than 0.5 mm. After that the soil was stabilized in boxes with constant moisture.

Four types of samples were examined – control soil without biochar and three types of biochar-amended soil with the biochar particle sizes aforementioned. We used a laboratory permeameter to measure the values of K_s in two series. In one series, there were two types of amended soil, each at five samples. After that, the samples were weighted for the assessment of other physical soil properties.

It was found out that biochar has an impact on K_s , although it was not statistically significant in most cases. The only significant difference was observed in samples with native biochar, where K_s decreased by 76.6 % ($1.42 \cdot 10^{-5}$ to $3.32 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). It is likely to be a result of numerous reasons, especially blocking of pores and increased retention, which is caused by the adsorption of water to the biochar particles. Also an effect on bulk density was observed.

The observed decreases in K_s together with increases of volumetric water content could have a great significance in permeable soils which are inclinable to desiccation, because the retention would increase and the outfall of water would be slower.

Keywords: application of biochar, soil hydraulic properties, impact of biochar's texture, laboratory measurements, fluvisol

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle práce	11
3	Literární rešerše	12
3.1	Darcyho zákon	12
3.2	Nasyčená hydraulická vodivost (K_s).....	13
3.3	Metody měření K_s	14
3.4	Biochar	17
3.5	Efekt biocharu na K_s	18
4	Metodika.....	21
4.1	Charakteristika použité zeminy a biocharu.....	21
4.2	Příprava zeminy s různým podílem biocharu.....	23
4.3	Odebírání vzorků	23
4.4	Laboratorní měření	24
4.4.1	K_s	25
4.4.2	Půdní vlastnosti	26
5	Statistická analýza	28
6	Výsledky.....	29
6.1	Nasyčená hydraulická vodivost.....	29
6.1.1	První časový krok	29
6.1.2	Druhý časový krok.....	30
6.1.3	Třetí časový krok	32
6.2	Půdní vlastnosti	33
6.2.1	Objemová hmotnost.....	33
6.2.2	Objemová vlhkost při odběru	34
6.2.3	Objemová vlhkost blízko nasycení	36
7	Diskuze	38
8	Závěr	41
9	Přehled literatury a použitých zdrojů	42
10	Seznam obrázků	44
11	Přílohy.....	46

1 Úvod

V současnosti se stále více diskutuje o možnosti využití biocharu jako nástroje ke zlepšení půdních vlastností a s nimi souvisejících vlivů na zemědělství a životní prostředí. Biochar je organický materiál získaný pyrolýzou biomasy (rozkladem organických surovin bez přístupu vzduchu). Tento materiál podle některých autorů při aplikaci do půdy pozitivně ovlivňuje její vlastnosti, například zvyšuje sorpční kapacitu (Uchimiya et al., 2011), kationtovou výměnnou kapacitu (Mohammed et al., 2016) a fixaci kovů a snižuje jejich toxicitu (Uchimiya et al., 2010), proto by mohl být nástrojem k zúrodnění degradovaných půd. Neutrální až zásadité pH biocharu by bylo možné využít ke zlepšení úrodnosti u kyselých půd, v zásaditých půdách by však šlo o nežádoucí negativní efekt (Verheijen et al., 2010). Vzhledem k vysokému obsahu pomalu se rozkládajícího uhlíku představuje biochar možnost pro snižování emisí oxidu uhličitého, jenž vzniká rychlým rozkladem organické hmoty, a představuje tak nástroj ke zmírnění klimatických změn (Brassard et al., 2016).

Co se týče vlivu biocharu na půdní hydraulické vlastnosti, biochar může v závislosti na jeho druhu a druhu půdy snižovat i zvyšovat hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (Barnes et al., 2014; Lim et al., 2016). Může také zvýšit retenci vody v půdě (Glab et al., 2016). Řada autorů však ve svých výzkumech nezjistila žádné výrazné změny nebo zlepšení hydraulických vlastností při použití biocharu oproti půdě bez jeho obsahu (např. Glab et al., 2016, Jeffery et al., 2015). Do budoucna by tedy bylo zapotřebí více komplexních výzkumů v této oblasti.

Nasycená hydraulická vodivost je jednou z charakteristik půdního prostředí. Vyjadřuje schopnost proudění kapaliny v porézním prostředí. Hodnoty K_s jsou základním podkladem pro mnoho inženýrských aplikací (např. závlahy, odvodnění, návrhy hrází) a klíčovým vstupem pro fyzikálně založené modelování proudění vody v půdě (Jačka et Pavlásek, 2014). Kvalitní stanovení K_s je tedy velmi důležité.

Vliv biocharu na K_s není zatím uspokojivě vysvětlen, přestože jeho vliv na poutání a proudění vody byl již řešen v řadě studií. Aktuální vědecké výzkumy (např. Lim et al., 2016; Glab et al., 2016) ukazují na důležitý vliv zrnitosti, velikosti dávky a chemického složení aplikovaného biocharu a vlastností půdy (textura, struktura, obsah organické hmoty a další), do které je biochar aplikován. Z tohoto důvodu je vliv různé zrnitosti na hodnoty K_s a související důležité fyzikální vlastnosti půdy v této práci experimentálně zkoumán.

První část práce je tvořena literární rešerší. Ta se zabývá nejprve obecným popisem nasycené hydraulické vodivosti (K_s) a biocharu, poté jsou uvedeny konkrétní výsledky experimentů několika autorů, kteří zkoumali vliv biocharu na K_s .

Druhá část je tvořena metodikou, která obsahuje charakteristiku použitých materiálů, postup měření K_s , na něj navazující popis měření a vyhodnocení půdních vlastností použitých vzorků a dále statistickou analýzu naměřených dat.

Třetí část obsahuje výsledky experimentu, jejich diskuzi a doporučení pro další výzkum.

2 Cíle práce

Prvním cílem této práce je stanovit vliv různých zrnitostí biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost nivní půdy.

Druhým cílem je stanovit objemovou hmotnost, objemovou vlhkost při odběru a objemovou vlhkost při nasycení u všech druhů vzorků a určit vliv biocharu na tyto půdní vlastnosti.

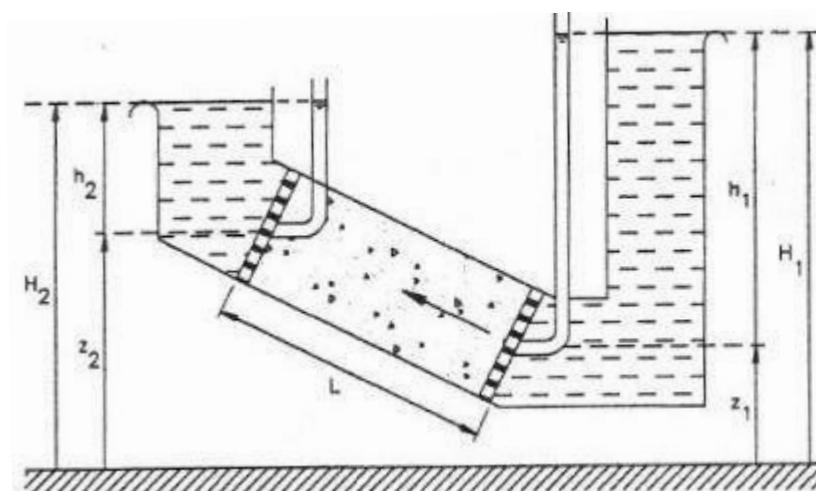
3 Literární rešerše

3.1 Darcyho zákon

Jednorozměrné proudění vody porézním homogenním prostředím popisuje Darcyho zákon. Henry Darcy odvodil experimentálně následující vztah:

$$Q = K_s \cdot S \cdot \frac{H_1 - H_2}{L} \quad [m^3 \cdot s^{-1}],$$

tedy že průtok vody sloupcem zeminy je přímo úměrný nasycené hydraulické vodivosti (K_s), průtočné ploše (S) a rozdílu piezometrických výšek na začátku (H_1) a na konci sloupce (H_2) a nepřímo úměrný délce sloupce (L).



Obr. 3.1-1: Schéma Darcyho experimentu. (převzato z: Valentová, 1998)

Po vydělení průtočnou plochou dostáváme vztah pro tzv. Darcyho rychlost (nazývanou také hustota toku):

$$v = -K_s \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad [m \cdot s^{-1}],$$

nebo v diferenciálním tvaru:

$$v = -K_s \cdot \frac{dH}{dL} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

(Valentová, 1998).

3.2 Nasycená hydraulická vodivost (K_s)

Nasycená hydraulická vodivost je veličina, která charakterizuje možnost proudění vody porézním prostředím. Můžeme ji charakterizovat jako rychlost proudění při jednotkovém hydraulickém gradientu. Hodnota K_s závisí jak na charakteru půdního prostředí, tak na fyzikálních vlastnostech kapaliny. Rozhodujícími půdními vlastnostmi jsou pórovitost, tvar a velikost pórů, specifický povrch, zrnitostní složení a tortuozita (zakřivenost pórů). Vliv kapaliny záleží na její dynamické viskozitě a hustotě (Jačka et Pavlásek, 2014). V tabulce 3.2-1 jsou uvedeny orientační hodnoty K_s pro různé druhy půd.

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	$(1 - 5) \cdot 10^{-3}$

Tabulka 3.2 -1: Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy. (převzato z: Valentová, 1998)

Hydraulickou vodivost můžeme vyjádřit následujícím způsobem:

$$K_s = \frac{k_p \rho g}{\mu} \quad [m \cdot s^{-1}],$$

kde k_p je propustnost (m^2), ρ je hustota kapaliny ($kg \cdot m^{-3}$), g je gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$) a μ je dynamická viskozita ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), (Jačka et Pavlásek, 2014).

3.3 Metody měření K_s

Nasyčenou hydraulickou vodivost lze měřit přímými nebo nepřímými metodami. Metody přímé můžeme dělit na laboratorní a terénní. Laboratorně se K_s měří buď s konstantním, nebo s proměnným spádem. U terénních metod rozlišujeme měření nad a pod hladinou podzemní vody (HPV).

Pro laboratorní stanovení K_s se používá nejčastěji laboratorní permeametr. Při měření s konstantním spádem se udržuje stálý rozdíl tlakových výšek na obou stranách půdního vzorku. Měří se čas, za který proteče objem vody vzorkem do byrety. S konstantním spádem se měří vzorky středně propustné a propustné. (Jačka et Pavlásek, 2014). Schéma přístroje je uvedeno na obr. 3.3-1. Výpočet K_s je pak podle upraveného Darcyho vztahu následující:

$$K_s = \frac{V_p L_v}{A_v t \Delta H} \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (3.3-1)$$

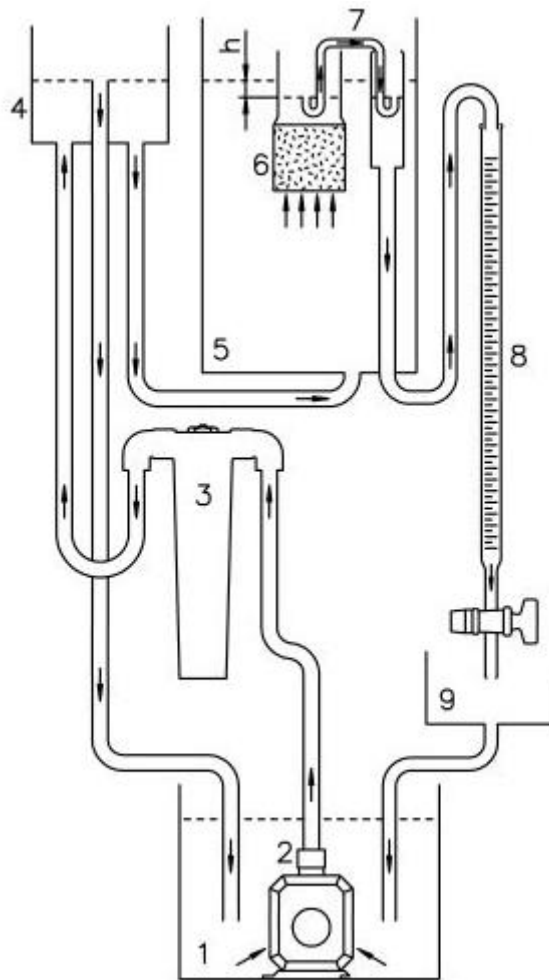
kde V_p je objem vody proteklý vzorkem, L_v délka válečku, A_v je průtočná plocha průřezu vzorku (válečku), t je čas, za který proteče V_p vzorkem a ΔH je rozdíl hladin vně a uvnitř vzorku.

Málo propustné vzorky se měří s proměnným spádem, kdy se sleduje změna v hydraulickém sklonu za čas. Výpočet K_s z upravené Darcyho rovnice je:

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

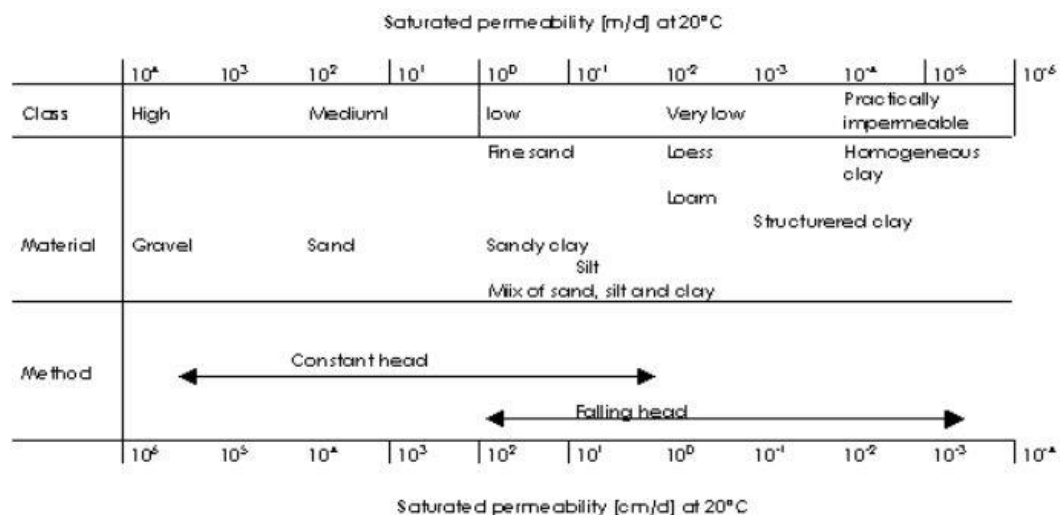
kde A_d je plocha průřezu trubice v držáku půdního vzorku, ΔH_1 značí rozdíl vodních hladin na počátku měření (čas t_1) a ΔH_2 rozdíl hladin v čase t_2 (Jačka et Pavlásek, 2014).

Podrobnější popis a metodiku práce s laboratorním permeametrem lze nalézt například v manuálu firmy Eijkelkamp (2017).



Obr. 3.3-1: Schéma laboratorního permeamtru: 1 - zásobní cisterna na vodu, 2 - čerpadlo, 3 - filtr, 4 - výškový regulátor, 5 - plastový kontejner, 6 - držák půdního vzorku, 7 - plastová násoska, 8 - byreta, 9 - nádoba s otvory pro odvádění prosakující vody. Šipky ukazují směr proudění vody v permeamtru (upraveno z: Eijkelkamp, 2017).

Výhodami laboratorních metod jsou možnost stanovení podmínek při měření, dále výpočet hodnot K_s podle dané rovnice a také fakt, že postupným sycením vzorků můžeme odstranit vliv vzduchu v pórech. Nevýhodou je pouze malý měřený objem půdy, který nemusí dobře charakterizovat vlastnosti prostředí, poté možnost vzniku preferenčních cest skrze vzorek a také nucený jednorozměrný směr proudění vody, který neodpovídá bočnímu proudění u strukturních půd.



Obr. 3.3-2: Rozsah použitelnosti metod měření K_s laboratorním permeametroem s konstantním a proměnným spádem (převzato z: Eijkelkamp, 2017).

Stanovení K_s v terénu nad HPV se provádí pomocí infiltračního válce, Guelphského permeametry nebo tenzního infiltrometry. Infiltrační válec má kladnou tlakovou výšku na povrchu půdy. Tenzní infiltrometr měří se zápornou tlakovou výškou na povrchu terénu. Guelphský permeametr pracuje na principu Marriotovy lahve, kdy je ve vrtu udržována stálá výška hladiny. Přístroj se skládá ze zásobníku vody, výtokové trubice, která je v dolní části perforovaná, a zavzdušňovací trubičky, pomocí které se nastavuje hladina vody. Pod HPV se K_s měří piezometrickou nebo jednosondovou metodou. Při jednosondové metodě se z vrtu dosahujícího pod HPV vody odčerpá voda. Poté se měří rychlost stoupání hladin ve vrtu.

Nepřímou metodou se rozumí odhad K_s podle jiné naměřené vlastnosti, např. zrnitosti, objemové hmotnosti apod. Nejbližší hodnota K_s se poté najde v databázi naměřených hodnot. Tato metoda je vhodná spíše jen pro písčité lehké půdy, které mají nízkou heterogenitu, neboť pro ostatní půdy nejsou údaje v databázích dostatečně přesné (Jačka et Pavlásek, 2014).

3.4 Biochar

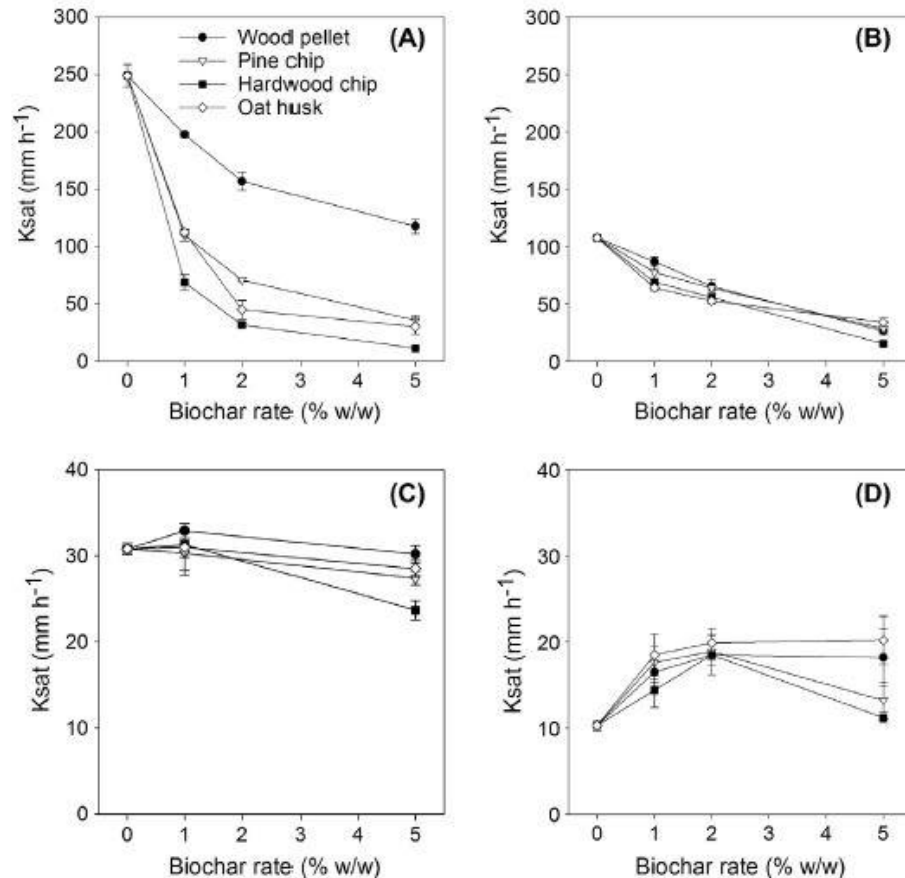
Biochar je organický materiál, který je produktem pyrolýzy biomasy (rozkladu suroviny bez přístupu nebo s velmi omezeným přístupem vzduchu). Vlastnosti a chování biocharu jsou velmi ovlivněny původním materiálem a podmínkami, za kterých probíhala pyrolýza. Předpokládá se, že aplikace biocharu do půdy může zlepšovat její vlastnosti (Verheijen et al., 2010).

Výsledky výzkumů ukázaly většinou pozitivní vliv na růst a výnos rostlin. Nejlepší výsledky byly pozorovány u kyselých propustných půd, neboť byl zároveň zjištěn i růst hodnoty pH. Jak však již bylo zmíněno v úvodu, nárůst pH by mohl uškodit v případě zásaditých půd (Verheijen et al., 2010). Se zvýšením pH v důsledku aplikace biocharu se však pojí další možné problémy, jako například zvýšené uvolňování rozpustného uhlíku z půdní organické hmoty (Wang et al., 2016). Použití biocharu by však také mohlo být limitováno v půdách s omezenou infiltrační kapacitou, protože částice biocharu by při deštích mohly být přednostně erodovány z půdy a byla by tak snížena efektivita jejich aplikace (Wang et al., 2013). Dalším možným efektem je zvýšení sorpční schopnosti půdy vůči znečišťujícím látkám, jako například pesticidům nebo polyaromatickým uhlovodíkům. Tato vlastnost by mohla na jedné straně zabránit šíření kontaminace v půdě, na straně druhé by však mohla způsobit její lokální akumulaci. Existují také výzkumy sledující tzv. priming effect (Cross et Sohi, 2011; Zimmerman et al., 2011), který umožňuje rychlejší rozklad půdní organické hmoty. Rychlejší rozklad by ovšem na druhou stranu mohl mít za následek poškození úrody v dlouhodobém horizontu z důvodu ztráty půdní organické hmoty a dále také větší množství CO₂ uvolňovaného do ovzduší (Verheijen et al., 2010). Proti tomuto tvrzení však stojí teorie některých autorů (např. Brassard et al., 2016), kteří vidí v biocharu naopak nástroj ke zmírnění změn klimatu díky jeho schopnosti vázat uhlík v půdě po dlouhou dobu. Woolf et al. (2010) ve své analýze zjistili, že globální zavedení používání biocharu by mohlo ročně kompenzovat až 12% nynější antropogenní produkce emisí ekvivalentů CO₂. Tento výčet vlastností a vlivů biocharu není zdaleka kompletní, o možnostech jeho využití se neustále diskutuje a objevují se další či pozměněné názory a návrhy.

3.5 Efekt biocharu na K_s

Vlivem biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost se zabývali Barnes et al., (2014). Ve svém výzkumu použili biochar vyrobený ze dřeva stromu *Prosopis* (naditec) pyrolýzou při teplotě 400 °C. Ten byl přidán do třech druhů půdy – písčité, organické a jílovité. Obsah biocharu představoval 10%. K_s byla měřena metodou proměnného spádu. Výsledky ukazují, že příměs biocharu průměrně snížila hodnoty nasycené hydraulické vodivosti o 92 % u písčité půdy (z $2,88 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $2,88 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a o 67 % u organické půdy (z $2,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $7,79 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), v jílovité půdě však hodnotu naopak zvýšila o 328% (z $3,26 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $1,16 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). U písčité půdy byl přitom předpoklad opačného výsledku, tedy zvýšení K_s v důsledku zvýšení pórovitosti. Důvodem snížení K_s i přes zvýšenou pórovitost by mohla být struktura biocharu. Biochar měl větší pórovitost a specifický povrch než použitý písek. Vznikly tak dvě možné cesty toku vody – první skrze prostory mezi biocharem a pískem a druhá skrze póry uvnitř vlastního biocharu.

Podle Lim et al., (2016), je nasycená hydraulická vodivost biocharem ovlivňována. Záleží přitom na typu a poměru přidaného biocharu a na velikosti částic půdy. Cílem výzkumu bylo vyvinout podpůrný nástroj k předpovědi vlivu biocharu přidaného do půdy na K_s . Autoři použili hrubý písek, jemný písek, jíl a hlínu. Druhy biocharu byly zvoleny na základě charakteristické velikosti částic. Jednalo se o biochar vyrobený z pelet z tvrdého dřeva (dub letní), odštěpků z borovicového dřeva, odštěpků z tvrdého dřeva (dub letní, javor cukrový, jasan americký) a z ovesných slupek. Každý druh biocharu byl smíchán se všemi druhy půd v poměru 1%, 2% a 5%. K_s byla měřena metodou s proměnným spádem. Hodnoty K_s se snížily po přidání biocharu u hrubého i jemného písku. Větší částice biocharu (60% > 1 mm) měly větší účinek na snížení K_s než menší částice (60% < 1 mm). Například aplikace 5% dřevěných pelet snížila K_s o 53% v hrubém písku a o 75% v jemném písku. Aplikace 5% dřevěných úlomků snížila K_s o 96% v hrubém a 86% v jemném písku. Zvýšení poměru biocharu vedlo k prudkému snížení K_s v hrubém písku, který vykazoval největší pokles K_s v celém experimentu. Tohoto faktu by bylo možné využít u písčítých půd, neboť kořeny rostlin by byly v kontaktu s vodou po delší dobu, což by mohlo vést k vyšším výnosům z důvodu redukované míry infiltrace.

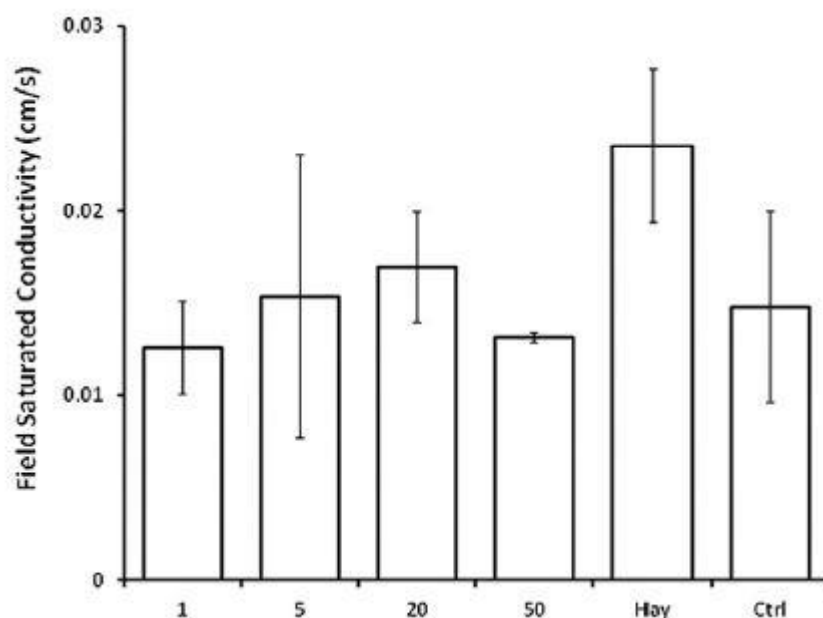


Obr. 3.5-1: Změny v nasycené hydraulické vodivosti při aplikaci 0%, 1%, 2% a 5% biocharu do čtyř typů půdy: A - hrubozrnný písek, B - jemnozrnný písek, C - hlína, D - jíl. (převzato z Lim et al., 2016)

Podle Glab et al., (2016), aplikace biocharu podstatně zlepšuje fyzikální vlastnosti písčité půdy. Pro experiment byl použit hlinitý písek. Biochar byl vyroben pyrolýzou při teplotě 300 °C ze stébel dvou druhů rostlin – ozdobnice a ozimé pšenice. Jeho částičky byly rozděleny podle velikosti do třech frakcí – 0-500 μm, 500-1000 μm a 1000-2000 μm a použity v poměrech 0,5%, 1%, 2% a 4%. K_s byla měřena metodou konstantního spádu. Očekávalo se, že přidání biocharu ovlivní propustnost půdy, protože se zvýšila její pórovitost a počet velkých pórů, které umožňují gravitační pohyb vody v půdě. Avšak hodnota K_s se výrazněji nezměnila. Průměrná hodnota u všech vzorků byla 143,2 cm·den⁻¹.

Podle Jeffery et al., (2015), nemá aplikace biocharu do písčité půdy významný vliv na nasycenou hydraulickou vodivost, retenční schopnost půdy ani na stabilitu agregátů. Ve dvou oddělených polních experimentech studovali efekt biocharu na hydrologické vlastnosti písčité půdy. Pro první experiment byl použit biochar

z bylinných odřezků zpracovaných pyrolýzou při teplotách 400°C a 600 °C, který byl aplikován v množství 10 t·ha⁻¹. Tyto dva druhy, neobohacená půda a také původní materiál (seno) ve stejném poměru byly aplikovány do horní vrstvy půdy pomocí rotavátoru. Ve druhém experimentu byl použit biochar téhož původu, připravený pyrolýzou při 400 °C, v množství 1 t·ha⁻¹, 5 t·ha⁻¹, 20 t·ha⁻¹ a 50 t·ha⁻¹, a taktéž neobohacená půda a seno, ale v množství 20 t·ha⁻¹. Aplikace proběhla stejně jako u prvního experimentu, avšak do oddělených dílců o velikosti 1x1 metr. Do všech z nich pak byla zasetá semena pro oblast běžných rostlin. Analýza půdních vlastností proběhla po jednom a třech vegetačních obdobích. K_s byla vyhodnocena po jednom vegetačním období ve druhém experimentu pomocí dvouválcového infiltrometru. Výsledky experimentu však neukázaly žádné výraznější změny v K_s, a to ani u jednoho z uvedených poměrů.



Obr. 3.5-2: Hodnoty K_s z druhého experimentu pro písčitou půdu s přidávkou 1, 5, 20 a 50 t·ha⁻¹ biocharu, 20 t·ha⁻¹ sena a pro původní půdu. (převzato z: Jeffery et al., 2015).

4 Metodika

Přípravy a měření probíhaly v laboratořích katedry KVHEM za dohledu vedoucího práce Ing. Lukáše Jačky, PhD.

4.1 Charakteristika použité zeminy a biocharu

Pro tuto práci byla použita nivní půda (fluvizem) z okolí řeky Litavky, odebraná 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. (souřadnice 49.7201722N, 14.0129314E).



Obr. 4.1-1: Lokalita odběru nivní půdy – okolí meteorologické stanice u obce Trhové Dušníky na břehu řeky Litavky (upraveno z: Mapy.cz, 2017).

Průměrné hodnoty zrnitostních frakcí z pěti rozborů určené hustoměrnou metodou byly následující (zrna větší než 2 mm se v půdě nevyskytovala):

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

Tabulka 4.1-1: Průměrné hodnoty zrnitostí nivní půdy z pěti rozborů stanovených hustoměrnou metodou (Jačka, nepublikováno).

Na základě těchto hodnot byl určen půdní druh podle klasifikátoru USDA jako písčité hlína (sandy-loam). Obsah uhlíku byl měřen pomocí analyzátoru SSM-5000A (Shimadzu, Japan) ve spolupráci s KGEV FŽP. Celkový průměrný obsah uhlíku v půdě z pěti rozborů 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 a obsažené látky jsou uvedeny v tabulce 4.1-2.

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

Tabulka 4.1-2: Vlastnosti a složení použitého biocharu (Trakal, nepublikováno).

4.2 Příprava zeminy s různým podílem biocharu

Při přípravě byly použity plastové bedýnky s pěti otvory na každé straně. Na dno každé z nich byla umístěna geotextilie. Pro možnost zavlažování zeminy byly skrze otvory ve stěně provlečeny knoty ze speciálních vláken, upravených pro dobré vedení vody, které byly jedním koncem položeny na geotextilii a druhý konec byl protažen otvorem ve víčku do uzavíratelných zkumavek o objemu 15 ml. V každé bedně bylo takto umístěno 10 knotů a zkumavek.

Úkolem bylo připravit tři druhy vzorků zeminy s 1% příměsí biocharu o zrnitosti původní (nativní), menší než 2 mm a menší než 0,5 mm. Dále byla pro porovnání výsledků ponechána jedna kontrolní bedýnka, která obsahovala pouze nivní půdu bez příměsí. Pro první druh vzorků s nativním biocharem bylo pouze odebráno 250 g původního biocharu. K přípravě dalších dvou druhů vzorků byl nativní biochar proset přes síta s velikostí ok 2 mm a 0,5 mm a použito bylo taktéž 250 g. Každý druh biocharu byl smíchán co možná nejrovnoměrněji v bedně s 24,750 kg zeminy a tím se dosáhlo 1% příměsí. Takto připravená zemina byla poté postupně přesypávána do bedýnek a lehce rovnoměrně udusávána. Po přípravě byly bedýnky umístěny v laboratoři na sebe a horní bedýnka byla zakryta geotextiliemi a deskou proti vypařování vody.

Zemina v bedýnkách byla zavlažována po dobu 5 týdnů ze zkumavek, doplňovaných pravidelně třikrát týdně (pondělí, středa, pátek) vodou. Většina zkumavek byla pokaždé v den příchodu do laboratoře zcela prázdná.

4.3 Odebírání vzorků

Vzorky byly odebírány do Kopeckého válečků o objemu 100 cm³. Odběr vzorků probíhal následujícím způsobem: ostrou hranou byl váleček položen na zeminu na místo, kde nebyl viditelně porušený povrch (například prasklinou) nebo jiný stav provlhčení a poté opatrně zatlačen do zeminy až po okraj. Přebytečná vrstva zeminy nad hranou válečku byla postupně seřezávána do roviny. Bylo důležité odstraňovat ji s opatrností, aby nedošlo ke znehodnocení vzorku. Váleček byl následně zavíčkovaný. Takto bylo v každé bedýnce umístěno cca deset válečků. Bedýnka byla zakryta několika vrstvami geotextilie. Následně bylo potřeba převrátit bedýnku na druhou stranu tak, aby nedošlo k posunu válečků uvnitř, což by znehodnotilo vzorky.

Po převrácení bedýnky začalo opatrné odstraňování zeminy pro nalezení válečků. Ty byly odebrány nejprve s vyšší vrstvou zeminy nad okrajem a teprve potom se nožem opatrně seřezávala zemina až k hraně válečku, aby vznikla rovná plocha. Každý váleček byl uzavřen i druhým víčkem. Takto připravené vzorky se ihned zvažily a hmotnosti byly zapsány do zápisníku k příslušnému číslu válečku a druhu vzorku.



Obr. 4.3-1: Odebírání vzorků do Kopeckého válečku.

4.4 Laboratorní měření

V experimentu byly měřeny čtyři druhy vzorků: vzorky bez přídavku biocharu (kontrola), vzorky s 1% biocharu o zrnitosti $\leq 0,5$ mm (bio_0.5), dále o zrnitosti ≤ 2 mm (bio_2) a s nativním biocharem o různé velikosti částic (bio_nat).

Jednotlivé vzorky byly nejdříve měřeny v laboratorním permeamtru pro stanovení K_s . Celkem použito pět vzorků od každého typu, dohromady tedy dvacet válečků. Měření proběhlo ve dvou sériích, v každé z nich byly měřeny dva druhy vzorků, tzn. deset vzorků v jedné sérii.

Po tomto experimentu následovalo vážení nasycených vzorků, jejich sušení a opětovné vážení pro stanovení objemové vlhkosti při odběru, objemové vlhkosti blízko nasycení a objemové hmotnosti.

4.4.1 K_s

Z Kopeckého válečku bylo nejprve odstraněno víčko na straně s tupou hranou. Místo něj byla přes okraj nejprve připevněna gáza pomocí gumového kroužku a na ni poté nasazeno sítko. Z druhé strany bylo sejmuto víčko a ostrou hranou směrem nahoru byl váleček vložen do držáku. Šroub držáku bylo potřeba opatrně dotáhnout a tím vzorek upevnit. Obě víčka dohromady byla zvážena na digitální váze s přesností jedné desetiny gramu a hmotnost zapsána do zápisníku.

U některých vzorků došlo ke vzniku větších trhlin nebo byl u nich předpoklad pro výskyt preferenčních cest. Tyto vzorky byly z měření vyřazeny. U vzorků, které měly pouze minimální vady (drobné mezery u okraje válečku, které však nepokračovaly hlouběji a tudíž netvořily preferenční cesty), bylo použito malé množství silikonu na jejich vyplnění.

Nejprve byl sestaven a připraven permeometr. K sycení vzorků byla použita destilovaná voda, která byla nalita do zásobníku vody a do vrchní nádrže permeometru, kam byly později umístěny vzorky. Do permeometru byl vložen držák se vzorkem a číslo vzorku bylo zapsáno k pozici č. 1. V kbelíku byla naplněna násoska vodou tak, aby v ní nezůstala žádná vzduchová bublina, a umístěna jedním koncem do držáku a druhým vně. Násoska odváděla vodu prosakující skrz vzorek. Stejným způsobem se postupovalo u všech deseti vzorků. Poté bylo zapnuto čerpadlo a vzorky se nechaly sytit. Sycení probíhalo po tři dny za postupného zvedání hladiny a to až do chvíle, kdy hladina vystoupala nad úroveň vzorků.

První série měření začala po dvou dnech. Rtuťovým teploměrem byla změřena teplota vody, do které byly ponořeny vzorky, a hodnota byla zaznamenána do zápisníku. Před počátkem měření bylo ještě potřeba změřit výšky hladin h_1 a h_2 pro určení rozdílu hladin ΔH , který byl použit při výpočtu nasycené hydraulické vodivosti. Hladinou H_1 byla výška vody uvnitř držáku, hladinou H_2 výška vně, v těsné blízkosti vzorku. Tyto hodnoty byly odečteny na mikrometru, který světelně signalizuje okamžik styku jeho spodní hrany s hladinou vody.

Po zapsání těchto údajů byl uzavřen kohoutek byrety a nechala se do ní natékat voda. V okamžiku, kdy hladina vody v byretě dosáhla na stupnici hodnoty 0 mm, začalo měření času na stopkách. Současně byl zapsán čas začátku měření. Následně byl třikrát po sobě naměřen objem 5 cm^3 a zaznamenány příslušné časy. Dále byl vypočten průměr, který reprezentuje hodnotu K_s v prvním kroku měření (prakticky ihned po začátku

kontinuálního protékání vody vzorkem). Poté byl otevřen kohoutek byrety a voda se nechala dále protékat. Tento postup byl opakován u všech deseti vzorků. Po ukončení celého měření byla horní nádrž permeamtru zakryta deskou proti výparu vody. Stejným postupem byly tytéž vzorky změřeny podruhé v ten samý den přibližně po třech hodinách (druhý krok) a potřetí s odstupem přibližně 24 hodin (třetí krok). V ten samý den byly připraveny vzorky pro druhou sérii měření. Vzorky se opět v permeamtru nechaly 3 dny sytit. Měření dalších deseti vzorků započalo o tři dny déle, postup byl totožný.

4.4.2 Půdní vlastnosti

Pro vyhodnocení půdních vlastností bylo po měření K_s provedeno vážení vzorků. Nejprve bylo zváženo samotné sklíčko. Poté byl na sklíčko položen váleček se vzorkem. Následně se změřené vzorky na sklíčku nechaly sušit při teplotě 105°C. Po vysušení byl zvážen nejprve vzorek na sklíčku. Poté byla zemina vysypána a byl zvážen samotný váleček.

Celkem bylo tedy stanoveno šest hodnot hmotností:

m_o - hmotnost vzorku při odběru (váleček + 2 víčka)

$m_{vál}$ - hmotnost válečku

m_{2v} - hmotnost dvou víček válečku

m_{nas+s} - hmotnost nasyceného vzorku na sklíčku (s válečkem)

m_s - hmotnost sklíčka

m_{vys+s} - hmotnost vysušeného vzorku na sklíčku (s válečkem).

Objemová hmotnost suché půdy se spočítá jako:

$$\rho_s = \frac{m_M}{V_s} \quad [g \cdot cm^{-3}],$$

kde m_M je hmotnost pevných částic a V_s je objem vzorku (Jačka et Pavlásek, 2014). Výpočet ρ_s z měřených hmotností byl tedy následující:

$$\rho_s = \frac{(m_{vys+s} - m_s - m_{vál})}{V_s}. \quad (4.4.2-1)$$

Objemová vlhkost se vypočítá jako:

$$\theta = \frac{V_W}{V_S},$$

kde V_W je objem vody a V_S objem vzorku (Jačka et Pavlásek, 2014). Vztah pro výpočet objemové vlhkosti při odběru (v %) za předpokladu, že V_S je 100 cm^3 a hustota vody $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, byl tedy:

$$\theta_o = m_o - m_{2v} - m_{v\acute{a}l} - (m_{vys+s} - m_s - m_{v\acute{a}l}). \quad (4.4.2-2)$$

Objemová vlhkost blízko nasycení (v %) za stejných předpokladů byla vypočtena následujícím způsobem:

$$\theta_{nas} = m_{nas+s} - m_{v\acute{a}l} - m_s - (m_{vys+s} - m_s - m_{v\acute{a}l}). \quad (4.4.2-3)$$



Obr. 4.4.2 – 1: Vzorek půdy po měření K_s . Nebyly pozorovány žádné objemové změny (autorka).

5 Statistická analýza

Statistické vyhodnocení a tvorba grafů byla provedena v rozhraní RStudio pro programovací jazyk a prostředí R. Z hodnot K_s , měřených vždy pro 5 vzorků, byla pro jednotlivé druhy vzorků (kontrola, bio_nat, bio_0.5 a bio_2) vypočtena popisná statistika (průměr, koeficient variace, směrodatná odchylka). Graficky byly jednotlivé druhy vzorků půdy porovnány pomocí boxplotů.

Dále byly pro tyto datové soubory provedeny testy normality (Shapiro et Wilk, 1965). Bylo zjištěno, že data lze aproximovat normálním rozdělením. Normalita dat byla předpokladem pro možnost použití následujících statistických testů.

Pro stanovení významnosti vlivu biocharu na K_s sledované půdy byla nejprve použita jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA (Bedáňová et Večerek, 2007). Nulová hypotéza ANOVA je následující: skutečný rozdíl ve středních hodnotách (průměrech) je nulový, neboli střední hodnoty jsou stejné. V případě, že byla nulová hypotéza zamítnuta (byl nalezen statisticky významný rozdíl v průměrech mezi druhy vzorků půdy), pak byl proveden Tukey test (Tukey honest significant test) pro vícenásobné párové porovnání průměru. ANOVA test ukáže, že jedna ze zrnitostí je významná. Účelem Tukey testu je ukázat, které konkrétní druhy vzorků se významně liší, tedy o kterou zrnitost se jedná. Tukey test je považován za konzervativní, což znamená, že v průběhu testování udržuje nízkou hladinu významnosti α a tím nedovolí, abychom snadno získali statistickou významnost rozdílů mezi testovanými skupinami (Bedáňová et Večerek, 2007). Všechny statistické testy byly provedeny na hladině významnosti 0,05.

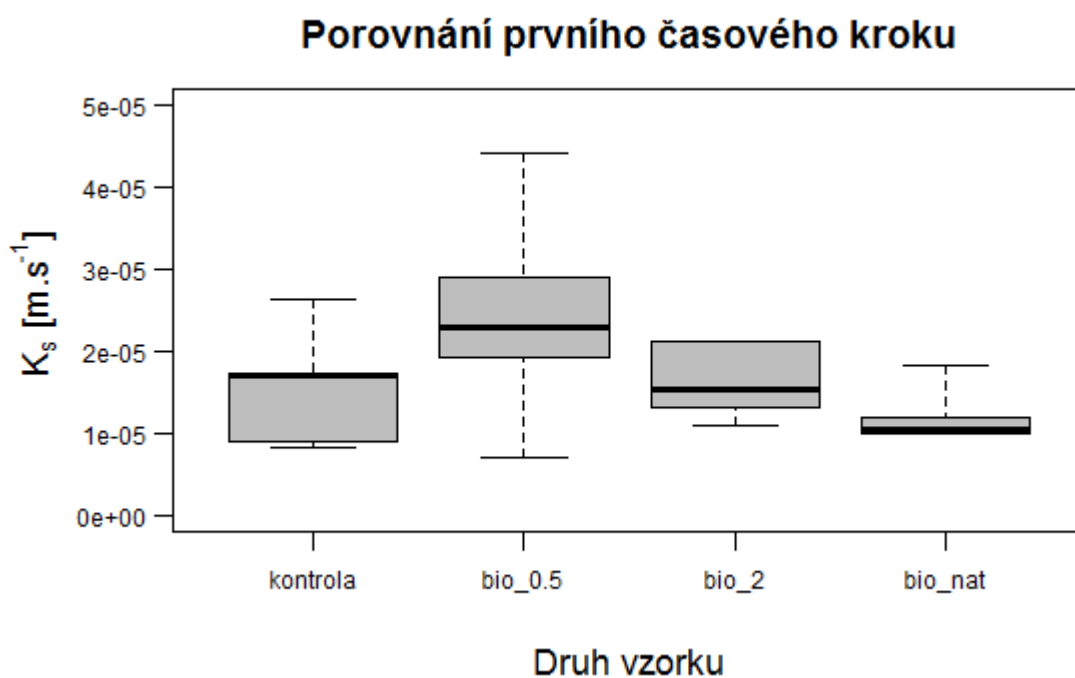
6 Výsledky

Pro interpretaci výsledků změn hodnot K_s bylo zvoleno porovnání vzorků v časových krocích. Nasycená hydraulická vodivost byla vypočtena podle vztahu (3.3-1).

6.1 Nasycená hydraulická vodivost

6.1.1 První časový krok

Popisnou statistiku v prvním kroku měření lze vidět v tabulce 6.1.1-1 a boxploty na obrázku 6.1.1-1. Minimální hodnotu K_s měl bio_0.5, u něhož byla zároveň zjištěna i maximální hodnota. Tento druh vzorku měl tedy nejvyšší variabilitu. Byl to jediný vzorek s biocharem, u kterého byla naměřena vyšší hodnota mediánu v porovnání s kontrolou. V prvním kroku nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly. ANOVA test měl p-hodnotu 0,15. Všechny naměřené hodnoty K_s , kompletní popisnou statistiku a výsledky ANOVA testu lze nalézt v přílohách 10-1 až 10-3.



Obr. 6.1.1-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 1. kroku -1 hodina od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Porovnání vzorků v prvním časovém kroku				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	$8,13 \cdot 10^{-6}$	$7,08 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$9,88 \cdot 10^{-6}$
Maximum	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Medián	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$7,39 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$4,74 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$
Koeficient variace	0,48	0,56	0,29	0,29

Tab. 6.1.1-1: Popisná statistika hodnot K_s v prvním časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

6.1.2 Druhý časový krok

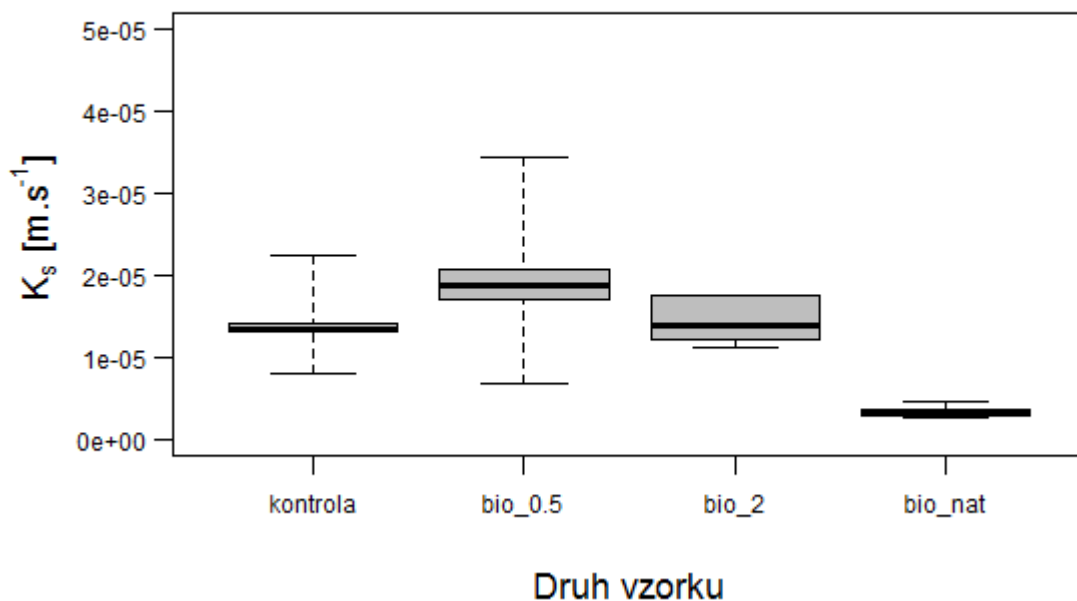
V druhém kroku měření byly nalezeny tři významné rozdíly hodnot. Jednalo se o následující vzorky:

Porovnávané vzorky	p – hodnota (Tukey)
bio_nat – bio_2	0.0363283
bio_nat – bio_0.5	0.0022138
bio_nat – kontrola	0.0409600

Tab. 6.1.2-1: Popisná statistika hodnot K_s v prvním časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Popisná statistika je uvedena v tabulce 6.1.2-2. Stejně jako v prvním kroku měly i zde největší variabilitu vzorky bio_0.5, u nichž byla naměřena i nejvyšší hodnota K_s . Minimální hodnota byla zjištěna u bio_nat. Kompletní statistika, jednotlivé hodnoty K_s a výsledky testů ANOVA a Tukey jsou k vidění v přílohách 10-4 až 10-7.

Porovnání druhého časového kroku



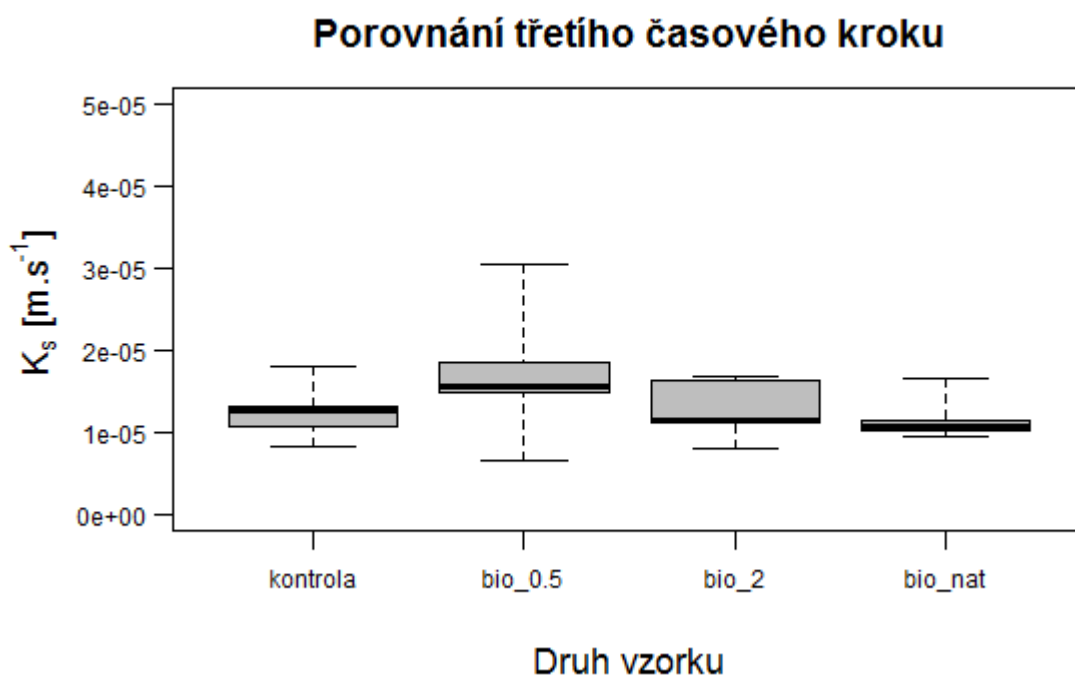
Obr. 6.1.2-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 2. kroku - 3 hodiny od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Porovnání vzorků v druhém časovém kroku				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	$8,07 \cdot 10^{-6}$	$6,73 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-6}$
Maximum	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,44 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$
Medián	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$3,09 \cdot 10^{-6}$
Průměr	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-6}$
Směrodatná odchylka	$5,17 \cdot 10^{-6}$	$9,91 \cdot 10^{-6}$	$2,99 \cdot 10^{-6}$	$7,53 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace	0,36	0,51	0,21	0,23

Tab. 6.1.2-2: Popisná statistika hodnot K_s v druhém časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

6.1.3 Třetí časový krok

Největší variabilitu měly opět vzorky bio_0.5. U tohoto druhu byla zjištěna nejvyšší i nejnižší hodnota měření. Stejně jako v prvním kroku dosahoval bio_0.5 vyšších hodnot než kontrola, bio_2 a bio_nat měly nižší hodnotu mediánu oproti kontrole. Ani u tohoto kroku nebyly nalezeny významné rozdíly, p-hodnota ANOVA testu byla 0,367, nebyl tedy nalezen žádný statisticky významný rozdíl. Výchozí hodnoty K_s , kompletní popisná statistika a celé výsledky ANOVA testu jsou uvedeny v přílohách 10-8 až 10-10.



Obr. 6.1.3-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 3. kroku -24 hodin od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Porovnání vzorků v třetím časovém kroku				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	$8,17 \cdot 10^{-6}$	$6,57 \cdot 10^{-6}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$9,43 \cdot 10^{-6}$
Maximum	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$
Medián	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$
Průměr	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
Směrodatná odchylka	$3,63 \cdot 10^{-6}$	$8,69 \cdot 10^{-6}$	$3,77 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-6}$
Koeficient variace	0,29	0,51	0,30	0,24

Tab. 6.1.3-1: Popisná statistika hodnot K_s v třetím časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

6.2 Půdní vlastnosti

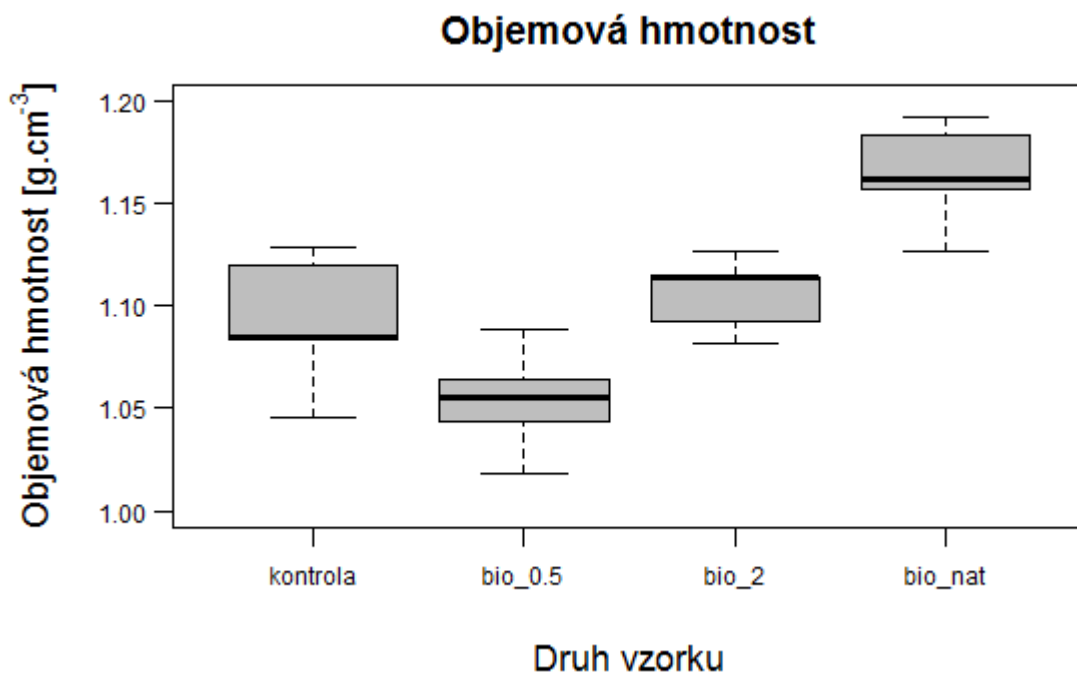
6.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla vypočtena podle vztahu 4.4.2-1. V příloze 10-11 jsou uvedeny objemové hmotnosti jednotlivých vzorků. Minimální hodnotu objemové hmotnosti měl vzorek bio_0.5, maximum bio_nat. Kompletní popisná statistika je uvedena v příloze 10-12. P-hodnota ANOVA testu byla $6,09 \cdot 10^{-5}$. Tukey-test našel významné rozdíly mezi těmito vzorky:

Porovnávané vzorky	p – hodnota (Tukey)
bio_0.5 - bio_2	0.0294522
bio_nat - bio_2	0.0136252
bio_nat- bio_0.5	0.0000301
kontrola – bio_nat	0.0027062

Tab. 6.2.1-1: P-hodnoty statisticky významných rozdílů mezi objemovými hmotnostmi při odběru podle Tukey-testu (autorka).

Výsledky ANOVA a Tukey testů jsou uvedeny v přílohách 10-13 a 10-14.



Obr. 6.2.1-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové hmotnosti všech druhů vysušených vzorků (autorka).

Porovnání objemové hmotnosti všech druhů vzorků				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	1,046	1,018	1,082	1,127
Maximum	1,129	1,089	1,127	1,192
Medián	1,085	1,055	1,114	1,162
Průměr	1,092	1,054	1,106	1,164
Směrodatná odchylka	0,033	0,026	0,018	0,025
Koeficient variace	0,030	0,025	0,016	0,022

Tab. 6.2.1-2: Popisná statistika hodnot objemové hmotnosti pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

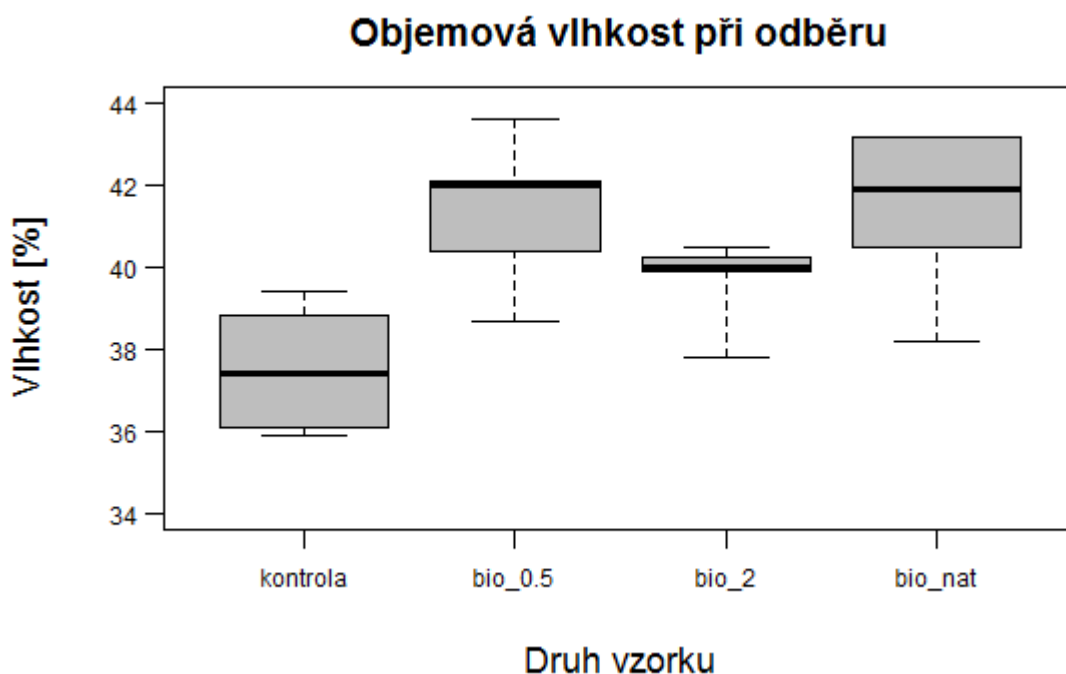
6.2.2 Objemová vlhkost při odběru

Objemová vlhkost při odběru byla vypočtena podle vztahu 4.4.2-2. Minimální hodnotu měl vzorek kontroly, maximum bio_0.5. P-hodnota ANOVA testu byla 0,00703. Tukey-test ukázal významné rozdíly mezi následujícími vzorky:

Porovnávané vzorky	p – hodnota (Tukey)
kontrola - bio_0.5	0.0122604
kontrola – bio_nat	0.0113710

Tab. 6.2.2-1: P-hodnoty statisticky významných rozdílů mezi objemovými vlhkostmi při odběru podle Tukey-testu (autorka).

Vstupní hodnoty, popisná statistika a výsledky ANOVA a Tukey testů jsou uvedeny v přílohách 10-15 až 10-18.



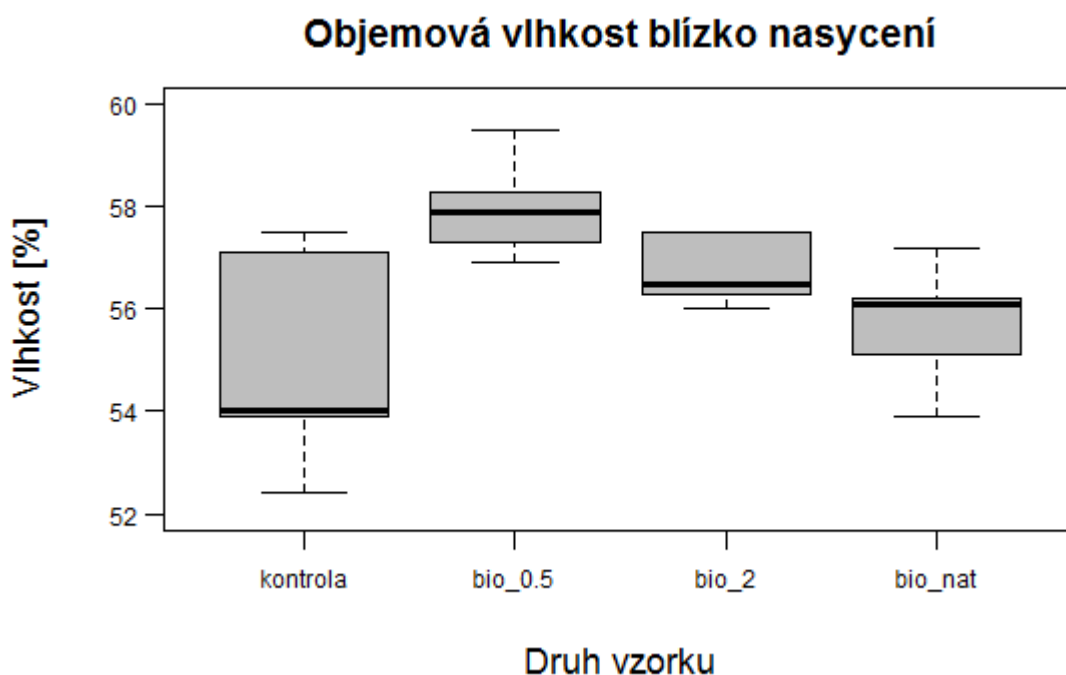
Obr. 6.2.2 -1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové vlhkosti při odběru pro všechny druhy vzorků (autorka).

Porovnání objemové vlhkosti při odběru u všech druhů vzorků (%)				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	35,9	38,7	37,8	38,2
Maximum	39,4	43,6	40,5	43,2
Medián	37,4	42	40,0	41,9
Průměr	37,52	41,36	39,69	41,4
Směrodatná odchylka	1,567	1,87	1,08	2,11
Koeficient variace	0,042	0,045	0,027	0,05

Tab. 6.2.2-2: Popisná statistika hodnot objemové vlhkosti při odběru pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

6.2.3 Objemová vlhkost blízko nasycení

Objemová vlhkost blízko nasycení byla vypočtena podle vztahu 4.4.2-3. Obrázek 6.2.3-1 ukazuje boxploty jednotlivých druhů vzorků. Minimální hodnota byla nalezena u vzorku kontroly, maximum bylo zjištěno u bio_0.5. P-hodnota ANOVA testu byla 0,0212. Tukey-testem byl nalezen jen jediný významný rozdíl, a to mezi vzorky kontrola a bio_0.5, kde p-hodnota byla 0.0187434. Vstupní hodnoty, popisná statistika a výsledky ANOVA a Tukey testů jsou uvedeny v přílohách 10-19 až 10-22.



Obr. 6.2.3-1 :Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové vlhkosti blízko nasycení pro všechny druhy vzorků (autorka).

Porovnání objemové vlhkosti blízko nasycení u všech druhů vzorků (%)				
	kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
Minimum	52,4	56,9	56,0	53,9
Maximum	57,5	59,5	57,5	57,2
Medián	54,0	57,9	56,5	56,1
Průměr	54,98	57,98	56,8	55,7
Směrodatná odchylka	2,22	1,01	0,7	1,25
Koeficient variace	0,040	0,017	0,012	0,022

Tab. 6.2.3-1: Popisná statistika hodnot objemové vlhkosti blízko nasycení pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

7 Diskuze

Z výsledků K_s lze u všech časových kroků pozorovat, že čím větší byly částice aplikovaného biocharu, tím nižší byla hodnota K_s obohacené půdy. Oproti kontrolní půdě vykazovaly vzorky bio_0.5 lehce zvýšené hodnoty K_s , hodnoty bio_2 a bio_nat byly v porovnání s kontrolou naopak nižší. Stejná tendence, tedy snižování hodnot K_s se zvyšováním částic biocharu, byla pozorována u písčitéch půd například ve výzkumech autorů Lim et al. (2016) nebo Barnes et al. (2014). Toto chování lze vysvětlit několika způsoby: u malých a navzájem tvarově podobných částic biocharu se pravděpodobně jedná o blokaci (snižování průtočné plochy) volných pórů těmito částicemi, které tak zpomalují tok vody půdou. Zároveň tyto jemné částice způsobují větší retenci vody, což souvisí se snižováním hodnot K_s . U velkých částic biocharu je pravděpodobně důvod takový, že rozměrově různé částičky jsou v půdě nerovnoměrně rozmístěny, cesty mezi póry mají menší rozměry a voda musí projít složitější cestou skrze půdní prostředí (Liu et al., 2016). Výsledná hodnota K_s je tedy pravděpodobně důsledkem kombinace několika příčin.

V praxi by se snížení K_s pomocí aplikace biocharu dalo využít u propustných půd, neboť by se snížila rychlost infiltrace a voda by byla pro rostliny dostupná po delší dobu, což by mohlo zabránit problémům v obdobích sucha. Celkově statisticky málo významné změny hodnot K_s mohly být způsobeny mnoha faktory. Jedním z nich je množství biocharu, které představovalo pouze jedno procento, a jeho vliv se tedy neprojevil v tak velké míře. Při přípravě a odběrech vzorků mohlo přes veškerou opatrnost dojít k jejich poškození, které poté mohlo ovlivnit výsledky měření. Je možné, že půda obohacená biocharem je více náchylná k poškození při manipulaci. Uvnitř vzorků se mohly nacházet preferenční cesty, které nebylo možné při odběrech vidět.

V objemových hmotnostech byly mezi několika druhy vzorků nalezeny statisticky významné rozdíly. Nejnižší ρ_s měly vzorky bio_0.5, u kterých hodnota oproti kontrole klesla. U vzorků bio_2 a bio_nat se však již oproti kontrole objemová hmotnost zvyšovala. Tento výsledek byl překvapivý. Vzhledem k tomu, že samotný biochar má nižší ρ_s než použitá půda, ve všech případech se předpokládalo také snížení ρ_s půdy, do které byl aplikován, jak tomu bylo v jiných výzkumech (Hardie et al., 2014; Glab et al., 2016; Lim et al., 2016). Tito autoři pozorovali snížení s narůstající velikostí částic biocharu, tedy přesně opačný výsledek. Jak uvádí Veheijen et al. (2010), důvod zvýšení

ρ_s může být ten, že částice biocharu se mohou relativně rychle rozpadnout, a ty, které jsou menší než volné póry v půdě, mohou tyto póry vyplnit, čímž se ρ_s zvýší. Avšak výsledky experimentu jsou v rozporu i s tímto vysvětlením, protože nejmenší zrnitost způsobila právě pokles ρ_s . Jedním z důvodů poklesu oproti kontrole může být náboj nejjemnějších částic, který způsobí, že se částičky biocharu navzájem odpuzují a vzniknou mezi nimi větší prostory.

Ačkoli velká část změn ve vlhkostech nebyla statisticky významná, lze pozorovat, že vzorky obohacené biocharem zadržovaly více vody než vzorky kontroly. Vliv biocharu na vlhkost blízko nasycení byl úměrný velikosti jeho částic: čím menší částice biocharu, tím větší vlhkost půdy, tedy větší množství zadržené vody. Stejně chování pozorovali Glab et al. (2016). Důvodem zvýšené retence vody je pravděpodobně velký specifický povrch částic biocharu, způsobený jeho vysokou pórovitostí. V souvislosti s K_s by mohlo být této skutečnosti využito v suchých obdobích roku a především u propustných půd. Zvýšení retence vody by znamenalo dostupnější vodu pro rostliny po delší časové období.

Vliv biocharu na vlhkost při odběru byl významný pouze u bio_0.5 a bio_nat. Tyto vzorky zadržovaly více vody než kontrola a také než bio_2. U vzorků bio_nat se však předpokládalo, že budou mít nejmenší vliv, podobně jako tomu bylo u objemové vlhkosti blízko nasycení. Výsledek hodnot bio_nat může být zkreslený z důvodu nestejněměrného provlhčení půdy před odběrem vzorků.

Podobně jako u K_s , výraznějších změn půdních vlastností by mohlo být dosaženo při aplikaci většího množství biocharu. Důležitou roli měl pravděpodobně způsob přípravy vzorků, kdy byla zemina pouze sypána do bedýnek a měla tedy poměrně vysokou pórovitost, kvůli které nejspíše nebyly změny tak viditelné, jako kdyby byla půda stejnoměrně zhutněná a její počáteční pórovitost byla nižší.

Experiment proběhl za určitých omezení, která musí být brána v úvahu při posuzování výsledků a možností využití poznatků v praxi. Zásadním faktem je, že experiment byl proveden v laboratorním prostředí, nikoliv v terénu. Měření v laboratoři mělo určité výhody – homogenní zeminu (původní i upravenou po aplikaci biocharu), stálé podmínky okolního prostředí (teplota, vlhkost) a možnost kontroly vlhkosti půdy při stabilizaci. Na druhou stranu nebylo možné sledovat půdu v přirozeném prostředí, neboť byla izolována od vlivů vegetace, půdních organismů (zejména žížal) a následné bioturbace (Hardie et al., 2014). Také se nemohly projevit vlivy výraznějšího kolísání teplot a vlhkostí. Způsob aplikace biocharu do půdy v laboratoři také neodpovídá

případnému postupu aplikace pomocí zemědělských strojů. Experiment trval kratší dobu, než by tomu bylo u terénního pokusu nebo v případě reálné aplikace v zemědělství, půda by tedy po delším časovém období mohla vykazovat jiné změny měřených hodnot. V neposlední řadě může mít svůj podíl na výsledcích i menší počet vzorků, které byly k měření použity, neboť statistické vyhodnocení by v případě vyššího počtu vzorků mělo větší vypovídající hodnotu.

8 Závěr

Výsledky experimentu prokázaly určitý vliv biocharu na K_s nivní půdy, ačkoliv většina změn nebyla při použití 1 % biocharu statisticky významná. Významný rozdíl byl nalezen pouze u vzorků bio_nat, u kterých průměrná hodnota K_s ve druhém kroku klesla vůči kontrole o 76,6 % (z $1,42 \cdot 10^{-5}$ na $3,32 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Z vyhodnocených měření všech tří časových kroků je možné vidět, že vzorky bio_0.5 hodnoty K_s lehce zvyšovaly (nejvíce o 58,1 % z $1,55 \cdot 10^{-5}$ na $2,45 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), vzorky bio_2 tyto hodnoty podstatně neměnily a vzorky bio_nat K_s spíše snižovaly (až o výše zmíněných 76,6 %).

Vliv biocharu na objemovou hmotnost a objemové vlhkosti při odběru a při nasycení byl pozorován ve větší míře než u K_s , přestože změny opět nebyly vždy statisticky významné. Vzorky bio_0.5 měly vyšší objemovou vlhkost při odběru o 10,34 % oproti vzorkům kontroly (z 37,52 na 41,4 %). Vzorky bio_nat měly hodnotu vlhkosti blízko nasycení o 5,46 % vyšší oproti kontrolním vzorkům (z 54,98 na 57,98 %). Tyto výsledky byly očekávány. Vliv na vlhkosti dokazuje vyšší retenční schopnost obohacené půdy. Hodnoty objemové hmotnosti u vzorků bio_0.5 byly nečekaně nižší než u kontrolních vzorků (o 3,5 % z 1,092 na 1,054 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Vzorky s většími částicemi biocharu naopak oproti předpokladům zvýšily objemovou hmotnost, a to o 1,3 % u bio_2 (z 1,092 na 1,106 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a o 6,6 % u bio_nat (z 1,092 na 1,164 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Pro potenciální navazující experimenty by bylo vhodné změnit postup přípravy vzorků a místo sypání je všechny stejným způsobem zhutnit. Tím by se mohlo docílit viditelnějších výsledků u všech měření a počítaných veličin.

9 Přehled literatury a použitých zdrojů

Odborné publikace

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.

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

Cross A., Sohi S. P., 2011: The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. Soil Biology and Biochemistry 43. P. 2127-2134.

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

Hardie M., Clothier B., Bound S., Oliver G., Close D., 2014: Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? Plant and soil 376. P. 347-361.

Jačka L., Pavlásek J., 2014: Hydopedologie. (nepublikováno)

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. P. 47-54.

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

Liu Z., Dugan B., Masiello C. A., Barnes R. T., Gallagher M. E., Gonnermann H., 2016: Impacts of Biochar Concentration and Particle Size on Hydraulic Conductivity and DOC 1 Leaching of Biochar-Sand Mixtures. Hydrol 533. P. 461-472.

Mohammed A., Dikko A. U., Audu M., Mohammed T., 2016: Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment 12(3). P. 95-103.

Shapiro, S. S., Wilk, M. B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika Vol. 52, No. 3/4 . P. 591-611.

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. P. 935-940.

Uchimiya M., Wartelle L. H., Klasson K. T., Fortier C. A., Lima I. M., 2011: Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. Journal of agricultural and food chemistry 59. P. 2501-2510.

Valentová J., 1998: *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha, 174 s.

Verheijen F., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Dafas I., 2010: *Biochar Application to Soils*. JRC-IES. Luxembourg, 166 s.

Wang C., Walter M. T., Parlange J.-Y., 2013: Modeling simple experiments of biochar erosion from soil. *Journal of Hydrology* 499. P. 140–145.

Wang D., Griffin D. E., Parikh S. J., Scow K. M., 2016: Impact of biochar amendment on soil water soluble carbon in the context of extreme hydrological events. *Chemosphere* 160. P. 287-292.

Zimmerman A. R., Gao B., Ahn M., 2011: Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar – amended soils. *Soil Biology and Biochemistry* 43. P. 1169–1179.

Internetové zdroje

Bedáňová I., Večerek V., 8/2007: *Základy statistiky pro studující veterinární medicíny a farmacie (online)* [cit. 2017.03.10], dostupné z <http://cit.vfu.cz/stat/fvl/skripta.pdf>.

Woolf D., Amonette J. E., Street-Perott F. A., Lehmann J. Joseph S., 10. 8. 2010: *Sustainable biochar to mitigate global climate change (online)* [cit 2017.04.14], dostupné z <https://www.nature.com/articles/ncom>.

Ostatní zdroje

Eijkelkamp, 2017: *Laboratory permeameters*. Eijkelkamp, Giesbeek, 15 s.

10 Seznam obrázků

Obr. 3.1-1: Schéma Darcyho experimentu. (převzato z: Valentová, 1998)

Tab. 3.2 -1: Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy. (převzato z: Valentová, 1998)

Obr. 3.3-1: Schéma laboratorního permeometru (upraveno z: Eijkelkamp, 2017).

Obr. 3.3-2: Rozsah použitelnosti metod měření K_s laboratorním permeometrem s konstantním a proměnným spádem (převzato z: Eijkelkamp, 2017).

Obr. 3.5-1: Změny v nasycené hydraulické vodivosti při aplikaci 0%, 1%, 2% a 5% biocharu do čtyř typů půdy: A - hrubozrnný písek, B - jemnozrnný písek, C - hlína, D - jíl. (převzato z Lim et al., 2016)

Obr. 3.5-2: Hodnoty K_s z druhého experimentu pro písčitou půdu s přidavkem 1, 5, 20 a 50 t·ha⁻¹ biocharu, 20 t·ha⁻¹ sena a pro původní půdu. (převzato z: Jeffery et al., 2015).

Obr. 4.1-1: Lokalita odběru nivní půdy – okolí meteorologické stanice u obce Trhové Dušníky na břehu řeky Litavky (Mapy.cz, © 2017: Mapy.cz (online) [cit. 2017.03.18], dostupné z <https://mapy.cz/letecka?x=14.0129314&y=49.7199710&z=17&source=coor&id=14.0129314%2C49.7201722>).

Tab. 4.1-1: Průměrné hodnoty zrnitostí nivní půdy z pěti rozborů stanovených hustoměrnou metodou (Jačka, nepublikováno).

Tab. 4.1-2: Vlastnosti a složení použitého biocharu (Trakal, nepublikováno).

Obr. 4.3-1: Odebírání provlhčených vzorků do Kopeckého válečků (autorka).

Obr. 4.4.2 – 1: Vzorek půdy po měření K_s . Nebyly pozorovány žádné objemové změny (autorka).

Obr. 6.1.1-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 1. kroku - 1 hodina od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Tab. 6.1.1-1: Popisná statistika hodnot K_s v prvním časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Tab. 6.1.2-1: Popisná statistika hodnot K_s v prvním časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Obr. 6.1.2-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 2. kroku - 3 hodiny od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Tab. 6.1.2-2: Popisná statistika hodnot K_s v druhém časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Obr. 6.1.3-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot K_s všech druhů vzorků v 3. kroku - 24 hodin od začátku kontinuálního protékání vody vzorky (autorka).

Tab. 6.1.3-1: Popisná statistika hodnot K_s v třetím časovém kroku pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Tab. 6.2.1-1: P-hodnoty statisticky významných rozdílů mezi objemovými hmotnostmi při odběru podle Tukey-testu (autorka).

Obr. 6.2.1-1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové hmotnosti všech druhů vysušených vzorků (autorka).

Tab. 6.2.1-2: Popisná statistika hodnot objemové hmotnosti pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Tab. 6.2.2-1: P-hodnoty statisticky významných rozdílů mezi objemovými vlhkostmi při odběru podle Tukey-testu (autorka).

Obr. 6.2.2 -1: Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové vlhkosti při odběru pro všechny druhy vzorků. (autorka).

Tab. 6.2.2-2: Popisná statistika hodnot objemové vlhkosti při odběru pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

Obr. 6.2.3-1 :Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil a maximum) hodnot objemové vlhkosti blízko nasycení pro všechny druhy vzorků (autorka).

Tab. 6.2.3-1: Popisná statistika hodnot objemové vlhkosti blízko nasycení pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

11 Přílohy

Ks - 1. krok			
kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
8.13E-06	4.43E-05	2.11E-05	1.04E-05
2.63E-05	1.93E-05	2.13E-05	1.18E-05
8.96E-06	2.30E-05	1.54E-05	1.82E-05
1.69E-05	7.08E-06	1.30E-05	1.00E-05
1.72E-05	2.90E-05	1.08E-05	9.88E-06

Příloha 10-1: Hodnoty K_s jednotlivých druhů vzorků v prvním časovém kroku (autorka).

	kontrola1	X0.5_1	X2mm_1	native_1
nbr.val	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00
nbr.null	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
nbr.na	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
min	8.13E-06	7.08E-06	1.08E-05	9.88E-06
max	2.63E-05	4.43E-05	2.13E-05	1.82E-05
range	1.82E-05	3.72E-05	1.05E-05	8.32E-06
sum	7.75E-05	1.23E-04	8.16E-05	6.03E-05
median	1.69E-05	2.30E-05	1.54E-05	1.04E-05
mean	1.55E-05	2.45E-05	1.63E-05	1.21E-05
SE.mean	3.31E-06	6.10E-06	2.12E-06	1.57E-06
CI.mean.0.95	9.18E-06	1.69458E-05	5.89E-06	4.37E-06
var	5.46E-11	1.86E-10	2.25E-11	1.238E-11
std.dev	7.39E-06	1.36E-05	4.74E-06	3.52E-06
coef.var	4.77E-01	5.56E-01	2.91E-01	2.92E-01
skewness	2.91E-01	1.84E-01	5.09E-02	9.57E-01
skew.2SE	1.60E-01	1.01E-01	2.79E-02	5.24E-01
kurtosis	-1.77E+00	-1.58E+00	-2.14E+00	-1.08E+00
kurt.2SE	-4.42E-01	-3.95E-01	-5.34E-01	-2.70E-01
normtest.w	9.05E-01	9.84E-01	8.87E-01	7.18E-01
normtest.p	4.39E-01	9.56E-01	3.42E-01	1.48E-02

Příloha 10-2: Kompletní popisná statistika jednotlivých druhů vzorků v prvním časovém kroku měření (autorka).

```

          Df    Sum Sq   Mean Sq F value Pr(>F)
ind         3 4.196e-10 1.398e-10  2.028  0.15
Residuals  16 1.103e-09 6.894e-11
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Příloha 10-3: Výsledky ANOVA testu pro první časový krok měření (autorka).

Ks - 2. krok			
kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
1.33E-05	3.44E-05	1.74E-05	3.09E-06
2.24E-05	1.70E-05	1.76E-05	3.55E-06
8.07E-06	2.06E-05	1.21E-05	4.52E-06
1.42E-05	6.73E-06	1.11E-05	2.65E-06
1.30E-05	1.88E-05	1.39E-05	2.80E-06

Příloha 10-4: Hodnoty K_s jednotlivých druhů vzorků v druhém časovém kroku měření (autorka).

	kontrola2	x0.5_2	x2mm_2	native_2
nbr.val	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00
nbr.null	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
nbr.na	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
min	8.07E-06	6.73E-06	1.11E-05	2.65E-06
max	2.24E-05	3.44E-05	1.76E-05	4.52E-06
range	1.43E-05	2.77E-05	6.50E-06	1.87E-06
sum	7.10E-05	9.75E-05	7.21E-05	1.66E-05
median	1.33E-05	1.88E-05	1.39E-05	3.09E-06
mean	1.42E-05	1.951E-05	1.44E-05	3.32E-06
SE.mean	2.31E-05	4.43E-06	1.34E-06	3.37E-07
CI.mean. 0.95	6.42E-06	1.23E-05	3.71E-06	9.34E-07
var	2.68E-11	9.83E-11	8.92E-12	5.66E-13
std.dev	5.17E-06	9.91E-06	2.99E-06	7.53E-07
coef.var	3.64E-01	5.08E-01	2.07E-01	2.27E-01
skewness	4.63E-01	2.47E-01	7.06E-02	5.97E-01
skew.2SE	2.54E-01	1.35E-01	3.87E-02	3.27E-01
kurtosis	-1.34E+00	-1.43E+00	-2.17E+00	-1.54E+00
kurt.2SE	-3.35E-01	-3.57E-01	-5.41E-01	-3.85E-01
normtest.w	9.00E-01	9.44E-01	8.79E-01	8.95E-01
normtest.p	4.07E-01	6.93E-01	3.05E-01	3.83E-01

Příloha 10-5: Kompletní popisná statistika jednotlivých druhů vzorků v druhém časovém kroku měření (autorka).

```

          Df    Sum Sq   Mean Sq F value   Pr(>F)
ind         3 6.968e-10 2.323e-10   6.907 0.00339 **
Residuals  16 5.380e-10 3.363e-11
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Příloha 10-6: Výsledky ANOVA testu pro druhý časový krok měření (autorka).

```

          diff          lwr          upr      p adj
bio5-bio2  5.0860e-06 -5.406890e-06  1.557889e-05 0.5248801
kontr-bio2 -2.2600e-07 -1.071889e-05  1.026689e-05 0.9999122
nat-bio2   -1.1098e-05 -2.159089e-05 -6.051097e-07 0.0363283
kontr-bio5 -5.3120e-06 -1.580489e-05  5.180890e-06 0.4893475
nat-bio5   -1.6184e-05 -2.667689e-05 -5.691110e-06 0.0022138
nat-kontr  -1.0872e-05 -2.136489e-05 -3.791097e-07 0.0409600

```

Příloha 10-7: Výsledky Tukey-testu pro druhý časový krok měření (autorka).

Ks - 3. Krok			
kontrola	bio_0.5	bio_2	bio_nat
1.25E-05	3.06E-05	1.67E-05	1.07E-05
1.80E-05	1.56E-05	1.64E-05	1.14E-05
8.17E-06	1.84E-05	1.12E-05	1.65E-05
1.32E-05	6.57E-06	1.13E-05	9.43E-06
1.07E-05	1.48E-05	7.90E-06	1.01E-05

Příloha 10-8: Hodnoty K_s jednotlivých druhů vzorků v třetím časovém kroku (autorka).

	kontrola3	X0.5_3	X2mm_3	native_3
nbr.val	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00	5.00E+00
nbr.null	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
nbr.na	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
min	8.17E-06	6.57E-06	7.90E-06	9.43E-06
max	1.80E-05	3.06E-05	1.67E-05	1.65E-05
range	9.83E-06	2.40E-05	8.80E-06	7.07E-06
sum	6.26E-05	8.60E-05	6.35E-05	5.81E-05
median	1.25E-05	1.56E-05	1.13E-05	1.07E-05
mean	1.25E-05	1.72E-05	1.27E-05	1.16E-05
SE.mean	1.62E-06	3.89E-06	1.69E-06	1.26E-06
CI.mean.0.95	4.51E-06	1.08E-05	4.68E-06	3.50E-06
var	1.32E-11	7.56E-11	1.42E-11	7.95E-12
std.dev	3.63E-06	8.69E-06	3.77E-06	2.82E-06
coef.var	2.90E-01	5.06E-01	2.97E-01	2.43E-01
skewness	3.24E-01	3.63E-01	-7.66E-03	8.99E-01
skew.2SE	1.77E-01	1.99E-01	-4.20E-03	4.92E-01
kurtosis	-1.53E+00	-1.42E+00	-2.03E+00	-1.12E+00
kurt.2SE	-3.84E-01	-3.55E-01	-5.07E-01	-2.81E-01
normtest.w	9.66E-01	9.38E-01	8.86E-01	7.90E-01
normtest.p	8.49E-01	6.52E-01	3.39E-01	6.67E-02

Příloha 10-9: Kompletní popisná statistika jednotlivých druhů vzorků v třetím časovém kroku měření (autorka).

```

Df    Sum Sq  Mean Sq F value Pr(>F)
ind          3 9.380e-11 3.128e-11  1.128  0.367
Residuals  16 4.438e-10 2.774e-11
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Příloha 10-10: Výsledky ANOVA testu pro třetí časový krok měření (autorka).

Objemová hmotnost			
bio_nat	bio_2	bio_0.5	kontrola
1.127	1.127	1.089	1.084
1.192	1.093	1.018	1.120
1.162	1.114	1.044	1.046
1.184	1.114	1.055	1.085
1.157	1.082	1.064	1.129

Příloha 10-11: Hodnoty objemové hmotnosti jednotlivých druhů vzorků (autorka).

	bio_nat	bio_2	bio_0.5	kontrola
nbr.val	5.00000000	5.00000000	5.00000000	5.00000000
nbr.null	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
nbr.na	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
min	1.12700000	1.08200000	1.01800000	1.04600000
max	1.19200000	1.12700000	1.08900000	1.12900000
range	0.06500000	0.04500000	0.07100000	0.08300000
sum	5.82200000	5.53000000	5.27000000	5.46400000
median	1.16200000	1.11400000	1.05500000	1.08500000
mean	1.16440000	1.10600000	1.05400000	1.09280000
SE.mean	0.01141315	0.008105554	0.01166619	0.01479662
CI.mean.0.95	0.03168799	0.022504625	0.03239054	0.04108201
var	0.00065130	0.000328500	0.00068050	0.00109470
std.dev	0.02552058	0.018124569	0.02608639	0.03308625
coef.var	0.02191737	0.016387495	0.02474990	0.03027658
skewness	-0.29093020	-0.192679751	-0.04258725	-0.19932722
skew.2SE	-0.15934904	-0.105535046	-0.02332600	-0.10917601
kurtosis	-1.73292257	-1.956541079	-1.61784561	-1.81981738
kurt.2SE	-0.43323064	-0.489135270	-0.40446140	-0.45495435
normtest.w	0.94883563	0.931060423	0.99402108	0.93115368
normtest.p	0.72886754	0.603619634	0.99170923	0.60425880

Příloha 10-12: Kompletní popisná statistika z hodnot objemové hmotnosti pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ind	3	0.03139	0.010462	15.19	6.09e-05 ***
Residuals	16	0.01102	0.000689		

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Příloha 10-13: Výsledky ANOVA testu objemových hmotností (autorka).

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = values ~ ind, data = d)

```

$ind
      diff      lwr      upr    p adj
bio5-bio2 -0.0520 -0.099487758 -0.004512242 0.0294522
kontr-bio2 -0.0132 -0.060687758  0.034287758 0.8555493
nat-bio2    0.0584  0.010912242  0.105887758 0.0136252
kontr-bio5  0.0388 -0.008687758  0.086287758 0.1307802
nat-bio5    0.1104  0.062912242  0.157887758 0.0000301
nat-kontr   0.0716  0.024112242  0.119087758 0.0027062

```

Příloha 10-14: Výsledky Tukey-testu pro hodnoty objemových hmotností (autorka).

Objemová vlhkost při odběru			
bio_nat	bio_2	bio_0.5	kontrola
38.200	40.500	43.600	37.40
40.500	40.000	38.700	36.10
43.200	39.900	40.400	35.90
43.200	40.250	42.100	38.80
41.900	37.800	42.000	39.40

Příloha 10-15: Hodnoty objemové vlhkosti při odběru jednotlivých druhů vzorků (autorka).

	nat	bio2	bio0_5	kontr
nbr.val	5.00000000	5.00000000	5.00000000	5.00000000
nbr.null	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
nbr.na	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
min	38.20000000	37.80000000	38.70000000	35.90000000
max	43.20000000	40.50000000	43.60000000	39.40000000
range	5.00000000	2.70000000	4.90000000	3.50000000
sum	207.00000000	198.45000000	206.80000000	187.60000000
median	41.90000000	40.00000000	42.00000000	37.40000000
mean	41.40000000	39.69000000	41.36000000	37.52000000
SE.mean	0.94286797	0.48383882	0.83582295	0.70099929
CI.mean.0.95	2.61782115	1.34335191	2.32061653	1.94628604
var	4.44500000	1.17050000	3.49300000	2.45700000
std.dev	2.10831686	1.08189648	1.86895693	1.56748206
coef.var	0.05092553	0.02725867	0.04518755	0.04177724
skewness	-0.46327852	-0.94841290	-0.23893142	0.08440156
skew.2SE	-0.25374809	-0.51946714	-0.13086813	0.04622864
kurtosis	-1.71878490	-1.05850969	-1.74506840	-2.13432025
kurt.2SE	-0.42969622	-0.26462742	-0.43626710	-0.53358006
normtest.w	0.88861520	0.75408982	0.96244021	0.90231426
normtest.p	0.35018778	0.03246071	0.82486557	0.42280846

Příloha 10-16: Kompletní popisná statistika z hodnot objemové vlhkosti při odběru pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ind	3	50.28	16.760	5.796	0.00703 **
Residuals	16	46.26	2.891		

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Příloha 10-17: Výsledky ANOVA testu objemových vlhkostí při odběru (autorka).

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = values ~ ind, data = d)

```
$ind
      diff      lwr      upr      p adj
bio5-bio2  1.67 -1.406827  4.746827 0.4312944
kontr-bio2 -2.17 -5.246827  0.906827 0.2225352
nat-bio2    1.71 -1.366827  4.786827 0.4114409
kontr-bio5 -3.84 -6.916827 -0.763173 0.0122604
nat-bio5    0.04 -3.036827  3.116827 0.9999807
nat-kontr   3.88  0.803173  6.956827 0.0113710
```

Příloha 10-18: Výsledky Tukey-testu pro hodnoty objemových vlhkostí při odběru (autorka).

Objemová vlhkost blízko nasycení			
bio_nat	bio_2	bio_0.5	kontrola
57.200	57.5	56.9	57.500
56.100	57.5	59.5	52.400
53.900	56.3	58.3	57.100
55.100	56.5	57.9	54.000
56.200	56	57.3	53.900

Příloha 10-19: Hodnoty objemové vlhkosti blízko nasycení jednotlivých druhů vzorků (autorka).

	nat	bio2	bio0_5	kontr
nbr.val	5.0000000	5.0000000	5.0000000	5.0000000
nbr.null	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
nbr.na	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
min	53.9000000	56.0000000	56.9000000	52.4000000
max	57.2000000	57.5000000	59.5000000	57.5000000
range	3.3000000	1.5000000	2.6000000	5.1000000
sum	278.5000000	283.8000000	289.9000000	274.9000000
median	56.1000000	56.5000000	57.9000000	54.0000000
mean	55.7000000	56.7600000	57.9800000	54.9800000
SE.mean	0.5594640	0.31240999	0.4498889	0.99065635
CI.mean.0.95	1.5533212	0.86738918	1.2490918	2.75050297
var	1.5650000	0.48800000	1.0120000	4.90700000
std.dev	1.2509996	0.69856997	1.0059821	2.21517494
coef.var	0.0224596	0.01230743	0.0173505	0.04029056
skewness	-0.2537524	0.15051827	0.3869972	0.11328054
skew.2SE	-0.1389859	0.08244225	0.2119671	0.06204631
kurtosis	-1.7116088	-2.17470304	-1.6480851	-2.11026794
kurt.2SE	-0.4279022	-0.54367576	-0.4120213	-0.52756699
normtest.w	0.9657707	0.84801032	0.9581579	0.88253240
normtest.p	0.8474785	0.18831087	0.7951013	0.32094458

Příloha 10-20: Kompletní popisná statistika z hodnot objemové vlhkosti blízko nasycení pro jednotlivé druhy vzorků (autorka).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ind	3	25.62	8.541	4.285	0.0212 *
Residuals	16	31.89	1.993		

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Příloha 10-21: Výsledky ANOVA testu objemových vlhkostí blízko nasycení (autorka).

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = values ~ ind, data = d)

```
$ind
      diff      lwr      upr      p adj
bio5-bio2  1.22 -1.334492  3.7744918 0.5367864
kontr-bio2 -1.78 -4.334492  0.7744918 0.2311520
nat-bio2   -1.06 -3.614492  1.4944918 0.6432033
kontr-bio5 -3.00 -5.554492 -0.4455082 0.0187434
nat-bio5   -2.28 -4.834492  0.2744918 0.0889563
nat-kontr   0.72 -1.834492  3.2744918 0.8504816
```

Příloha 10-22: Výsledky Tukey-testu pro hodnoty objemových vlhkostí blízko nasycení (autorka).