

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv kompostu a biocharu na hydro-fyzikální vlastnosti
upravené nivní půdy**

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

Bakalant: Karolína Doušová

2019 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Karolína Doušová

Vodní hospodářství

Název práce

Vliv kompostu a biocharu na hydro-fyzikální vlastnosti upravené nivní půdy

Název anglicky

Effect of compost and biochar on hydro-physical properties of amended Fluvisol

Cíle práce

Stanovit vliv kompostu a kompostu s přidavkem biocharu na hydraulické vlastnosti (retenci vody, nasycenou hydraulickou vodivost) upravené nivní půdy.

Metodika

Stručně charakterizovat organické půdní přídatky a jejich význam na základě současné literatury. Stručně definovat nasycenou hydraulickou vodivost, retenční čáru a způsoby jejich měření. Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu organických přídatků na hydraulické půdní vlastnosti.

Na předem připravených vzorcích zeminy (kontrolní zemina, zemina s přidavkem kompostu a zemina s přidavkem kompostu a biocharu) provést měření retenční čáry s využitím laboratorní podtlakové i přetlakové aparatury a nasycené hydraulické vodivosti laboratorním permeametrem. Vyhodnotit naměřená data, statisticky porovnat výsledky a určit vliv testovaných organických přídatků na výše uvedené hydraulické vlastnosti.

Doporučený rozsah práce

35

Klíčová slova

modifikovaná organická hmota, kompost, biochar, hydraulické vlastnosti půdy, laboratorní měření, nivní půda

Doporučené zdroje informací

- Camps, M., Tomlinson, T., 2015: The Use of Biochar in Composting. International Biochar Initiative. P. 1-4.
- Fischer, D., Glaser, B., 2012: Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In: Kumar, S. (ed.): Management of organic waste. Intech Open, Shanghai. P. 167–198.
- Głąb, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., Tabor, S., 2018: Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. Geoderma 315. P. 27–35.
- Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016: Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. Chemosphere 142. P. 136 – 144.
- Verheijen F., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Dafas I., 2010: Biochar Application to Soils. JRC-IES, Luxembourg, 166 s.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 06. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. a uvedla jsem veškerou 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 22.4.2019

.....

Doušová Karolína

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho odborné rady, cenné připomínky, ochotu, čas a velkou trpělivost.

Abstrakt

Kompost je celkově považován za jedno z nejdůležitějších organických hnojiv pro půdu. Biochar je v poslední době testován jako užitečný přídatek do půdy. Kombinací kompostu s biocharem předpokládáme výraznější pozitivní vliv na hydro-fyzikální vlastnosti půdy než při použití přídatků do půdy samostatně. Bakalářská práce řeší vliv kompostu a kompostu s biocharem, přidávaných do nivní půdy, na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s) a retenci vody.

Použitý biochar byl připraven z měkkého dřeva (převážně smrku) pyrolýzou při teplotě 500 - 600 °C. Pro tvorbu kompostu bylo použito spadané dubové a javorové listí, čerstvě posečená tráva a drobné větvičky. Nivní půda byla odebrána z okolí řeky Litavky v hloubce 10 - 30 cm pod povrchem terénu. Celkem byly připraveny 4 směsi (ošetření) půdy: 1) kontrola - půda bez přídatků, 2) půda s kompostem, 3) půda s přídatkem kompostu a biocharu od začátku kompostování, 4) půda s kompostem a biocharem přidávaným po kompostování. Hmotnostní poměr půda:přídatek byl 3:2. Tyto 4 směsi byly nasypány a stabilizovány v Kopeckého válečcích. Pro každou směs bylo připraveno 7 vzorků (válečků), z nichž čtyři byly konsolidovány. Následně bylo na těchto vzorcích provedeno laboratorní měření K_s a měření bodů retenční čáry (do pF 3,7).

Průměrné hodnoty K_s se pohybovaly v rozmezí od $3,36 \cdot 10^{-6}$ do $2,59 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹. Největší rozdíly průměrných hodnot mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky byly u kontroly - půdy bez přídatků. Vzorky s přídatkem kompostu a biocharu vykazovaly nejnižší průměrné hodnoty K_s . Mezi testovanými ošetřeními půdy nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly hodnot K_s .

Byly stanoveny změny vlhkosti v závislosti na podtlaku. Nejvyšší změna vlhkosti byla zaznamenána u půdy s přídatkem kompostu a biocharu při rozdílu pF 2 a pF 3,7 (snadno dostupná voda pro rostliny). Po přídatku kompostu s biocharem byl naměřen obsah snadno dostupné vody v půdě okolo 26 %. Tato hodnota je vyšší než pro půdu s kompostem bez biocharu (přibližně 22 - 24 % v závislosti na konsolidaci) a významně vyšší než pro kontrolu (okolo 21 %).

Klíčová slova: modifikovaná organická hmota, kompost, biochar, hydraulické vlastnosti půdy, laboratorní měření, nivní půda

Abstract

Compost is one of the most important organic fertilizer for soils. Biochar has recently been tested as a useful addition to soil. For combination of compost with biochar (co-composting process) increased positive effect on the hydrophysical properties is supposed than for separate addition of biochar and compost. The bachelor thesis deals with the influence of compost and compost with biochar, added to fluvisol, on saturated hydraulic conductivity (K_s) and water retention.

The used biochar was prepared from soft wood (mostly spruce) by pyrolysis at 500 - 600 ° C. Fallen oak and maple leaves, freshly cut grass and tiny twigs were used for composting. The Fluvisol was collected of the river Litavka at a depth of 10 - 30 cm below the soil surface. A total of four types of samples were prepared: 1) control - soil without additions, 2) soil with compost, 3) soil with compost and biochar addition from the beginning of composting, 4) soil with compost and biochar added after composting. The weight ratio soil:addition was 3:2. These 4 mixtures were poured and stabilized in Kopecky rings. It was prepared 7 samples rings for each mixture, four of which were consolidated. Subsequently, laboratory measurements of K_s and measurements points of retention curves (up to pF 3,7) were performed on these samples.

The mean K_s values ranged from $3,36 \cdot 10^{-6}$ to $2,59 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The largest differences in average values between consolidated and non-consolidated samples were for controls – soil without additions. Samples with the addition of compost and biochar showed lowest mean of K_s . There were not founded statistically significant differences of K_s values between the tested soils.

Changes were determined in depending of the under pressure (lower than atmospheric). The highest moisture change was observed for enriched soil by compost and biochar between differences pF 2 and pF 3,7 (easily available water for plants). After addition of compost with biochar, the easily available water content of the soil was measured to be about 26%. This value is higher than for soil with compost without biochar (approximately 22-24 % depending on consolidation) and significantly higher than for control (around 21%).

Keywords: modified organic matter, compost, biochar, saturated hydraulic conductivity, laboratory measurements, fluvisol

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce	3
3. Literární rešerše	4
3.1 Proudění vody v půdním prostředí	4
3.2 Darcyho zákon	4
3.3 Meze platnosti Darcyho zákona	6
3.4 Nasycená hydraulická vodivost (K_s)	8
3.5 Metody měření K_s	9
3.6 Retenční čára půdní vlhkosti	12
3.7 Metody stanovení retenční čáry půdní vlhkosti	14
3.8 Organické půdní doplňky	16
3.8.1 Kompost	16
3.8.2 Biochar	16
3.9 Vliv organických přísadků na vlastnosti půdy	17
4. Metodika	20
4.1 Charakteristika použité zeminy a půdních přísadků	20
4.2 Příprava a plnění vzorků	23
4.3 Sycení, stabilizace, měření bobtnání a konsolidace vzorků	25
4.4 Měření K_s na laboratorním permeamtru	27
4.5 Měření bodů retenční čáry	29
4.6 Statistická analýza	33
5. Výsledky	34
5.1 Nasycená hydraulická vodivost	34
5.1.1 První časový krok	34
5.1.2 První časový krok – konsolidované vzorky	36
5.1.3 První časový krok – nekonsolidované vzorky	37
5.1.4 Druhý časový krok	38
5.1.5 Druhý časový krok – konsolidované vzorky	39
5.1.6 Druhý časový krok – nekonsolidované vzorky	40
5.2 Retence vody	41
6. Diskuze	44
7. Závěr	46
8. Přehled literatury a použitých zdrojů	48
9. Přílohy	52

1. Úvod

K popisu proudění vody v půdě se používá hlavně nasycená hydraulická vodivost a retenční čára. Nasycená hydraulická vodivost (K_s) charakterizuje, jaká je schopnost porézního prostředí umožnit proudění vody (Pokorná, Zábranská, 2007). Její velikost je závislá na vlastnostech proudící kapaliny i na atributech prostředí. Znalost K_s je důležitá pro modelování pohybu vody a transportních procesů rozpuštěných látek v půdě. Slouží jako podklad pro řešení úloh v hydrogeologii a hydroopedologii, především pak pro návrhy odvodnění, závlah, sypaných hrází, k ochraně půdy a podzemní vody před znečištěním a k rekultivaci půd (Pavlásek, Jačka, 2014a). Retenční čára půdní vlhkosti je graficky zobrazený vztah mezi vlhkostí půdy a vlhkostním potenciálem (sacím tlakem eventuálně tlakovou výškou). Tvar retenční čáry závisí na mnoha parametrech (obsah humusu, mineralogické a zrnitostní složení, struktura, objemová hmotnost apod.), a proto nelze její průběh přesně stanovit (Pokorná, Zábranská, 2007).

Organické půdní doplňky do půdy přidáváme za účelem meliorace půdy. Dodáním těchto doplňků do půdy předpokládáme pozitivní vliv na hydrofyzikální vlastnosti půdy. Například zlepšení hospodaření s vodou – úprava K_s (snížení v písčitéch půdách nebo zvýšení v jílovitých půdách), zvýšení využitelné vodní kapacity pro rostliny a celkově retence vody v období sucha.

Kompost je stabilizovaný a hygienizovaný produkt kompostování¹ (Kuraš, 2014). Výsledným produktem tohoto biologického procesu je humus, stabilní substrát, bez patogenů a rostlinných semen. Účinky se pohybují od stabilizace půdy až po fytosanitární dopady zralého kompostu (Amlinger, et al., 2007). Biochar (BC) je organický materiál získaný pyrolýzou, což je proces, při kterém dochází k rozkladu organických surovin za nepřístupu médií obsahujících kyslík (Verheijen, et al., 2010). Přidání biocharu do půdy dle některých autorů pozitivně ovlivňuje její charakter. Například zvyšuje kationtovou výměnnou kapacitu (Mohammed, et al., 2016) nebo sorpční kapacitu (Uchimiya, et al., 2011), a tím zároveň snižuje toxicitu a transport těžkých kovů (Uchimiya, et al., 2010). Biochar v závislosti na jeho druhu a typu půdy může snižovat K_s (Lim, et al., 2016) nebo zvýšit retenci vody v půdě (Głąb, et al., 2016). Řada autorů však nezjistila žádný výrazný účinek nebo zlepšení hydraulických vlastností po přidání biocharu do půdy (Jeffery, et al., 2015).

¹ Hygienické zabezpečení (hygienizace) je snížení ukazatelů patogenních organismů na požadovanou hodnotu (Dohányos, 2006).

(Fischer, Glaser, 2012) předpokládají, že společné kompostování biocharu s organickým materiálem bude mít mnoho výhod oproti pouhému smíchání biocharu nebo kompostu s půdou. Příkladem může být zvýšený přísun živin, zlepšení hospodaření s vodou nebo zvýšení kvality a množství organické hmoty v kompostu. Vliv kompostu s biocharem na hydraulické vlastnosti půdy není zatím náležitě objasněn. Z tohoto důvodu se bakalářská práce touto problematikou zabývá.

V teoretické (rešeršní) části bakalářské práce (kapitola 3) je popsáno proudění vody v půdním prostředí, Darcyho zákon a jeho meze platnosti. Dále je zde popsána nasycená hydraulická vodivost (K_s), retenční čára půdní vlhkosti a jejich metody určení. V závěru rešeršní části jsou popsány použité půdní doplňky a jejich vliv na vlastnosti půdy. Praktická část práce se zabývá metodikou (kapitola 4). V této části jsou charakterizovány použité materiály, stručně je popsána příprava, plnění, sycení a stabilizace vzorků. Dále je popsáno samotné měření nasycené hydraulické vodivosti na laboratorním permeamtru a měření bodů retenční čáry na podtlakových a přetlakových aparaturách. V kapitole 5 jsou uvedeny výsledky ve formě popisné statistiky, doplněny pro přehlednost grafy. Diskuze je psána samostatně v kapitole 6. Na konci práce (kapitola 7) je uveden závěr.

2. Cíle práce

Prvním cílem bakalářské práce je určit vliv kompostu a kompostu s přídatkem biocharu přidaných do upravené nivní půdy na nasycenou hydraulickou vodivost (K_s) a provést měření na laboratorním permeamtru.

Druhým cílem je určit vliv kompostu a kompostu s přídatkem biocharu přidaných do upravené nivní půdy na retenci vody a provést měření s využitím laboratorní podtlakové i přetlakové aparatury.

3. Literární rešerše

3.1 Proudění vody v půdním prostředí

Půda jako porézní prostředí umožňuje proudění vody v pórech. Půdní voda je limitována prostorem, ve kterém se může pohybovat a maximálně odpovídá objemů pórů (Kutílek a kol., 2000).

Pro popis proudění vody v půdě se používají dvě měřítka: mikroskopické a makroskopické. Mikroskopické měřítko se používá pro popis proudění vody v půdě ve zvláštních případech. Obvykle se ale používá měřítko makroskopické (Darcyovské). Zpravidla totiž není dostatek detailních znalostí o geometrii pórovitého prostředí, a kromě toho by bylo třeba provést velké množství výpočtů pro jednotlivé póry (Kutílek, Nielsen, 1994).

Důvodem proudění vody v půdě je spád celkového potenciálu, což je rozdíl celkových potenciálních energií přepočtených na jednotku vody. Hlavní hnací silou pro pohyb vody ve všech půdách je tlakový a gravitační potenciál (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Pokud jsou všechny póry v půdě nasycené vodou, jde o proudění nasycené. Při nasyceném proudění jsou vyplněny i velmi malé póry či část nespojitých pórů, kde neproudí voda. Nevelká část pórů, jež je zcela uzavřena, zůstává i při nasyceném proudění stále nepřístupná pro vodu. V některých pórech je uzavřen vzduch. V přírodě tak téměř nikdy nedojde k zaplnění všech efektivních pórů. V efektivních pórech je tlakový potenciál při nasyceném proudění kladný (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Při nenasyceném proudění je půda nasycená vodou jen zčásti. Efektivní pórovitost je větší než objemová hmotnost (Pokorná, Zábranská, 2007). V efektivních pórech je tlakový potenciál záporný. V nenasycené zóně se na rozdíl od nasycené zóny mohou póry při proudění vody plnit a prázdnit (Pavlásek, Jačka, 2014a).

3.2 Darcyho zákon

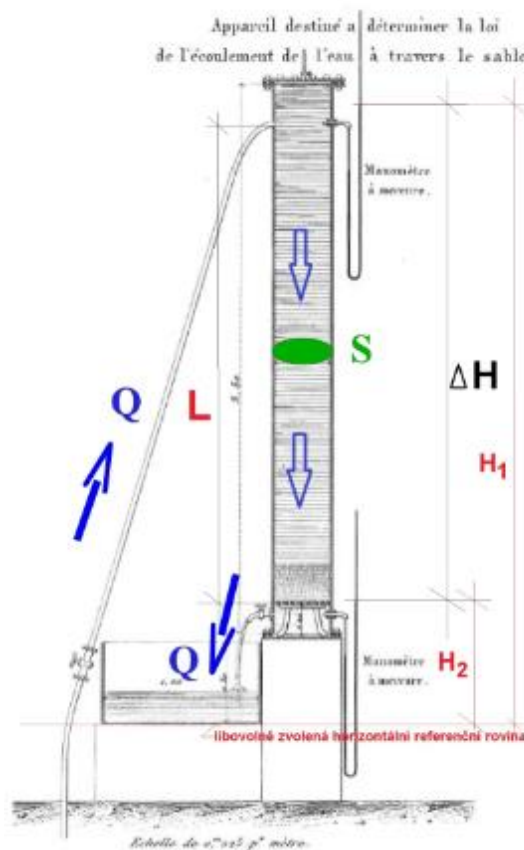
V roce 1856 francouzský inženýr Henry Darcy publikoval závěry svých pokusů týkajících se proudění vody ve sloupci naplněném pískem. Pokusy prováděl za účelem vyřešení znečištění vody ve městě Dijon. Při experimentech s filtrací vody přes sloupec písku a jiné materiály nečekaně objevil základní zákon proudění vody (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Darcy zjistil, že průtok vody Q přes pórové prostředí v koloně je přímo úměrné rozdílu tlakových výšek ΔH na vstupu a na výstupu kolony, průřezové ploše vzorku S , hydraulické vodivosti K_s a nepřímo úměrné výšce sloupce zeminy L (Šráček, Kuchovský, 2003).

Pro ustálené nasycené jednorozměrné proudění platí:

$$Q = K_s \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

kde Q [$L^3 \cdot T^{-1}$] značí objemový průtok vody, K_s [$L \cdot T^{-1}$] je nasycená hydraulická vodivost, S [L^2] je průřezová plocha vzorku, L [L] vyjadřuje výšku sloupce zeminy, ΔH [L] je rozdíl hydraulických výšek ($H_1 - H_2$) (Pavlásek, Jačka, 2014a). Schéma Darcyho experimentu je na obr. 1.



Obr. 1 Schéma Darcyho experimentu (převzato z Pavlásek, Jačka, 2014a).

Odlíšnou možností jak vyjádřit Darcyho zákon je využití vztahu $v = \frac{Q}{S}$, kde v je makroskopická rychlost (označována také jako Darcyovská, zdánlivá nebo mezinárodně hustota toku - angl. flux density) (Pavlásek, Jačka, 2014a).

$$v = K_s \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

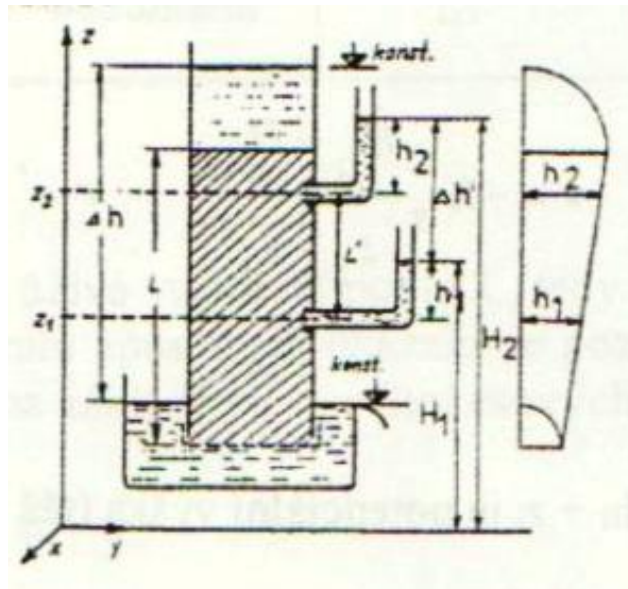
Dle obr. 2 získáme hydraulický sklon ze čtení dvou piezometrů $I = \frac{\Delta H}{L}$. Pokud bychom ztotožnili spodní hladinu vody s počátkem osy z a pokud je osa z kladná směrem vzhůru, pak voda proudí opačným směrem. Darcyho rovnici v diferenciálním tvaru lze zapsat jako (Kutílek, 1978):

$$v = -K_s \cdot \frac{dH}{dz} \quad (3)$$

Záporné znaménko v rovnici 3 znamená, že voda proudí v opačném směru, než je orientace osy z (kladně vzhůru). Pro proudění ve více než v jednom směru je tvar Darcyho zákona následující:

$$v = -K_s \cdot \nabla H \quad (4)$$

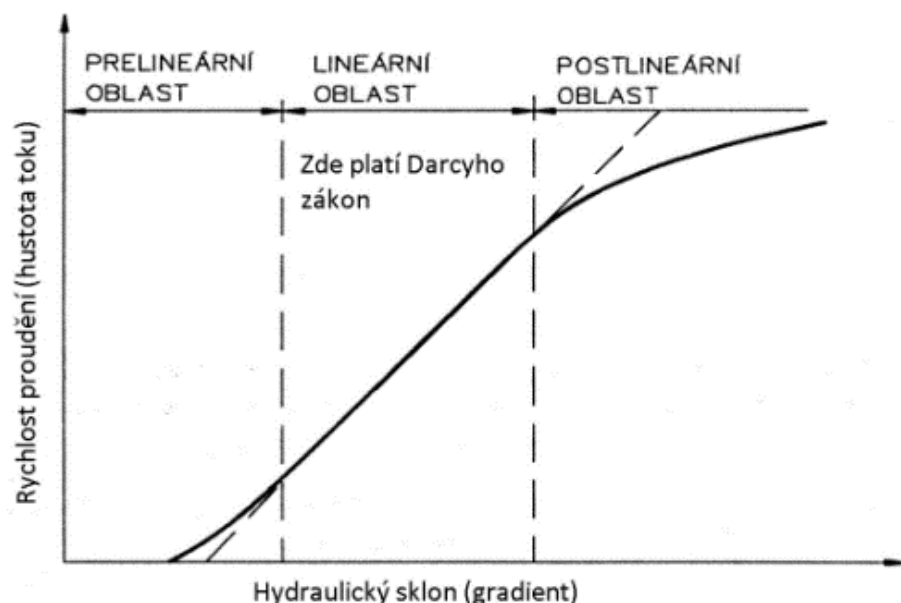
kde ∇H [L] je sklon celkového potenciálu (Pavlásek, Jačka, 2014a).



Obr. 2 Tlakové poměry při proudění vody sloupcem homogenní půdy (převzato z Kutílek, 1978).

3.3 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi rychlostí proudění (hustotou toku) a hydraulickým sklonu. Lineární závislost neplatí pro všechny hodnoty hydraulického sklonu mezi 0 a ∞ . Darcyho zákon platí pouze v lineární oblasti. Meze platnosti jsou vidět na obr.3 (Pavlásek, Jačka, 2014a).



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

V horní mezi se zvyšuje rychlost pomaleji, než podle Darcyho zákona (postlineární režim), když se zvětšují síly v Navier-Stokesových rovnicích.² Pokud se zvyšuje rychlost i nadále dochází k turbulentnímu proudění. Horní mez platnosti Darcyho zákona se uvádí pomocí kritické hodnoty Reynoldsova čísla Re (Kutílek, 1978). Jde o bezrozměrné číslo, které vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a viskózními silami působící na proudící kapalinu. Jako kritická hodnota Reynoldsova čísla při proudění vody v potrubí se uvádí hodnota okolo 2000 (Valentová, 1994). V půdním prostředí se ale určuje obtížně. V nasycené zóně je Reynoldsovo číslo vyjádřeno vztahem:

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

kde d [L] je efektivní průměr zrna nebo efektivní průměr póru, u [L.T⁻¹] rychlost proudění kapaliny (makroskopická), ρ hustota kapaliny, μ dynamická viskozita [L².T⁻¹] (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Při malých rychlostech a sklonech (přelineární režim) může dojít k odchýlení od Darcyho lineárního režimu. Převážně se tak děje u těžkých půd a u materiálů obsahujících koloidní částičky. Odchytky jsou vysvětlovány posunem částic, bobtnáním ale především se předpokládá, že v blízkosti povrchu tuhé fáze je kromě newtonovské vody i voda s jinou viskozitou a s obecně newtonovskými vlastnostmi (Kutílek, 1978).

² Navier-Stokesovy rovnice obecně popisují proudění tekutin (Hillel, 1998).

3.4 Nasycená hydraulická vodivost (K_s)

Nasycená hydraulická vodivost (K_s) je definována Darcyho rovnicí (Pavlásek, Jačka, 2014a). Charakterizuje, jaká je schopnost porézního prostředí umožnit proudění vody (Pokorná, Zábranská, 2007). Její velikost záleží na charakteru prostředí (objemu, zakřivení, velikosti pórů) stejně jako na vlastnostech proudící kapaliny (na teplotě, chemickém složení). V izotropním prostředí můžeme K_s definovat jako makroskopickou rychlost proudění při jednotkovém hydraulickém sklonu. V některých případech se může K_s lišit v závislosti na směru proudění a může tak mít anizotropní charakter. Často je termín nasycená hydraulická vodivost chybně zaměňován s termíny filtrační koeficient, propustnost či Darcyho koeficient (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Nasycenou hydraulickou vodivost lze vyjádřit vztahem:

$$K_s = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (6)$$

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

Hustota kapaliny ρ [$kg \cdot m^{-3}$] a její dynamická viskozita μ [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$] určují hodnotu nasycené hydraulické vodivosti. Vlastnosti půdy, které charakterizují porézní prostředí, jsou zejména pórovitost, tvar a velikost pórů, zrnitostní složení, vliv součinitele zakřivení (tortuozity) a měrný povrch (Pavlásek, Jačka, 2014a). Na těchto vlastnostech půdy, na rozdíl od hydraulické vodivosti, závisí propustnost (Valentová, 1994).

Pro modelování pohybu vody v půdě a transportních procesů rozpuštěných látek v půdě je zásadní znalost nasycené hydraulické vodivosti. Ta je také důležitým podkladem při návrhu odvodnění, závlah, sypaných hrází vodních děl a mnoha dalších inženýrských staveb (Pavlásek, Jačka, 2014a). Pro přibližné odhady K_s pro různé druhy zeminy (různou zrnitost půdy) lze použít tab.1.

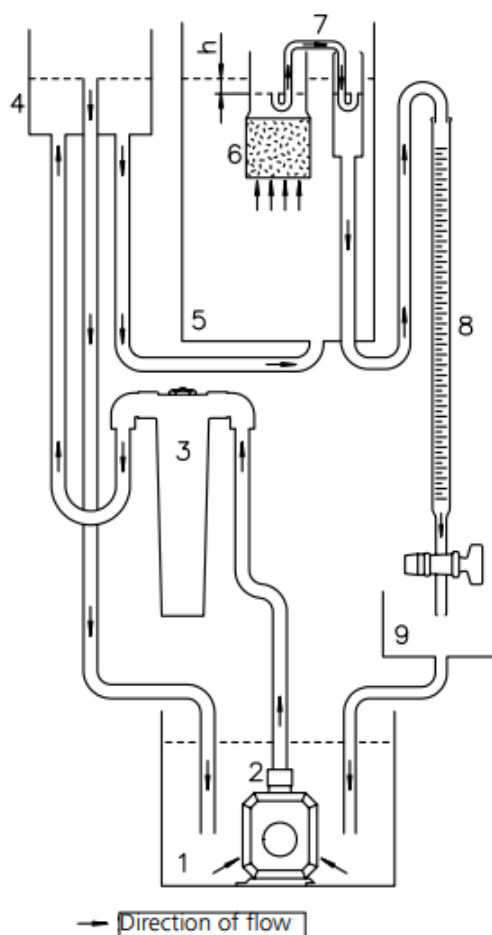
Druh zeminy	Hydraulická vodivost K [m/s]
Jíl	$< 1 \cdot 10^{-8}$
Písečná hlína	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Hlinitý písek ulehý	$(1 - 5) \cdot 10^{-6}$
Písek s příměsí jílu	$(1 - 2) \cdot 10^{-5}$
Hlinitý a jemný písek	$(1 - 5) \cdot 10^{-3}$
Hrubozrný písek	$(1 - 5) \cdot 10^{-3}$
Štěrkopísek	$(2 - 10) \cdot 10^{-4}$
Štěrka	$(1 - 5) \cdot 10^{-4}$

Tab. 1 Orientační hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (převzato z Valentová, 1994).

3.5 Metody měření K_s

Jednou z hlavních půdních charakteristik je nasycená hydraulická vodivost. Můžeme ji stanovit přímými nebo nepřímými metodami měření. Přímé metody stanovení K_s dělíme na laboratorní a terénní. Laboratorní metody se dále dělí na metody s konstantním spádem a proměnným spádem (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Laboratorně lze stanovit nasycenou hydraulickou vodivost na neporušených vzorcích půdy odebraných při terénním průzkumu do kovových válečků. Objem jednoho tzv. Kopeckého válečku je většinou 100 cm^3 (Kutílek, et al., 2000). Odebrané vzorky jsou měřené v laboratorních permeametrech či v podobných aparaturách (Pavlásek, Jačka, 2014a). Schéma přístroje je znázorněno na obr. 4.



Obr. 4 Schéma laboratorního permeamtru (převzato z Eijkelkamp, 2013).

1 - zásobní cisterna na vodu, 2 - čerpadlo, 3 - filtr, 4 - posuvný výškový regulátor, 5 - plastový kontejner, 6 - držák půdního vzorku, 7 - plastová násoska, 8 - byreta, 9 - nádoba s otvory pro odvádění prosakující vody

Pro měření lze použít konstantní nebo proměnný spád (Pavlásek, Jačka, 2014a). Konstantního sklonu se docílí zachováním neměnné úrovně hladin nad vzorkem a pod vzorkem pomocí přepadu nebo Mariottovy lahve³ (Kutílek, 1978).

Vhodná metoda měření je zvolena na základě použitého materiálu. Vzorky, které jsou málo propustné, většinou s obsahem jílu, měříme proměnným spádem. Konstantním spádem měříme především vzorky vysoce a středně propustné, kde se rozsah hodnot K_s pohybuje přibližně mezi 10^{-2} - 10^{-7} ms^{-1} . Hodnoty K_s při měření konstantním spádem získáme přímo z úpravy Darcyho zákona, platí tedy:

$$K_s = \frac{V_p \cdot L_v}{A_v \cdot t \cdot \Delta H} \quad (7)$$

kde K_s je nasycená hydraulická vodivost, V_p je objem vody proteklé vzorkem, L_v je délka válečku, A_v je průtočná plocha válečku, t je čas, za který protekl určitý objem vody vzorkem a ΔH je rozdíl hydraulických výšek (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Při měření s proměnným spádem získáme hodnoty K_s opět z úpravy Darcyho zákona, platí tedy:

$$K_s = \frac{A_d \cdot L_v}{A_v \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \cdot \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \right) \quad (8)$$

kde A_d je průřezová plocha trubice držáků vzorků, ve které stoupá hladina a měří se její změna, ΔH_1 je rozdíl hladin na počátku měření v čase t_1 a ΔH_2 je rozdíl hladin na počátku měření v čase t_2 (Pavlásek, Jačka, 2014a).

U měření K_s s konstantním spádem se měří objem vody, který proteče vzorkem za čas t do byrety, naproti tomu u proměnného spádu se měří změna hydraulického sklonu v čase (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Laboratorně stanovené hodnoty K_s charakterizují vlastnosti pouze měřených vzorků ale nikoliv celého zájmového území (Valentová, 1994). Velikost vzorku lze tak považovat za jednu z hlavních nevýhod tohoto měření (Kutílek, et al., 2000). Mezi další nevýhody lze zařadit například to, že odebrané vzorky nejsou v přímém hydraulickém kontaktu s okolní půdou (Pavlásek, Jačka, 2014a).

³ Marriotova láhev zaručuje vytékání kapaliny z lahve pod stálým přetlakem (Pavlásek, Jačka, 2014a).

Výsledky však mohou být zkresleny například i tím, že ve vzorcích mohou být preferenční cesty (například podél stěny válečku či v díře po žížale) (Pavlásek, Jačka, 2014a). Pozor si také musíme dát na vyplavování suspendovaných materiálů. Mohlo by dojít k zanešení vzorku (Reynolds, et al., 2002).

Terénní metody lze rozdělit na metody nad hladinou a pod hladinou podzemní vody (Pavlásek, Jačka, 2014a). Pokud není v profilu přítomná hladina podzemní vody, určuje se K_s například infiltračním pokusem, Guelphským permeametrem (Pokorná, Zábranská, 2007) nebo tenzním infiltrometrem (Pavlásek, Jačka, 2014a). Při měření K_s , kdy je hladina podzemní vody v měřeném půdním profilu, lze využít jednosondové či piezometrické metody (Pavlásek, Jačka, 2014a). V hydrogeologie se používá převážně metoda čerpacího pokusu (Pokorná, Zábranská, 2007).

Hlavní výhodou terénních metod jsou naměřené hodnoty, které charakterizují několikanásobně větší oblast, než je velikost vzorků, které se odebírají pro měření v laboratoři. Kromě toho se měření děje na neporušeném materiálu (Valentová, 1994).

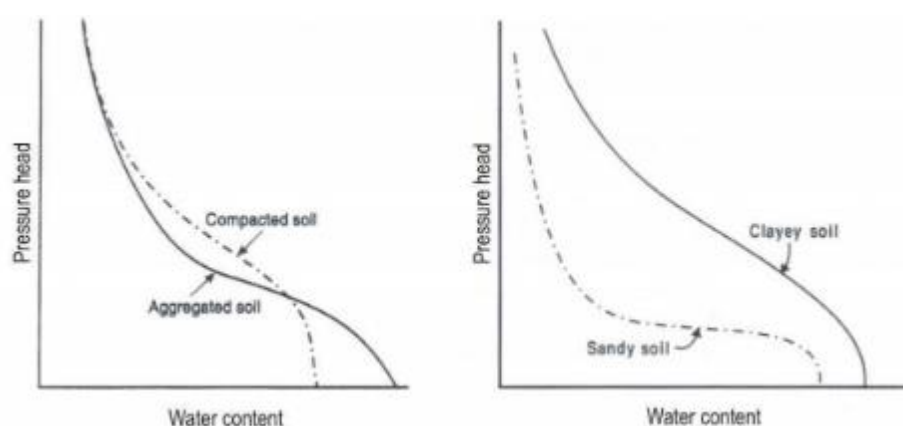
U nepřímých metod odvozujeme hodnotu K_s na základě snadno stanovitelných půdních vlastností jako je např. textura (zrnitost), struktura, obsah humusu nebo objemová hmotnost. Tyto metody jsou známé jako tzv. pedotransferové funkce (Kutílek, et al., 2000).

Nepřímými metodami získáme většinou jen přibližný odhad hodnot K_s . Podle dříve naměřené databáze hodnot se pak hledá nejbližší odpovídající hodnota K_s . Jelikož však databáze zanedbává závislost nasycené hydraulické vodivosti na vegetačním pokryvu, množství organické hmoty a půdní struktuře lze v dnešní době použít pedotransferové funkce pouze pro lehké písčité půdy s nízkou heterogenitou, pro které jsou tyto odhady dostačující (Pavlásek, Jačka, 2014a).

3.6 Retenční čára půdní vlhkosti

Mezi základní hydraulické charakteristiky půdy patří retenční čára. Jde o graficky zobrazený vztah mezi vlhkostí půdy a vlhkostním potenciálem (sacím tlakem eventuálně tlakovou výškou) (Pokorná, Zábranská, 2007).

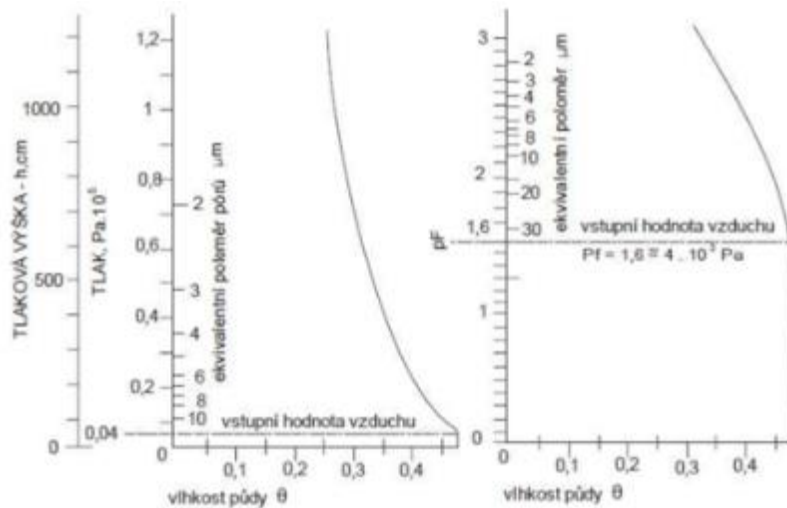
Průběh retenční křivky je závislý na mineralogickém a zrnitostním složení, obsahu humusu, výměnných kationtech a také struktuře a objemové hmotnosti. Z důvodů množství parametrů, na kterých je tato křivka závislá, je nutné ji pro každou půdu stanovit zvlášť. Předpokládat nemůžeme ani její průběh (Pokorná, Zábranská, 2007). Na obr. 5 je znázorněno, jak vlastnosti půdy ovlivňují tvar retenční křivky.



Obr. 5 Závislost retenční čáry na struktuře půdy (vlevo) a na textuře půdy (vpravo) (převzato z Hillel, 2004).

V semilogaritmickém měřítku zobrazujeme graf v případě většího rozsahu vlhkostních potenciálů, v měřítku logaritmickém se vynáší potenciál, obvykle jako hodnoty pF. Tato čára se nazývá pF čára. Při velkém rozsahu sacího tlaku (0 - 10⁵ Pa a více) se používá semilogaritmické zobrazení (pF čára), pro menší rozsah (např. 0 - 200 cm tlakové výšky) je vhodnější použít graf se sacím tlakem v lineárním měřítku (Kutílek, et al., 2000).

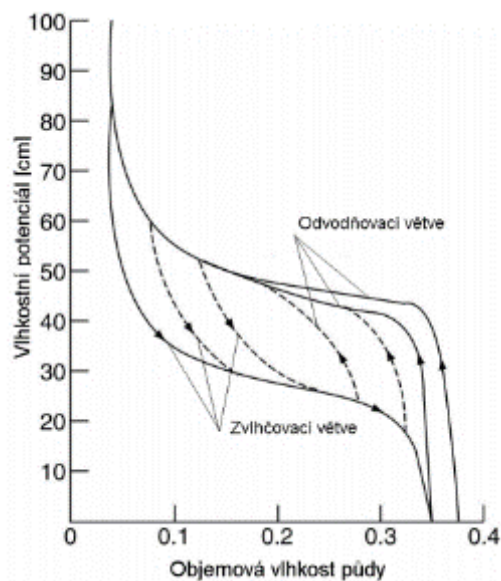
Vstupní hodnota vzduchu (h_v) je potenciál (nebo tlaková výška), při kterém se půda začne odvodňovat a do půdy začne pronikat vzduch. h_v je pro různé druhy půd a různé objemové hmotnosti odlišná, může být také $h_v=0$ (Kutílek, 1978). Na obr. 6 je vidět rozdíl vynesení v měřítku lineárním a semilogaritmickém.



Obr. 6 Retenční čára půdní vlhkosti, a) v lineárním měřítku, b) v semilogaritmickém měřítku jako pF křivka (převzato z Kutílek, et al., 2000).

Průběh retenční čáry závisí na způsobu dosažení rovnovážného stavu. Čára, kterou jsme získali postupným zvlhčováním, tedy snižováním vlhkostního potenciálu, není totožná s čarou získanou po nasycení půdy vysoušením, tedy postupným zvyšováním vlhkostního potenciálu. Tento jev označujeme jako hysterezi retenční čáry (Pokorná, Zábranská, 2007).

Hysterezi způsobuje několik činitelů. Zejména to je vliv uzavíraného vzduchu ve „slepých“ pórech, proměnlivost průřezu pórů a rozdílná hodnota smáčecího úhlu při postupu kapaliny na suchém povrchu a při ústupu kapaliny ze zvlhčeného povrchu (Kutílek, 1978). Na obr. 7 je vidět hystereze retenční čáry písku.



Obr. 7 Hystereze retenční čáry písku (převzato z Pavlásek, Jačka, 2014b).

3.7 Metody stanovení retenční čáry půdní vlhkosti

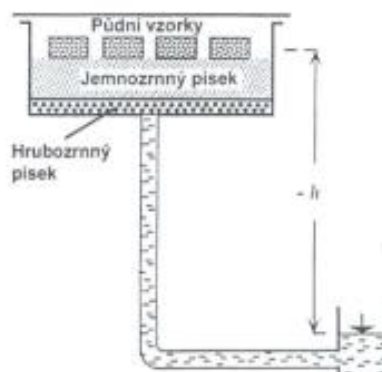
Retenční čára vlhkosti spolu s koeficientem hydraulické vodivosti jsou nejdůležitějšími veličinami pro studium pohybu vody v půdě. Pro jejich určení se používá mnoho laboratorních a terénních metod, viz. tab. 2 (Stoklásková, 2012).

Stanovení retenční křivky půdní vlhkosti	
Laboratorní metody	Terénní měření
Podtlakové přístroje: - Pískový tank	Čidla na měření vlhkosti: - TDR senzory
Přetlakové přístroje	- neuronové a kapacitní sondy
Kombinace přetlaku a podtlaku: - Tempská cela	Čidla na měření tlakové výšky: - Tenzometr s rtuťovým manometrem

Tab. 2 Metody stanovení retenční křivky (převzato z Stoklásková, 2012).

V laboratoři lze retenční čáru půdní vlhkosti stanovit pomocí podtlakových nebo přetlakových přístrojů. Mezi podtlakové přístroje patří například pískový či jílový tank. Přístroj se skládá z kontejneru, který je vyplněn dvěma vrstvami písku (popřípadě jílu a písku), hadičky a nádoby na vodu. Obě vrstvy jsou nasycené vodou. Na spodní straně kontejneru je otvor, který je spojen hadičkou s nádobou na vodu (Kodešová, et al., 2015).

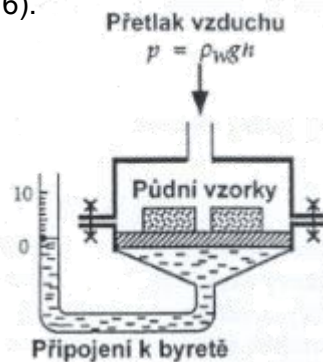
Změnou výšky nádoby vzorek v několika postupných krocích drénujeme do ustálené hladiny vody v nádobě. Gravimetrickou hodnotu objemové vlhkosti zjistíme při každé změně výšky. Z objemové vlhkosti a příslušných hodnot tlaku lze vykreslit body retenční čáry (Čermák, 2012). Pískový tank (obr.8) slouží z velké části ke stanovení odvodňovací větve a měří v rozsahu 0 až -100 cm tlakové výšky (písko-kaolínový tank až do - 500 cm) (Hnatajková, 2016).



Obr. 8 Pískový tank (převzato z Kodešová, 2005).

Mezi přetlakové přístroje řadíme přetlakový aparát. Přístroj se skládá z tlakové nádoby, polopropustné keramické membrány, kompresoru, regulátoru tlaku, manometru, hadičky a byřety. Kompresor je spojen s otvorem v nádobě a pomocí regulátoru tlaku a manometru je nastavován přetlak vzduchu. V přetlakové nádobě je umístěna membrána, která je spojena hadičkou s byřetou. Celý prostor mezi nasycenou membránou a hladinou vody v byřeti je vyplněn vodou (Kodešová, et al., 2015).

Neporušené půdní vzorky jsou drénovány několika změnami tlaku vzduchu. Body retenční křivky zjistíme stejně jako u podtlakových přístrojů z objemové hmotnosti a příslušných hodnot tlaků (Čermák, 2012). Přetlakové přístroje (obr. 9) umožňují měřit od 0 do 15 barů (přibližně -15 000 cm tlakové výšky) (Hnatajková, 2016).



Obr. 9 Přetlakový aparát (převzato z Kodešová, 2005).

Přístroj, který pracuje na kombinaci přetlaku a podtlaku se nazývá Tempská cela. Je vhodné ji použít v případech, kdy hrozí vyplavení nestabilních částic ze vzorku (Čermák, 2012).

V terénu se měří tlaková výška tenzometrem. Tenzometr se skládá z porézní porcelánové nádobky, jejíž stěny umožňují hydraulické spojení mezi půdní vodou a manometrem. Tlaky jsou obvykle získávány pomocí rtuťového manometru, na kterém je před měřením nastavena nulová hodnota (Kutílek, 1978). Tenzometr umožňuje měřit tlaky pod hodnoty 1 atm (přibližně 1 bar), což je zapříčiněno tím, že manometr měří částečné vakuum vzhledem k vnějšímu atmosférickému tlaku. Z důvodu toho, že většina půd je zaměřena na udržení nízkých sacích podmínek, který je pro růst rostlin nejvhodnější, jsou tenzometry dostačující (Hillel, 2004).

Pro měření vlhkosti v terénu se užívají čidla jako například TDR senzory nebo neutronové a kapacitní sondy (Stoklásková, 2012). Tento přístup je však často frustrován heterogenitou půdy a nejistotami ohledně rovnováhy, stejně jako hysterezí, která se v terénu může vyskytnout (Hillel, 2004).

3.8 Organické půdní doplňky

Organické půdní doplňky přivádějí do půdy užitečné mikroorganismy nebo organickou hmotu, ze které se tvoří humus. Dále do půdy dodávají velké množství živin a růstové látky. Půdní mikroorganismy přeměňují živiny do formy, jenž je vhodná pro rostliny. Organické půdní doplňky tvoří základ trvalé půdní úrodnosti a nedají se ničím nahradit (Kalina, 2014).

Mezi nepoužívanější organická hnojiva patří zejména chlévský hnůj a chlévská mrva. Nicméně z důvodu jejich snížené dostupnosti (úbytek hospodářských zvířat) se do půdy začaly přidávat i jiné půdní doplňky, které zlepšují vlastnosti půdy (např. biochar či kompost).

3.8.1 Kompost

Kompost je stabilizovaný a hygienizovaný produkt kompostování (Kuraš, 2014). Podobá se důkladně uzrálému hnoji, avšak je čistější a nezapáchá. Jakmile projde kompostovacím procesem stane se z kompostu hrubozrnný, tmavý, zemitý materiál (Flowerdew, 2010).

Kompostovat lze skoro všechno, co v přírodě vyrostlo a co by se časem rozložilo. Na kompostovou hromadu lze přidat např. zbytky jídla, odpad ze zahrady (spadlé listí, plevel, posečená tráva, větve apod.) nebo třeba lepenkové obaly, novinový papír, dřevěný popel či vlněné oblečení (Flowerdew, 2010).

Kompost má pozitivní vliv na úrodnost půdy, zvyšuje filtrační a pufrací kapacitu a je možným uložištěm uhlíku (Kuraš, 2014). Do půdy dodává minerální látky a nepřímo jakýmsi „naočkováním“ i užitečné mikroorganismy. Pokud se kompost přidá do zeminy a nechá se rozložit vznikne humus, který zvyšuje zrnitost půdy a její schopnost udržet vodu (Flowerdew, 2010).

Kvalitně připravený kompost je svým účinkem srovnatelný s dobře uzrálým hnojem a rostliny vyživuje mnohem lépe než umělá hnojiva (Flowerdew, 2010).

3.8.2 Biochar

Biochar je pevný materiál získaný z termochemické přeměny biomasy v prostředí s omezeným obsahem kyslíku (karbonizací) (Camps, Tomlinson, 2015). Základní složkou biocharu je chemicky stabilní uhlík, který se dále nerozkládá ani nepodléhá oxidaci (Káňa, 2019).

Z technického hlediska se biochar vyrábí tepelným rozkladem organických materiálu (např. ze dřeva, listů či hnoje) za omezeného přístupu kyslíku a při poměrně nízkých teplotách (pod 700 °C) (International Biochar Initiative, ©2018).

Jediný rozdíl mezi biocharem a dřevěným uhlím je v jeho použití. Dřevěné uhlí se používá převážně k vytápění nebo jako topivo pro grily. Ve fyzikálně-chemickém významu je biochar a dřevěné uhlí v podstatně totožným materiálem (Verheijen, et. al., 2010).

Kvalita půdy se po přidání biocharu zlepšuje. Uhlík váže v půdě důležité živiny a látky (fosfor, dusík, draslík, ...), které se z ní nevyplavují. Biochar dokáže v půdě vázat i vodu, jelikož má vysokou retenční schopnost, která je ovlivněna vysokou hodnotou kationtové výměnné kapacity⁴ (Káňa, 2019).

Biochar má nejčastěji neutrální nebo zásadité pH. Kyselejší půdy mají obvykle nižší pH, tím snižují kationtovou výměnnou kapacitu a dostupnost živin. Několik terénních experimentů ukázalo zvýšení pH po přidání biocharu do půdy – pozitivní účinek na růst rostlin (Verheijen, et. al., 2010). Větší přínosy byly pozorovány v kyselejší půdě, u zásaditých půd byly přínosy malé. V některých případech mělo zvýšení pH (> 6) nepříznivý vliv na růst rostlin, jelikož docházelo ke ztrátě stopových prvků. U zásaditých půd je proto třeba přidávat biochar opatrně (International Biochar Initiative, ©2018).

3.9 Vliv organických přísad na vlastnosti půdy

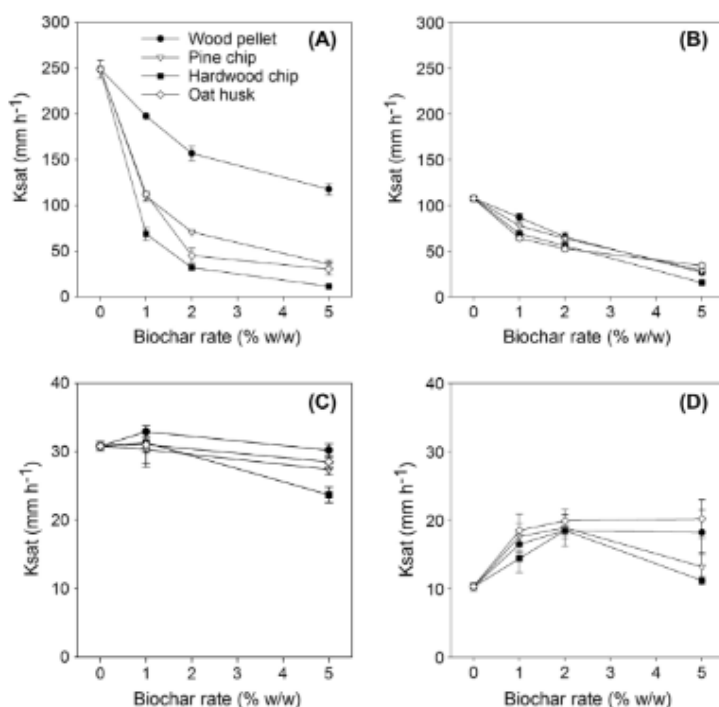
Přídavek biocharu do půdy je v dnešní době hodnocen jako prostředek ke zvýšení výnosnosti plodin a zlepšení kvality půdy. Kromě příznivých účinků na dostupnost a přísun živin v půdě se předpokládá, že biochar zlepšuje i retenci vody v půdě. Důkazy o takovém účinku však v dostupné literatuře nejsou pořádně objasněny (Jeffery, et al., 2015).

Jeffery, et al., (2015) se rozhodli udělat dva samostatné polní pokusy na písčité půdě v Nizozemsku. Pro první pokus byl biochar získán pomalou pyrolýzou z bylinných odřezků při dvou teplotách (400 °C a 600 °C). Do půdy byl aplikován v poměru 10 t.ha⁻¹. Pro druhý pokus byl biochar získán pyrolýzou při teplotě 400 °C a do půdy byl aplikován v poměrech 1, 5, 20 a 50 t.ha⁻¹. Půdy byly testovány na půdní retenci vody, stabilitu a další fyzikální vlastnosti ve

⁴ Kationtová výměnná kapacita udává schopnost půdy vázat kationty v půdním komplexu (Pečenka, 2008)

třech vegetačních obdobích a samostatně pro každý experiment v jednom vegetačním období. Ani v jednom z pokusů Jeffery, et al., (2015) nenašli žádný významný účinek přidání biocharu na retenci vody, stabilitu ani na nasycenou hydraulickou vodivost.

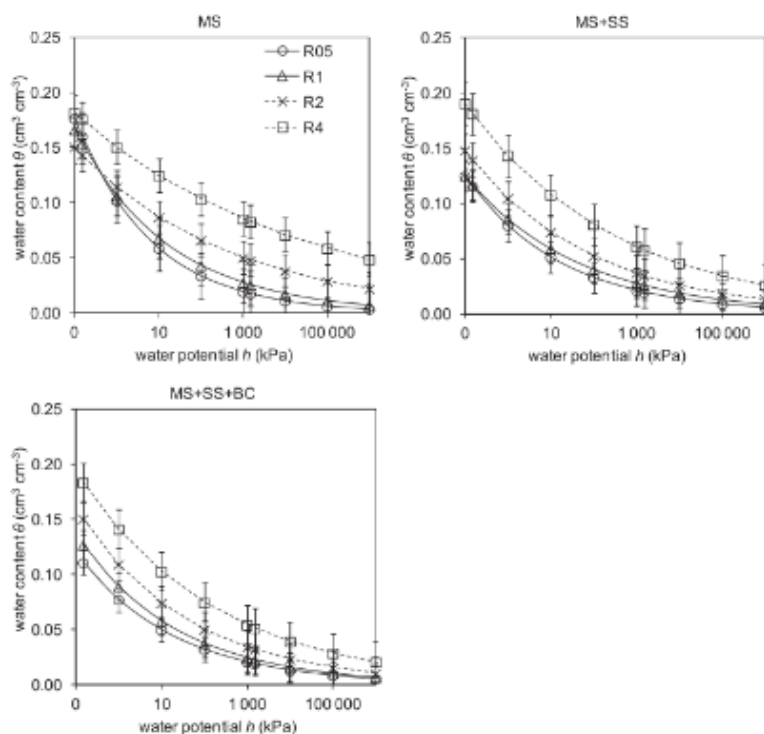
Nasycená hydraulická vodivost je podle Lim, et al., (2016) ovlivňována biocharem. Záleží při tom na velikosti částic, poměru přidaného biocharu a původní půdní textuře. Předmětem výzkumu bylo vyvinout podpurný nástroj, který by předpovídal účinek přidaného biocharu na nasycenou hydraulickou vodivost. Lim, et al., (2016) zkoumali biochar, který byl získán ze 4 různých materiálů. Jednalo se o biochar vyrobený z odštěpků z borovicového dřeva, odštěpků z tvrdého dřeva (javor cukrový, jasan americký, dub letní), z ovesných slupek a z pelet z tvrdého dřeva (dub letní). Získaný biochar autoři aplikovaly do čtyř různých půd (jemný písek, hrubý písek, jíl, hlína) v poměru 0 %, 1 %, 2 % a 5 %. Hydraulická nasycená vodivost byla změřena metodou s proměnným spádem. Hodnoty K_s se snížily po přidání biocharu do jemného a hrubého písku. Menší částice biocharu (60 % < 1 mm) měly menší účinek na snížení K_s než větší částice (60 % > 1 mm). Toto chování by mohla vysvětlit vzrůstající tortuozita. Na druhou stranu po přidání 1 % a 2 % biocharu do jílovitých hlín se hodnoty K_s zvýšily. Avšak po přidání 5 % biocharu se hodnoty K_s nezvyšovaly ani nesnižovaly (Lim, et al., 2016). Na obr. 10 jsou zobrazeny změny K_s po přidání 4 různých biocharu v různém poměru do 4 různých půd.



Obr. 10 Změny nasycené hydraulické vodivosti v důsledku přidání 4 různých biocharů v různém poměru (0 %, 1 %, 2 %, 5 %) do odlišných půd (hrubý písek - A, jemný písek - B, hlína - C, jíl - D). Jedná se o průměrné hodnoty ze 4 měření (převzato z Lim, et al., 2016).

Agronomické využití kompostu má pro půdu určité výhody. Kompost zvyšuje obsah živin a organických látek v půdě a pozitivně ovlivňuje biologické, fyzikální a chemické vlastnosti půdy (Głąb, et al., 2018).

Głąb, et al., (2018) provedli výzkum, kde zkoumali vliv rozdílného poměru kompostu a odlišného typu biocharu na retenci vody v písčité půdě. Použili následující směsi: kompost s kukuřičnou slámou (MS), kompost s kukuřičnou slámou a čistírenským kalem (MS + SS) a kompost s kukuřičnou slámou, čistírenským kalem a biocharem (MS + SS + BC). Směsi kompostu + přísadků a půdy byly připraveny v množství 0,5 % (R05), 1 % (R1), 2 % (R2) a 4 % (R4). Půdní retenční křivka byla stanovena pro sedm hydraulických potenciálů (4, 10, 33, 100, 200, 500, 1500 kPa). Zjistili, že ve srovnání s neošetřenou půdou má půda s použitím kompostu významný vliv na fyzikální vlastnosti písčité půdy. Základní fyzikální vlastnosti, jako je objemová hmotnost a pórovitost, byli ovlivněny poměrem přidaného biocharu do půdy. Odlišná pórovitost byla ovlivněna poměrem kompostu i typem suroviny. U půdy s kompostem a kukuřičnou slámou (MS) bylo zjištěna nejnížší hodnota dostupné vody (AWC). Přidání čistírenského kalu a biocharu během kompostování vedlo ke zvýšení AWC v půdě. Nejlepší kombinace poměru kompostu a typu suroviny je podle Głąb, et al., (2018) kompost s kukuřičnou slámou, čistírenským kalem a biocharem v poměru 4 %. Retenční křivky jsou zobrazeny na obr.11.

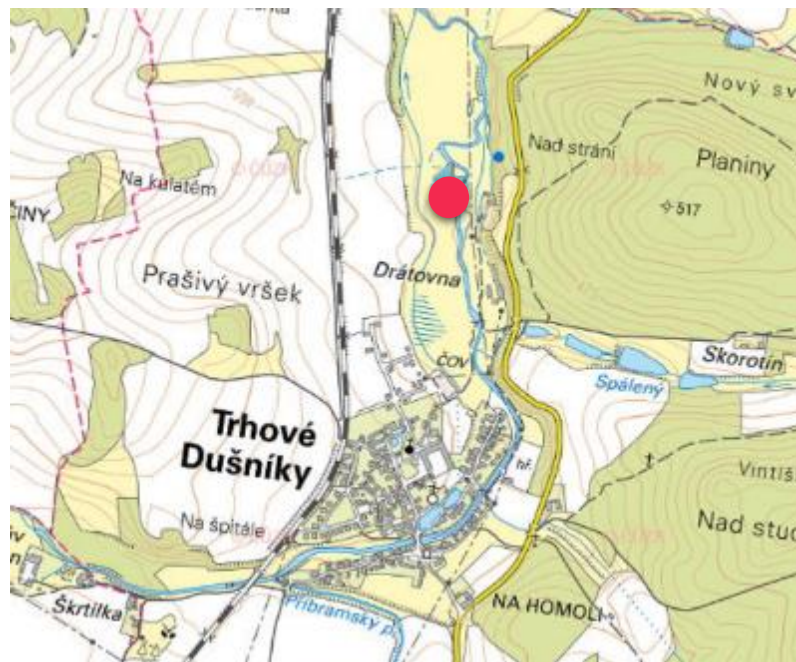


Obr. 11 Půdní retenční křivky založené na rovnici van Genuchten zkoumající směsi půdy, kompostu a přidaných surovin. Svislé pruhy představují standardní odchylky ($n = 12$) (převzato z Głąb, et al., 2018).

4. Metodika

4.1 Charakteristika použité zeminy a půdních přísadků

Pro tuto bakalářskou práci byla použita fluvizem (nivní půda) z okolí řeky Litavky, která byla odebrána v blízkosti hydrometeorologické stanice FŽP ČZU v hloubce 10 - 30 cm pod povrchem terénu. Lokalita se nachází v blízkosti obce Trhové Dušníky v okrese Příbram, ve Středočeském kraji v nadmořské výšce 440 m.n.m. (Liu, 2017). Místo odběru lze najít na souřadnicích 49.7201794N, 14.0129083E (zobrazeno na obr. 12).



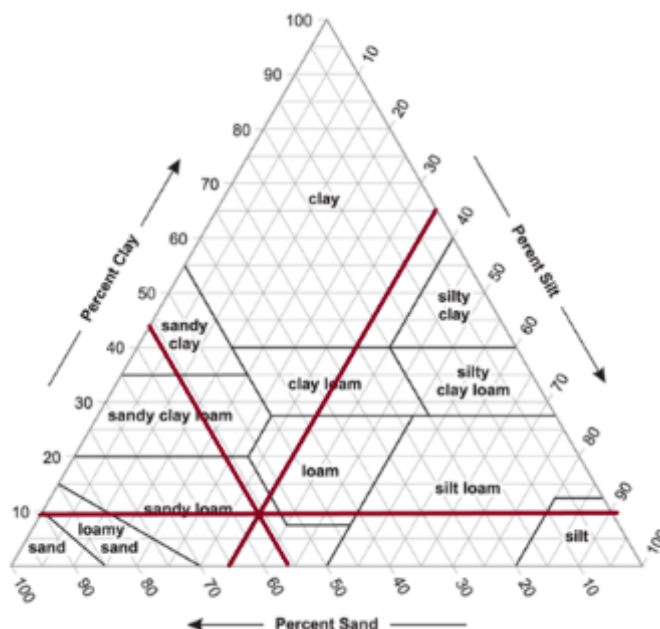
Obr. 12 Místo odběru nivní půdy (upraveno z geoportal.cuzk.cz, 2019).

Hustoměrnou metodou z pěti rozborů bylo určeno procentuální zastoupení jemnozeme (jíl, prach, písek) a skeletu (viz tab.3) (Liu, 2017). Půda neobsahovala zrna větší než 2 mm (Kubíková, 2017).

Rozmezí	Částice	[%]
< 2 μ m	jíl	8.7 \pm 1.0
2-50 μ m	prach	34.8 \pm 4.3
0.05-2 mm	písek	56.5 \pm 4.4
Σ =		90.8 \pm 4.2

Tab. 3 Procentuální zastoupení částic v jemnozemi (převzato z Liu, 2017).

Podle klasifikátoru USDA (United States Department of Agriculture), který je zobrazen na obr. 13, byl určen půdní druh sandy – loam (písečná hlína). Pomocí analyzátoru SSM-5000A byl změřen obsah uhlíku v půdě ve spolupráci s KGEV FŽP. Celkový průměrný obsah organického uhlíku v půdě představoval $2,1512 \pm 0,0093$ %, anorganický uhlík nebyl v půdě nalezen (Kubíková, 2017).



Obr. 13 Trojúhelníkový klasifikátor USDA – určení půdního druhu (upraveno z www.nrcs.usda.gov, 2019).

Použitý biochar, vyrobený v Kozomíně, byl připraven z měkkého dřeva (převážně smrku) pyrolýzou při teplotě 500–600 °C. Do půdy byly přidány 2 % hmotnosti suchého biocharu v rozměrech 6–10 mm. Jednotlivé vlastnosti jsou uvedené v tab. číslo 4.

Vlastnosti	Jednotky	6 — 10 mm
Vlhkost	% hmot.	3,75
Celkové hořlaviny	% hmot.	94,32
Popílek (550 °C)	% hmot.	5,68
Nestálé hořlaviny	% hmot.	3,80
Vázaný uhlík	% hmot.	90,52
Objemová hmotnost volně sypaného biocharu	kg.m ⁻³	142
Specifický povrch - BET	m ² .g ⁻¹	615

Tab. 4 Vlastnosti použitého biocharu (převzato z Gallagher, 2019).

K tvorbě kompostu bylo použito spadané dubové a javorové listí, čerstvě posečená tráva a drobné větvičky. Materiál k výrobě kompostu byl shromážděn v kampusu České zemědělské univerzity v Praze 1. listopadu 2017. Listy, tráva a větvičky byly rozstříhány nůžkami a přidány do 200 litrové nádoby v poměru 5:1 (listy ku trávě). Tento poměr se stanovil na základě vhodného poměru uhlíku a dusíku 25:1, který je důležitý pro optimální rozložení organického materiálu v kompostu.

Celkem byli naplněny tři nádoby (jednu naplněnou nádobu je možno vidět na obr. 14). Každá obsahovala 25 kg listí a 5 kg trávy. První nádoba obsahovala 0 % biocharu (BC), druhá 2 % BC a třetí 5 % BC.

Během drcení se do všech nádob přilily 3 litry vody, kvůli nasycení materiálu. A po přilítí se provedla zkouška tzv. "zmáčknutí", kdy se hrstka materiálu zmáčknula a sledovalo se, kolik vyteče vody. Ze zkoumaného materiálu vykapalo pouze pár kapek, což znamenalo že materiál je vlhký ale ne přesycený vodou. Připravené nádoby byly umístěny přibližně na 4 měsíce do skleníku, kde se teplota pohybovala okolo 20 °C. Každé tři týdny se materiál promíchal a provzdušnil.

Původní poměr listů ku trávě postrádal dusík, který je potřebný pro optimální rozklad organického materiálu. A tak se každé nádoby přidalo 2,21 kg čerstvé trávy a odpovídající procentuální množství biocharu. Od 29. listopadu, kdy se do půdy přidala tráva a biochar, až do 12. prosince 2017 se do nádob postupně přilévala voda a prováděl se test "zmáčknutí". Kompostování se ukončilo 12. února 2018, kdy se skoro všechný organický materiál rozložil (až na větší klaciky), kompost byl homogenní a neprodukoval žádné teplo tvořeno rozkladem.

Kompost a směs kompostu s biocharem připravoval student Brett Nolan Gallagher, který tuto směs používá i ve své diplomové práci (in prep.). Pro náš experiment jsme využili pouze 2 % směs biocharu s kompostem.



Obr. 14 Naplněná nádoba listím a trávou (převzato z Gallagher, 2019).

4.2 Příprava a plnění vzorků

Příprava, plnění a měření vzorků probíhalo v laboratoři katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování na Fakultě životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze pod dohledem a ve spolupráci s vedoucím bakalářské práce Ing. Lukášem Jačkou, Ph.D.

Pro měření byly použity 4 různé směsi (ošetření) půdy. První kontrola – půda bez přísad, druhá půda s přísadou kompostu v poměru 60/40, třetí půda s přísadou kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu od začátku kompostování a čtvrtá půda s přísadou kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu přidaných po kompostování (zobrazena na obr.15).



Obr. 15 Půda s přísadou kompostu a 2 % biocharu přidaných po kompostování.

Nejprve bylo nutné všechny směsi, kromě kontroly, rozmělnit v třecí misce (obr. 16) a prosít na sítu o průměru ok 4 mm. Tímto krokem jsme odstranili nadměrné částičky (klacíky, ulity, ...), které by mohli způsobovat zkreslení výsledků. Prosetá směs je zobrazena na obr. 17.



Obr. 16 Směs půdy připravená k rozmělnění ve třecí misce.



Obr. 17 Prosetá směs půdy na sítu o průměru ok 4 mm.

Poté jsme si připravili Kopeckého válečky o objemu 100 cm³, které jsme slepili pomocí lepicí pásky ostrou hranou k sobě (obr.18). Na jednu tupou stranu se pomocí gumičky upevnila propustná látková membrána (gáza). Pro lepší přehled má každý váleček vyryté identifikační číslo. Připravené válečky jsou vidět na obr. 19.

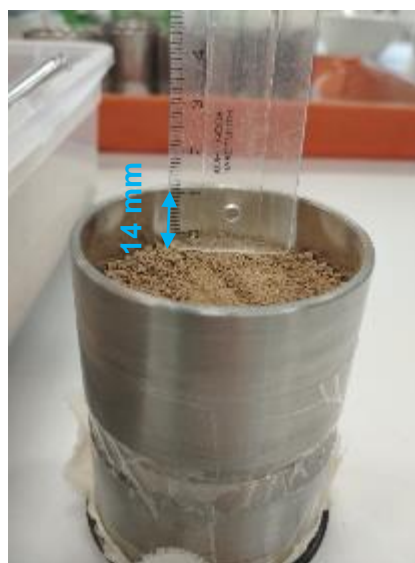


Obr. 18 Spojování Kopeckého válečků lepicí páskou.



Obr. 19 Připravené válečky (upevněná látková membrána gumičkou).

Válečky se zvažily na velmi přesné váze a poté se do nich volně nasypala připravená směs. Válečky se plnily 14 mm pod okraj horní hrany (viz obr. 20). Průměrná hmotnost suché sesednuté směsi ve válečcích byla 163,28 g.



Obr. 20 Měření hloubky volně nasypané zeminy ve válečku.

Dohromady bylo připraveno 28 vzorků. Z toho 7 kontrolních – 4 konsolidované (K_ko) a 3 nekonsolidované (N_ko), 7 s přidavkem kompostu v poměru 60/40 – 4 konsolidované (K_kom) a 3 nekonsolidované (N_kom), 7 s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu od začátku kompostování – 4 konsolidované (K_kbio_z) a 3 nekonsolidované (N_kbio_z), 7 s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu po kompostování – 4 konsolidované (K_kbio_po) a 3 nekonsolidované (N_kbio_po). Z důvodu nedostatku směsi byl poslední vzorek (140N z N_kbio_po) naplněn zbytkem zeminy (31 mm pod horní okraj válečku).

Pro stanovení vlhkosti zeminy se z každé připravené směsi odebraly 3 vzorky zeminy, které se vložily do předem zvážených a vysušených váženek. Takto připravené váženky se opět zvážily a umístily do sušičky. Po vysušení se váženky zvážily znovu. Na obr. 21 jsou vidět připravené vzorky a váženky.



Obr. 21 Naplněné válečky a váženky.

4.3 Sycení, stabilizace, měření bobtnání a konsolidace vzorků

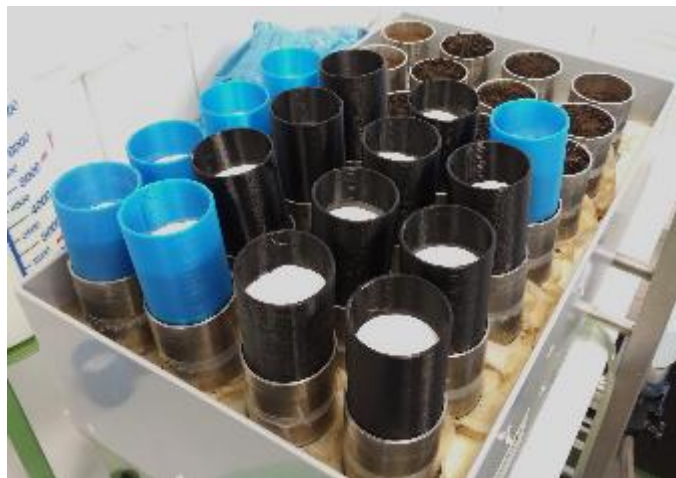
Volně nasypané vzorky zeminou se nechaly šest dní sesednout. Po této době se přeměřila hloubka sesednuté zeminy ve válečku. Následně se vzorky nechaly týden sytit při postupném zvyšování hladiny v pískovém tanku (obr. 22). Opět se přeměřila hloubka zeminy a na pískovém tanku byl nastaven podtlak 50 cm.



Obr. 22 Sycení vzorků v pískovém tanku.

Vzorky se nechaly pod podtlakem odvodňovat po dobu 22 dní, přičemž poslední týden se část vzorků zatížila závažím o hmotnosti 600 g a byla vystavena konsolidaci.

Konsolidace se používá proto, protože nasycené vzorky neodpovídají půdě v přirozeném uložení. Abychom se přiblížily zatížení zeminy, které nastává v hloubce 10-20 cm pod povrchem, zatížily jsme vzorky 600 g závažím (obr. 23) (Falcová, 2018).



Obr. 23 Konsolidace vybraných vzorků.

Z každé směsi zeminy byly vystaveny konsolidaci právě 4 vzorky, zbylé byly ponechány pro porovnání bez konsolidace. Po skončení měření se naposledy přeměřila hloubka zeminy ve válečkách.

Naměřené hodnoty výšky bobtnání připravených směsí zeminy slouží jako podklad k projektu: Komercializace FŽP / Výstupy vědy a výzkumu pro environmentální praxi (ověřovací záměr č.1 Výroba stabilního zahradního substrátu z bioodpadu „KompoChar) a nejsou v této práci vyhodnocovány.

4.4 Měření K_s na laboratorním permeamtru

Před samotným měřením nasycené hydraulické vodivosti byli vzorky použity pro měření retenční čáry do pF 2. Po skončení měření K_s byly vzorky použity pro další měření retenční čáry. Měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s) probíhalo na laboratorním permeamtru nizozemské firmy Eijkelkamp Soil & Water metodou s konstantního spádu.

Na začátku měření byly vzorky zkontrolovány. Tam, kde se utvořily malé trhlinky a mezery mezi okrajem válečku, byl použit silikon pro jejich vyplnění (obr.24). Před vložením vzorku do permeamtru bylo nutné jednotlivé vzorky řádně očistit, aby nedocházelo k nežádoucímu proudění mezi držákem a válečkem. Poté se vzorky upevnily do držáků a opatrně dotáhly šroubem (obr.25). Takto připravené vzorky se vkládaly na jednotlivé pozice do připraveného permeamtru. Číslo pozice bylo zapsáno do připravené záznamové tabulky.



Obr. 24 Vyplnění mezer silikonem (mezi okrajem válečku a zemínou).



Obr. 25 Upevněný vzorek v držáku.

Následně se vzorky nechaly několik dní (za postupného zvedání hladiny) sytit, aby došlo k vytlačení vzduchových bublin a nedošlo ke zkreslení měření nasycené hydraulické vodivosti.

Plastové násosky byly před vložením naplněny vodou, tak aby v nich nezůstala žádná vzduchová bublina. Takto připravené násosky se umísťovaly jedním koncem dovnitř držáků a druhým koncem vně. Násosky odvádějí prosakující vodu skrz vzorek. Umístění vzorků v permeamtru je zobrazeno na obr. 26.



Obr. 26 Umístěné vzorky s násoskami v laboratorním permeamtru.

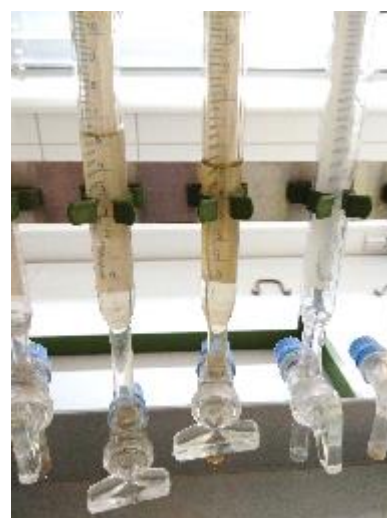
Před zahájením měření jednotlivých vzorků bylo nutné vždy změřit teplotu vody rtuťovým teploměrem a odečíst výšku hladiny vody na mikrometru uvnitř držáku a vně v těsné blízkosti vzorku. Naměřené hodnoty byly zapsány do záznamové tabulky a byl vypočten rozdíl hladin ΔH .

Samotný začátek měření započal uzavřením kohoutu byrety, kam se nechala natékat voda. V okamžiku, kdy hladina vody v byretě vystoupala na stupnici na hodnotu 0 mm, spustili se stopky a byl zapsán čas začátku měření. Jakmile voda dosáhla určitého objemu v byretě, byl čas zastaven a zapsán do tabulky. Na obr. 27 je zachycen průběh měření K_s , detail byrety je zobrazen na obr. 28.

Měření pro každý vzorek bylo opakováno třikrát za sebou. Po ukončení měření daného vzorku byl kohout byrety otevřen a voda se nechala volně protékat. Po skončení měření (vyndání vzorků) se horní nádrž permeamtru zakryla deskou, která zabraňovala výparu vody.



Obr. 27 Průběh měření K_s na laboratorním permeamtru.



Obr. 28 Detail byrety s nateklou vodou.

Doba měření K_s byla 14 dní. První série vzorků byla sycena 4.7.2018, měření proběhlo 12.7.2018, ten samý den se začala sytit druhá série vzorků a měření proběhlo o čtyři dny později 16.7.2018. Třetí série se začala sytit v den skončení druhé série a její měření proběhlo o dva dny později 18.7.2018. Všechny série byly měřeny ve dvou časových krocích, většinou s rozestupem 2-3 hodin.

4.5 Měření bodů retenční čáry

Před samotným měřením retenční čáry je nutné si vzorky připravit. Je potřeba u každého vzorku oddělit od sebe Kopeckého válečky a seříznout zeminu. To se provedlo při částečně nasyceném vzorku tak, že se pomocí odlamovacího nože rozřízla lepící páska a poté se opatrně nadzvedl horní Kopeckého váleček. Pomocí vlasce se vzorek vodorovně rozpůlil a nožem se opatrně odřezávala přebytečná zemina až do té doby, dokud zemina ve válečku nelícovala s hranou válečku (obr. 29). Takto připravené vzorky (obr.30) se položily na sklíčko a zvažily se na přesné digitální váze.



Obr. 29 Oddělování Kopeckého válečků a seřezávání zeminy.



Obr. 30 Připravené vzorky pro měření.

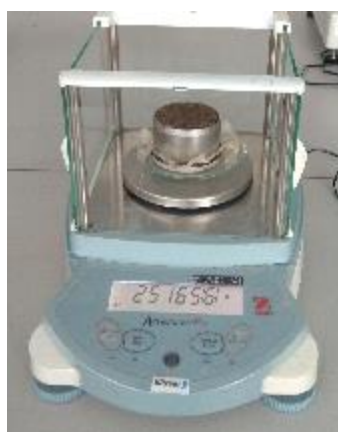
Měření bodů retenční křivky se provádělo na podtlakové i přetlakové aparatuře firmy Eijkelkamp Soil & Water.

Pro hodnoty vlhkostního potenciálu do 10 kPa (pF 2) se používal pískový tank. Pro hodnoty do 50 kPa (pF 2,7) se používal písko-kaolínový tank. Přetlakové aparatury se používaly k měření vlhkostního potenciálu až do hodnot 1,5 MPa (pF 4,2).

Nejprve se vzorky umístily do pískového tanku s 0,5 cm hladinou vody a nechaly se několik hodin adaptovat. Poté se tank doplnil opatrně destilovanou vodou, tak aby hladina vody byla 1 cm po hranou válečku (při neopatrném nalití vody by mohlo dojít k poškození struktury půdy). Před zahájením měření se každý vzorek jemně přitlačil a pootočil. Zajistil se tak dokonalý kontakt vzorku s pískovým podkladem. Následně se pískový tank uzavřel víkem a vzorky se nechaly po dobu dvou dnů sytit.

Jakmile vzorky dosáhly stavu plného nasycení (pF 0), tak se zvážily na váze a hodnoty se zaznamenaly do zápisníku. Vzorky byly váženy spolu s látkou, gumičkou a sklíčkem. Při nízkých hodnotách pF bylo nutné nechat vzorek chvíli okapat, přibližně 5-10 sekund (odstranění přebytečné vody).

Na pískovém tanku se poté nastavovaly další hodnoty pF. Jakmile se dosáhlo ustáleného stavu při dané hodnotě pF, tak se vzorky zvážily (obr.31) a naměřené hodnoty se zaznamenaly. Rozestupy mezi měřeními byly následující: pF 1–4 dny, pF 1,5 – 3 dny.



Obr. 31 Vážení vzorků na přesné digitální váze.

Měření pokračovalo na písko-kaolínovém tanku hodnotou pF 2. Vzorek se umístil do 0,5 cm vody a teprve poté se opatrně doplnil destilovanou vodou do stejné úrovně jako u pískového tanku. Zde už nebylo nutné nechávat vzorky okapávat. Ustáleného stavu se při hodnotě pF 2 dosáhlo za 5 dní. Vzorky byly zváženy stejně jako u pískového tanku.

Po změření pF 2 na písko-kaolínovém tanku se vzorky použily pro měření nasycené hydraulické vodivosti (viz 4.4). Po ukončení měření se vzorky umístily do přetlakového aparátu na navlhčenou keramickou desku (obr.32). Opět se vzorky jemně přitlačily a pootočily. Následně se nádoba se vzorky zavřela a utáhla se jistíci šrouby. Zapnul se kompresor a nastavila se hodnota tlaku, kterou jsme chtěli měřit.



Obr. 32 Umisťování vzorků do přetlakového přístroje.

Poté bylo potřeba sledovat vzestup hladiny v byretě a čekat na ukončení drenáže vzorků. Probíhající měření na přetlakové aparatuře je vidět na obr. 33. Jakmile se dosáhlo rovnovážného stavu byl vypuštěn vzduch z nádoby a došlo k převážení vzorků (Kameníčková, 2013). Rozestupy mezi měřeními byly následující: pF 3 - 128 dní, pF 3,7 - 84 dní. U hodnoty pF 4,18 stále probíhá měření. Rovnovážného stavu může dosáhnout až po několika měsících, a proto není zahrnuta do výsledků této práce.

Kdyby bylo měření ukončeno, vzorky by se zvážily a poté se nechaly sušit v sušičce při teplotě 105 °C. Po vysušení by se vzorek opět zvážil. Ze získaných hmotností by pak bylo možné stanovit půdní vlastnosti.

Do práce tedy není možné stanovit hodnoty objemové vlhkosti (z důvodu ještě probíhajícího měření na podtlaku pF 4,18), ale je možné stanovit změny vlhkosti v závislosti na podtlaku a odhadnout množství snadno dostupné vody pro rostliny (pF 2 – pF 3,7).



Obr. 33 Probíhající měření pF 3 na přetlakové aparatuře

4.6 Statistická analýza

Statistická analýza byla provedena v matematickém softwaru R, který je specializovaný na statistiku. Bylo použito grafické uživatelské prostředí RStudio a programovací jazyk R.

Pro jednotlivé půdní vlastnosti (nasyčená hydraulická vodivost, retence vody) byla vypočtená popisná statistika (minimum, maximum, medián, průměr, směrodatná odchylka, koeficient variace atd.). Následně byly hodnoty vypočteny i pro kombinace měření (konsolidované + nekonsolidované vzorky z prvního i druhého měření). Pro snazší porovnání výsledku byly vykresleny krabicové grafy (boxploty).

Měřená data byla následně otestována testem normality Shapiro–Wilk. Bylo zjištěno, že skoro všechna data lze aproximovat normálním rozdělením, což je předpoklad pro možnost použití následujících statistických testů (Kubíková, 2017).

Byly udělány ANOVA testy, Tukey testy a T-testy na hladině významnosti 0,05. Jako první byla provedena jednofaktorová analýza ANOVA, která zjišťuje rozdíly průměrů mezi více skupinami prostřednictvím výpočtu testovacího kritéria. Nulová hypotéza ANOVA je následující: skutečný rozdíl ve středních hodnotách (průměrech) je nulový neboli střední hodnoty jsou stejné. (Kubíková, 2017). Pokud byla nulová hypotéza zamítnuta byl nalezen statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými daty. Na základě toho byl poté proveden Tukey test (Tukey honest significant difference test), který slouží pro mnohonásobné porovnání všech dvojic skupin v experimentu navzájem (Bedáňová, Večerek, 2019). Nakonec byly data doplněny o párové T-testy, které porovnávají, zda se výsledky v jedné skupině podstatně liší od výsledků měření ve druhé skupině.

5. Výsledky

5.1 Nasycená hydraulická vodivost

Pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti byl použit vzorec (7), který vychází z úpravy Darcyho zákona. Naměřené hodnoty K_s všech vzorků jsou uvedeny v příloze 1-4.

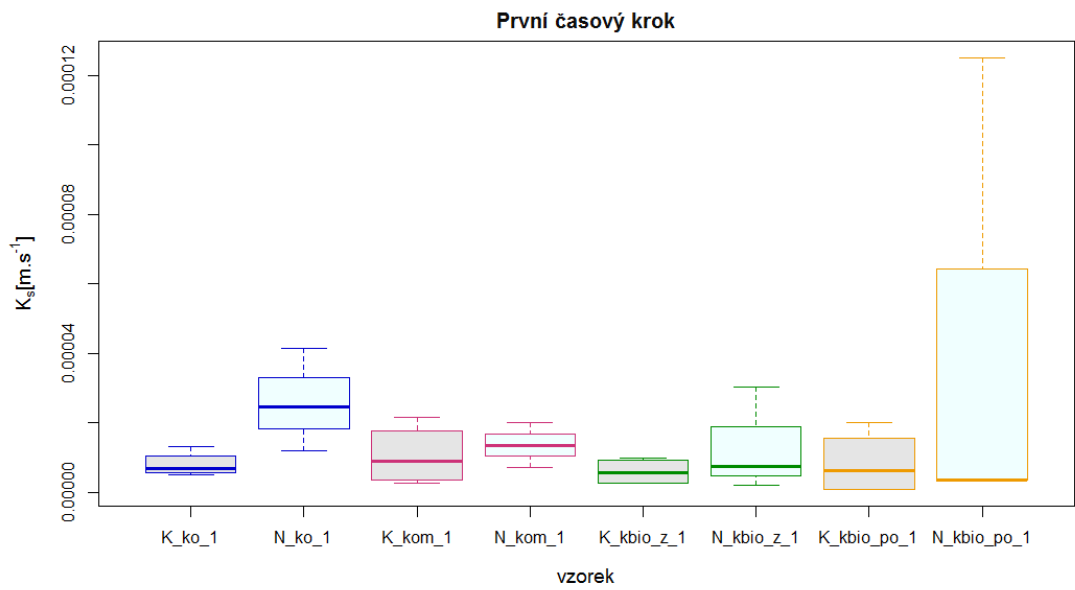
Po zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že vzorek 140N (z N_kbio_po) zkresluje výsledky, jelikož nebyl naplněn jako ostatní vzorky. A protože ho nebylo možné považovat za reprezentativní vzorek, byl z vyhodnocování dat vyřazen. Pro porovnání je v prvním i druhém časovém kroku uveden boxplot, který je včetně vyřazeného vzorku (obr.34, 38)

5.1.1 První časový krok

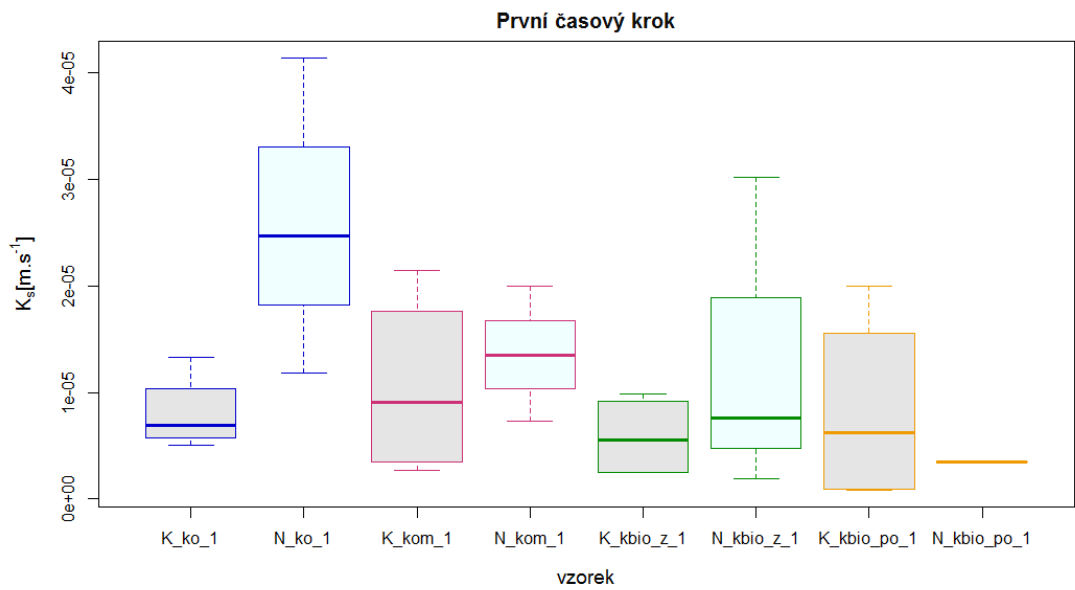
Popisná statistika pro první časový krok (pro vzorky konsolidované i nekonsolidované) je uvedena v tab. 5. Boxploty jsou na zobrazeny obr.33, 34. Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se pohybovaly v rozmezí od $3,49 \cdot 10^{-6}$ do $2,59 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Konsolidované vzorky dosahovaly převážně menších průměrných hodnot než vzorky nekonsolidované (výjimkou jsou vzorky kbio_po_1). Největší rozdíly průměrných hodnot mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky byly u ko_1. Nejnižší hodnota nasycené hydraulické vodivosti byla naměřena u konsolidovaného vzorku K_kbio_po_1 ($8,29 \cdot 10^{-7}$), nejvyšší u nekonsolidovaného vzorku N_ko_1 ($4,13 \cdot 10^{-5}$). Největší variabilitu měl nekonsolidovaný vzorek N_kbio_z_1. V tomto časovém kroku nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl p-hodnotu 0,109. T-testy při porovnání konsolidovaných a nekonsolidovaných vzorků stejné směsi nabývaly p-hodnot od 0,166 - 0,623.

	K_ko_1	N_ko_1	K_kom_1	N_kom_1	K_kbio_z_1	N_kbio_z_1	K_kbio_po_1	N_kbio_po_1
minimum	5,02E-06	1,18E-05	2,68E-06	7,29E-06	2,51E-06	1,95E-06	8,29E-07	3,45E-06
maximum	1,33E-05	4,13E-05	2,15E-05	1,99E-05	9,90E-06	3,02E-05	1,99E-05	3,52E-06
medián	6,88E-06	2,47E-05	9,07E-06	1,35E-05	5,50E-06	7,59E-06	6,18E-06	3,49E-06
průměr	8,02E-06	2,59E-05	1,06E-05	1,36E-05	5,85E-06	1,32E-05	8,28E-06	3,49E-06
směrodatná odchylka	3,65E-06	1,48E-05	8,77E-06	6,32E-06	3,88E-06	1,49E-05	9,16E-06	4,60E-08
koeficient variace	0,46	0,57	0,83	0,47	0,66	1,13	1,11	0,01

Tab. 5 Popisná statistika K_s v prvním časovém kroku pro všechny vzorky.



Obr. 34 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s všech vzorků v prvním časovém kroku, včetně vyřazeného vzorku 140N (N_{kbio_po}).



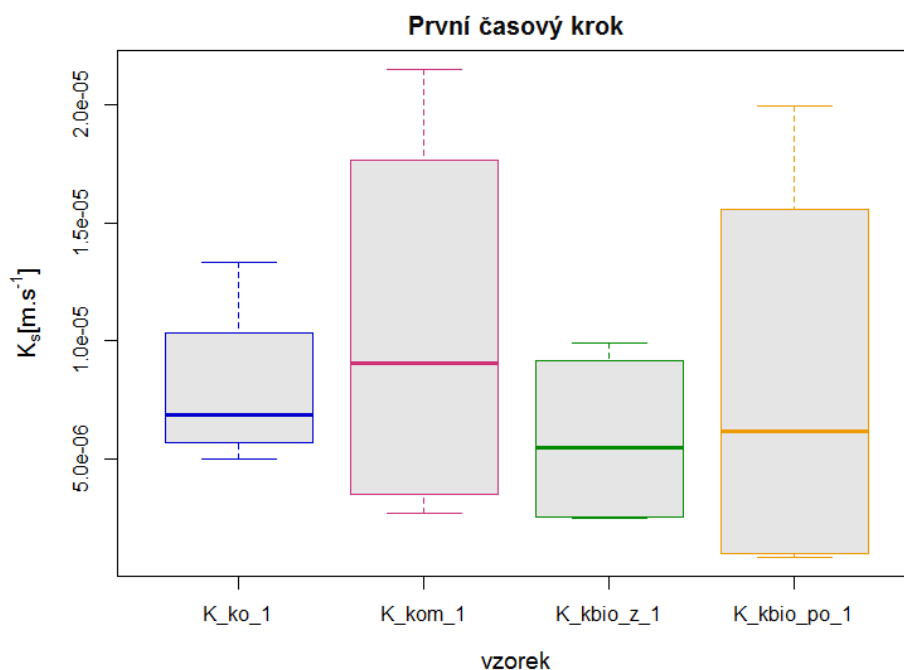
Obr. 35 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s všech vzorků v prvním časovém kroku, po vyřazení vzorku 140N.

5.1.2 První časový krok – konsolidované vzorky

Při porovnání pouze konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku bylo naměřeno nejmenší K_s u $K_{kbio_po_1}$ a největší u K_{kom_1} . Největší variability dosahovaly vzorky $K_{kbio_po_1}$. Žádné statisticky významné hodnoty nebyly zjištěny. ANOVA test měl p - hodnotu 0,814. V tab. 6 je uvedena popisná statistika a v obr. 36 jsou vykresleny boxploty. Celková popisná statistika je uvedena v příloze 5.

	K_ko_1	K_kom_1	K_kbio_z_1	K_kbio_po_1
minimum	5,02E-06	2,68E-06	2,51E-06	8,29E-07
maximum	1,33E-05	2,15E-05	9,90E-06	1,99E-05
medián	6,88E-06	9,07E-06	5,50E-06	6,18E-06
průměr	8,02E-06	1,06E-05	5,85E-06	8,28E-06
směrodatná odchylka	3,65E-06	8,77E-06	3,88E-06	9,16E-06
koeficient variace	0,46	0,83	0,66	1,11

Tab. 6 Popisná statistika K_s v prvním časovém kroku pro konsolidované vzorky.



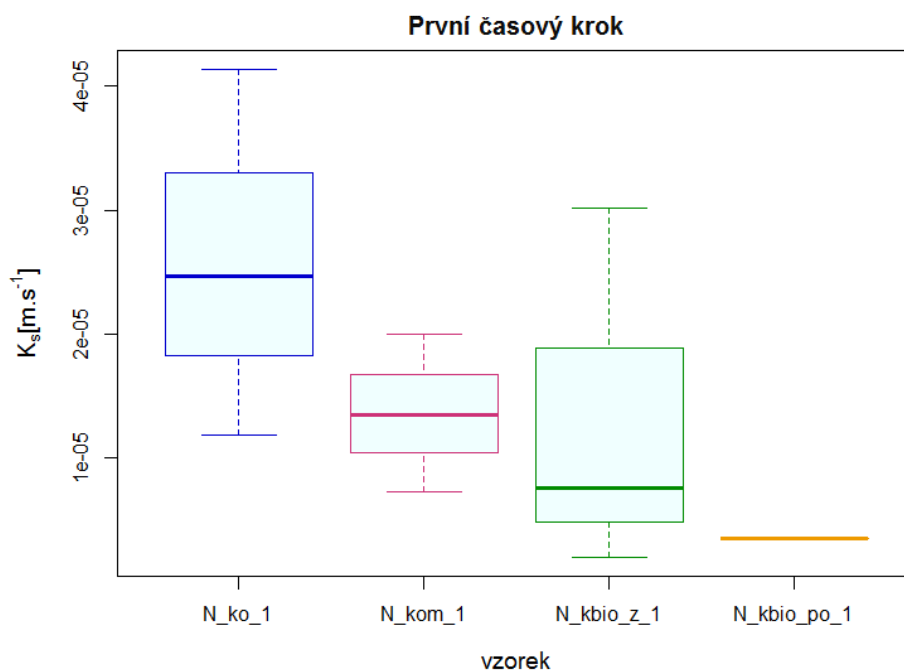
Obr. 36 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku.

5.1.3 První časový krok – nekonsolidované vzorky

Při porovnání pouze nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku bylo naměřeno nejmenší K_s u $N_kbio_z_1$ a největší u N_ko_1 . Největší variability dosahovaly vzorky $N_kbio_z_1$. Žádné statisticky významné hodnoty nebyly zjištěny. ANOVA test měl p-hodnotu 0,285. Popisná statistika je uvedena v tab. 7. Na obr. 37 jsou vykresleny boxploty. Celková popisná statistika je uvedena v příloze 6.

	N_ko_1	N_kom_1	N_kbio_z_1	N_kbio_po_1
minimum	1,18E-05	7,29E-06	1,95E-06	3,45E-06
maximum	4,13E-05	1,99E-05	3,02E-05	3,52E-06
medián	2,47E-05	1,35E-05	7,59E-06	3,49E-06
průměr	2,59E-05	1,36E-05	1,32E-05	3,49E-06
směrodatná odchylka	1,48E-05	6,32E-06	1,49E-05	4,60E-08
koeficient variace	0,57	0,47	1,13	0,01

Tab. 7 Popisná statistika K_s v prvním časovém kroku pro nekonsolidované vzorky.



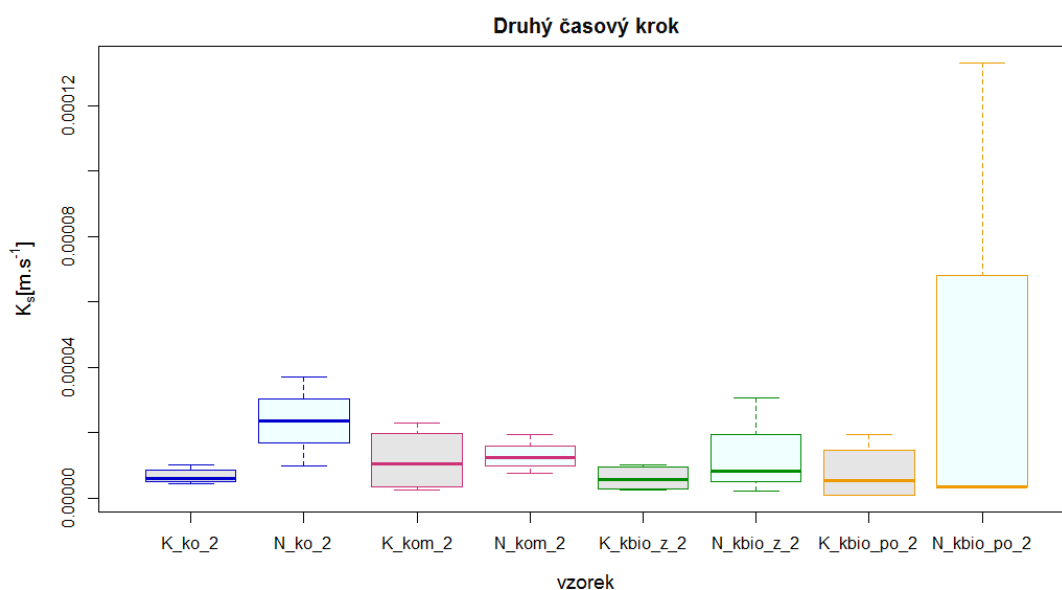
Obr. 37 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku.

5.1.4 Druhý časový krok

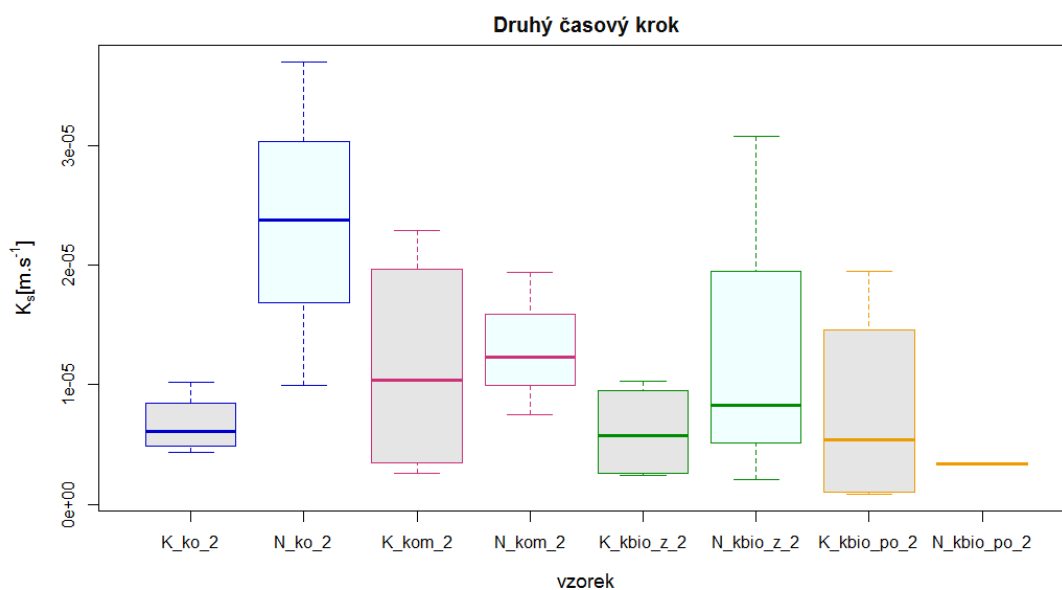
Popisná statistika pro druhý časový krok (pro vzorky konsolidované i nekonsolidované) je uvedena v tab. 8. Na obr. 38,39 jsou zobrazeny boxploty. Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se pohybovaly v rozmezí od $3,36 \cdot 10^{-6}$ do $2,35 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Menších průměrných hodnot opět dosahovaly, až na výjimku (kbio_po_2), konsolidované vzorky. Největší rozdíly průměrných hodnot mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky byly opět u ko_2. Nejnižší hodnota K_s byla naměřena u konsolidovaného vzorku K_kbio_po_2 ($8,63 \cdot 10^{-7}$), nejvyšší u nekonsolidovaného vzorku N_ko_2 ($3,69 \cdot 10^{-5}$). Největší variabilitu měl konsolidovaný vzorek K_kbio_po_2. Ani v tomto časovém kroku nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly měřených hodnot. ANOVA test měl p-hodnotu 0,143. T-testy při porovnání konsolidovaných a nekonsolidovaných vzorků stejné směsi nabývaly p-hodnot od 0,160 - 0,810.

	K_ko_2	N_ko_2	K_kom_2	N_kom_2	K_kbio_z_2	N_kbio_z_2	K_kbio_po_2	N_kbio_po_2
minimum	4,39E-06	9,97E-06	2,61E-06	7,54E-06	2,46E-06	2,11E-06	8,63E-07	3,27E-06
maximum	1,02E-05	3,69E-05	2,29E-05	1,94E-05	1,03E-05	3,07E-05	1,95E-05	3,45E-06
medián	6,07E-06	2,37E-05	1,04E-05	1,23E-05	5,78E-06	8,25E-06	5,44E-06	3,36E-06
průměr	6,69E-06	2,35E-05	1,16E-05	1,31E-05	6,07E-06	1,37E-05	7,80E-06	3,36E-06
směrodatná odchylka	2,55E-06	1,35E-05	9,71E-06	5,96E-06	4,02E-06	1,51E-05	8,80E-06	1,29E-07
koeficient variace	0,38	0,57	0,84	0,46	0,66	1,10	1,13	0,04

Tab. 8 Popisná statistika K_s ve druhém časovém kroku pro všechny vzorky.



Obr. 38 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s všech vzorků ve druhém časovém kroku, včetně vyřazeného vzorku 140N (N_{kbio_po}).



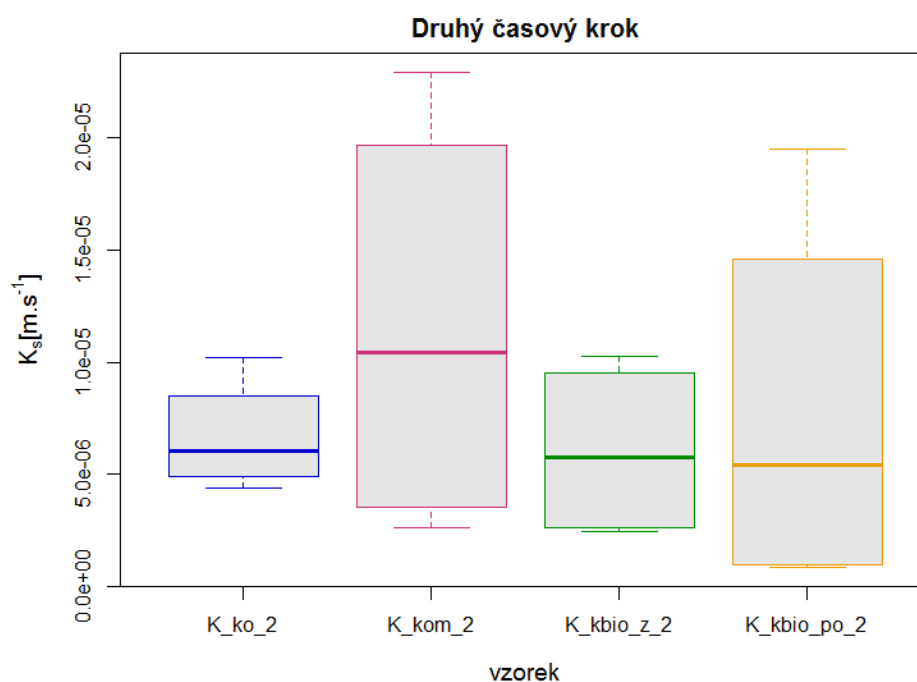
Obr. 39 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s všech vzorků ve druhém časovém kroku, po vyřazení vzorku 140N.

5.1.5 Druhý časový krok – konsolidované vzorky

Při porovnání pouze konsolidovaných vzorků ve druhém časovém kroku nebyly nalezeny žádné statisticky významné hodnoty. Nejmenší nasycená hydraulická vodivost byla zjištěna u K_kbio_po_2 a největší u K_kom_2. Největší variability dosahovaly vzorky K_kbio_po_2. ANOVA test měl p – hodnotu 0,688. Popisná statistika je uvedena v tab. 9. Boxploty jsou vykresleny na obr. 40. Celková popisná statistika je uvedena v příloze 7.

	K_ko_2	K_kom_2	K_kbio_z_2	K_kbio_po_2
minimum	4,39E-06	2,61E-06	2,46E-06	8,63E-07
maximum	1,02E-05	2,29E-05	1,03E-05	1,95E-05
medián	6,07E-06	1,04E-05	5,78E-06	5,44E-06
průměr	6,69E-06	1,16E-05	6,07E-06	7,80E-06
směrodatná odchylka	2,55E-06	9,71E-06	4,02E-06	8,80E-06
koeficient variace	0,38	0,84	0,66	1,13

Tab. 9 Popisná statistika K_s ve druhém časovém kroku pro konsolidované vzorky.



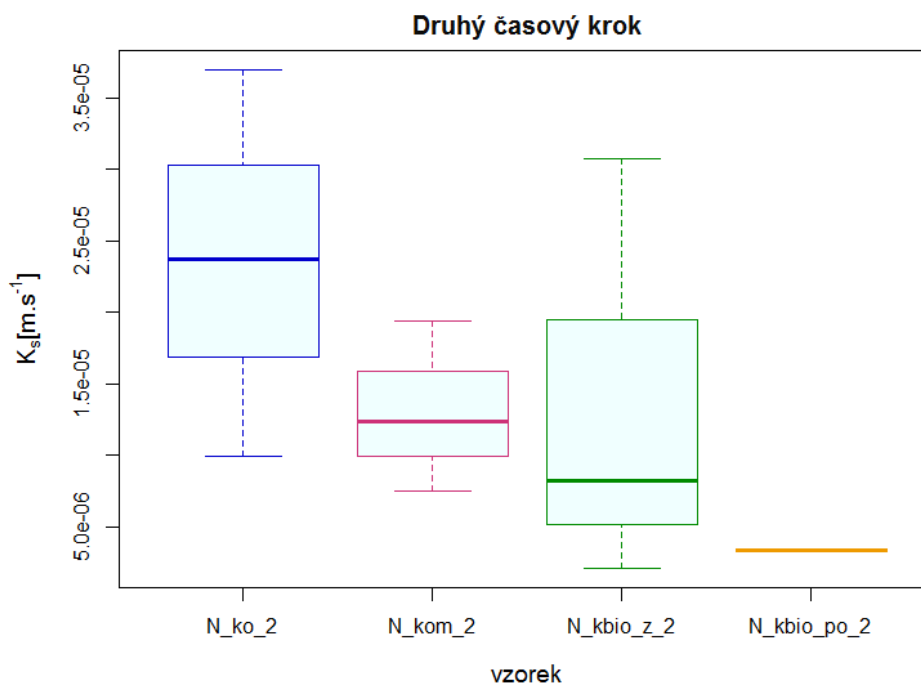
Obr. 40 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s konsolidovaných vzorků ve druhém časovém kroku.

5.1.6 Druhý časový krok – nekonsolidované vzorky

Ve druhém časovém kroku, při porovnání pouze nekonsolidovaných vzorků, nebyly nalezeny žádné statisticky významné hodnoty. ANOVA test měl p - hodnotu 0,343. Nejmenší hodnoty K_s byly zjištěny u N_kbio_z_2 a největší u N_ko_2. U vzorku N_kbio_z_2 byla zjištěna i největší variabilita. V tab. 10 je uvedena popisná statistika a na obr. 41 jsou zobrazeny boxploty. Celková popisná statistika je uvedena v příloze 8.

	N_ko_2	N_kom_2	N_kbio_z_2	N_kbio_po_2
minimum	1,18E-05	7,29E-06	1,95E-06	3,45E-06
maximum	4,13E-05	1,99E-05	3,02E-05	3,52E-06
medián	2,47E-05	1,35E-05	7,59E-06	3,49E-06
průměr	2,59E-05	1,36E-05	1,32E-05	3,49E-06
směrodatná odchylka	1,48E-05	6,32E-06	1,49E-05	4,60E-08
koeficient variace	0,57	0,47	1,13	0,01

Tab. 10 Popisná statistika K_s ve druhém časovém kroku pro nekonsolidované vzorky.



Obr. 41 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro hodnoty K_s nekonsolidovaných vzorků ve druhém časovém kroku.

5.2 Retence vody

Z důvodu stále probíhajícího měření není možné stanovit hodnoty objemové vlhkosti. Vyhodnoceny jsou tak alespoň změny vlhkosti v závislosti na podtlaku. Porovnávají jsou vzorky konsolidované a nekonsolidované.

Stejně jako u vyhodnocování nasycené hydraulické vodivosti, tak i u vyhodnocování změn vlhkosti v závislosti na podtlaku, nebyl použit vzorek 140N (z N_kbio_po).

V tab. 11 a 12 jsou zobrazeny průměrné rozdíly hmotnosti vzorků při různých pF. Největší průměrný rozdíl hmotnosti při pF 0-1 byl u konsolidovaných vzorků K_kbio_z, při pF 1-1,5 a pF 1,5-2 byl u nekonsolidovaných vzorků N_ko, při pF 2-3 a pF 2-3,7 u konsolidovaných vzorků K_kbio_po a při pF 3-3,7 u nekonsolidovaných vzorků N_kom.

Největší rozdíly mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky byli při pF 0-1 u vzorků K_bio_z, u pF 1-1,5 u vzorků N_kbio_po, při pF 1,5-2, pF 2-3, pF 2-3,7 byl největší rozdíl u konsolidovaných vzorků K_kom a při pF 3-3,7 u nekonsolidovaných vzorků N_kom. Rozdíl mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky K_ko a N_ko byl do pF 3-3,7 téměř zanedbatelný. Největší rozdíly mezi vzorky konsolidovanými a nekonsolidovanými byli u směsi kbio_po.

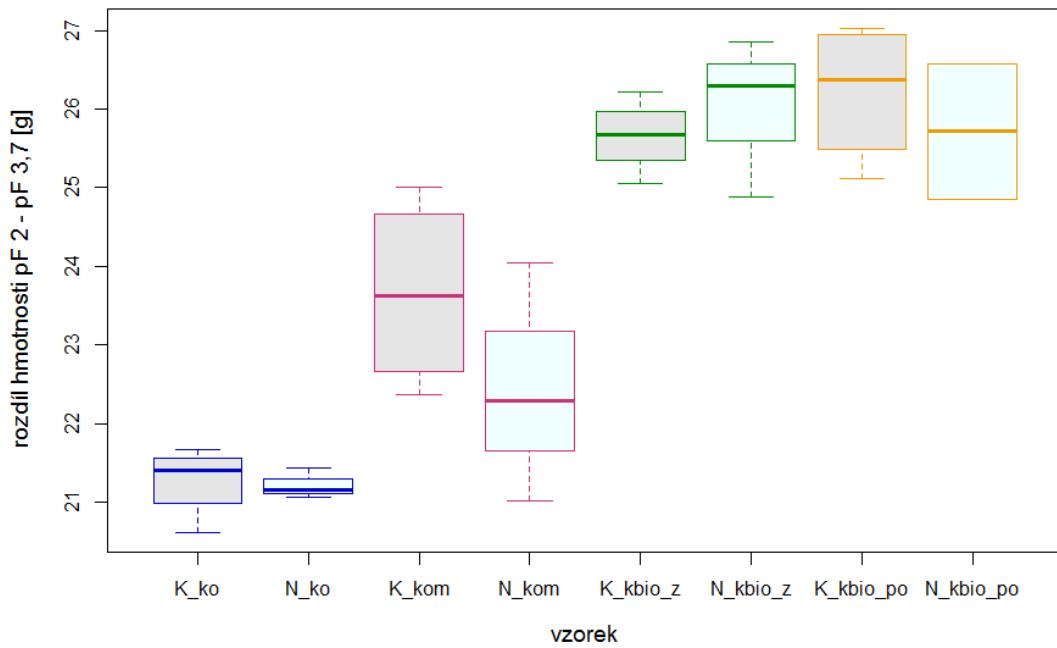
Vliv směsi kbio je nejzřetelnější při pF 2-3,7 (snadno dostupná voda pro rostliny), kdy oproti kontrolní půdě a směsi pouze s kompostem, má směs kompostu s biocharem větší průměrné hodnoty rozdílu hmotností (objemových vlhkostí [%]). U tohoto rozmezí pF byly nalezeny staticky významné rozdíly hodnoty. ANOVA test měl p-hodnotu $3,72 \cdot 10^{-7}$. Tukey test ukázal, mezi jakými vzorky byly nalezeny významné rozdíly. Pro lepší přehlednost byli vykresleny boxploty (obr.42). Výsledek ANOVA testu a Tukey testu je uveden v příloze č.9,10.

Typ	K_ko	K_kom	K_kbio_z	K_kbio_po
Konsolidace				
průměrný rozdíl hmotnosti pF 0 - pF 1 [g]	2,65	5,02	6,30	4,24
průměrný rozdíl hmotnosti pF 1 - pF 1,5 [g]	6,41	1,37	1,80	2,25
průměrný rozdíl hmotnosti pF 1,5 - pF 2 [g]	12,63	11,25	12,17	10,62
průměrný rozdíl hmotnosti pF 2 - pF 3 [g]	18,00	18,03	19,66	20,49
průměrný rozdíl hmotnosti pF 2 - pF 3,7 [g]	21,28	23,66	25,66	26,23
průměrný rozdíl hmotnosti pF 3 - pF 3,7 [g]	3,27	5,63	6,00	5,73

Tab. 11 Průměrné rozdíly hmotnosti konsolidovaných vzorků mezi pF 0 a pF 1; pF 1 a pF 1,5; pF 1,5 a pF 2; pF 2 a pF 3; pF 2 a pF 3,7; pF 3 a pF3,7

Typ	N_ko	N_kom	N_kbio_z	N_kbio_po
Nekonsolidace				
průměrný rozdíl hmotnosti pF 0 - pF 1 [g]	2,53	4,80	5,30	4,32
průměrný rozdíl hmotnosti pF 1 - pF 1,5 [g]	6,46	3,35	2,02	5,19
průměrný rozdíl hmotnosti pF 1,5 - pF 2 [g]	12,84	10,46	12,39	10,10
průměrný rozdíl hmotnosti pF 2 - pF 3 [g]	18,66	15,21	20,38	19,97
průměrný rozdíl hmotnosti pF 2 - pF 3,7 [g]	21,22	22,45	26,01	25,72
průměrný rozdíl hmotnosti pF 3 - pF 3,7 [g]	2,55	7,24	5,63	5,74

Tab. 12 Průměrné rozdíly hmotnosti nekonsolidovaných vzorků mezi pF 0 a pF 1; pF 1 a pF 1,5; pF 1,5 a pF 2; pF 2 a pF 3; pF 2 a pF 3,7; pF 3 a pF3,7



Obr. 42 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) průměrné hodnoty rozdílu hmotností pro pF 2-3,7 (snadno dostupná voda pro rostliny).

6. Diskuze

Z výsledků K_s lze u obou časových kroků vidět pokles průměrné nasycené hydraulické vodivosti u všech nekonsolidovaných vzorků oproti kontrolní půdě (N_{ko}). (Barnes, et al., 2014) zjistil, že po přidavku biocharu do půdy se hodnoty nasycené hydraulické vodivosti snížily u písčitéch půd o 92 % a u organických o 62 %. Příčinami snižování K_s může být u malých a vzájemně tvarově podobných částic biocharu snižování průtočné plochy (blokace volných pórů), které mají za účinek zpomalení toku vody půdou. Současně tyto menší částice způsobují větší retenci vody, což vede právě ke snižování hodnot K_s . U biocharu s velkými částicemi je důvodem snižování K_s nejspíše rozměrová variabilita částic, které jsou v půdě nerovnoměrně rozmístěny. Mezi póry jsou menší mezery a voda hledá obtížněji cestu skrze půdní prostředí (Lim, et al., 2016).

U konsolidovaných vzorků je pokles K_s pouze u K_{kbio_z} , u ostatních je průměrná hodnota nasycené hydraulické vodivosti oproti kontrolní půdě (K_{ko}) zvýšena. Průměrná hodnota K_s směsi K_{kom} oproti K_{ko} je v prvním časovém kroku zvýšena skoro o 32 % a v druhém už téměř o 73 %. U směsi K_{kbio_po} je průměrná hodnota K_s oproti K_{ko} v prvním časovém kroku zvětšena o necelých 5 % a ve druhém o 18 %. Důvodem nárůstu těchto hodnot může být zvýšené vyplavování kompostu a biocharu ze vzorku. Zvýšení nasycené hydraulické vodivosti například zjistil (Lim, et al., 2016) po přidání 1 % a 2 % biocharu do jílovitých hlín nebo (Barnes, et al., 2014), kdy se hodnoty K_s u jílovitých půd zvýšily o 328 %. Eventuální příčinou nárůstu hodnot K_s může být i přes všechnu opatrnost, poškození vzorků při jejich přípravě a měření nebo vznik preferenčních cest kolem stěn válečku.

Změny hodnot K_s byly celkově statisticky nevýznamné, což může být způsobeno mnoha činiteli. Jedním z nich může být množství použitého kompostu a biocharu, kdy se vliv 2 % biocharu nemusí vůbec projevit. (Jačka, et al., 2018) zjistil, že po přidání více procentního biocharu do půdy se více snižuje hodnota K_s . Porovnával půdy s 0 %, 2 % a 5 % přidaným biocharem. Největší snížení K_s , oproti půdě bez přísad, bylo u půdy obohacené o 5 % biochar. Půdy s větším množstvím přidaného biocharu výrazněji nabobtnaly, čímž snížily objemovou hmotnost a zvýšily zadržování vody v půdě. Vlivem bobtnání současně také došlo ke zpomalení nebo zamezení toku vody v půdních pórech.

Účinek použití směsi kompostu s biocharem byl vidět u porovnání průměrných rozdílů hmotností. Nejpatrnější vliv byl při pF 2-3,7, kdy rozdíly objemových vlhkostí [%] byly u vzorků s biocharem (k_{bio_z} i k_{bio_po}) okolo

26 %. Tyto hodnoty by mohly značit větší množství dostupné vody pro rostliny po delší čas. Značný vliv účinku biocharu přidaného do půdy na retenci vody v půdě shledal např. (Verheijen, et al., 2010), (Głąb, et al., 2018). (Abideen, et al., 2017) zjistil, že přidavek kompostu a kompostu s biocharem vede ke zvýšení retenční kapacity a zvýšenému výskytu uhlíku v půdě. Což má za účinek zlepšení dostupnosti živin a vody pro rostliny. Kombinaci biocharu s kompostem a jejich vliv na půdu také zkoumal (Trupiano, et al., 2017). Ten zjistil, že i půda samostatně s kompostem či biocharem má pozitivní účinek na růst rostlin, zvýšení úrodnosti půdy či chemické vlastnosti půdy. Nicméně žádné pozitivní synergické účinky se ve výzkumu neprokázaly⁵. Ke stejnému závěru došel i (Seehausen, et al., 2017), který se synergií kompostu s biocharem také zabýval. Naproti tomu (Głąb, et al., 2018), (Fischer, Glaser, 2012) i (Agegnehu, et al., 2015) synergické účinky pozorovali.

Při přípravě námi použité směsi půdy s kompostem a 2 % biocharem (Gallagher, 2019) pozoroval při kompostování rychlejší rozpad materiálu u směsi s biocharem (nejrychlejší rozpad nastal u nepoužité směsi s 5 % biocharem). Kromě rychlejšího rozpadu materiálu byl u 5 % biocharu pozorován příjemný zemitý zápach, zatímco u půdy s kompostem a 2 % biocharem byl zápach velice nepříjemný. Tato skutečnost by mohla znamenat uvolňování plynného amoniaku a ztrátu vzácného dusíku. Směsi s biocharem se staly rychleji homogennější a časem ztratily zápach, zatímco směs pouze s kompostem měla slizovitou texturu a zápach nezmizel. Rychlejší rozpad organické hmoty při použití 2,5 % biocharu, jako přídavku do půdy, zjistily i (Jain, et al., 2019)). Lze se domnívat, že se zvyšováním procentuálního množství biocharu přidaného do půdy bude rozklad organické hmoty rychlejší. Bohužel, účinek použití různých dávek biocharu při kompostování a jeho vlivu na rychlejší rozpad organické hmoty, je stále nejasný.

Je nutno brát v potaz, že měření proběhlo za určitých omezení, která by měla být brána na zřetel při posuzování výsledku a možnosti využití poznatků v praxi. Měření proběhlo v laboratoři, což mělo jisté výhody. Například neměnné podmínky okolního prostředí (humidita, teplota) nebo možnost kontroly půdy při stabilizaci. Za nevýhody lze považovat velikost odebraných vzorků nebo nemožnost pozorovat půdu v přirozeném prostředí (izolace od vlivů vegetace, půdních organismů – především žížal a bioturbance) (Hardie, et al., 2014). Bylo zkoumáno pouze sedm vzorků od každé směsi, které se poté ještě rozdělily na vzorky konsolidované a nekonsolidované. Větší počet vzorků by mohl přinést průkaznější výsledné hodnoty, které by mohl být statisticky významnější.

⁵ Synergie = Situace, kdy výsledný efekt zároveň působících složek je větší než výsledek účinků jednotlivých složek.

7. Závěr

Bakalářská práce se zabývá účinkem přidaných doplňků (kompostu a biocharu) na hydro-fyzikální vlastnosti nivní půdy (nasycenou hydraulickou vodivostí a retencí vody).

Průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se u všech nekonsolidovaných vzorků (v prvním i druhém časovém kroku) oproti kontrolní půdě (N_{ko}) snížily. Největší pokles průměrné hodnoty K_s u nekonsolidovaných vzorků (oproti N_{ko}) byl zaznamenán v prvním časovém kroku u směsi $N_{kbio_po_1}$ a ve druhém časovém kroku u směsi $N_{kbio_z_2}$. Největší pokles K_s u konsolidovaných vzorků (oproti K_{ko}) je u směsi K_{kbio_z} v obou časových krocích. U ostatních konsolidovaných směsí průměrné hodnoty K_s oproti kontrole (K_{ko}) vzrostly. Největší rozdíly průměrných hodnot mezi konsolidovanými a nekonsolidovanými vzorky byly u půdy bez přísad (ko). Směs kompostu s 2 % biocharem přidaným od začátku kompostování (K_{kbio_z}) měla největší účinek na snížení průměrné hodnoty K_s u konsolidovaných vzorků. A u nekonsolidovaných vzorků měla největší účinek na snížení K_s směs kompostu s 2 % biocharem přidaným po kompostování (N_{kbio_po}). Půda s přísadkou kompostu a biocharu v obou případech (konsolidace, nekonsolidace) vedla k nejnižším průměrným hodnotám K_s . Statisticky významné rozdíly měřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti však nebyly nalezeny.

Největší pokles hmotnosti vzorků při měření retence vody v půdě nastal mezi hodnotami pF 2-3. Vliv směsi kompostu s biocharem byl viditelný u porovnání průměrných rozdílů objemových vlhkostí při pF 2-3,7. Obsah snadno dostupné vody byl u vzorků s biocharem (k_{bio_z} i k_{bio_po}) přibližně 26 %. U půdy s kompostem, bez biocharu, se hodnota pohybovala od 22 % do 24 % (v závislosti na konsolidaci). Nejnižší hodnoty byly zjištěny u kontroly, okolo 21 %. Vzorky s přísadkou kompostu a biocharu do půdy (k_{bio}) vykazovaly nejvyšší obsah snadno využitelné vody pro rostliny. U tohoto rozmezí byly nalezeny statisticky významné rozdíly.

Lze tedy přepokládat, že půda s přísadkou kompostu a biocharu má pozitivní účinek na retenci vody oproti neošetřené půdě a lepší účinky oproti použití samotného kompostu. Tyto přísadky do půdy by tak mohly vést ke zmírnění dopadu zemědělského sucha (větší množství zadržené vody pro rostliny). Pro potvrzení a zobecnění je nezbytné udělat více experimentů na různých půdách, s odlišnými druhy kompostů a typy biocharu. Rovněž je nutné otestovat účinek přísadků přímo v terénu, jelikož vzorky v uměle vytvořených laboratorních podmínkách se mohou chovat jinak než po aplikaci

v terénu. Je potřeba se také zamyslet nad skutečnou použitelností biocharu, zejména nad množstvím organické hmoty, která je potřeba pro jeho výrobu. Je také nutné zvážit, zda jeho pozitivní účinek na půdu předčí náklady vložené do jeho výroby.

Téma účinků biocharu či kompostu na hydro-fyzikální vlastnosti půdy je stále aktuální. Bylo provedeno velké množství pokusů prokazujících většinou vliv těchto přísadků na půdu a její vlastnosti. Studie založené na synergii kompostu a biocharu se ale ve svých závěrech rozcházejí. Společné působení přísadků pozorovali např. (Głab, et al., 2018), (Abideen, et al., 2017), avšak autoři (Seehausen, et al., 2017) a (Trupiano, et al., 2017) synergii vyvracejí.

Pro potenciální navazující experimenty by bylo vhodné testovat vliv množství přidaného biocharu na proces kompostování. Pro potvrzení účinků přísadku by experiment měl proběhnout v laboratorních podmínkách i v terénu.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

Abideen Z., Koyro H. W., Huchzermeyer B., Gul B., Khan M. A., 2017: Impact of a Biochar or a Compost-Biochar Mixture on Water relation, Nutrient uptake and Photosynthesis of Phragmites karka. *Pedosphere*. P.1-22.

Agegnehu, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., Bird, M.I., 2016: Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment* 543. P. 295–306.

Amlinger, F., Peyr S., Geszti J., Dreher P., Weinfurtner K., Nortcliff S., 2007: Beneficial effects of compost application on fertility and productivity of soils. Federal Ministry for Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Austria. P. 225.

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.

Bedáňová I., Večerek V., 2007: Základy statistiky pro studující veterinární medicíny a farmacie (online) [cit. 2019.02.25], dostupné z <<https://cit.vfu.cz/stat/FVL/Skripta.pdf>>.

Camps, M., Tomlinson, T., 2015: The Use of Biochar in Composting. International Biochar Initiative. P.1-5.

Čermák, P., 2012: Vliv půdní struktury na hydraulické vlastnosti půdy. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Brno. 62 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“.

Dohányos, M., 2006: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů (online) [cit. 2019.02.07], dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.

Eijkelkamp, 2013: Operating instructions – 09.02 laboratory-permeameters. Eijkelkamp Soil & Water, Giesbeek , 14 s.

Falcová, M., 2018: Vliv rozdílných biocharů na vybrané hydrofyzikální vlastnosti písčitohlinité půdy. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 57 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

Fischer, D., Glaser, B., 2012: Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In: Kumar, S. (ed.): Management of organic waste. Intech Open, Shanghai. P.167-198.

Flowerdew, B., 2010: Kompost. Metafora, spol.s.r.o., Praha, s 112.

Gallagher, B. N., 2019: Diplomová práce in prep., Česká zemědělská univerzita, Praha, „nepublikováno“.

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.

Głąb, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., Tabor, S., 2018: Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. Geoderma 315. P. 27–35.

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.

Hillel, D., 2004: Introduction to environmental soil physics. Academic Press, San Diego, USA.

Hnatajková, E., 2016: Vliv sorbentů na retenční čáru kontaminované nívní půdy. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 59 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

International Biochar Initiative, ©2018: About biochar (online) [cit. 2019.03.11], dostupné z < <https://biochar-international.org> >.

Jačka L., Trakal L., Ouředníček P., Pohořel M., Šípek V., 2018: Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. Soil & Tillage Research. P. 181-185.

Jain M.S., Siddhartha P., Kalamdhad A.S., 2019: Utilization of Biochar as an amendment during lignocellulose waste composting: impact on composting physics and Realization (probability) amongst physical properties. Process Safety and Environmental Protection, Volume 121. P. 229-238.

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.

Kalina, M., 2014: Hnojení v zahradě. Grada, Praha, 114 s.

Kameníčková, I., 2013: Návody do cvičení (VHK). Skriptum, VUT, Brno.

Káňa, J., 2019: Biouhel (online) [cit. 2019.03.11], dostupné z < <http://biouhel.cz/> >.

FAPPZ, 2015: Metodika průzkumu hydroopedologických podmínek na území ovlivněném vodní erozí. FAPPZ ČZU, Praha, 40 s.

Kodešová, R., 2005: Modelování v pedologii. Skriptum, ČZU, Praha.

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.

Kuraš, M., 2014: Odpady a jejich zpracování. Vodní zdroje Ekomonitor spol. s.r.o., Chrudim, 343 s.

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

Kutílek, M., 1978: Vodohospodářská pedologie. SNTL- ALFA, Praha.

Kutílek, M., Kuráž, V., Císlerová, M., 2000: Hydroopedologie 10. Skriptum, Fakulta stavební ČVUT, Praha.

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, Q., 2017: Stanovení hydraulických parametrů nivní půdy a jejich časoprostorových změn. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 66 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

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

Pavlásek, J., Jačka, L., 2014: Hydroopedologie. Skriptum, ČZU, Praha.

Pavlásek, J., Jačka, L., 2014: Infiltrace vody do půdního prostředí. Skriptum, ČZU, Praha.

Pečenka, K., 2008: Jak chápat výsledky chemických rozborů půdy (online) [cit. 2019.03.26], dostupné z <<http://www.czgreen.com/2008/11/jak-chapat-vysledky-chemicky-rozboru-pudy/>>.

Pokorná D., Zábranská J. 2007: Hydrologie a hydroopedologie. VŠCHT, Praha.

Reynolds W., Elrick D., Youngs E., Booltink H., Bouma J., 2002: Saturated and field-saturated water flow parameters: laboratory methods. In: Dane J., Topp G., (eds.): *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soil Science Society of America, Madison. P. 802-804.

Seehausen M. L., Gale, N., Dranga, S., Hudson V., Liu N., Michener J., Thurston E., Williams C., Smith S.M., Thomas S.C., 2017: Is There a Positive Synergistic Effect of Biochar and Compost Soil Amendments on Plant Growth and Physiological Performance? *Agronomy* 7,13. P. 1-15.

Stoklásková, A., 2012: Stanovení hydraulických charakteristik půdy ve vybrané lokalitě. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Brno. 134 s. (diplomová práce). „nepublikováno“.

Šrámek, O., Kuchovský, T., 2003: *Základy hydrogeologie*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, Brno. 177 s.

Trupiano, D., Cocozza, C., Baronti S., Amendola, C., Vaccari, F.P., Lustrato, G., Di Lonardo, S., Fantasma, F., Tognetti, R., Scippa, G.S., 2017: The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Hindawi International Journal of Agronomy*, vol. 2017. P. 1-12.

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., 1994: *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha.

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

9. Přílohy

Kontrola – půda bez přísadků					
číslo válečku	K _s - průměr		číslo válečku	K _s - průměr	
	první časový krok	druhý časový krok		první časový krok	druhý časový krok
konsol.	[m/s]	[m/s]	nekonsol.	[m/s]	[m/s]
125k	5,02E-06	4,39E-06	77n	1,18E-05	9,97E-06
33k	7,38E-06	6,77E-06	79n	2,47E-05	2,37E-05
63k	1,33E-05	1,02E-05	73n	4,13E-05	3,69E-05
50k	6,38E-06	5,37E-06			

Příloha č. 3 Výsledné průměrné hodnoty K_s pro oba časové kroky pro půdu bez přísadků.

Půda s přísadkem kompostu v poměru 60/40					
číslo válečku	K _s - průměr		číslo válečku	K _s - průměr	
	první časový krok	druhý časový krok		první časový krok	druhý časový krok
konsol.	[m/s]	[m/s]	nekonsol.	[m/s]	[m/s]
89k	2,15E-05	2,29E-05	72n	7,29E-06	7,54E-06
82k	1,38E-05	1,64E-05	111n	1,35E-05	1,23E-05
101k	2,68E-06	2,61E-06	48n	1,99E-05	1,94E-05
81k	4,34E-06	4,43E-06			

Příloha č. 1 Výsledné průměrné hodnoty K_s pro oba časové kroky pro půdu s přísadkem kompostu v poměru 60/40.

Půda s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu od začátku kompostování					
číslo válečku	K _s - průměr		číslo válečku	K _s - průměr	
	první časový krok	druhý časový krok		první časový krok	druhý časový krok
konsol.	[m/s]	[m/s]	nekonsol.	[m/s]	[m/s]
29k	2,55E-06	2,80E-06	116n	7,59E-06	8,25E-06
137k	8,45E-06	8,75E-06	25n	3,02E-05	3,07E-05
132k	9,90E-06	1,03E-05	26n	1,95E-06	2,11E-06
139k	2,51E-06	2,46E-06			

Příloha č. 3 Výsledné průměrné hodnoty K_s pro oba časové kroky pro půdu s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu od začátku kompostování.

Půda s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu přidaných po kompostování					
číslo válečku	K _s - průměr		číslo válečku	K _s - průměr	
	první časový krok	druhý časový krok		první časový krok	druhý časový krok
konsol.	[m/s]	[m/s]	nekonsol.	[m/s]	[m/s]
84k	1,10E-06	1,13E-06	115n	3,45E-06	3,27E-06
124k	8,29E-07	8,63E-07	133n	3,52E-06	3,45E-06
54k	1,99E-05	1,95E-05	140n	1,25E-04	1,33E-04
22k	1,13E-05	9,76E-06			

Příloha č. 4 Výsledné průměrné hodnoty K_s pro oba časové kroky pro půdu s přidavkem kompostu v poměru 60/40 a 2 % biocharu přidaných po kompostování.

	K_ko_1	K_kom_1	K_kbio_z_1	K_kbio_po_1
nbr.val	4,00E+00	4,00E+00	4,00E+00	4,00E+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	5,02E-06	2,68E-06	2,51E-06	8,29E-07
max	1,33E-05	2,15E-05	9,90E-06	1,99E-05
range	8,28E-06	1,88E-05	7,39E-06	1,91E-05
sum	3,21E-05	4,23E-05	2,34E-05	3,31E-05
median	6,88E-06	9,07E-06	5,50E-06	6,18E-06
mean	8,02E-06	1,06E-05	5,85E-06	8,28E-06
SE.mean	1,83E-06	4,38E-06	1,94E-06	4,58E-06
CI.mean.0.95	5,81E-06	1,39E-05	6,18E-06	1,46E-05
var	1,33E-11	7,68E-11	1,51E-11	8,39E-11
std.dev	3,65E-06	8,77E-06	3,88E-06	9,16E-06
coef.var	4,55E-01	8,29E-01	6,64E-01	1,11E+00
skewness	5,94E-01	2,21E-01	4,45E-02	2,68E-01
skew.2SE	2,93E-01	1,09E-01	2,20E-02	1,32E-01
kurtosis	-1,78E+00	-2,17E+00	-2,39E+00	-2,14E+00
kurt.2SE	-3,40E-01	-4,14E-01	-4,56E-01	-4,08E-01
normtest.W	8,58E-01	9,12E-01	8,12E-01	8,72E-01
normtest.p	2,53E-01	4,91E-01	1,27E-01	3,08E+00

Příloha č. 5 Celková popisná statistika konsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku včetně testu normality Shapiro–Wilk.

	N_ko_1	N_kom_1	N_kbio_z_1	N_kbio_po_1
nbr.val	3,00E+00	3,00E+00	3,00E+00	2,00E+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	1,00E+00
min	1,18E-05	7,29E-06	1,95E-06	3,45E-06
max	4,13E-05	1,99E-05	3,02E-05	3,52E-06
range	2,95E-05	1,26E-05	2,82E-05	6,51E-08
sum	7,78E-05	4,07E-05	3,97E-05	6,97E-06
median	2,47E-05	1,35E-05	7,59E-06	3,49E-06
mean	2,59E-05	1,36E-05	1,32E-05	3,49E-06
SE.mean	8,54E-06	3,65E-06	8,62E-06	3,26E-08
CI.mean.0.95	3,67E-05	1,57E-05	3,71E-05	4,14E-07
var	2,19E-10	3,99E-11	2,23E-10	2,12E-15
std.dev	1,48E-05	6,32E-06	1,49E-05	4,60E-08
coef.var	5,70E-01	4,66E-01	1,13E+00	1,32E-02

Příloha č. 6 Celková popisná statistika nekonsolidovaných vzorků v prvním časovém kroku.

	K_ko_2	K_kom_2	K_kbio_z_2	K_kbio_po_2
nbr.val	4,00E+00	4,00E+00	4,00E+00	4,00E+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	4,39E-06	2,61E-06	2,46E-06	8,63E-07
max	1,02E-05	2,29E-05	1,03E-05	1,95E-05
range	5,84E-06	2,03E-05	7,80E-06	1,86E-05
sum	2,68E-05	4,63E-05	2,43E-05	3,12E-05
median	6,07E-06	1,04E-05	5,78E-06	5,44E-06
mean	6,69E-06	1,16E-05	6,07E-06	7,80E-06
SE.mean	1,28E-06	4,85E-06	2,01E-06	4,40E-06
CI.mean.0.95	4,06E-06	1,54E-05	6,40E-06	1,40E-05
var	6,52E-12	9,42E-11	1,62E-11	7,75E-11
std.dev	2,55E-06	9,71E-06	4,02E-06	8,80E-06
coef.var	3,82E-01	8,38E-01	6,62E-01	1,13E+00
skewness	4,48E-01	1,28E-01	4,28E-02	3,52E-01
skew.2SE	2,21E-01	6,30E-02	2,11E-02	1,74E-01
kurtosis	-1,89E+00	-2,27E+00	-2,38E+00	-2,05E+00
kurt.2SE	-3,62E-01	-4,33E-01	-4,55E-01	-3,92E-01
normtest.W	9,22E-01	8,97E-01	8,32E-01	8,70E-01
normtest.p	5,46E-01	4,18E-01	1,74E-01	2,96E-01

Příloha č. 7 Celková popisná statistika konsolidovaných vzorků ve druhém časovém kroku včetně testu normality Shapiro–Wilk.

	N_ko_2	N_kom_2	N_kbio_z_2	N_kbio_po_2
nbr.val	3,00E+00	3,00E+00	3,00E+00	2,00E+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	1,00E+00
min	9,97E-06	7,54E-06	2,11E-06	3,27E-06
max	3,69E-05	1,94E-05	3,07E-05	3,45E-06
range	2,70E-05	1,19E-05	2,86E-05	1,83E-07
sum	7,06E-05	3,93E-05	4,11E-05	6,72E-06
median	2,37E-05	1,23E-05	8,25E-06	3,36E-06
mean	2,35E-05	1,31E-05	1,37E-05	3,36E-06
SE.mean	7,78E-06	3,44E-06	8,70E-06	9,15E-08
CI.mean.0.95	3,35E-05	1,48E-05	3,74E-05	1,16E-06
var	1,82E-10	3,56E-11	2,27E-10	1,68E-14
std.dev	1,35E-05	5,96E-06	1,51E-05	1,29E-07
coef.var	5,73E-01	4,56E-01	1,10E+00	3,85E-02

Příloha č. 8 Celková popisná statistika nekonsolidovaných vzorků ve druhém časovém kroku.

```

          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
ind          7 109.41  15.631    18.07 3.72e-07 ***
Residuals   19  16.44   0.865
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
5 observations deleted due to missingness

```

Příloha č. 9 Výsledky ANOVA testu pro průměrné rozdíly hmotnosti při pF 2-3,7

```

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

```

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

```

$ind
      diff      lwr      upr    p adj
N_ko-K_ko -0.05833333 -2.46679934 2.350133 1.0000000
K_kom-K_ko 2.38500000  0.15519376 4.614806 0.0309634
N_kom-K_ko 1.17833333 -1.23013268 3.586799 0.7115478
K_kbio_z-K_ko 4.38250000  2.15269376 6.612306 0.0000518
N_kbio_z-K_ko 4.73833333  2.32986732 7.146799 0.0000511
K_kbio_po-K_ko 4.95000000  2.72019376 7.179806 0.0000096
N_kbio_po-K_ko 4.44000000  1.70905624 7.170944 0.0005569
K_kom-N_ko 2.44333333  0.03486732 4.851799 0.0453086
N_kom-N_ko 1.23666667 -1.33809180 3.811425 0.7289342
K_kbio_z-N_ko 4.44083333  2.03236732 6.849299 0.0001193
N_kbio_z-N_ko 4.79666667  2.22190820 7.371425 0.0001045
K_kbio_po-N_ko 5.00833333  2.59986732 7.416799 0.0000241
N_kbio_po-N_ko 4.49833333  1.61966585 7.377001 0.0008777
N_kom-K_kom -1.20666667 -3.61513268 1.201799 0.6882522
K_kbio_z-K_kom 1.99750000 -0.23230624 4.227306 0.0993198
N_kbio_z-K_kom 2.35333333 -0.05513268 4.761799 0.0583469
K_kbio_po-K_kom 2.56500000  0.33519376 4.794806 0.0175076
N_kbio_po-K_kom 2.05500000 -0.67594376 4.785944 0.2333111
K_kbio_z-N_kom 3.20416667  0.79570066 5.612633 0.0047591
N_kbio_z-N_kom 3.56000000  0.98524153 6.134758 0.0032499
K_kbio_po-N_kom 3.77166667  1.36320066 6.180133 0.0008567
N_kbio_po-N_kom 3.26166667  0.38299919 6.140334 0.0198003
N_kbio_z-K_kbio_z 0.35583333 -2.05263268 2.764299 0.9995160
K_kbio_po-K_kbio_z 0.56750000 -1.66230624 2.797306 0.9861546
N_kbio_po-K_kbio_z 0.05750000 -2.67344376 2.788444 1.0000000
K_kbio_po-N_kbio_z 0.21166667 -2.19679934 2.620133 0.9999851
N_kbio_po-N_kbio_z -0.29833333 -3.17700081 2.580334 0.9999543
N_kbio_po-K_kbio_po -0.51000000 -3.24094376 2.220944 0.9978341

```

Příloha č. 10 Výsledky Tukey testu pro průměrné rozdíly hmotnosti při pF 2-3,7