

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**

Studijní obor: Krajinné inženýrství



**Vliv sorbentů na retenční čáru kontaminované
nivní půdy**

**Influence of sorbents on retention curve of contaminated
fluvisol**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Autor:

Bc. Eva Hnatajková

Praha, prosinec 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Eva Hnatajková

Krajinné inženýrství

Název práce

Vliv sorbentů na retenční čáru kontaminované nivní půdy

Název anglicky

Influence of sorbents on retention curve of contaminated fluvisol

Cíle práce

Stanovit vliv vybraných sorbentů na tvar retenční čáry.

Metodika

Stručně charakterizovat použité sorbenty a jejich význam na základě současné literatury.

Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu sorbentů na hydraulické charakteristiky.

Provést měření retenční čáry na materiálech s různými sorbenty. Porovnat výsledky měření s půdou bez sorbentů. Statisticky vyhodnotit data a určit vliv sorbentů na testované půdě.

Doporučený rozsah práce

50stran

Klíčová slova

Biochar, Amorfni oxid manganu, vliv sorbentů, retenční čára

Doporučené zdroje informací

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G., 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202–203, 183–191.
- Eijkelkamp, 2007. Operating instructions. 08.11 Sandbox for pF determination. <https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=e184df12>, cit. 30.7. 2015.
- Eijkelkamp, 2014. Operating instructions. 08.11 Sand-Kaolin box for pF determination. https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=M10802e_Sand_kaolin_box_53fb.pdf, cit. 30.7. 2015.
- Gerardo Ojeda, Stefania Mattana, Anna Àvila, Josep Maria Alcañiz, Martin Volkmann, Jörg Bachmann, Are soil–water functions affected by biochar application?, *Geoderma*, Volumes 249–250, July 2015, Pages 1-11
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany.
- Simon Jeffery, Marcel B.J. Meinders, Cathelijne R. Stoof, T. Martijn Bezemer, Tess F.J. van de Voorde, Liesje Mommer, Jan Willem van Groenigen, Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil, *Geoderma*, Volumes 251–252, August 2015, Pages 47-54.
- Trakal, L., Komárek, M., Száková, J., Zemanová, V., Tlustoš, P., 2011. Biochar application to metal-contaminated soil: Evaluating of Cd, Cu, Pb and Zn sorption behavior using single- and multi-element sorption experiment. *Plant, Soil and Environment* 57(8), 372–380.
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., Diafas, I., 2010. Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 ZS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 15. 12. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma: “Vliv sorbentů na retenční čáru kontaminované nivní půdy” vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. a uvedla v ní všechny použité literární a jiné odborné zdroje.

V Praze dne 15.12 2016

Podpis autora.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Poskytnuté literární zdroje, odborné rady, cenné připomínky, ochotné jednání, vstřícný přístup a hlavně velkou trpělivost. Další velké díky patří mé rodině, která se mě snažila v práci plně podporovat a díky níž mi bylo umožněno celé studium na vysoké škole.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem sorbentů na retenční křivku kontaminované nivní půdy (půdní typ fluvisol) a porovnáním těchto retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou, do které byl sorbent aplikován. Jako sorbenty byly použity biochar (BC), amorfni oxid manganu (AMO) a jejich kombinace. Půdní vzorky byly odebrány ve specifické oblasti v blízkosti řeky Litavky ve Středočeském kraji.

K pokusu byly využity dva rozdílné typy vzorků. První typ vzorků byl odebrán z kolonových experimentů a druhý typ vzorků byl odebrán přímo z rostlého terénu. Všechny vzorky byly odebrány do Kopeckého válečku o objemu 100 cm³. Měření retenčních čar bylo provedeno přímou metodou v laboratoři. Pro laboratorní stanovení retenčních čar byla použita klasická souprava přístrojů. Pískový tank, písko-kaolínový tank a přetlakové aparáty. Naměřená data byla proložena modelem van Genuchten. Porovnávané hodnoty jsou objemová hmotnost, parametry podle vztahu van Genuchten (θ_s , θ_R , α , n) a hodnoty pF (0; 1,0; 2,0; 2,7; 3,0; 3,7; 4,18). Porovnání půd ošetřených různými sorbenty bylo založeno na průměru, směrodatné odchylce a rozdílu a poměru průměrů.

Určitý vliv sorbentů na tvar retenční čáry byl naměřen. Zejména vliv biocharu, ve vyšších podtlacích byl výrazný. V práci se nám potvrdila např. i hypotéza podle *VERHEIJEN et al. (2010)*, že biochar zvyšuje celkovou retenci půdní vody, ale nezvyšuje obsah vody využitelný rostlinami.

Vliv AMO na retenční křivku byl zanedbatelný. Tedy sorbent AMO má pouze velmi malý vliv na změnu zadržování vody v testované půdě. Vliv kombinovaného sorbentu (AMO + BC) na retenční křivku byl výraznější než aplikace pouze samotného sorbentu AMO. Tato kombinace sorbentů má vliv na zadržování vody v půdě v závislosti na daném podtlaku.

Klíčová slova: biochar, amorfni oxid manganu, vliv sorbentů, retenční čára

Abstract

The thesis deals with the influence of sorbents on the retention curve of the contaminated alluvial soil (fluvisol). The retention curves of soil without sorbents (reference soil) are compared with the soils enriched by the following sorbents. Biochar (BC), amorphous manganese oxide (AMO) and combination of (AMO + BC). Soils sample were collected is specific uncultivated area in the valley of Litavka river (located in the central part of the Czech republic).

Two different types of samples were used for measurement of retention curves. First type of the samples were collected from the column experiments and second type were the samples collected in the field. All samples were extracted using in Kopecky rings (100 cm³). The measurement of the retention curves was performed by a direct method in the laboratory. For laboratory determination of the retention curves classical set of instruments were used (sandbox, sand-kaolin box and pressure apparatuses). The measured data were fitted using van Genuchten. Values compared are the bulk density, parameters of van Genuchten model (θ_s , θ_R , α , n), and values pF (0; 1.0; 2.0; 2.7; 3.0; 3.7; 4.18). The comparison of retention curves of differently treated soil was based on the average, standard deviation and the difference and ratio of the avarages.

According to presented findings sorbents affected shapes of the retention curves. Especially biochar influence water content for high pF values. We confirmed the hypothesis according to *VERHEIJEN et al. (2010)*, that biochar tincrase the total retention of soil water, but does not increase the amoust of water available plants.

The influence of AMO on retention curve was negligible. Therefore sorbent AMO has a small influence on change of water retention in the tested soil. The effect of combined sorbent (AMO + BC) on the retention more significant than effect of using AMO sorbent only. This combination of sorbents affects the water retention depending on applied pF.

Keywords: biochar, amorphous manganese oxide, influence of sorbents, retention curve

OBSAH

1.	Seznam zkratk a použitých výrazů	9
2.	Úvod.....	10
3.	Cíl práce	11
4.	Literární část.....	12
4.1.	Retenční křivka půdní vlhkosti.....	12
4.2.	Stanovení retenčních čar.....	15
4.3.	Funkční vztahy pro popis retenčních čar.....	17
4.3.1.	Rovnice retenční křivky van Genuchten (1980)	17
4.3.2.	Rovnice retenční křivky Brooks a Corey (1964)	18
4.4.	Sorbenty	19
4.5.	Vliv sorbentů na retenční křivku.....	20
5.	Metodika.....	23
5.1.	Charakteristika zeminy a sorbentů	23
5.1.1.	Biochar.....	23
5.1.2.	Amorfní oxid manganu	24
5.1.3.	Studovaná oblast	24
5.2.	Příprava vzorků	25
5.3.	Měření retenčních čar.....	26
5.4.	Vyhodnocení měření.....	30
5.4.1.	Výpočet objemové vlhkosti a vynesení měřených bodů retenčních čar	31
5.4.2.	Proložení měřených bodů vztahem van Genuchten	31
5.5.	Porovnání retenčních čar půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbenty	32
6.	Výsledky	33
6.1.	Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s BC	33
6.2.	Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s AMO	36
6.3.	Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s kombinací AMO + BC.....	39
6.4.	Výsledné porovnání půdy bez sorbentu z kolon s půdou z rostlého terénu	42
6.5.	Souhrnné porovnání	45
7.	Diskuze.....	48
8.	Závěr	52
9.	Seznam zdrojů a použité literatury.....	54
10.	Přílohy.....	57

1. Seznam zkratk a použitých výrazů

BC	biochar , i označení půdy obohacené tímto sorbentem
AMO	amorfní oxid manganu, i označení ošetřené půdy sorbentem (z anglického amorphous manganese oxide)
KVK	kationtová výměnná kapacita (z anglického cationt exchange capacity)
DOC	rozpuštěný organický uhlík (z anglického dissolved organic carbon)
TOC	celkový organický uhlík (z anglického total organic carbon)
RMSE	relativní střední kvadratická chyba (z anglického root-mean-square error)
SD	směrodatná odchylka (z anglického standard deviation)
RETC	retenční křivka půdní vlhkosti (z anglického retention curve)
Vzorky	zkoumaná (kontaminovaná) půda odebraná do Kopeckého válečků pomocí kolon i přímo z rostlého terénu

2. Úvod

Hlavní téma této práce je retenční křivka půdy a vliv sorbentů na její průběh. Jelikož retenční křivka popisuje schopnost půdy zadržovat vodu při různé vlhkosti, nepochybně patří mezi nedůležitější hydraulické vlastnosti. Tvar křivky závisí na charakteristických vlastnostech půdy. A je tedy závislý na mnoha faktorech, jako jsou např. zrnitostní a mineralogické složení půdy, objemová hmotnost, struktura půdy a další. Křivka je také ovlivněna obsahem organické hmoty, množstvím a hlavně velikostí pórů v půdě.

S tím, co retenční křivka vlhkosti půdy udává, patří mezi základní nástroje hydroopedologie. Zásobu vody v půdě, se kterou křivka přímo souvisí, je důležité znát v mnoha oblastech, např. ochrana přírody a krajiny, zemědělství aj.

Sorbenty přidané do půdy mají vliv na její fyzikální i chemické vlastnosti. Používají se zejména v důsledku zkvalitnění půdy. V této studii byly použity dva typy sorbentů. Biochar (BC), amorfní oxid manganu (AMO) a kombinace těchto dvou sorbentů. Vliv na některé vlastnosti je znám spíše u biocharu a je popsán v mnoha studiích. Konkrétní působení na retenční křivku zmiňuje například ve svých studiích *VERHEIJEN et al. (2010)*, *HARDIE et al. (2014)* a *ANDRENELLI et al. (2016)*. Oproti tomu, jaký vliv má sorbent AMO a kombinace AMO + BC na tvar a průběh retenční křivky, znám doposud není.

Struktura práce je rozdělena na tři části. První je část literární (teoretická), která pojednává o tématu, na které je práce zpracována. Tedy retenční křivka půdní vlhkosti, sorbenty a vliv sorbentů na retenční křivku. Druhá část je praktická a jedná se o kapitulu metodika. Ta se týká laboratorního měření půdních vzorků, charakteristiky použitých sorbentů i materiálu a následného zpracování naměřených dat, potřebných pro zhotovení retenčních křivek zkoumaných vzorků. Dále také vyhodnocení měření a porovnání těchto retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou, která byla sorbentem naopak obohacena. Hlavní část je třetí a poslední. Do této části jsou zahrnuty kapitoly výsledky a diskuze. Zde jsou zhodnoceny a diskutovány výsledky, ke kterým se během průzkumu dospělo.

3. Cíl práce

Hlavním cílem této práce je určení vlivu použitých sorbentů na retenční křivku kontaminované nivní půdy.

Prvním dílčím cílem bylo stanovení retenčních křivek všech zkoumaných vzorků pomocí laboratorního měření. Tedy, jak půdy obohacené sorbentem, tak i půdy bez přidaného sorbentu.

Druhým dílčím cílem bylo porovnání těchto vytvořených retenčních křivek mezi sebou. Opět půdy bez přidaného sorbentu s půdou, do které byl sorbentem aplikován.

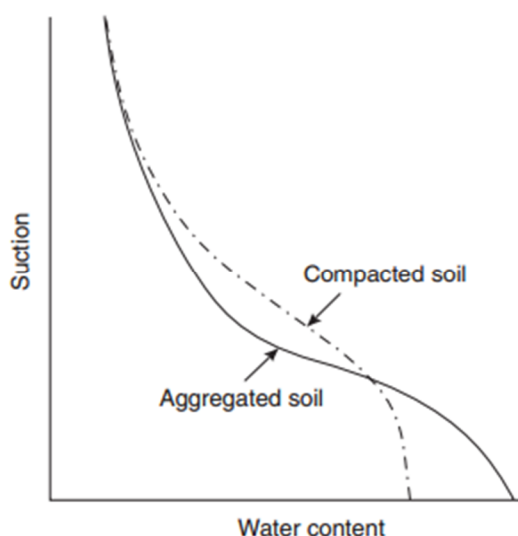
4. Literární část

4.1. Retenční křivka půdní vlhkosti

Vlivem přitažlivých sil mezi kapalnou a pevnou fází je navzdory gravitaci, výparu a čerpání vody kořeny rostlin umožněno zadržovat půdě vodu. Tomu říkáme retence vody, neboli zásoba vody v půdě (ANDERSON et al. 1996). A to nám udává právě retenční křivka.

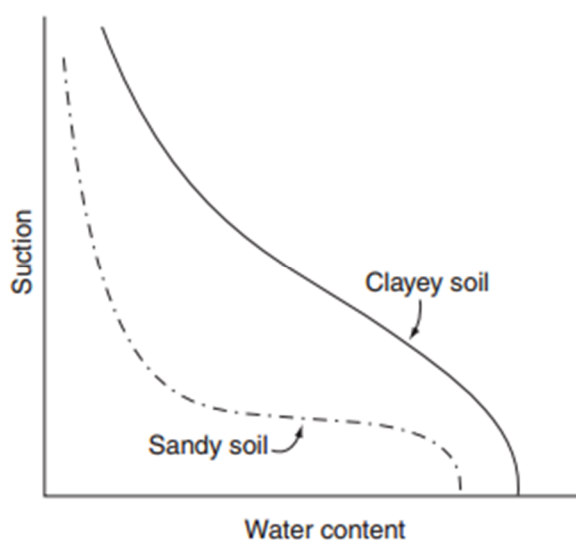
Retenční křivka půdy patří mezi nejdůležitější hydraulické charakteristiky půdy. Jde o grafické zobrazení závislosti mezi vlhkostním potenciálem půdy (sacím tlakem případně tlakovou výškou) a vlhkostí půdy. Průběh retenční křivky je úzce spjat se zrnitostním a mineralogickým složením, obsahem humusu a výměnných kationtů s půdní strukturou a objemovou hmotností. Díky těmto závislostem je unikátní pro každou půdu. Proto je nutné stanovit ji pro každou půdu a nelze její průběh ani přibližně odhadovat. Podstatná je také tzv. vstupní hodnota vzduchu. To je potenciál (neboli tlaková výška), při němž se začne půda odvodňovat a do půdy začne pronikat vzduch. Vstupní hodnota vzduchu se pro různé druhy půd liší. U různých objemových hmotností se může stát, že je tato hodnota nulová (KUTÍLEK et al. 2004).

Na obr. č. 1. a č. 2. je schematicky naznačeno, jak vlastnosti půdy ovlivňují tvar křivky. Obr. č. 1 znázorňuje závislost na struktuře (zhuťněná a naopak strukturní půda). Obr. č. 2. udává závislost na textuře (rozdíl mezi jílovitou a písčitou půdou).



Obr. 1: Vliv půdní struktury na udržení půdní vody, HILLEL (1998).

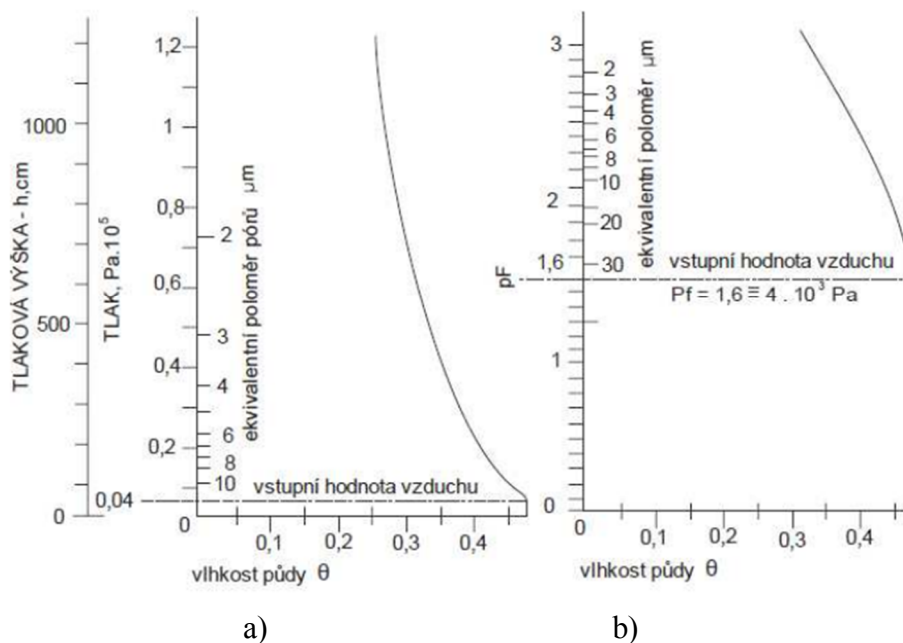
Vzhledem k vlivu struktury půdy na tvar charakteristicky půdní vlhkosti především v nízkém sacím tlaku lze očekávat značný vliv zhutnění. To ničí agregovanou strukturu a sníží celkovou pórovitost, zejména množství velkých pórů. Výsledkem zhutnění je množství počátečního nasycení vodou. Po použití nízkého sání se snížení obsahu vody zmenšilo. Na druhé straně je pravděpodobné, že množství pórů se střední velikostí bude větší v kompaktní půdě (proto, že některé velké póry byly vmačkané do středních velikostí lisováním), zatímco mikro póry zůstávají v obou případech nedotčené. Křivky (jak zhutněné tak nezhutněné půdy) mají ve vyšších hodnotách sacího tlaku tendenci konvergovat (HILLEL 1998).



Obr. 2: Vliv textury na zadržování půdní vody, HILLEL (1998).

Množství vody uchované při nízkých hodnotách sacího tlaku (řekněme mezi 0 – 100 kPa), závisí na kapilaritě a distribuci velikosti pórů. Proto je silně ovlivněno strukturou půdy. Při vyšším sacím tlaku je retence vody kvůli stále větší adsorpci ovlivněna strukturou už méně, a o to více naopak půdní texturou a specifickým povrchem. Čím větší je obsah jílu, obecně tím větší je retence vody v určitém sacím tlaku a křivka má pozvolnější sklon. V písčité půdě jsou póry poměrně velké, a jakmile se tyto póry v daném odsávání vyprázdňují, zůstává v půdě pouze malé množství vody (HILLEL 1998).

Retenční čára tedy udává, jakou má půda při různé vlhkosti schopnost zadržovat vodu. A jedná se o nelineární závislost, která je zpravidla zobrazována v logaritmickém měřítku na ose potenciálu. Z tohoto důvodu je také často označována jako pF – křivka (čára), kde $pF = \log_{10}(|h [cm]|)$, (ROŽNOVSKÝ et al. 2013). Možnost vynesení do grafu je také v lineárním měřítku, které je vhodné spíše jen pro menší rozsah (0 – 200 cm) tlakové výšky (KUTÍLEK et al. 2004). Rozdíl vynesení v měřítku lineárním a naopak v semilogaritmickém je patrná na obr. č. 3.



Obr. 3: Retenční čára půdní vlhkosti, a) v lineárním měřítku, b) v semilogaritmickém měřítku jako pF -křivka, KUTÍLEK et al. (1978).

U retenčních čar půdní vlhkosti se setkáváme i s tzv. hysterezí. Jedná se také o grafické zobrazení hysterezní křivky, kde jsou vstupní hodnoty tlak a vlhkost půdy. A je to zobrazení průběhu odvodnění půdy. Průběh odvodnění původně vlhké půdy je totiž odlišný od průběhu čáry pro zvlhčení půdy ze suchého stavu. Retenční křivka je tedy závislá na tom, jakou formou se rovnovážného stavu vlhkosti u půdy dosáhlo (KUTÍLEK et al. 2004).

Hystereze je způsobena několika faktory. Především jde o vliv uzavíratelného vzduchu nebo vody ve slepých pórech. Proměnlivostí průřezu pórů a rozdílnou hodnotou smáčecího úhlu při postupu kapaliny na suchém povrchu a při ustoupení kapaliny z povrchu zvlhčeného (KUTÍLEK et al. 2004).

4.2. Stanovení retenčních čar

Stanovení retenční čáry tedy přímo souvisí s vlhkostí půdy. Metody pro určení této vlhkosti lze rozdělit podle různých kritérií. S ohledem na využití dělíme metody na laboratorní a terénní. Dále pak podle toho zda je vzorek nutné odebrat či nikoliv na metody destruktivní a nedestruktivní. Časté použití dělení podle způsobu měření je na metody přímé a nepřímé. Metodou přímou se stanovuje obsahu vody v půdě. Kdežto u metody nepřímé se měří jiná fyzikální veličina (elektrický odpor, dielektrická konstanta atd.), která je funkčně závislá na vlhkosti (KUTÍLEK et al. 2004).

Mezi laboratorní metody řadíme například měření pomocí podtlakových přístrojů (pískové tanky), přetlakové aparáty a kombinace přetlaku a podtlaku (tempeská cela). K terénnímu měření zase slouží různá čidla na určení vlhkosti (TDR senzory), nebo na měření tlakové výšky (tenzometry).

Převážně je pro stanovení retenční čáry půdní vlhkosti využíváno laboratorních metod. Pokud je nutno určit retenční křivku v plném rozsahu vlhkosti, kterou dokáží rostliny zužitkovat, používá se zpravidla kombinace dvou metod (pískového tanku a přetlakových aparátů). Rozsah tlakové výšky je obvykle od 0 do -15000 cm. (MIHÁLIKOVÁ 2011).

Přetlakový aparát s keramickou membránou je velice hojně používaná metoda, pro stanovení odvodňovací větve retenční křivky. Tento přístroj umožňuje měření od 0 do 15 barů (což je přibližně -15 000 cm tlakové výšky) v závislosti na použité keramické membráně. Nedoporučuje se ovšem používat pro stavy blízké plnému nasycení, pro tento stav je mnohem přesnější a vhodnější metoda pískového tanku.

Pískový tank patří také mezi oblíbené metody a zpravidla převážně slouží k stanovení odvodňovací větve. Tento tank měří v rozsahu 0 až -100 cm tlakové výšky. Písko-kaolínový tank je pro tlakovou výšku až do - 500 cm.

Zde je shrnutí základních pojmů, které už zde zazněly a jsou přenesené do vzorců potřebných ke grafickému zobrazení retenční křivky půdní vlhkosti. Množství vody v půdě se tedy nazývá vlhkostí půdy (půdní vlhkost). Tu lze vyjádřit dvěma způsoby. První je pomocí objemů a druhý pomocí hmotností. Jestliže vyjádříme hodnotu prvním způsobem, nazýváme ji objemovou vlhkostí půdy a v druhém případě hmotnostní vlhkostí.

Vzorec pro výpočet objemové vlhkosti půdy. Je to poměr objemu vody k objemu neporušeného vzorku půdy.

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} (\cdot 100 \%) \quad (1)$$

Hmotnostní vlhkost půdy je vyjádřena poměrem hmotnosti vody k hmotnosti tuhé fáze půdy.

$$w = \frac{m_w}{m_z} (\cdot 100 \%) \quad (2)$$

Symbolem ve jmenovateli je označena hmotnost zcela vysušené půdy. Laboratorní způsob vysoušení vzorků je popsán v kapitole 5.3. *Měření retenčních čar*.

Vzorce lze, po vzájemném přepočtu, vyjádřit pomocí objemové hmotnosti půdy a hustoty vody.

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} (\cdot 100 \%) \quad (3)$$

Uvádí-li se hustota v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, potom lze rovnici zjednodušit a vyjádřit takto.

$$\theta = w \cdot \rho_d (\cdot 100 \%) \quad (4)$$

Vlhkost je v tomto vyjádření jako bezrozměrná, ovšem časté vyjádření bývá v procentech, stačí vynásobit hodnotou 100, jak je to již v rovnicích naznačeno (KUTÍLEK et al. 2004).

Přesnější vyjádření z fyzikálního hlediska je pomocí hmotnostní vlhkosti. Ta je totiž založena na přesně získané hodnotě (hmotnosti) pevné fáze půdního vzorku. Což také bylo použito v této práci. Objemová vlhkost je přesná poněkud méně. Hraje zde roli objemová nestálost zemin (bobtnání a smršťování), ta je mimo jiné závislá i na samotné vlhkosti (PAVLÁSEK, JAČKA 2014).

4.3. Funkční vztahy pro popis retenčních čar

Retenční křivky půdní vlhkosti je třeba analyticky vyjádřit. Existuje několik funkcí, kterými lze průběh retenční křivky popsat. Nejčastější proložení experimentálně získaných dat se provádí pomocí rovnice van Genuchtena (1980) a zpravidla poskytuje nejlepší proložení. O něco méně používaná pak rovnice Brookse a Coreyho (1964).

4.3.1. Rovnice retenční křivky van Genuchten (1980)

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + (\alpha|h|)^n\right)^m} \quad (5)$$

kde: $|h|$ – absolutní hodnota tlakové výšky [cm]

$\theta(h)$ – objemová vlhkost závislá na tlakové výšce [cm^3 , cm^{-3}]

θ_s – nasycená vlhkost [cm^3 , cm^{-3}]

θ_r – reziduální vlhkost [cm^3 , cm^{-3}]

α – převrácená hodnota vstupní hodnoty vzduchu [cm^{-1}]

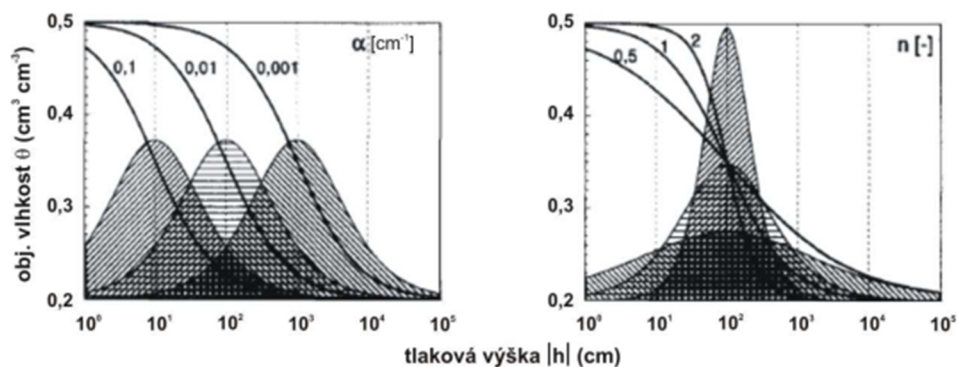
n , m – empirické tvarové koeficienty, vztah mezi parametry m a n je:

$$m = 1 - 1/n$$

Typickým grafem této funkce je křivka esovitého tvaru. Tyto čtyři nezávislé parametry θ_s , θ_r , α , a n se získají proložением experimentálně získaných bodů. Z těchto nezávislých parametrů je vždy pravděpodobně k dispozici nasycená vlhkost θ_s . Ta se dá totiž snadno získat měřením a patří k hodnotám, které jsou v hydro-pedologických laboratořích standardně zjišťovány (MIHÁLIKOVÁ 2011).

Tvarovým parametrem α jsou kvalitně popsány největší souvislé póry. To znamená, že vyšší hodnoty odpovídají nižšímu pásmu vzlínání nad hladinou vody. Poslední nezávislý parametr n kvalitativně popisuje rozdělení velikosti pórů v půdě. Vyšší hodnoty parametru n jsou odrazem úzkého rozsahu rozdělení velikosti pórů, který je běžný pro hrubozrnné a nestrukturní půdy. Naopak nižší hodnoty parametru n jsou zobrazeny širší distribucí velikostí pórů běžných pro jemnozrnnou

a strukturální půdu (MIHÁLKOVÁ 2011). Jak ovlivňují tyto dva parametry průběh tvaru rovnice je znázorněno na obr. č. 4.



Obr. 4: Vliv parametrů α a n na tvar rovnice (5) a jejich první derivace reprezentující rozdělení velikosti pórů, SCHEINOST *et al.* (1997).

4.3.2. Rovnice retenční křivky Brooks a Corey (1964)

$$\begin{aligned} \theta(h) &= \theta_s && \text{pro } h \geq h_v \\ \theta(h) &= \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_v}{h} \right)^\lambda && \text{pro } h < h_v \end{aligned} \quad (6)$$

kde: θ – objemová vlhkost závislá na tlakové výšce [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]

θ_s – nasycená vlhkost [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]

θ_r – reziduální vlhkost [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]

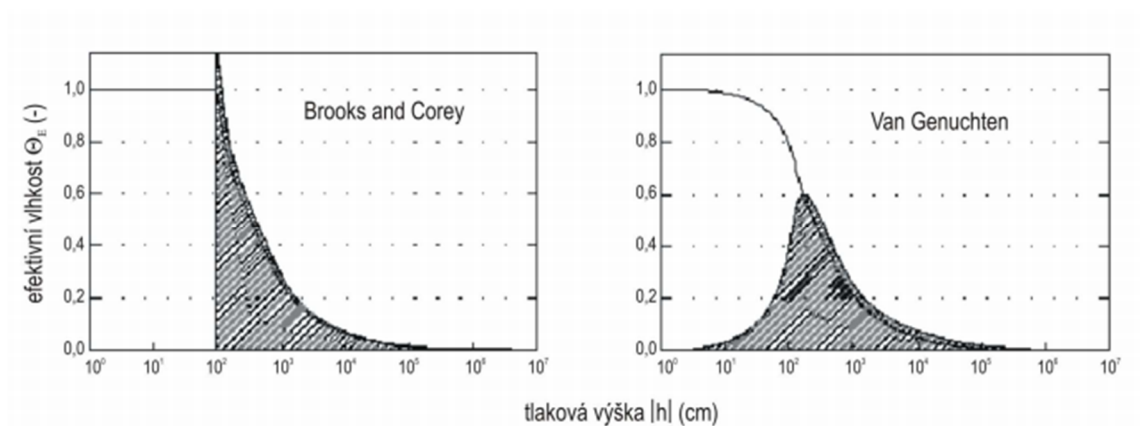
h_v – vstupní hodnota vzduchu [cm]

h – tlaková výška [cm]

λ – index rozdělení velikosti pórů

Tato rovnice (6) se obecně považuje za méně vhodnou oproti rovnici (5). Nicméně vztah této rovnice je historicky jedním z nejrozšířenějších. Oproti rovnici (5) totiž popisuje podstatně důležitou fyzikální vlastnost, kterou je vstupní hodnota vzduchu. Rozdíl mezi těmito dvěma rovnicemi je patrný na obr. č. 5.

Vstupní hodnotou vzduchu se rozumí potenciál (resp. tlaková výška), při kterém se porézní systém (plně nasycen) začne odvodňovat. Vodu v pórech tedy nahrazuje vzduch. U této rovnice je podstatný se parametr h_v . Je vztažen k maximální velikosti pórů. Ty formulují souvislou síť tokových kanálů v půdě. Pro půdy písčité je tedy jeho hodnota nízká a naopak pro jílové půdy vyšší (MIHÁLIKOVÁ 2011).



Obr. 5: Znázornění proložení retenční křivky podle rovnice Brookse a Coreyho a van Genuchtena. Vyšrafovaná část zobrazuje derivační křivky obou rovnic KUTÍLEK et al. (2004).

4.4.Sorbenty

Pojem sorbent se ve spojitosti s půdou rozumí jako materiál, který se používá pro absorpci a adsorpci. Kompletně tedy pro sorpční procesy. V půdě je sorpce pojem zahrnující jak mechanické, tak fyzikální, chemické a výměnné (fyzikálně chemické) sorpční procesy. Sorbenty mohou být organického i anorganického původu. Tyto pevné látky bohaté na uhlík mohou být vyrobeny například pyrolýzou nebo hydrotermální karbonizací (EIBISCH et al. 2015).

Půda, ať už se jedná o jakoukoliv (říční, lesní, polní atd.), je hlavní zásobárnou chemických kontaminantů a toxických látek. Spoustu těchto látek se v půdě vyskytuje i přirozeně a půda má schopnost tyto látky poutat (sorbovat). To je způsobeno sorbenty, které se v ní přirozeně vyskytují. Takovými sorbenty jsou například organická složka půdy (humus), jílové minerály a oxidy kovů (ADRIANO 2001).

Ovšem mnoho škodlivých látek se do půdy dostane v důsledku lidské činnosti. S těmi si sama půda poradit nedokáže, protože se v ní přirozeně (např. v tak velkém množství) nevyskytují. Přítomnost těchto toxických látek v půdě je nežádoucí či dokonce škodlivá nejen pro životní prostředí, ale i pro lidstvo.

Sorbenty tedy slouží ke stabilizaci nežádoucích látek (kontaminantů), které se v půdě nepřírozeně vyskytují. Redukují toxicitu a transport těžkých kovů. Zlepšují také i půdní vlastnosti (např. obsah organického uhlíku, pórovitost, zvýšení sorpční kapacity aj.). Se zlepšením půdních vlastností přímo souvisí i úrodnost půdy.

4.5. Vliv sorbentů na retenční křivku

Sorbenty se tedy do půdy přidávají z důvodu možnosti zlepšení chemických a fyzikálních vlastností. Nás konkrétně zajímají hydraulické, ke kterým se retenční křivka vztahuje. Jak uvádí např. *EIBISCH et al. (2015)*, sorbenty mohou zlepšit dostupnou kapacitu půdní vody pro rostliny. *ABEL et al. (2013)* se zabýval průzkumem vlivu na zadržování vody v písčitéch půdách. *ANDRENELLI et al. (2016)* zkoumal vliv biocharu na retenci vody v jílovité půdě plus další parametry (např. polní vodní kapacitu, bod vadnutí aj.).

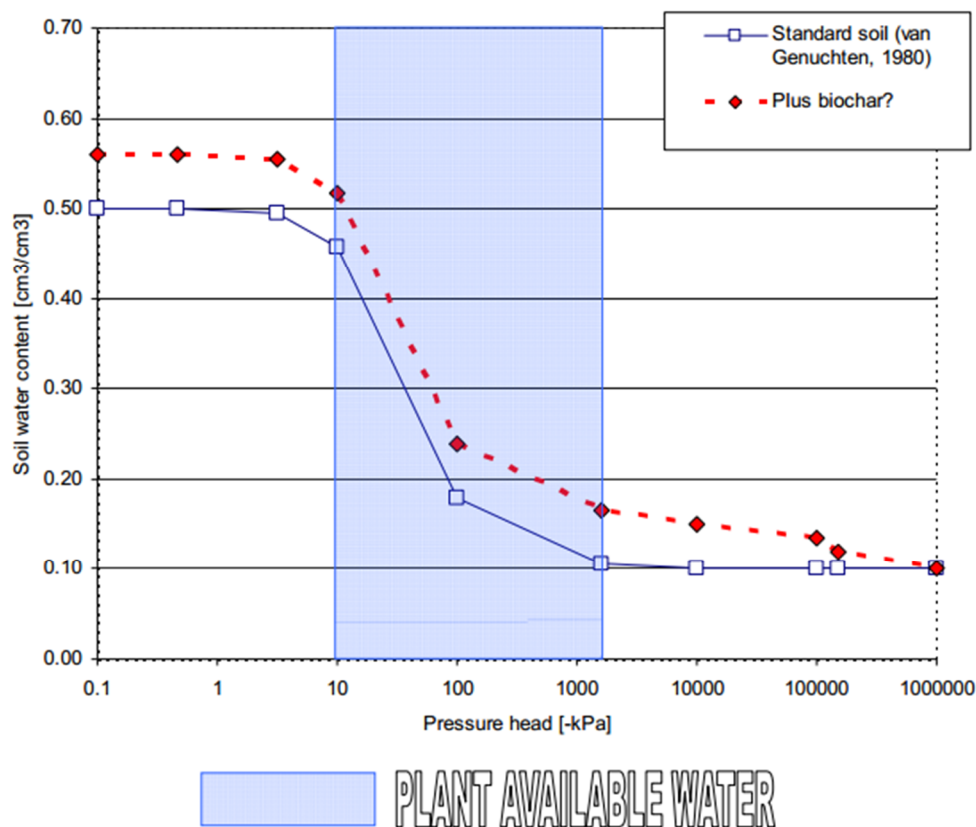
Všechny výše zmíněné studie se ovšem shodují na tom, že i když je toto téma stále více aktuální a diskutováno, prozatím je vliv a dopad sorbentů na hydraulické vlastnosti půdy málo pochopen a doposud není dostatečně prozkoumán. V současnosti je tedy toto téma předmětem intenzivního zkoumání. A proto, je velice obtížné přesně specifikovat změny průběhu retenční křivky, které mohou po přidání sorbentů nastat.

Přestože není vliv sorbentů na tvar a průběh retenční křivky zatím zcela objasněn, jsou zde spekulace, že závisí i na množství, původu, textuře a struktuře aplikovaného sorbentu. Stejně tak, jako na vlastnostech půdy (zrnitost, struktura, objemová hmotnost), která je sorbentem obohacena.

V této práci je výzkum zaměřen na vliv BC a AMO. Přičemž doposud neproběhla žádná studie ve spojitosti amorfního oxidu manganu a jeho vlivu na retenční křivku půdy. Zkoumán byl pouze ve vztahu se sanací půdy (stabilizace kovů), jak např. uvádí *DELLA PUPPA et al. (2013)*, *ETTLER et al. (2014)*, *ETTLER et al. (2015)*.

Vliv biocharu na retenční křivku popisuje ve studii např. i *HARDIE et al. (2014)*, kde se zabývali převážně ovlivněním půdní pórovitosti. Podle této studie neměla aplikace biocharu významný vliv na půdní vlhkost. Však s pozdějším přeměřením se dospělo k závěru, že půda měla např. výrazně vyšší hydraulickou vodivost. Změny půdních vlastností přičítali tvorbě velkých makropórů (> 1200 μm) v důsledku většího množství výskytu žíhal v půdě obohacené sorbentem. Přímý důkaz o vlivu samotného biocharu na pórovitost půdy však nalezen nebyl (*HARDIE et al. 2014*).

Poznatky o vlivu biocharu na retenční křivku uvedl ve své publikaci také *VERHEIJEN et al. (2010)*. Mimo jiné, bylo v této publikaci ukázáno mnoho pozitivních i negativních účinků biocharu na vlastnosti půdy. V této fázi jsou vysloveny pouze hypotézy, jaký bude účinek biocharu na průběh retenční křivky. Ten je zobrazen na obr. č. 6.



Obr. 6: Typický příklad retenční křivky půdní vlhkosti s proložením podle rovnice van Genuchten a předpokládaný účinek po přidání biocharu do půdy *VERHEIJEN et al. (2010)*.

Obr. č. 6 poukazuje, že většina koncepční vody, která je v půdě uložena, nebude pro rostliny dostupná. V této hypotetické reprezentaci je to zdůvodněno především jako důsledek distribuce velikosti pórů biocharu. Póry v biocharu jsou z velké části tvořeny velmi malými póry a jen velmi malé procento pórů obsahuje tedy vodu dostupnou pro rostliny (VERHEIJEN et al. 2014). Dále může být zvýšení retence způsobené sorpcí vody na povrchu biocharu a bobtnáním biocharu – tato pevně sorbovaná voda však není pro rostliny také dostupná.

V publikaci *ANDRENELLI et al. (2016)* zkoumali konkrétně peletizovaný biochar z pšeničných otrub a jeho dopad na WRC (water retention curve) po aplikaci do půdy jílovitého typu. V práci bylo potvrzeno, že přidáním peletizovaného biocharu do půdy se retenční schopnost půdy zvýšila, a to i v krátkodobém horizontu.

EIBISCH et al. (2015) ve studii uvádí, že aplikace sorbentů (pyrochars and hydrochars) do půdy má pouze velmi malý vliv na celkové zlepšení zadržování vody v půdě. Jednalo se o druh půdy hlinitý písek. Sorbenty byly vytvořeny tzv. pyrolýzou a hydrotermální karbonizací. Použitý materiál pro výrobu sorbentů byl digestát (99% kukuřice) a dřevní štěpky (vrba nebo topol).

EASTMAN (2011) zkoumal biochar hlavně v souvislosti zlepšení kvality půdy a následného zvýšení její úrodnosti, s čímž retence také souvisí. Průzkum ukázal, že aplikace biocharu do půdy zlepšuje zadržování vlhkosti v půdě, dokonce i 6 měsíců po jeho aplikaci, ovšem tento dopad nebyl nikterak závratný.

5. Metodika

5.1. Charakteristika zeminy a sorbentů

Půda pro tento experiment byla odebrána v lokalitě, kde již byla podrobně prozkoumána. Odběr byl proveden z orníčního horizontu (0 – 25 cm). Všechny základní vlastnosti (jako pH, KVK neboli CEC, TOC, DOC, dostupná forma živit a celkový obsah kovů, viz tab. č. 1) se uvádí v práci *TRAKAL et al. (2011)*, ze které jsou informace o experimentální půdě čerpány. Z průzkumu zrnitostního rozboru, který proběhl hustoměrnou metodou, vyšla křivka zrnitosti. Zastoupení jednotlivých kategorií je uvedeno v tab. č. 2. Půda je prakticky bez skeletu. Podle trojúhelníkového klasifikačního diagramu se jedná o druh půdy písčité hlína.

Tab. 1: Fyzikálně-chemické vlastnosti a celková koncentrace počátečních kovů ve studované půdě převzato z TRAKAL et al. (2011).

	pH (-)	CEC (mmol/kg)	TOC (%)	DOC (mg/kg)	Available form of nutrients* (mg/kg)				N _{min} (mg/kg)	Total metal content (mmol/kg)			
					Ca	K	Mg	P		Cd	Cu	Pb	Zn
Soil	5.7	134 ± 3	3.72	146	995 ± 68	155 ± 4	125 ± 1	58.8 ± 1	80.5	0.41 ± 0.03	1.22 ± 0.05	12.1 ± 0.5	65.6 ± 1.0

Tab. 2: Procentuální zobrazení jednotlivých kategorií experimentální půdy.

Zrnitostní složení		
písek	%	52
prach	%	39,5
jíl	%	8,5

5.1.1. Biochar

Biochar je produkt vytvořený pyrolýzou organického materiálu. Prakticky může být vytvořen z jakékoliv organické suroviny. Jeho vlastnosti závisí na tom, za jakých podmínek pyrolýza proběhla a na materiálu, ze kterého byl produkt vyroben. To vše totiž ovlivňuje účinky a důsledky, které bude biochar po přidání do půdy mít (SOLDÁN 2015).

Konkrétně pro tento pokus, byl biochar vyroben z odpadu vinné révy v Ústavu chemických procesů AV ČR pyrolýzou při teplotě 600°C. A následně zpracován podle metodického postupu, který je uveden ve studii *TRAKAL et al. (2014)*. Podrobné charakteristiky použitého biocharu jsou uvedeny v této práci také, kde je označen jako GSBC (grape stalks biochar).

5.1.2. Amorfni oxid manganu

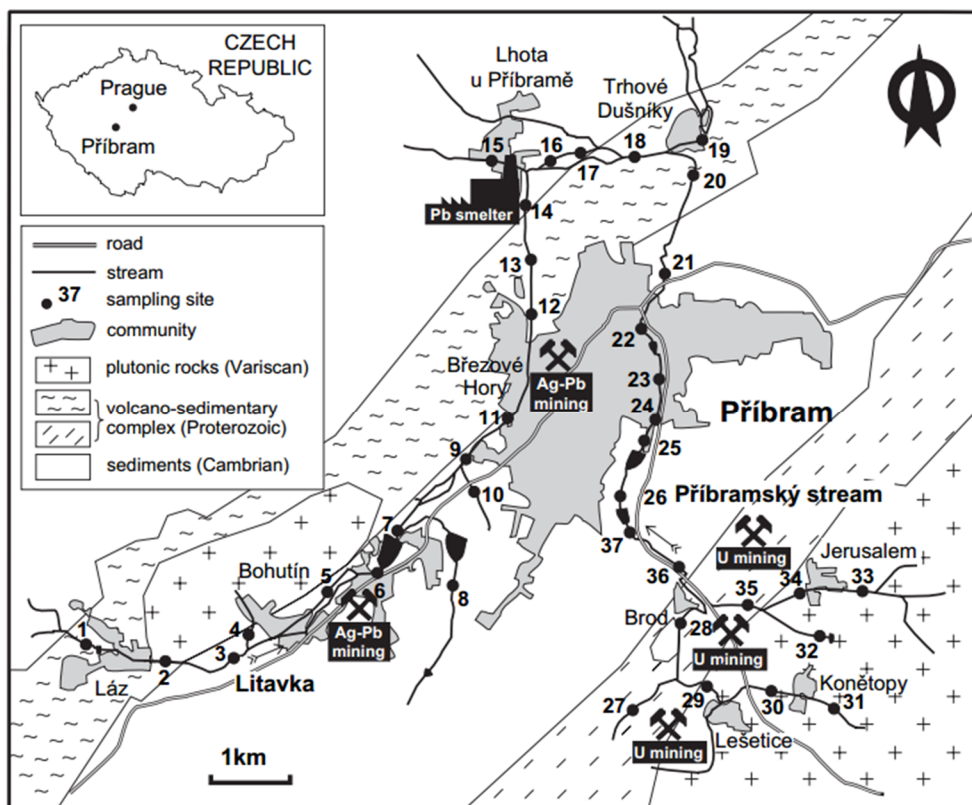
AMO neboli amorfni hydratovaný oxid manganu je synteticky vyrobená látka. Pro tento pokus byl syntetický oxid manganu vyroben na České zemědělské univerzitě modifikací postupu pro syntézu birnessitu a dále zpracován podle metodických postupů uvedených v pracích *CHING et al. (1997)* a *ETTLET et al. (2014)*. Postup přípravy AMO pro tento pokus také popisuje *OUŘEDNÍČEK (2015)*, který též popisuje jeho strukturu, složení a charakteristiky.

5.1.3. Studovaná oblast

Experimentální zemina pochází z nivní půdy řeky Litavky. Konkrétně z lokality nedaleko obce Trhové Dušníky viz obr. č. 7, kde se v blízkosti nachází měrná stanice FŽP ČZU. Lokalita spadá do regionu Příbramsko. Oblast leží 60 km jihozápadně od hlavního města Prahy.

Příbramsko patří mezi historicky významná místa v oblasti těžebního průmyslu. První zmínky o těžbě v tomto regionu sahají již do starověku. Za vrchol těžební činnosti je považována především druhá polovina 20. století a konkrétně rok 1950 až 1989 (*ETTLER et al. 2006*). Proto je půda v této oblasti vysoce kontaminovaná, zejména pak kovy. Celková produkce kovů v této oblasti se odhaduje na 3 500 tun stříbra, 480 tis. tun olova, 260 tis. tun zinku, 80 tis. tun antimonu a produkci uranu odhadují na 49 990 tun (*ŽÁK et al. 2009*).

Dle geologického hlediska na ploše dominují dva pásy svrchního proterozoika (vyvěřelé a usazené horniny), ty jsou doprovázeny variským průnikem z Bohutína (diority, jihozápad Příbramska) a středočeským plutonem (granity a granodiority, jihovýchodní část). Variský průnik souvisí s mineralizací, ty se vyskytuje jako depozity rudných kovů (Pb, Ag, Zn), (*ETTLER et al. 2006*).



Obr. 7: Mapa místa odběru experimentálních vzorků, umístění historické důlní a hutní oblasti a geologický podklad na Příbramsku, ETLER et al. (2006).

5.2. Příprava vzorků

Pro tuto práci byly vzorky již připravené. Odebrané byly z kolonových experimentů. Ty patří mezi nezastupitelné laboratorní testy. Popisují totiž simulaci procesů (např. i popis hydraulických vlastností půdy), které se odehrávají v půdním prostředí. Probíhající procesy mohou být ovlivněny různými aspekty (např. kontaminací půdy, ze které odebraná zemina pochází) a především prouděním podzemní vody. Vzorky byly odebrány do Kopeckého válečků o objemu 100 cm^3 , přímo z kolon. Tyto kolonové experimenty jsou charakterizovány v pracích *OUŘEDNÍČEK (2015)* a *SOLDÁN (2015)*.

Celkem byly k prozkoumání připraveny dvě série. V první sérii pocházely vzorky pouze z kolonových experimentů a bylo jich celkem osm. Šlo o dva vzorky s půdou obohacenou BC, další dva s AMO, dva s kombinací těchto dvou sorbentů a poslední dva vzorky s půdou bez přidaného sorbentu. Ve finální přípravě vzorků

došlo k úpravě pH proplachem půdy 0,43 M HNO₃, což mohlo půdu zásadně změnit. A případná změna půdních vlastností by vedla i ke změně průběhu retenční křivky.

Ve druhé sérii bylo osm vzorků z kolon připravených stejným způsobem, jako v první sérii. Rozdíl byl pouze v závěrečném proplachu půdy, který je ovšem zásadní. V této sérii byla na proplach použita destilovaná voda. Těchto osm vzorků bylo stejného charakteru, jako vzorky z první série. Vždy po dvou válečkách BC, AMO, kombinace a čistá půda. Dalšími vzorky z této série bylo deset Kopeckého válečků (objem 100 cm³). Ty byly odebrány přímo z rostlého terénu a jedná se tedy o neporušenou půdu bez jakýchkoli následných úprav.

Zastoupení sorbentu v půdě: 2% BC, 2% AMO a 2% kombinace v poměru 1:1. Procentuální zastoupení sorbentu v půdě bylo odvozeno z hmotnosti. Tedy na 100 g množství půdy připadají 2 g sorbentu.

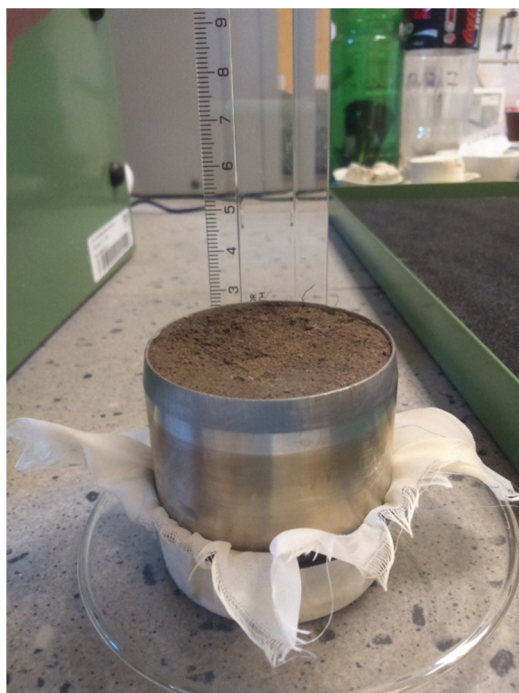
5.3. Měření retenčních čar

Ke stanovení pF – křivky půdních vzorků bylo třeba soupravy skládající se ze třech na sebe navazujících přístrojů. Sandbox (pískový tank), který umožňuje měření vlhkostního potenciálu až do hodnot 10 kPa (hodnota pF 2,0). Sand-kaolin box (písko-kaolínový tank) umožňující měření vlhkostního potenciálu až do hodnot 50 kPa (pF 2,7). A posledním jsou přetlakové aparáty s kompresorem, které měří hodnoty vlhkostního potenciálu až do hodnot 1,5 MPa (pF 4,2).

Příprava přístrojů, jejich nastavení, a jak postupovat při měření vzorků je podrobně popsáno v manuálech, který má každý přístroj samostatně. Manuál pro pískový tank (SANDBOX), pro písko-kaolínový tank (SAND-KAOLIN BOX) a pro přetlakové aparáty (LABORATORY EXTRACTORS), zvláště jsou tam také dostupné manuály pro aparát do 5 barů a do 15 barů (EIJKELKAMP 2016).

Náš postup měření se od toho z manuálu lišil jen nepatrně. A byl následující: Po uvedení pískového tanku do provozu bylo třeba mít vzorky v takovém stavu, ve kterém se s nimi bude nadále pracovat. Tzn. odvíčkovat a pomocí gumičky připevnit na spodní hranu kus nylonové látky (viz obr. č. 8). Během celého pokusu, počínaje tímto krokem, bylo třeba vše řádně vážít a hmotnosti pečlivě zaznamenávat.

Připravené vzorky se vkládaly do pískového tanku s výškou hladiny 0,5 cm. Vzorky se nechaly přizpůsobit po dobu několika hodin. Plnění tanku destilovanou vodou do stavu, kdy hladina sahala 1 cm pod horní okraj válečků (obr. č. 9), proběhlo pomalu v několika krocích. Toto je potřeba neuspíšit, aby rychlým sycením vzorků nedošlo k porušení struktury půdy. Po naplnění se tank uzavřel a vzorky se nechaly sytit po dobu několika dní (zhruba 7 dní).



Obr. 8: Vzorek připravený pro zahájení pokusu.



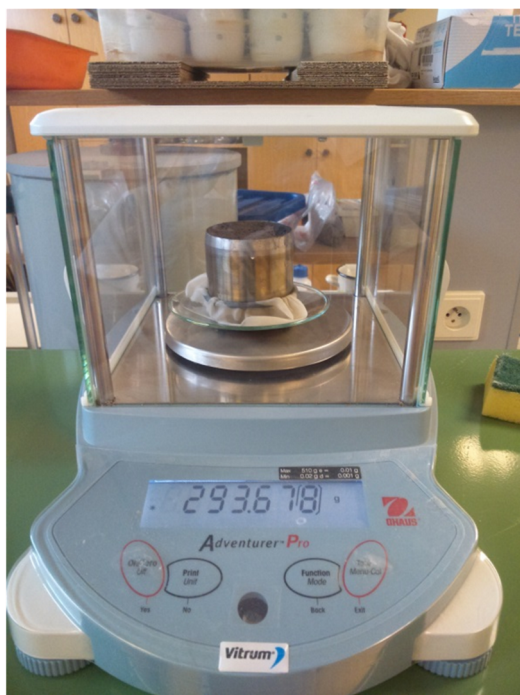
Obr. 9: Sycení vzorků v pískovém tanku s výškou hladiny vody 1 cm pod horní okraj vzorku.

Po dosažení stavu plného nasycení (hodnota pF 0) se vzorky převažovaly a hmotnosti byly opět pečlivě zaznamenány. Jelikož při těchto nízkých pF hodnotách (0, 0,4 1,0), trval stále stav plného nasycení a později i tomu blízký, docházelo k odkapávání přebytečné vody z látky. Proto byl zvolen jednotný časový interval (5 sekund) doby okapání. Byl dostačující na to, aby stihla přebytečná voda okapat a zároveň dostatečně krátký, aby nedocházelo k zbytečnému odvodňování vzorku vlivem gravitačních sil. Váha byla zaznamenána společně s látkou, gumičkou a podkladovým sklíčkem, na které byla zachytávána odkapávající voda ze vzorku (viz obr. č. 10).

Převažování vzorků probíhalo vždy na ustáleném stavu při dané hodnotě pF , která se postupně navyšovala. Intervaly s postupným navyšováním hodnoty

pF byly následující: pF 0,4 – 3 dny, pF 1,0 – 5 dní, pF 1,5 – 5 dní a pF 1,8 – 6 dní. Intervaly doby uložení v tanku na určitém podtlaku byly stanoveny kontrolním přeměřováním dvou vzorků, které k tomu byly určeny. Stejně tak tomu bylo i u písko-kaolínového tanku.

Pokračování měření probíhalo v druhém přístroji ze soupravy. Po posledním převážení z pískového tanku se vzorky přemístily do písko-kaolínového (obr. č. 11). Zde se navázalo na hodnotu pF 2,0. V tomto stavu byly vzorky bez odkapávající vody. Proto bylo vždy nutné, před vrácením váženého vzorku do tanku (vždy stejné umístění), písko-kaolínový podklad navlhčit. Intervaly převažování vzorků v tomto tanku byly následující: pF 2,0 – 8 dní, pF 2,3 – 5 dní a pF 2,7 – 8 dní.



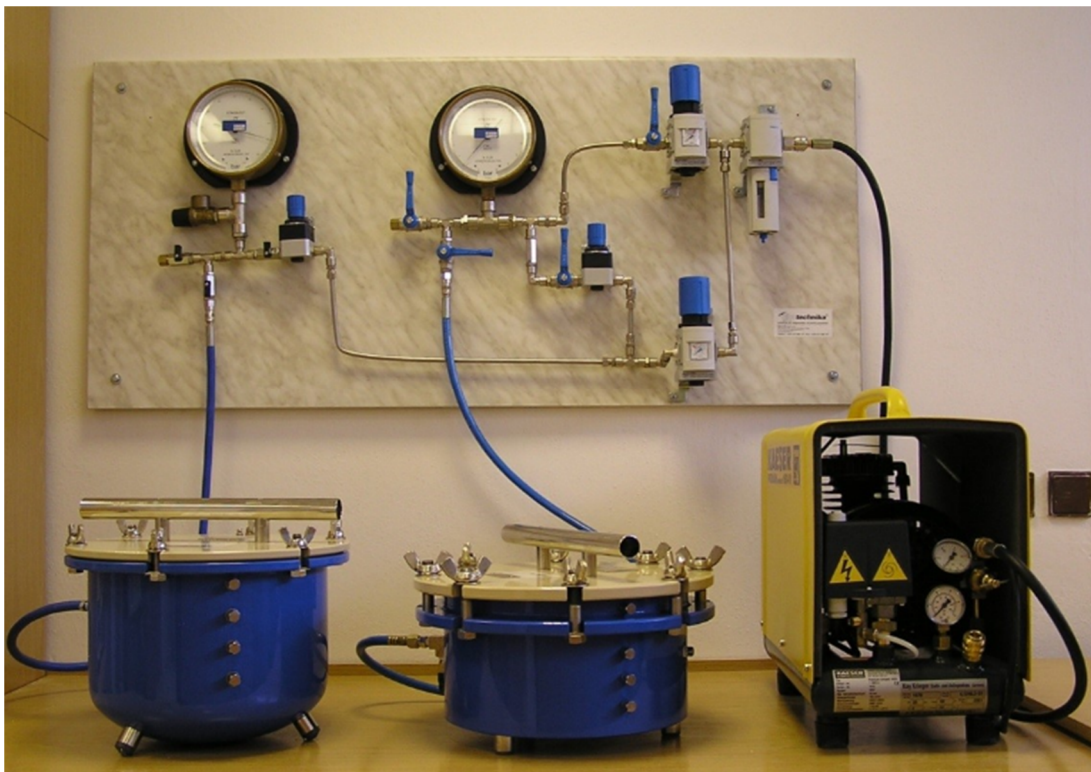
Obr. 10: Laboratorní váha s přesností $\pm 0,001$ g a vzorek převažovaný s látkou, gumičkou a skleněnou podložkou.



Obr. 11: Vzorky půdy v písko-kaolínovém tanku.

Posledním potřebným přístrojem k měření vlhkostního potenciálu byl použit přetlakový aparát (viz obr. č. 12), kde následoval stejný metodický postup převažování vzorků. Intervaly vzorků na dané pF hodnotě byly: pF 3,0 – 15 dní, pF 3,7 – 55 dní a konečná hodnota pF 4,18 – 50 dní. Z časových důvodů bylo u druhé série vzorků vynecháno měření na tlaku 10 barů. Zde byly intervaly určeny

pomocí výšky hladiny vody ve skleněné byretě napojené na aparát. Probíhalo tedy pouze jedno převažování vzorků, žádné kontrolní převažování zde nebylo.



Obr. 12: Souprava přetlakových aparátů s kompresorem. Levá nádoba pro měření do 5 barů. Pravá nádoba pro měření vlhkostního potenciálu až do 15 barů.

K určení retenční křivky je také potřebné znát konstantní hmotnost půdního vzorku. Ta se stanoví vysoušením. Vysoušení do konstantní hmotnosti je odstranění nekystalické půdní vody z daného vzorku, a to aniž by nastaly nějaké změny v organické hmotě, kterou vzorek obsahuje. Vzorek s půdou je vysušen do konstantní hmotnosti tehdy, neztrácí-li už nic ze své hmotnosti. Tohoto stavu bylo dosaženo při dvacetihodinovém vystavení půdních vzorků teplotě 105°C (obr. č. 13 a 14). Poté byl vzorek opět zvážen na analytické váze s přesností $\pm 0,001$ g. Jelikož bylo potřeba znát konstantní hmotnost pouze půdy, bylo poté nutno zvážit samotný (čistý a suchý) váleček. Stejně tak bylo důležité znát váhu podkladové misky, gumičky a látky pro následné odečtení od zaznamenávané hmotnosti celého vzorku.



Obr. 13: Ukázka vzorku odebraného z kolon po vysušení.



Obr. 14: Vzorek po vysušení bez válečku – pouze zemina, odběr kolona.

Tímto krokem máme již všechna potřebná data (hmotnosti) k určení retenčních křivek, které se z práce v laboratoři daly získat, čímž práce v ní končí.

Měření bylo uskutečněno v hydroopedologické laboratoři, nacházející se na fakultě životního prostředí v areálu ČZU Praha, kde bylo k dispozici veškeré potřebné vybavení.

5.4. Vyhodnocení měření

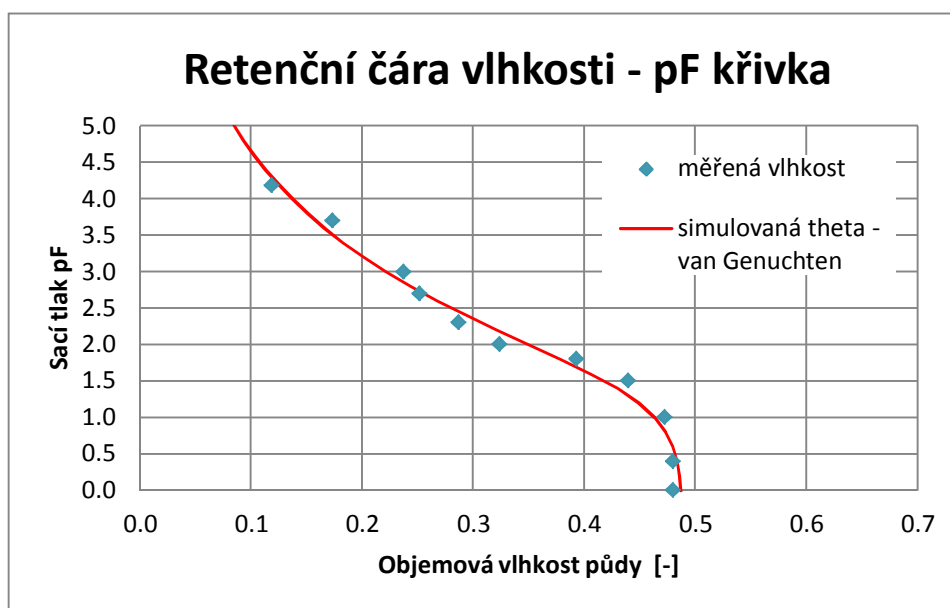
Vyhodnocení měření tedy proběhlo pouze na základě vážení vzorků s půdou během celého procesu, kdy byly vzorky uloženy v soupravě přístrojů a postupně vystavovány většímu podtlaku. Klíčová je tedy naměřená hmotnost při konkrétním podtlaku, kdy byly vzorky vždy převáženy. Celá část vyhodnocování proběhla pomocí programu MS Excel 2013.

5.4.1. Výpočet objemové vlhkosti a vynesení měřených bodů retenčních čar

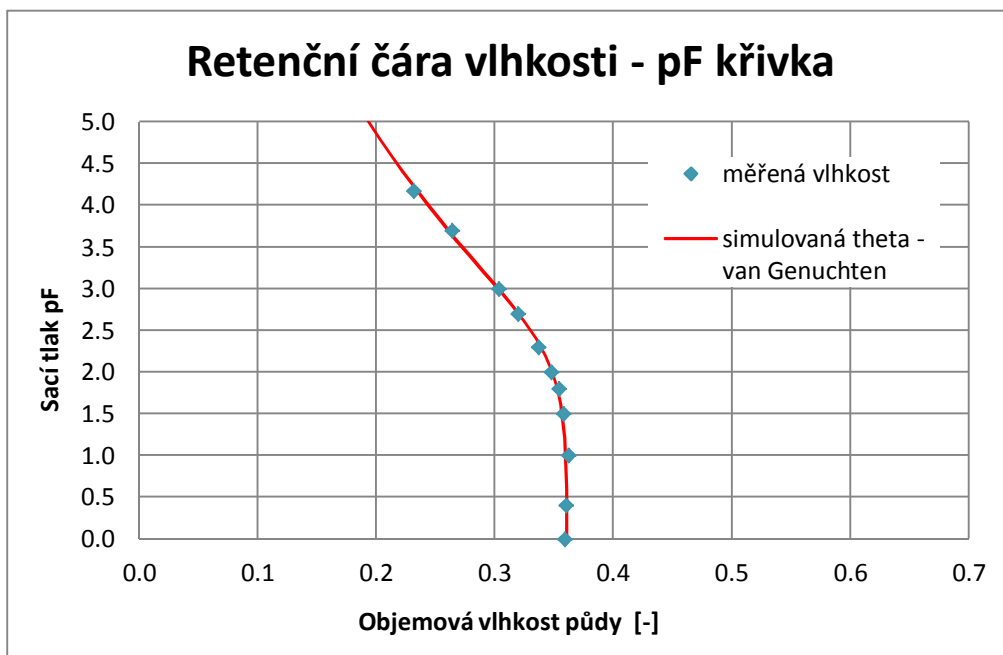
Podklady pro vynesení retenční křivky (zatím pouze bodů) jsou hodnoty pF (osa y) a hodnoty objemové vlhkosti (osa x). Tedy jakou má půda vlhkost při daném sacím tlaku. Jelikož byla měřena vždy pouze hmotnost vzorku, bylo třeba vypočítat objemovou vlhkost pomocí hmotnosti. Ta byla vypočtena podle vzorců (konkrétně rovnice č. 4) v kapitole 4.2. *Stanovení retenčních čar*. Po vypočtení byly jednotlivé body vyneseny do grafu.

5.4.2. Proložení měřených bodů vztahem van Genuchten

Body vynesené do grafu byly proloženy vztahem van Genuchten (5). Tento vztah je popsán v kapitole 4.3. *Funkční vztahy pro popis retenčních čar*. Prokládání proběhlo použitím *Řešitele*, implementovaného v Microsoft Excelu 2013. Hlavním kritériem byla minimální hodnota odmocniny ze střední kvadratické chyby (*RMSE*). Další podmínky se vztahovaly na jednotlivé členy rovnice. Hodnota θ_s , měla dvě podmínky, $\theta_s \leq \max.\theta + 0,04$ a $\theta_s \geq \min.\theta - 0,01$. Parametr $\theta_R \leq \frac{1}{2} \min.\theta$. A parametr $n \geq 1,000001$. Proložení vznikla retenční křivka, ukázka výsledného proložení na obr. č. 15 a 16.



Obr. 15: Ukázkový graf naměřených bodů s proložení podle vztahu van Genuchten (1980) v programu MS Excel. Jedná se o vzorek z druhé série, odebraný pomocí kolonových experimentů a obohacený sorbentem AMO.



Obr. 16: Ukázkový graf naměřených bodů s proložením podle vztahu van Genuchten (1980) v programu MS Excel. Jedná se o vzorek z druhé série, odebraný přímo z rostlého terénu (neporušený) kontaminované nivní půdy. Vzorek není obohacen žádným sorbentem, ani s ním nebyly prováděny žádné jiné úpravy. Průběh křivky se nejvíce podobá průběhu retenční křivky pro půdní druh jílu. O vzorku lze říct, že je prakticky nepropustný.

5.5. Porovnání retenčních čar půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbenty

Po vynesení retenčních čar každého zkoumaného vzorku se mohlo přistoupit k určení vlivu přidání sorbentů na průběh retenční křivky. Porovnání proběhlo mezi vzorky obohacené sorbentem s půdou, která byla naopak bez sorbentu. Porovnávání mezi sebou byly: průměr, směrodatná odchylka, rozdíl a poměr, objemové hmotnosti, jednotlivých parametrů podle vztahu van Genuchten (θ_s , θ_R , α , n) a hodnoty pF (0; 1,0; 2,0; 2,7; 3,0; 3,7; 4,18). Tabulky a grafy těchto porovnání jsou zobrazeny v následující kapitole s názvem Výsledky.

6. Výsledky

V této kapitole jsou shrnuty všechny výsledky, ke kterým se dospělo během celé studie pomocí postupu popsaného v předchozí kapitole.

Největší vliv na proložení, měřených bodů pF-křivkou, ze vztahu van Genuchtena mají parametry α a n . Poznatky o vlivu parametrů na křivku zjištěné během studie:

Parametr α

- je převrácená hodnota vstupního vzduchu
- čím vyšší hodnota, tím menší vstupní hodnota vzduchu
- čím vyšší hodnota, tím dříve se začíná půda odvodňovat
- ovlivňuje hlavně počáteční odvodnění půdy (tj. do pF 1)

Parametr n

- čím nižší hodnota, tím více se křivka zplošťuje
- čím nižší hodnota, tím více si půda drží vodu
- jeho vliv se projevuje spíše až ve vyšších podtlacích
- od hodnoty pF 1,5 si půda drží výrazně více vody

Parametr α se mění pouze v setinách a změna průběhu křivky je velice malá. Rozdíl při změně hodnoty parametru o setinu, je v posunu křivky nepatrný. Naproti tomu parametr n vychází v desetínách a rozdíl posunu o jednu desetinu je velký. Vliv hodnoty parametru n je tedy velice podstatný.

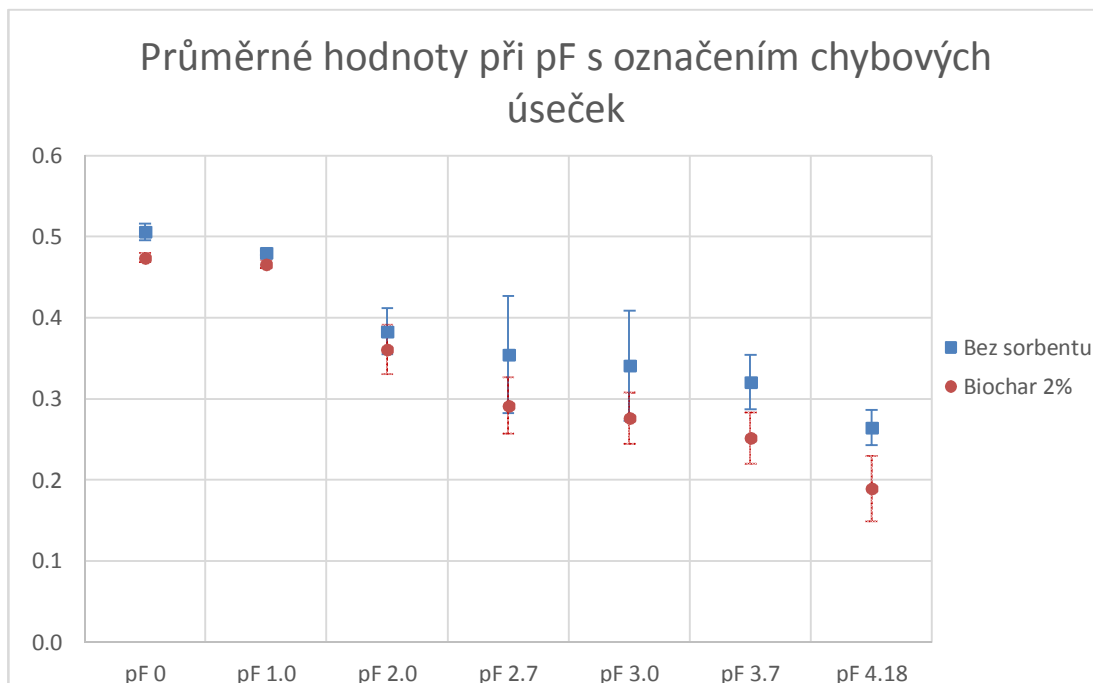
Bohužel nelze porovnávat konkrétní porovnávané hodnoty z první a druhé série mezi sebou z důvodu rozdílného, závěrečného proplachu půdy, kdy kyselina HNO_3 podstatně mění vlastnosti půdy. To má za následek i velké ovlivnění použitých sorbentů na průběh retenční křivky.

6.1. Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s BC

Po provedeném měření a vyhodnocení byly výsledné hodnoty zaneseny pro přehlednost do tabulky, vytvořené též v programu Microsoft Excel 2013. Výsledky pro půdu bez sorbentu a půdu obohacenou biocharem pro první sérii jsou uvedeny v tab. č. 3. Vzájemné grafické porovnání a odlišnost průběhu datových řad je zobrazeno na obr. č. 17.

Tab. 3: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbentem biochar, první série.

půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta kyselinou		půda s BC 2% promyta kyselinou		půda bez - půda s BC 2%	půda bez ku půda s BC 2%
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.13	0.0123	1.16	0.0111	-0.036	0.969
θ_{sVG}	0.53	0.0212	0.49	0.0180	0.043	1.089
θ_r	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.000	0.000
α	1.11	0.7852	0.13	0.0678	0.972	8.303
n	1.07	0.0041	1.12	0.0084	-0.049	0.956
pF 0	0.51	0.0041	0.47	0.0077	0.032	1.067
pF 1.0	0.48	0.0114	0.47	0.0061	0.014	1.030
pF 2.0	0.38	0.0030	0.36	0.0245	0.022	1.062
pF 2.7	0.35	0.0026	0.29	0.0271	0.063	1.215
pF 3.0	0.34	0.0046	0.28	0.0241	0.065	1.234
pF 3.7	0.32	0.0072	0.25	0.0170	0.069	1.272
pF 4.18	0.26	0.0147	0.19	0.0068	0.075	1.395



Obr. 17: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s BC pro první sérii.

Pro tyto výsledky z první série je hodnota průměrné objemové hmotnosti půdy bez sorbentu o 0,036 menší, než hodnota půdy obsahující sorbent biochar. Parametr α vychází o 0,972 vyšší a parametr n je o 0,049 naopak menší pro půdu bez sorbentu než pro půdu obohacenou biocharem. Z poznatků o těchto parametrech vyplívá, že půda bez sorbentu se začala odvodňovat dříve než půda s biocharem a zároveň si ale také, drží více vody ve vyšších podtlacích.

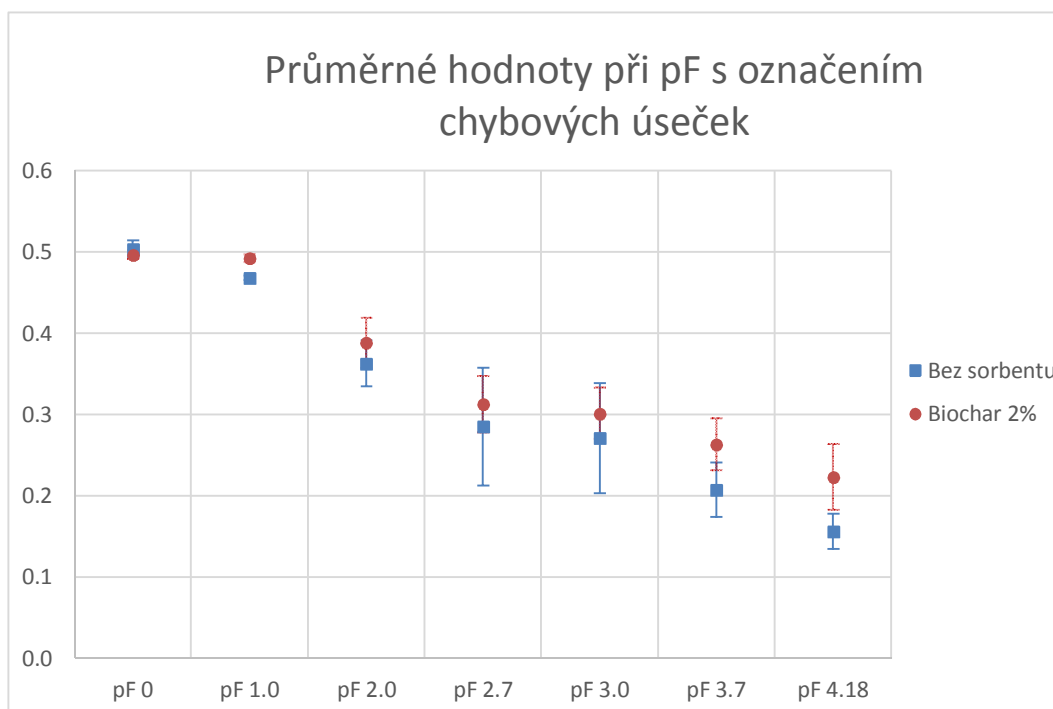
Výsledný graf (obr. č. 17) určuje, že půda promyta kyselinou zadržuje po celou dobu měření až do sacího tlaku 1,5 MPa více vody než půda s biocharem. V tomto případě je tedy vliv biocharu na retenci vody negativní.

Chybové úsečky znázorněné v grafickém zobrazení jsou vyneseny podle hodnot směrodatných odchylek (SD), pro každé vzorky (bez sorbentu, BC, AMO, AMO + BC) a stejně tak, jako i pro každou sérii zvláště. Hodnoty SD jsou rovněž vždy uvedeny v každé tabulce s výslednými hodnotami.

Stejným způsobem byly zpřehledněny v tabulce a vyneseny do grafu všechny získané výsledky i zbývajících vzorků. Výsledné hodnoty průměrné objemové hmotnosti, parametrů ze vztahu van Genuchtena a jednotlivé pF hodnoty jsou pro druhou sérii uvedeny v tab. č. 4. A opět vzájemné grafické porovnání a odlišnost průběhu datových řad je zobrazeno na obr. č. 18.

Tab. 4: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbentem biochar, druhá série.

půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta vodou		půda s BC 2% promyta vodou		půda bez - půda s BC 2%	půda bez ku půda s BC 2%
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.21	0.0202	1.17	0.0611	0.036	1.030
θ_{sVG}	0.50	0.0088	0.51	0.0071	-0.012	0.976
θ_r	0.04	0.0497	0.00	0.0000	0.035	0.000
α	0.03	0.0063	0.05	0.0188	-0.027	0.510
n	1.23	0.1022	1.13	0.0223	0.104	1.092
pF 0	0.50	0.0103	0.50	0.0055	0.007	1.014
pF 1.0	0.47	0.0030	0.49	0.0048	-0.024	0.951
pF 2.0	0.36	0.0282	0.39	0.0307	-0.025	0.935
pF 2.7	0.29	0.0722	0.31	0.0344	-0.028	0.912
pF 3.0	0.27	0.0679	0.30	0.0315	-0.030	0.899
pF 3.7	0.21	0.0336	0.26	0.0317	-0.056	0.788
pF 4.18	0.16	0.0218	0.22	0.0404	-0.067	0.699



Obr. 18: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s BC pro druhou sérii.

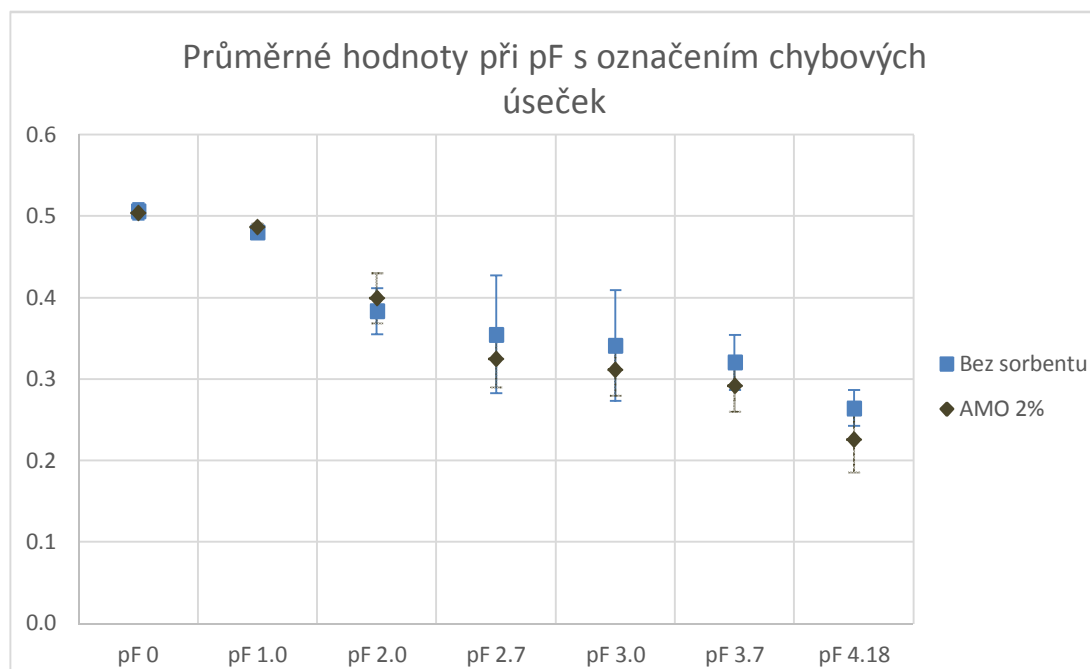
Průměrná objemová hmotnost při odběru půdy bez sorbentu je o 0,036 vyšší než pro půdu s biocharem. Parametr α je o 0,027 nižší a parametr n je o 0,104 vyšší pro půdu bez sorbentu než pro půdu s biocharem. Zde se začala odvodňovat dříve půda s biocharem, která si ale drží více vody než půda bez sorbentu. To potvrzuje i graf (obr. č. 18), kdy si více vody zadržuje půda obohacená biocharem, zejména pak v hodnotách pF 3,7 a 4,18. Vyplývá tedy, že čím vyšší je sucho, tím větší vliv má biochar na zadržování vody v půdě. Voda je ale pro rostliny nedostupná.

6.2. Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s AMO

Výsledné hodnoty z měření pro první sérii u půdy s AMO jsou zobrazeny v tab. č. 5. Totéž platí i pro sérii druhou, ovšem v tab. č. 6. Vzájemné grafické porovnání s půdou bez sorbentu a odlišnost průběhu datových řad je zobrazena na obr. č. 19 pro první sérii a pro druhou sérii na obr. č. 20.

Tab. 5: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbentem AMO, první série.

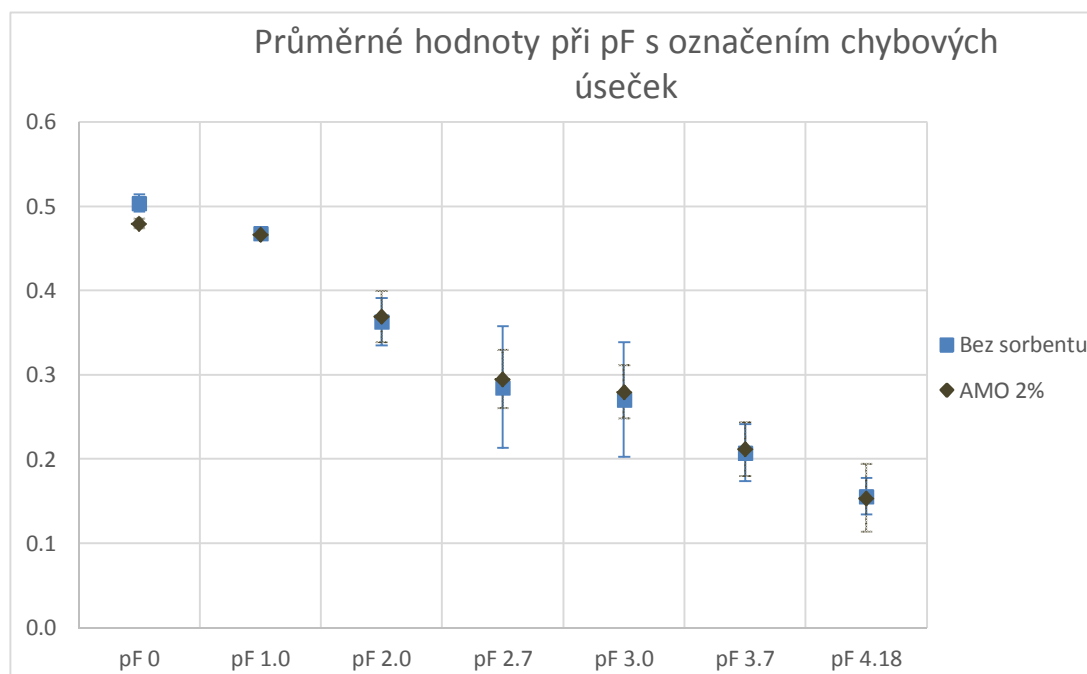
půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta kyselinou		půda s AMO 2% promyta kyselinou		půda bez - půda s AMO%	půda bez ku půda s AMO%
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD		
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.13	0.0123	1.19	0.0340	-0.068	0.943
θ_{sVG}	0.53	0.0212	0.52	0.0132	0.015	1.028
θ_r	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.000	0.000
α	1.11	0.7852	0.15	0.0348	0.954	7.297
n	1.07	0.0041	1.10	0.0234	-0.030	0.973
pF 0	0.51	0.0041	0.50	0.0077	0.002	1.004
pF 1.0	0.48	0.0114	0.49	0.0044	-0.006	0.987
pF 2.0	0.38	0.0030	0.40	0.0101	-0.016	0.961
pF 2.7	0.35	0.0026	0.32	0.0453	0.030	1.093
pF 3.0	0.34	0.0046	0.31	0.0411	0.030	1.097
pF 3.7	0.32	0.0072	0.29	0.0368	0.029	1.099
pF 4.18	0.26	0.0147	0.23	0.0211	0.039	1.171



Obr. 19: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s AMO, první série.

Tab. 6: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbentem AMO, druhá série.

půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta vodou		půda s AMO 2% promyta vodou		půda bez - půda s AMO 2%	půda bez ku půda s AMO 2%
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.21	0.0202	1.20	0.1338	0.013	1.011
θ_{sVG}	0.50	0.0088	0.49	0.0024	0.011	1.023
θ_r	0.04	0.0497	0.00	0.0000	0.035	0.000
α	0.03	0.0063	0.03	0.0193	-0.002	0.935
n	1.23	0.1022	1.18	0.0357	0.050	1.042
pF 0	0.50	0.0103	0.48	0.0089	0.024	1.050
pF 1.0	0.47	0.0030	0.47	0.0075	0.002	1.003
pF 2.0	0.36	0.0282	0.37	0.0647	-0.006	0.983
pF 2.7	0.29	0.0722	0.30	0.0623	-0.010	0.966
pF 3.0	0.27	0.0679	0.28	0.0608	-0.009	0.967
pF 3.7	0.21	0.0336	0.21	0.0555	-0.004	0.980
pF 4.18	0.16	0.0218	0.15	0.0510	0.002	1.015



Obr. 20: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s AMO, druhá série.

Pro první sérii a sorbent AMO připadá jeden z největších rozdílů objemové hmotnosti. Rozdíl je 0,068, kdy větší objemovou hmotnost měla půda se sorbentem. Parametr α je o 0,954 vyšší a parametr n je o 0,03 naopak menší pro půdu bez sorbentu. Odvodňování tedy začalo dříve u půdy bez sorbentu. Dle parametru n si půda se sorbentem drží méně vody než čistá půda.

Vliv sorbentu AMO na retenci vody se začal projevovat až od hodnoty pF 2,7, kdy zadržoval vodu mnohem méně než půda bez sorbentu (obr. č. 19). Tedy čím vyšší sací tlak, tím více se půda obohacená sorbentem AMO odvodňuje.

Objemová hmotnost pro půdu bez sorbentu a se sorbentem AMO, se u druhé série liší pouze o 0,013, kde vyšší byla pro půdu bez AMO. Parametr α je pro půdu se sorbentem o 0,002 nižší, což je bezvýznamné. Parametr n je o 0,05 vyšší pro půdu bez sorbentu. Půda se tedy začala odvodňovat takřka současně. I když je rozdíl hodnot parametru n velmi nízký, nepatrně více vody si držela půda obohacena sorbentem AMO, tedy až na hodnotu sacího tlaku 4,18, zde je hodnota shodná.

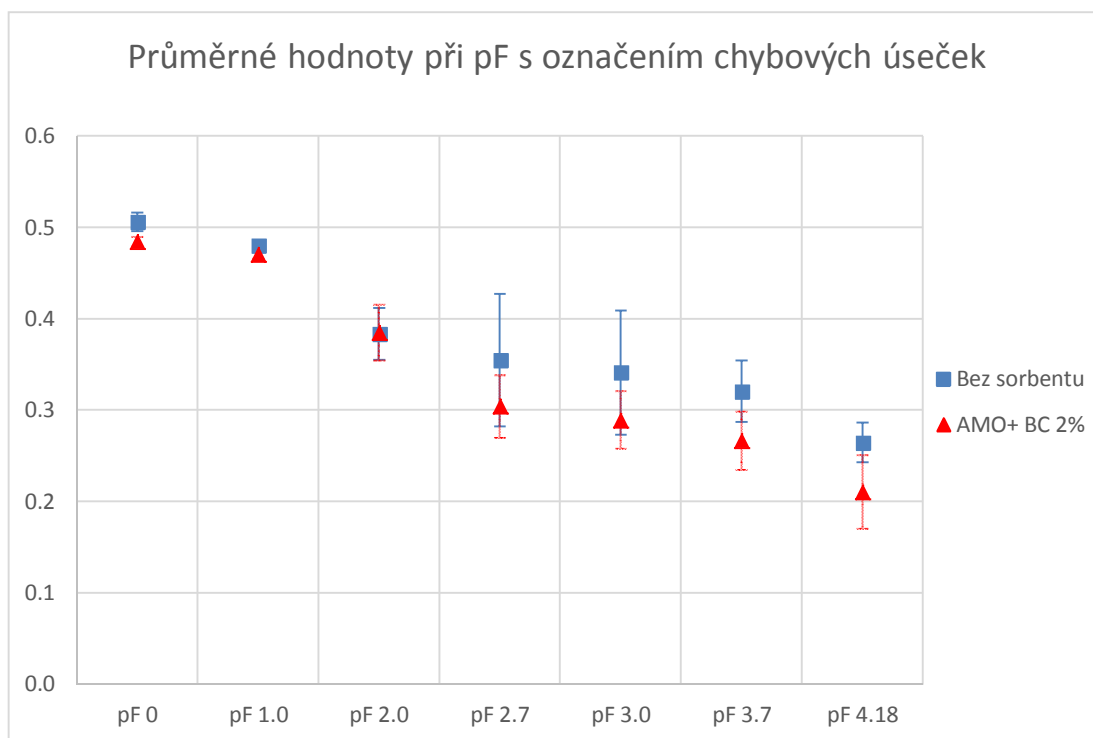
V tomto případě je průběh datových řad pro oba druhy vzorků takřka totožný. Z grafu (obr. č. 20) také vyplývá, že nepatrně více vody si drží vzorek se sorbentem, ovšem ne v celém měřeném rozsahu, což je potvrzeno i parametrem n . Podle těchto výsledků je vliv AMO na retenci vody v tomto druhu půdy prakticky zanedbatelný.

6.3. Výsledné porovnání půdy bez sorbentu s kombinací AMO + BC

Výsledné hodnoty z měření pro první sérii u půdy, do které byla aplikována kombinace sorbentů AMO + BC, jsou zobrazeny v tab. č. 7. Totéž i pro sérii druhou, v tab. č. 8. Vzájemné grafické porovnání s půdou bez sorbentu a odlišnost průběhu datových řad je zobrazeno na obr. č. 21 pro první sérii a pro druhou sérii obr. č. 22.

Tab. 7: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbenty AMO+BC, první série.

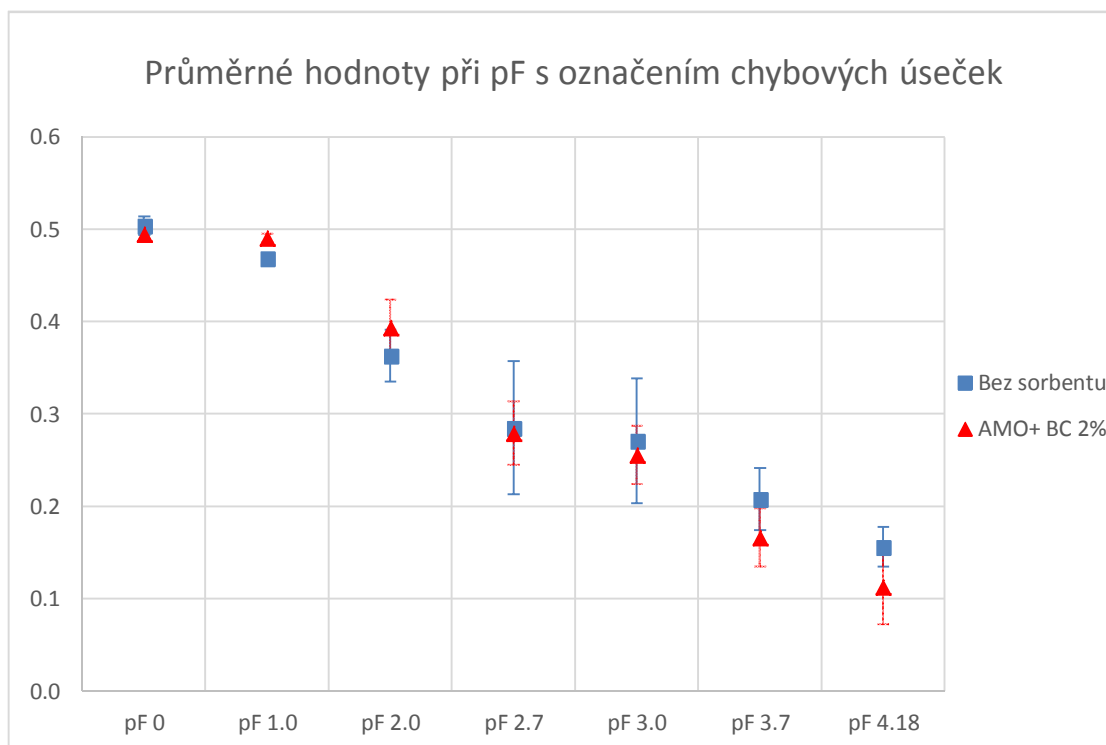
půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta kyselinou		půda s AMO+BC 2% promyta kyselinou		půda bez - půda s AMO+BC	půda bez ku půda s AMO+BC
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.13	0.0123	1.17	0.0048	-0.045	0.962
θ_{sVG}	0.53	0.0212	0.50	0.0155	0.036	1.071
θ_r	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.000	0.000
α	1.11	0.7852	0.14	0.0712	0.964	7.852
n	1.07	0.0041	1.11	0.0075	-0.040	0.963
pF 0	0.51	0.0041	0.48	0.0110	0.022	1.045
pF 1.0	0.48	0.0114	0.47	0.0062	0.010	1.021
pF 2.0	0.38	0.0030	0.38	0.0094	-0.001	0.996
pF 2.7	0.35	0.0026	0.30	0.0025	0.051	1.167
pF 3.0	0.34	0.0046	0.29	0.0023	0.052	1.180
pF 3.7	0.32	0.0072	0.27	0.0045	0.054	1.203
pF 4.18	0.26	0.0147	0.21	0.0112	0.054	1.258



Obr. 21: Průměrné hodnoty objemové hmotnosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s kombinací sorbentů AMO+BC, první série.

Tab. 8: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu s půdou obohacenou sorbenty AMO+BC, druhá série.

půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta vodou		půda s AMO+BC 2% promyta vodou		půda bez - půda s AMO+BC	půda bez ku půda s AMO+BC
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.21	0.0202	1.28	0.0062	-0.069	0.946
θ_{sVG}	0.50	0.0088	0.50	0.0051	-0.005	0.991
θ_r	0.04	0.0497	0.03	0.0402	0.007	1.235
α	0.03	0.0063	0.01	0.0002	0.014	2.037
n	1.23	0.1022	1.32	0.1047	-0.090	0.932
pF 0	0.50	0.0103	0.49	0.0051	0.009	1.019
pF 1.0	0.47	0.0030	0.49	0.0019	-0.023	0.954
pF 2.0	0.36	0.0282	0.39	0.0094	-0.030	0.923
pF 2.7	0.29	0.0722	0.28	0.0477	0.006	1.020
pF 3.0	0.27	0.0679	0.26	0.0537	0.015	1.060
pF 3.7	0.21	0.0336	0.17	0.0087	0.042	1.250
pF 4.18	0.16	0.0218	0.11	0.0018	0.043	1.386



Obr. 22: Průměrné hodnoty objemové hmotnosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu a půdy s kombinací sorbentů AMO+BC, druhá série.

V první sérii byl rozdíl objemové hmotnosti u kombinace sorbentů 0,045, kdy vyšší hodnotu měla půda obohacena sorbenty. Parametr α je o 0,964 vyšší a parametr n je o 0,04 naopak menší pro půdu bez sorbentu. Podle parametru α začalo odvodňování také dříve u půdy bez sorbentu a půda se sorbentem si drží méně vody než půda bez sorbentu. Graf (obr. č. 21) zobrazuje menší retenci vody u půdy se sorbenty, hlavně pak ve vyšších podtlacích. Výsledný vliv kombinace sorbentů na retenci vody je opět negativní.

U druhé série připadá největší vliv na změnu objemové hmotnosti právě kombinaci obou sorbentů. Rozdíl činí 0,069, kdy vyšší hodnota byla pro půdu obohacenou kombinací sorbentů AMO + BC. Parametr α je o 0,014 vyšší pro půdu bez sorbentů a n je naopak o 0,09 nižší, což je například obráceně než tomu bylo u samotného biocharu. Zde začalo odvodňování dříve u půdy bez přidané kombinace sorbentů. Parametr n udává, že více vody si drží půda bez sorbentů, zejména ve vyšších podtlacích.

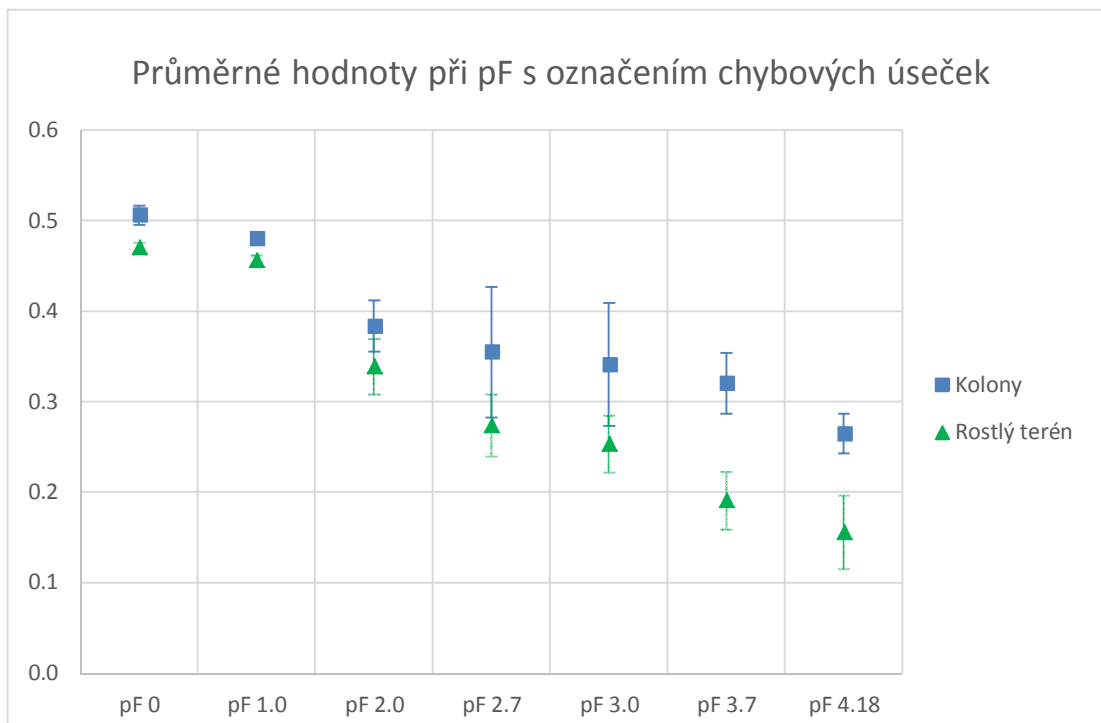
Grafické zobrazení průběhu porovnávaných datových řad (obr. č. 22) popisuje, že z kraje datové řady jsou hodnoty různorodé. Hlavní rozdíl vlivu kombinace sorbentů se projevuje až u vyššího sacího tlaku (hodnot pF 3,0 3,7 4,18), kde si půda bez sorbentu uchovává více vody než půda obohacena sorbentem, což potvrzují i hodnoty parametru n pro tyto vzorky. Lze tedy říct, že kombinace má vliv na retenci vody v půdě, ovšem v závislosti na velikosti sacího tlaku.

6.4. Výsledné porovnání půdy bez sorbentu z kolon s půdou z rostlého terénu

Jelikož jsme měli k dispozici i vzorky přímo z rostlého terénu, porovnali se navzájem i hodnoty těchto vzorků s půdou bez přidaného sorbentu odebraných z kolon. Tedy výsledné hodnoty průměrné objemové hmotnosti, parametrů ze vztahu van Genuchten a jednotlivé pF hodnoty. Ty jsou pro první sérii uvedeny v tab. č. 9 a pro druhou v tab. č. 10. Vzájemné grafické porovnání a odlišnost v průběhu datových řad je zobrazena na obr. č. 23 (první série) a 24 (druhá série).

Tab. 1: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu (měřených na vzorcích odebraných po kolonových experimentech) s půdou odebranou přímo z rostlého terénu, první série.

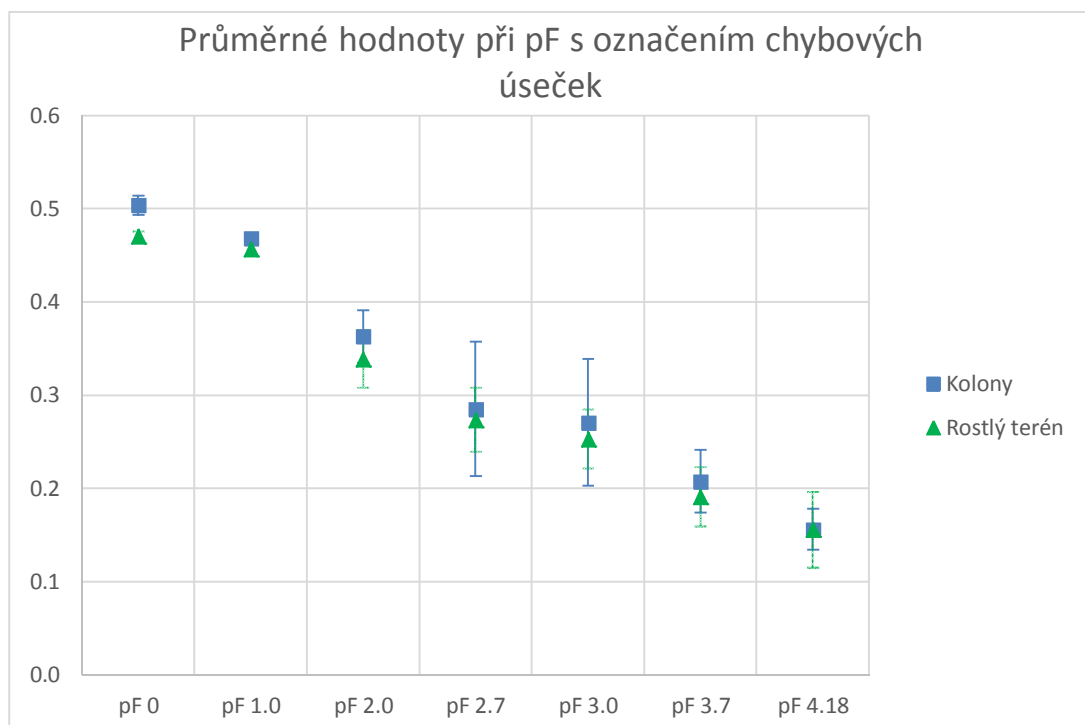
půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta kyselinou		půda rostlého terénu		půda kolony - rostlý terén	půda kolony ku rostlý terén
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD		
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.13	0.0123	1.28	0.1719	-0.150	0.883
θ_{sVG}	0.53	0.0212	0.48	0.0776	0.055	1.115
θ_r	0.00	0.0000	0.01	0.0291	-0.014	0.000
α	1.11	0.7852	0.07	0.0511	1.036	15.952
n	1.07	0.0041	1.18	0.0760	-0.117	0.901
pF 0	0.51	0.0041	0.47	0.0748	0.036	1.076
pF 1.0	0.48	0.0114	0.46	0.0732	0.024	1.052
pF 2.0	0.38	0.0030	0.34	0.0527	0.044	1.131
pF 2.7	0.35	0.0026	0.27	0.0462	0.081	1.298
pF 3.0	0.34	0.0046	0.25	0.0439	0.088	1.348
pF 3.7	0.32	0.0072	0.19	0.0414	0.130	1.681
pF 4.18	0.26	0.0147	0.16	0.0466	0.109	1.702



Obr. 23: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu odebrané z kolony a půdy odebranou přímo z rostlého terénu, první série.

Tab. 10: Porovnání retenčních křivek půdy bez sorbentu (měřených na vzorcích odebraných po kolonových experimentech) s půdou odebranou přímo z rostlého terénu, druhá série.

půda / porovnávané hodnoty	půda bez sorbentu promyta vodou		půda rostlého terénu		půda kolony - rostlý terén	půda kolony ku rostlý terén
	PRŮMĚR	SD	PRŮMĚR	SD	ROZDÍL	POMĚR
objemová hmotnost [g/cm ³]	1.21	0.0202	1.28	0.1719	-0.065	0.949
θ_{sVG}	0.50	0.0088	0.48	0.0776	0.020	1.041
θ_r	0.04	0.0497	0.01	0.0291	0.022	2.585
α	0.03	0.0063	0.07	0.0511	-0.042	0.400
n	1.23	0.1022	1.18	0.0760	0.051	1.043
pF 0	0.50	0.0103	0.47	0.0748	0.034	1.071
pF 1.0	0.47	0.0030	0.46	0.0732	0.012	1.026
pF 2.0	0.36	0.0282	0.34	0.0527	0.024	1.071
pF 2.7	0.29	0.0722	0.27	0.0462	0.012	1.043
pF 3.0	0.27	0.0679	0.25	0.0439	0.018	1.071
pF 3.7	0.21	0.0336	0.19	0.0414	0.017	1.089
pF 4.18	0.16	0.0218	0.16	0.0466	0.001	1.004



Obr. 24: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) s chybovými úsečkami. Ty znázorňují potenciální velikost chyby vzhledem k jednotlivým měřeným bodům v datové řadě. Jedná se o zobrazení půdy bez sorbentu odebrané z kolony a půdy odebranou přímo z rostlého terénu, druhá série.

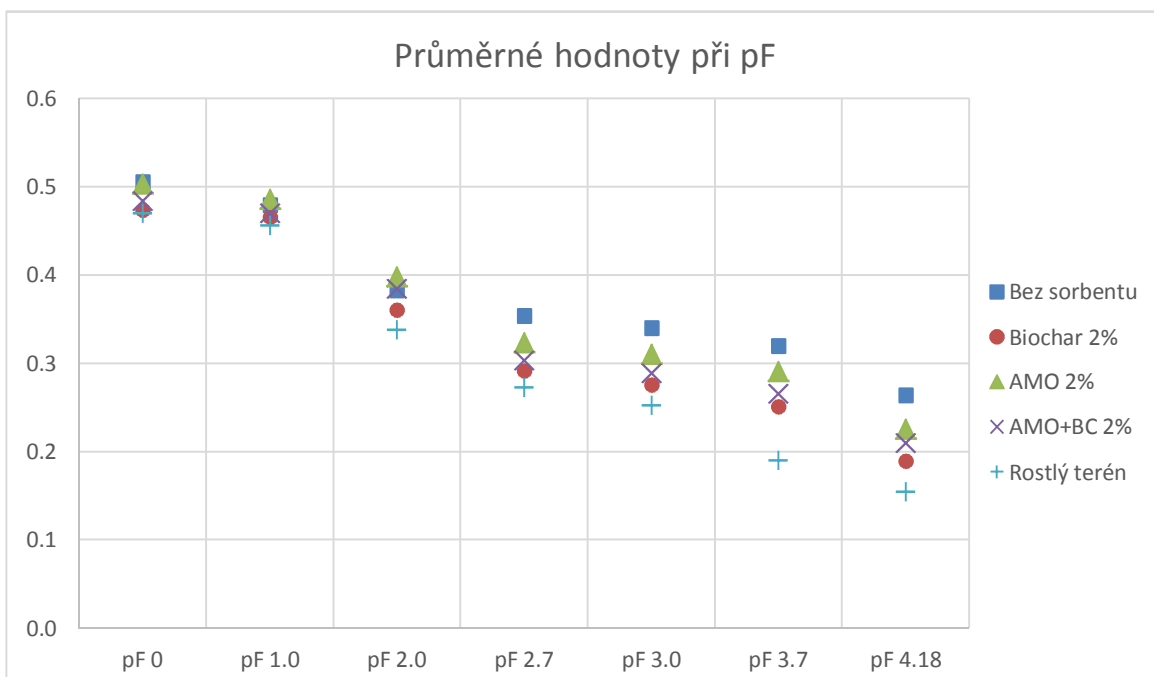
První série: Porovnání průběhu datové řady půdy bez přidaných sorbentů odebrané z kolonových experimentů s půdou odebranou přímo z rostlého terénu je nejvíce odlišné, i když se jedná o stejný druh půdy (obr. č. 23). Tento rozdíl je přikládán závěrečnému proplachu půdy kyselinou dusičnou, který zásadně změnil půdní vlastnosti.

Rozdíl v objemové hmotnosti je 0,150. To je největší rozdíl ze všech porovnávaných. Vyšší hodnota připadá půdě z rostlého terénu. Parametr α je o 1,036 vyšší pro půdu odebranou z kolon. Hodnota tohoto parametru je také nejvyšší ze všech porovnávaných. Parametr n je 0,117 nižší pro půdu z kolon. Tento rozdíl je oproti ostatním také markantní. Parametry udávají dřívější odvodňování u půdy odebrané z kolon. A větší retenci vody oproti půdě z rostlého terénu. To lze potvrdit opět na grafickém zobrazení (obr. č. 22) datových řad tohoto srovnání.

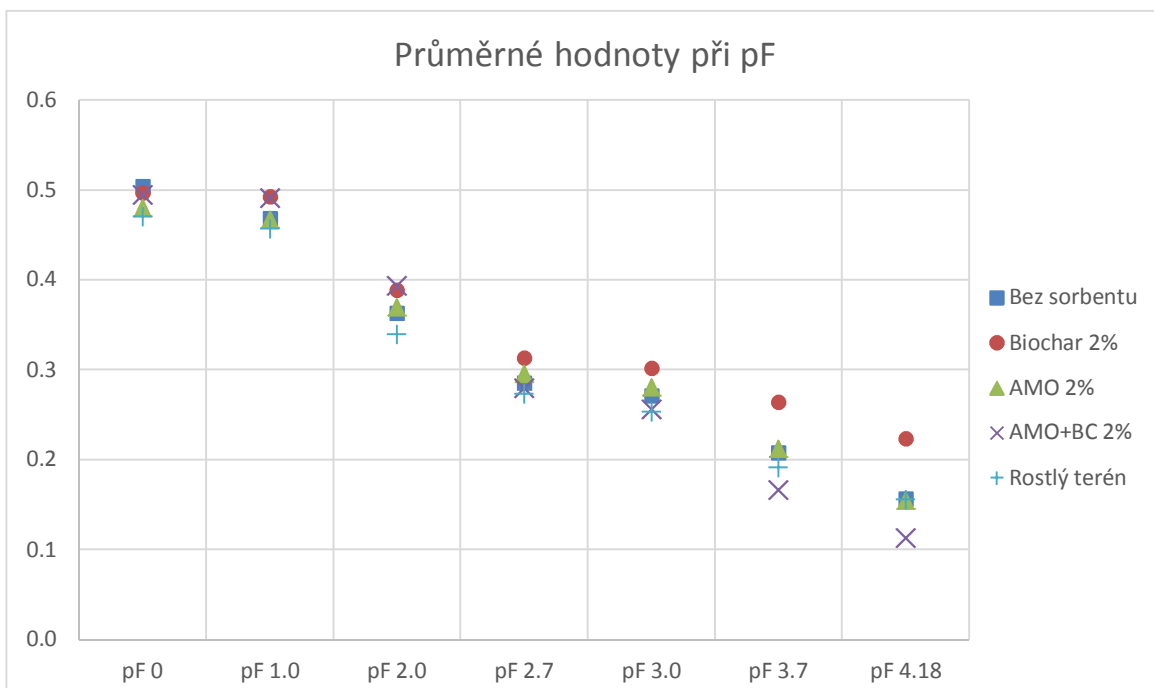
Druhá série: Datové řady půdy odebrané z kolon a z rostlého terénu mají velice podobný průběh. Objemová hmotnost je o 0,065 vyšší pro půdu z rostlého terénu. Parametr α je o 0,042 vyšší také pro půdu odebranou z rostlého terénu. A parametr n je pro tuto půdu nižší o 0,051. To je například stejné jako u kombinace sorbentů AMO + BC a opačně než u biocharu. O něco dříve se tady podle parametru n začala odvodňovat půda odebraná z rostlého terénu. Větší retence vody připadá půdě odebrané z kolon. To také potvrzuje výsledný graf (obr. č. 24).

6.5. Souhrnné porovnání

Pro přehlednější znázornění jsou do grafu vyneseny všechny výsledné hodnoty pF při daném sacím tlaku společně, a to pro všechny druhy zkoumané půdy. Tedy pro půdu bez přidaného sorbentu, půdu s BC, s AMO a kombinací AMO + BC. Grafické zobrazení je pro každou sérii zvláště na obr. č. 25 (první série) a 26 (druhá série).



Obr. 25: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) pro všechny druhy vzorků. Jedná se o první sérii.



Obr. 26: Průměrné hodnoty objemové vlhkosti při daném sacím tlaku (pF) pro všechny druhy vzorků. Jedná se o druhou sérii.

Závěrečný proplach půdy kyselinou dusičnou u první série značně změnil vlastnosti půdy. Tato změna je patrná ze všech grafů v porovnání s grafy pro druhou sérii. Důsledek toho je i zcela odlišný vliv sorbentů na vzorky z první a druhé série, jak lze vidět na předchozím grafickém zobrazení (obr. č. 25 a 26).

U první série lze jednoznačně říci, že nejvyšší (tzn. největší obsah vody v půdě) hodnoty v celé datové řadě má půda bez sorbentu, pocházející z kolon. Naopak nejnižší (nejmenší obsah vody v půdě), taktéž v celé datové řadě má půda bez sorbentu pocházející přímo z rostlého terénu. Když vezmeme v potaz pouze vzorky pocházejících z kolonových experimentů, pak má nejnižší hodnoty půda obohacená sorbentem biochar.

V druhé sérii se to takto jednoznačně pro celou datovou řadu určit nedá. Zde se hodnoty různě mění vlivem sacího tlaku v daném bodě. Jediné jednoznačně určené je, že od sacího tlaku pF 2,7 má nejvyšší hodnoty ve zbytku datové řady vzorek půdy obohacený biocharem.

7. Diskuze

Mezi první a druhou sérií vzorků vycházejí rozdílné dopady sorbentů, ač se jedná o stejnou půdu a stejný metodický postup měření. Tímto byl prokázán vliv závěrečného proplachu kyselinou dusičnou u první série vzorků na změnu půdních vlastností, která vedla právě k odlišnému vlivu těchto přidaných sorbentů.

Poznatky o vlivu parametrů α a n na průběh retenční křivky zjištěné během studie vyplývají z výsledných grafů a tabulek. Jedná se o grafické zobrazení na obr. č. 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 a 24. Tabulky s parametry jsou tab. č. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 10. Byl také prokázán vliv sorbentů na zadržování vody v půdě, ať už nulový (viz obr. č. 20), negativní (obr. č. 17, 19, 21 a 22) nebo pozitivní (obr. č. 18 a 22).

Jak uvádí ve své studii např. *HARDIE et al. (2014)* a *CHEN et al. (2011)*, biochar má vliv na snížení objemové hmotnosti, to vedlo ke zvýšení celkové pórovitosti. V našem průzkumu se snížení objemové hmotnosti vlivem BC projevilo v druhé sérii vzorků, což potvrzuje poznatky z těchto studií. Snížení bylo ovšem velmi malé z hodnoty 1,21 na 1,17. U půdy promyté kyselinou byl vliv na objemovou hmotnost opačný, to bylo nejspíše zapříčiněno proplachem kyselinou dusičnou.

Rovněž se ve studii *HARDIE et al. (2014)* a v další studii např. *EASTMAN (2011)* uvádí, že aplikace biocharu do půdy neměla žádný významný vliv na zadržování vody v půdě. To se nám potvrdilo u první sérii. Zde si půda bez BC držela mnohem více vody než půda s BC. Projevovat se to však začalo až od pF 2,7. Teorii o účinku biocharu na zadržování vody uvedl ve studii např. i *VERHEIJEN et al. (2010)*. A zní, že sorbent BC má významný vliv na zadržování vody v půdě (více viz kapitola 4.5. *Vliv sorbentů na retenční křivku*). Tato teorie se nám potvrdila u druhé série, kdy si půda obohacená sorbentem BC zadržovala mnohem více vody, než půda bez BC. A vliv biocharu se stupňoval s vyšším sacím tlakem. Toto tvrzení se dá vztahovat na teorii o tom, že určitá kombinace půdy a biocharu může mít tento dopad na zadržování vody v půdě.

Všechny zmínění studie a mnoho dalších se shoduje v tom, že záleží na mnoho faktorech, jaký bude výsledný dopad aplikace biocharu do půdy. Ty jsou např. vlastnosti, druh, typ půdy, vlastnosti použitého biocharu a záleží i na jeho původu. Velmi důležitá je velikost pórů biocharu. Podstatným prvkem mohou být i klimatické podmínky, hydrologické podmínky, půdní kontaminace aj. Navíc jeden druh biocharu může mít odlišný dopad na retenci vody v různých typech půdy. Proto ani nelze tvrdit, že všechny druhy biocharu budou mít stejný vliv a dopad na retenci vody u tohoto druhu půdy.

Bohužel se žádná dosavadní studie nezabývala konkrétně vlivem sorbentu AMO a kombinace AMO + BC na zadržování vody v půdě a průběh retenční křivky, proto není možnost výsledky porovnat s dalšími studii. Lze se odkázat pouze na poznatky a spekulace vlivu jiných, prozkoumaných sorbentů, což by však vhodné nebylo z důvodu rozdílných vlastností sorbentů.

Vliv AMO pro první sérii vyšel nepatrný leč spíše negativní, kdy si půda obohacena o tento sorbent držela naopak ještě méně vody než půda bez AMO. V druhé sérii se vliv prokázal jako nulový. Průběh datových řad vyšel prakticky totožný. Sorbent AMO ani nijak výrazně nezměnil objemovou hmotnost půdy. Z tohoto průzkumu lze říci, že podle této studie nemá AMO prakticky žádný vliv na retenci vody v půdě. To platí v celé škále měřeného sacího tlaku, ze kterého jsou rostliny schopny půdní vodu čerpat. Nelze to však brát za jednoznačný závěr. Vzhledem k vlivu u první série a již známým poznatkům o dopadu, např. biocharu, bude vždy záležet na druhu půdy, zejména půdních vlastnostech, a také určitě na vlastnostech i množství použitého AMO a mnoho dalších.

Vzhledem k dosavadním zjištěním lze u kombinace AMO + BC předpokládat zároveň pozitivní i negativní vliv na retenci vody v půdě. Dle této studie se u první série neprojevoval žádný vliv až do podtlaku 500 cm. Od této hodnoty si půda se sorbenty držela mnohem méně vody než půda bez sorbentu. Snížení retence vody bylo takřka konstantní, nebyl zaznamenán rozdíl u vyššího podtlaku. U druhé série si půda se sorbenty držela vody více, až do podtlaku kolem 500 cm. Hodnoty pF 2,7 a 3,0 jsou hranice, kdy se začalo zadržování vody vyrovnávat. Půda obohacena kombinací AMO + BC si držela stejné množství vody, jako půda bez sorbentu.

Od hodnoty pF 3,0 se postupně začal vliv měnit. Půda, kde byl aplikován sorbent, si postupně ve vyšších podtlacích držela méně vody, než půda bez sorbentu. Lze říci, že tato kombinace sorbentů má jistý vliv na retenci vody, ovšem je podmíněn velikostí sacího tlaku. To lze přikládat biocharu a jeho účinku, který měl na tuto půdu. Možností tohoto vlivu je i kombinace těchto dvou sorbentů, což není zatím prokazatelné.

Možné chyby v metodickém postupu měření byly očekávány spíše ze začátku měření při nízkých podtlacích. Z důvodu nejtěžšího měření právě v této fázi, kdy byly vzorky plně nasyceny vodou (viz kapitola 5.3. *Měření retenčních čar*). Ovšem podle výsledných grafů s chybovými úsečkami byly největší chyby měření na hodnotách pF 2,7 a 3,0. Jedná se o poslední měření v písko-kaolínovém tanku a první měření v přetlakovém aparátu do 5 barů. Chyby byly větší u celé první série. Jelikož se chyby u těchto pF hodnot vyskytují u všech grafů, lze předpokládat, že se nejedná o chybu při samotném přeavařování vzorků, to je i vyvráceno velikostí ostatních chybových úseček ve zbytku datové řady. Ovlivnění těchto chyb vzniklo pravděpodobně chybou na přístrojích nebo nedostatečným přilnutím vzorků na polopropustnou porézní membránu, např. z důvodu nedostatečného navlhčení. Správnost postupu měření nám potvrzovalo výsledné proložení naměřených bodů, retenční křivkou podle vztahu van Genuchten (1980), kde vycházely velmi nízké hodnoty *RMSE*, a to zejména pro vzorky z rostlého terénu.

Je nutno brát v potaz, že v průzkumu jsme měli velmi omezené množství zkoumaných vzorků (tj. dva vzorky od každého druhu) ve dvou sériích. Navíc proplach kyselinou dusičnou u první série vzorků měl značný vliv na změnu půdních vlastností, proto nebylo vhodné porovnávat získané poznatky ani mezi sebou.

Ráda bych poznamenala, že sorbenty se do půdy nepřidávají jen kvůli zadržování vody v půdě, ale i z mnoha dalších důvodů (viz Literární část). Aplikace správného biocharu do určitého druhu půdy může způsobit velký vliv na zadržování vody v půdě. Ovšem podle hypotézy, kterou uvedl ve své studii *VERHEIJEN et al. (2010)*, kdy zadržovaná voda v půdě nebude pro rostliny stejně dostupná. Je potřebné se zamyslet nad otázkou, pokud by biochar měl mít tento dopad na retenci vody v půdě, zda by byl vhodným sorbentem do onoho určitého druhu půdy.

Každopádně z tohoto průzkumu nelze vyvozovat jednoznačné závěry. Ani zde, jako v mnoha jiných pracích, nebyl nalezen přesvědčivý důkaz, který by umožnil vytvoření jednoznačného vztahu mezi zadržováním vody v půdě a použitím sorbentů. Práce však může sloužit jako další srovnávací podklad pro nové výzkumy v tomto směru. A určitě bych doporučila více k prozkoumání kombinaci AMO + BC.

8. Závěr

Získané poznatky potvrdily určitý vliv sorbentů na průběh retenční křivky. Z průzkumu bylo zjištěno, že nejvýznamnější vliv na zadržování vody v půdě má sorbent BC zejména ve vyšších hodnotách podtlaku. Tím se potvrdily některé studie např. *VERHEIJEN et al. (2010)* a *ANDRENELLI et al. (2016)*.

Rovněž se potvrdil vliv kyseliny dusičné na změnu půdních vlastností – došlo k takovému porušení vzorků, že hydraulické vlastnosti byly zcela odlišné, než u vzorků promytých pouze čistou (destilovanou) vodou. Výsledky druhé série jsou tedy více reprezentativní z důvodu absence promytí půdy kyselinou dusičnou.

Zcela novým poznatkem je vliv AMO a vliv kombinace dvou sorbentů AMO + BC. Vliv AMO na zadržování vody v půdě byl takřka nulový při celém měřeném rozsahu podtlaků. Tedy vliv AMO na průběh retenční křivky je neutrální. Tento poznatek nevyvrátil ani nepotvrdil žádnou teorii, jelikož nebyly doposud podobné studii na toto téma zpracovány. Kombinace těchto sorbentů měla značný vliv na retenci vody v půdě, ovšem ne v celém průběhu, pouze v určitých hodnotách sacího tlaku. Při nižších hodnotách pF (1,0 a 2,0), kde byl vliv pozitivní, si půda obohacena sorbenty držela vody více. Až od hodnoty pF 2,7, kdy začala retence vody s postupným zvyšováním sacího tlaku klesat, nejvyšší pokles byl pak na hodnotě pF 4,18.

Průběh RETC u půdy odebrané přímo z rostlého terénu a naopak půdy získané z kolon je velmi podobný. Dle výsledné tabulky (tab. č. 10) mají tyto vzorky jedny z nejmenších (zcela nejmenší má AMO) rozdílů průměrné vlhkosti. Půda z rostlého terénu si na všech těchto hodnotách pF 2,0; 3,0 a 3,7 drží takřka konstantně nevýrazně méně vody než půda pocházející z kolon. Na hodnotách pF 1,0; 2,7 a 4,18 je množství vody v obou půdách prakticky shodné. Větší rozdíl je pouze při stavu plného nasycení, kdy je měření nejméně přesné.

Z průzkumu tedy dále vyplývá, že největší vliv na zadržování vody v půdě má sorbent biochar (vyrobený z odpadu vinné révy) aplikovaný do půdy (písčítá hlína) promyté pouze čistou vodou. Půda obohacena BC si postupně s přibývajícím podtlakem držela větší množství vody. To potvrzují i postupně se navyšující rozdíly hodnot vlhkosti právě s přibývajícím podtlakem. Například u pF 2,0 je rozdíl -0,025;

hodnotě pF 3,0 připadá rozdíl -0,030 a u pF 4,18 vyšel rozdíl -0,067. Hlavní parametry (podle vztahu van Genuchten – θ_s a α) jsou si však až na parametr n velmi podobné (viz tab. č. 4).

Studie a průzkumy na téma vliv sorbentů na retenční křivku půdy jsou stále potřebné, protože vlivy půdních sorbentů na RETC nejsou dostatečně popsány a závisí, jak na množství a vlastnostech sorbentu, tak i na vlastnostech půdy. Proto je třeba získávat další a nové poznatky na toto téma, které je stále více aktuální.

9. Seznam zdrojů a použité literatury

- ABEL S., PETERS A., TRINKS S., SCHONSKY H., FACKLAM M., WESSOLEK G. 2013: Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil., Elsevier B.V. All rights reserved, *Geoderma* 202–203 (2013) 183–191
- ADRIANO D. C. 2001: Trace Elements in the Terrestrial Environment, 2. vydání, Springer-Verlag, New York.
- ANDERSON M.G., WALLING D.E., BATES P.D. 1996: Floodplain processes, Chichester: Wiley, ISBN: 0471966797, 9780471966791
- ANDRENELLI M.C., MAIENZAB A., GENESIOB L., MIGLIETTAB F., PELLEGRINI S., VACCARI F.P., VIGNOZZI N. 2016: Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil, *Agricultural Water Management* 163 (2016) 190–196
- DELLA PUPPA L., KOMÁREK M., BORDAS F., BOLLINGER L-C., JOUSSEIN E., 2013: Adsorption of copper, cadmium, lead and zinc onto a synthetic manganese oxide, Elsevier Inc. All rights reserved, *Journal of Colloid and Interface Science* 399 (2013) 99–106
- EASTMAN CM 2011: Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqulf amended with Biochar. Graduate Program in Environmental and Natural Resources. The Ohio State University, Columbus
- EIBISCH N., DURNER W., BECHTOLD M., FUB R., MIKUTTA R., WOCHE S.K., HELFRICH M. 2015: Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties?, Elsevier B.V. All rights reserved, *Geoderma* 245–246 (2015) 31–39
- EIJKELKAMP 2016: Eijkelkamp Soil & Water, Giesbeek, The Netherlands, online: SANDBOX: <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/sandbox-for-pf-determination.html>, cit. 15. 12. 2016.

SAND-KAOLIN BOX: <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/sand-kaolin-box-for-pf-determination.html>, cit. 15. 12. 2016.

LABORATORY EXTRACTORS: <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/set-for-pf-determination-with-ceramic-plates.html>, cit. 15. 12. 2016.

ETTLER V., MIHALJEVIČ M., ŠEBEK O., MOLEK M., GRYGAR T., ZEMAN J., 2006: Geochemical and Pb isotopic evidence for sources and dispersal of metal contamination in stream sediments from the mining and smelting district of Příbram, Czech Republic, Elsevier Ltd. All rights reserved, Environmental Pollution 142 (2006) 409–417

ETTLER V., KNYTL V., KOMÁREK M., DELLA PUPPA L., BORDAS F. MIHALJEVIČ M., KLEMENTOVÁ M., ŠEBEK O. 2014: Stability of a novel synthetic amorphous manganese oxide in contrasting soils., Elsevier B.V. All rights reserved, Geoderma 214–215 (2014) 2–9

ETTLER V., TOMÁŠOVÁ Z., KOMÁREK M., MIHALJEVIČ M., ŠEBEK O., MICHÁLKOVÁ Z. 2015: The pH-dependent long-term stability of an amorphous manganese oxide in smelter-polluted soils: Implication for chemical stabilization of metals and metalloids., Elsevier B.V. All rights reserved, Journal of Hazardous Materials 286 (2015) 386–394

HARDIE M., CLOTHIER B., BOUND S., OLIVER G., CLOSE D. 2014: Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?, Regular article – Plant Soil (2014) 376:347–361

HILLEL D. 2004: Introduction to environmental soil physics, Elsevier Academic Press, ISBN 0-12-348655-6

CHEN HX, DU ZL, GUO W, ZHANG QZ 2011: Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain. Chinese Journal of Applied Ecology 22:2930–2934

CHING S., PETROVAY D. J., JORGENSEN M. L. 1997: Sol-Gel Synthesis of Layered Birnessite-Type Manganese Oxides. Inorganic Chemistry 36(5): 883-890

- KUTÍLEK M., KURÁŽ V., CÍSLEROVÁ M. 2004: *Hydropedologie 10*, České vysoké učení technické v Praze, ISBN 80-01-02237-4
- MIHÁLIKOVÁ M. 2011: *Pedotransferové funkce pro odhad fyzikálních vlastností půd*, “nepublikováno“, doktorská disertační práce, ČZU Praha
- OUŘEDNÍČEK P. 2015: *Simulace transportu Pb a Zn půdním profilem po aplikaci syntetického oxidu manganu (AMO)*, “nepublikováno“, diplomová práce, ČZU Praha
- PAVLÁSEK J., JAČKA L. 2014: *Hydropedologie*, školní skripta, ČZU, Fakulta životního prostředí, projekt OP-Praha Adaptabilita CZ.2.17/3.1.00/36149
- ROŽNOVSKÝ J., LITSCHMANN T., STŘEDA T., STŘEDOVÁ H. [eds.] 2013: *Voda, půda a rostliny. Sborník abstraktů + CD s příspěvky z mezinárodní konference, Křtiny 29. až 30. 5. 2013. 48 stran. ČHMÚ, ISBN 978-80-87577-17-2*
- SOLDÁN Z. 2015: *Použití kombinace biocharu a syntetického oxidu manganu (AMO) ke snížení transportu Pb a Zn v kontaminované půdě*, “nepublikováno“, diplomová práce, ČZU Praha
- TRAKAL L., KOMÁREK M., SZÁKOVÁ J., ZEMANOVÁ V., TLUSTOŠ P. 2011: *Biochar application to metal-contaminated soil: Evaluating of Cd, Cu, Pb and Zn sorption behavior using single- and multi-element sorption experiment. Plant, soil and environment 57, 8: 372–380.*
- VERHEIJEN F., JEFFERY S., BASTOS A.C., VAN DER VELDE M., DIAFAS I. 2010: *Biochar Application to soil – A Critical Scientific Review of Effects of Soil Properties, Processes and Functions. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24099 – EN, Italy*
- ŽÁK K., ROHOVEC J., NAVRÁTIL T. 2009: *Fluxes of Heavy Metals from a Highly Polluted Watershed During Flood Events: A Case Study of the Litavka River, Czech Republic, Institute of Geology AS CR, v. v. i., Water Air Soil Pollut (2009) 203:343–358*

10. Přílohy

Příloha č. 1: Pískový tank. Snímky dokumentující podklad polopropustné porézní membrány s výluhem ze vzorků, po ukončení měření v tomto přístroji.



Obr. 27: Výluh ze vzorku z první série obohacený sorbentem AMO 2%.



Obr. 28: Snímek s výluhem ze vzorku z první série neobohacený žádným sorbentem.



Obr. 29: Snímek dokumentující pískový tank po vyjmutí vzorků z druhé série. Kombinace kolon a rostlého terénu. Místa s nulovým nebo minimálním výluhem připadají vzorkům odebraných přímo z rostlého terénu. Největší výluh připadá na vzorky s BC a kombinací AMO + BC (dolní roh) a také kombinace AMO + BC (horní roh). Jediný výrazně světle hnědý výluh (druhý od spodu) je ze vzorku obohaceného AMO.

Příloha č. 5: Snímky Kopeckého válečku před a po celém procesu měření.



Obr. 30: Čistý Kopeckého váleček.



Obr. 31: Ten samý váleček jako na obr. č. 30. Ovšem po celém procesu měření, tedy i po vysušení a výluhem kontaminantů obsažených v půdě. Jedná se o vzorek z první série, kde byla půda obohacena 2% BC.