

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Diplomová práce



Analýza vlivu různých zrnitostí biocharu na vybrané hydrofyzikální vlastnosti půdy

Bc. Tereza Dlouhá

ČZU v Praze, 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tereza Dlouhá

Regionální environmentální správa

Název práce

Analýza vlivu různých zrnitostí biocharu na vybrané hydrofyzikální vlastnosti půdy

Název anglicky

Analysis of the effect of different biochars on selected soil hydrophysical properties

Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je porovnání vlivu rozdílných biocharů na retenční schopnosti půdy a na nasycenou hydraulickou vodivost. Dalším cílem práce je sepsání rešerše se zaměřením na popis biocharu a jeho vlivu na vybrané hydrofyzikální vlastnosti půdy.

Metodika

Stručně charakterizovat biochar a jeho vliv na hydrofyzikální vlastnosti, stručně popsat retenční schopnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost.

Připravit vzorky zeminy s různým biocharem (plant, wood) a různým procentuálním zastoupením (1 % hm., 2 % hm.) a kontrolní vzorky bez ošetření. Dále část těchto vzorků zatížit a provést měření retenčních bodů a měření nasycené hydraulické vodivosti u všech vzorků, tedy zatížených i nezatížených.

Vyhodnotit naměřená data a vyhodnotit vliv biocharů na vybrané hydraulické parametry.

Doporučený rozsah práce

50

Klíčová slova

biochar, retence, nasycená hydraulická vodivost, půdní vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- Enders A., Hamley K., Whitman O., Joseph S., Lehmann J., 2012: Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114: 644-653.
- Herath, H., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An alfisol and an andisol. *Geoderma* 209–210, 188 – 197.
- Jeffrey S., van Groenigen J., Voorde T. F. J., Stoof C. R., Mommer L., Bezemer T.M., Meidners M.B.J., 2015: Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil., *Geoderma*, 251 – 252 s.
- Lehmann J., Rillig, M. C., Thies J., Masiello, A., Hockaday W., Crowley, D., 2011: Biochar Effects on Soil Biota – A Review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. 1812–1826.
- Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016: Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142. P. 136 – 144.
- Vijayaraghavan K., 2021: The importance of mineral ingredients in biochar production, properties and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51: 113-139.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Kovář

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou/závěrečnou práci na téma: „Analýza vlivu různých zrnitostí biocharu na vybrané hydrofyzikální vlastnosti půdy“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou/závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb. o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení §35. odst. 3 tohoto zákon, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové/závěrečné práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně doplnění dalších zákonů ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne _____

Podpis

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala mému vedoucímu diplomové práce Martinovi Kovářovi za odborné vedení, připomínky, užitečné rady a poskytnuté informace, a především za jeho čas a konzultace, které mi poskytl během procesu realizace této práce. Další díky bych chtěla věnovat mým rodičům.

Analýza vlivu různých zrnitostí biocharu na vybrané hydrofyzikální vlastnosti půdy

Abstrakt

Biochar je prvkem, který se v posledních letech testuje za účelem aplikování do půdy. Jeho aplikace má totiž nemalý vliv na půdní vlastnosti. Biochar se vyrábí pomocí tepelného rozkladu organického materiálu bez možného přístupu vzduchu, který se nazývá pyrolýza, při kterém se biomasa přeměňuje na konečný produkt, tedy na zuhelnatěnou biomasu.

Diplomová práce se zabývá zkoumáním a porovnáváním jednotlivých druhů biocharu, jak moc ovlivňují půdní vlastnosti, a to zejména retenční schopnosti a nasycenou hydraulickou vodivost. Výsledek tohoto zkoumání popisuje, jak jednotlivé prvky v experimentu uspěly a jaký z nich je tím nejvhodnějším.

V experimentu se sledují obecně tři typy vzorků. První vzorek je ponechán v původním stavu bez jakéhokoliv přídatku. Jedná se tedy o obyčejnou odebranou a následně homogenizovanou půdu. Do dalších dvou prvků je aplikován biochar. Jeden je rostlinného původu a druhý je vyroben ze dřeva. Tyto vzorky (konsolidované i nekonsolidované) se poměřují při měření retenčních schopností a nasycené hydraulické vodivosti.

Klíčová slova:

Biochar, retence, nasycená hydraulická vodivost, půdní vlastnosti

Analysis of the influence of different grain sizes of biochar on selected soil hydrophysical properties

Summary

Biochar is an element that has been tested for soil application in recent years. Its application has a considerable effect on soil properties. The preparation of this substance is not difficult. The thermal decomposition of organic matter without air, known as pyrolysis, converts the biomass into the final product, charred biomass.

This thesis investigates and compares how much different types of biochar affect soil properties, particularly soil retention and soil hydraulic conductivity. The result of this investigation describes how each element succeeded in the experiment and which one is the most suitable.

In general, three types of samples are monitored in the experiment. The first sample is left in its original state without any addition. It is therefore ordinary soil taken and then homogenised. Biochar is applied to the other two elements. One is of plant origin and the other is made of wood. These samples (consolidated and unconsolidated) are measured for retention capacity and saturated hydraulic conductivity.

Keys word:

Biochar, retention, saturated hydraulic conductivity, soil properties

Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Cíle práce.....	12
3.	Klima.....	13
4.	Půda.....	15
4.1	Význam.....	15
4.2	Pórovitost.....	15
4.3	Struktura půdy.....	16
4.4	Textura půdy.....	16
4.5	Vlhkost půdy.....	17
<u> 4.6</u>	<u> Proudění vody v porézním prostředí.....</u>	<u>18</u>
<u> 4.7</u>	<u> Retence.....</u>	<u>19</u>
<u> 4.8</u>	<u> Hydraulická vodivost.....</u>	<u>23</u>
<u> 4.8.1</u>	<u> Měření hydraulické vodivosti.....</u>	<u>24</u>
<u> 4.8.2</u>	<u> Laboratorní metody.....</u>	<u>25</u>
<u> 4.8.3</u>	<u> Darcyho zákon.....</u>	<u>27</u>
5.	Biouhel.....	28
5.1	Historie biocharu.....	28
5.2	Prvkové složení.....	29
5.3	Výroba biohlu.....	29
<u> 5.4</u>	<u> Zásobník živin a zlepšení úrodnosti.....</u>	<u>30</u>
<u> 5.5</u>	<u> Navýšení pH v půdě.....</u>	<u>31</u>
<u> 5.6</u>	<u> Retence půdy.....</u>	<u>31</u>
<u> 5.7</u>	<u> Vázání uhlíku.....</u>	<u>31</u>
<u> 5.8</u>	<u> Sorpční schopnost půdy.....</u>	<u>31</u>
<u> 5.9</u>	<u> Imobilizace nežádoucích prvků.....</u>	<u>31</u>
<u> 5.10</u>	<u> Tepelná energie.....</u>	<u>32</u>
<u> 5.11</u>	<u> Využití v kompostu.....</u>	<u>32</u>
<u> 5.12</u>	<u> Ve stavebnictví.....</u>	<u>32</u>
<u> 5.13</u>	<u> Dopad na životní prostředí.....</u>	<u>32</u>
<u> 5.14</u>	<u> Vliv biocharu na chemické, hydrologické a fyzikální vlastnosti půd.....</u>	<u>33</u>
<u> 5.15</u>	<u> Uvolňování skleníkových plynů za pomoci biocharu.....</u>	<u>33</u>
5.16	Hydraulická vodivost a biochar.....	34
5.17	Retence a biochar.....	35
<u> 5.18</u>	<u> Negativní stránky.....</u>	<u>35</u>

6.	Metodika.....	37
6.1	Příprava a měření retenčních bodů.....	37
6.2	Objemová vlhkost.....	42
6.3	Nasyčená hydraulická vodivost měřená v laboratoři	43
7.	Výsledky.....	45
7.1	Retence.....	45
7.2	Objemová hmotnost.....	47
7.3	Nasyčená hydraulická vodivost.....	48
8.	Diskuze.....	50
9.	Závěr	53
10.	Přehled literatury a použitých zdrojů	55
<u>10.1</u>	Internetové zdroje	60
11.	Přehled použitých obrázků	61
12.	Přehledpoužitých tabulek.....	61
13.	Přílohy	62

1. Úvod

V současné době jsou hodně diskutována témata týkající se životního prostředí a jeho vývoje v budoucích letech. Díky globálnímu oteplování a stoupajícím teplotám je jedním z často řešených bodů sucho. To má za důsledek například špatné výsledky hospodaření v zemědělství. Nedostatek vody se týká nejen České republiky, ale jde o rozsáhlý celosvětový problém. Nejvíce vody zadržuje samozřejmě půda, ale ta pomalu tuto svou schopnost postupně ztrácí. Půda je bez života, utužená, syká, obsahuje nedostatečné množství živin, a především má špatnou schopnost infiltrace. Dalšími příčinami poškozené půdy mohou být samozřejmě ale i jiné faktory jako např. špatný způsob obhospodařování půdy. Tím může být používání velmi těžkých několika tunových strojů, nevhodně zvolené metody orání a další způsoby hospodaření (Fisher a kol. 2019).

Při přívalových intenzivních deštích se stává, že vyschlá udusaná půda nezvládne pojmout rychle tak velký přísun vody a horní úrodná vrstva půdy (ornice) se tak odplavuje z místa pryč. Jako možné řešení tohoto problému může být buď technologický postup, který zadrží vodu v dané krajině a napomůže proti suchu a povodním nebo přidávání určitých pomocných materiálů přímo do půdy, které se pozvolně uvolňují do dané krajiny, kde pomáhají vylepšovat nejenom problém se suchem, ale zlepšují i další půdní vlastnosti.

Jedním z nástrojů, který by mohl být přínosem v této oblasti je biochar neboli takzvaný biouhel. Jedná se o produkt, který je vyráběn z organické hmoty (např. štěpky ze dřeva, rýžové stonky nebo i hnůj) za pomoci termického rozkladu látek bez přístupu kyslíku – pyrolýzy. Jeho aplikace do půdy má kladný vliv na půdní vlastnosti, což tvrdí nemálo autorů. Konkrétně dle Uchimiya a kol. (2010) může přidání tohoto prvku snížit toxicitu obsaženou v kovech a také navýšit sorpční schopnost půdy. V kyselých půdách by se mohla zlepšit úrodnost díky neutrálnímu až zásaditému pH přidávaného biocharu. Nesmělo by se toto ale provádět v půdách, které jsou zásadité. V tomto případě by mohlo dojít k nežádoucím účinkům (Verheijen a kol. 2010).

Biouhel dokáže také snížit emise oxidu uhličitého, které vznikají rychlým rozkládáním organické hmoty. Co se týče jeho obsahu, největší zastoupeno složkou je totiž vysoké množství uhlíku, které se nachází ve stabilní formě a nepodléhá již skoro žádnému většímu rozkladu. Živiny, které se na uhlík navážou, se uvolňují velmi pomalu a dále

se nevyplavují. Mohl by se tak označit jako jeden z nástrojů při nastupujícímu globálnímu oteplování a výkyvu teplotních změn (Brassard a kol. 2016).

Biochar ovlivňuje schopnost, jak dokáže proudit voda v půdním prostředí neboli jak ovlivňuje hydraulické půdní vlastnosti. Závisí na druhu biocharu a půdy, ale ve vhodné kombinaci lze docílit snížení nebo zvýšení těchto hodnot (Barnes a kol. 2014; Lim a kol. 2016). Tyto hodnoty jsou důležité, neboť jsou často základem pro mnoho projektů (zavlažování, odvodňování, výstavba hrází).

Díky biocharu lze dosáhnout také zvýšení retence. Nejedná se ale o převratné změny. Proto by bylo dobré v budoucích letech tuto schopnost biocharu ovlivňující půdu více zkoumat a zabírat se více pokusy a výzkumy.

V první části této diplomové práce se popisuje půda jako obecné téma, jsou probírána možná řešení zkvalitnění půdy se zaměřením konkrétně na biochar.

Druhá část obsahuje výzkum/měření, kdy jsou zkoumány obecně tři typy vzorků (1. vzorek s biocharem ze dřeva, 2. s biocharem z rostlinného původu a 3. vzorek bez přídavku).

Tyto prvky jsou vyhodnocovány při měření retenční schopnosti a hydraulické nasycené vodivosti a zkoumá se, který půdní vzorek s přídavkem biocharu nebo bez je tím nejefektivnějším. Tyto údaje jsou vyhodnoceny a prezentovány v grafických výstupech.

2. Cíl práce

Jako hlavní cíl této diplomové práce je porovnávání vlivů rozdílných půdních prvků konsolidovaných i nekonsolidovaných, a to bez i s přidavkem biocharu (původem rostlinného a ze dřeva) a vyhodnocení nejefektivnějšího zkoumaného půdního vzorku na základě měření retence a hydraulické vodivosti v laboratorních podmínkách.

Také je cílem diplomové práce seznámit čtenáře s terminologickými pojmy, které se týkají obecných základů pedologie a dále se zkoumaným prvkem – biocharem a proč je tento přídavek, který se aplikuje do půd výhodný i nevýhodný. Poslední velkou kapitolou pro čtenáře, která je sepsána ve formě rešerše, je retenční schopnost půdy a sorpční hydraulická vodivost, na čemž závisí celý proces měření půdních vzorků.

3. Klima

Klima se v současné době mění velmi rychle. Tento problém je již problémem celosvětovým. Zvyšují se hladiny moří a ubývá ledu (Antarktida, Grónsko). Stoupají emise skleníkových plynů, v největší míře koncentrace oxidu uhličitého. Dále k tomuto jevu přispívá i metan. Ten se uvolňuje ze dna oceánu nebo z permafrostu. Vyšší teploty sebou přináší více požárů a vymírání lesů, což jen přispívá ke zvyšování oxidu uhličitého. Dalšími skleníkovými plyny, které ovlivňují energetickou bilanci atmosféry jsou vodní pára, oxid dusný a ozon (Brázdil a Kotyza, 2010).

Zvyšování koncentrace těchto plynů nepovede jenom k převratu teplotních změn, ale změní se i celý klimatický systém – tzn. rozprostření, četnost a intenzita srážek a dále i mimořádné podoby počasí. Největším rizikem, kterému by mohla čelit Střední Evropa je éra sucha a s tím spojené dodávání rezerv do podzemních vod během jarního tání díky sníženému množství objemu sněhu a nástup brzkého začátku vegetačního období dříve než doteď kvůli vyšším teplotám. To by zapříčinilo vydatnější odpar a zvýšené spotřebovávání vody z půdy. To by doprovázelo i snížení srážek v létě. Dále během jara a léta i vyšší vypařování vody z půd. Toto vše dohromady by mohlo znamenat snížení průměru rezerv vody v půdním profilu, a to cca na polovičku současného stavu. Úbytek dešťů by se stal rizikem zejména pro ta území, která trpí nedostatkem vody už v této době – např. Asie a některé oblasti v Africe (Barker, 2003).

Celková teplota podnebí je výrazně ovlivňována teplotou půdy, vody a vzduchu. Teplota půdy souvisí především s jejími fyzikálními vlastnostmi. Dalším aspektem je i porost, vláha a aktuální počasí. U porostlých půd se pohybuje teplota pod 40 stupni a minimální teplota povrchu půdy se nedostane pod minus 14 stupňů. V polárních oblastech se ale vyskytují půdy, které jsou trvale zamrzlé. Nazývají se permafrost. Díky globálnímu oteplování ale i tyto půdy začínají rozmrzávat a díky tomu dochází k uvolňování nežádoucích prvků jakož jsou právě skleníkové plyny (Kangawa, 2019).

Mezi největší rizika a hrozby pro zemědělskou půdu způsobené klimatickými změnami patří eroze (větrná i vodní), acidifikace a salinizace, zhoršení struktury půdy s čímž souvisí i její utužování, záplavy nebo i sesuvy. Dále i dehumifikace či desertifikace. Degradace půd není způsobena jen zrychlujícím se stylem života nebo technologiemi, ale vliv má i nastávající klimatická změna. Půda je ovlivněna její povrchovou teplotou, jaká panuje vlhkost a také tlak, rychlost a směr větrů, srážky (četnost) a sněhová pokrývka. Změna klimatu sebou nese degradační následky jako

je již zmíněná eroze nebo nedostatečné množství organické hmoty. Od roku 1936 již ubylo cca 1 milion ha zemědělské půdy (Schneider a kol. 2010).

Co se týče změn teplot, půda je tímto faktorem velmi ovlivňována. Teplota vzduchu má vliv na hydrologické procesy v půdě. Je zrychlená evapotranspirace a způsobována salinizace a desertifikace půdy. Do určité míry je společně s hydrologickými změnami spouštěč pro půdní sesuvy. Změny teplot a srážek také mají za příčinu prodloužení vegetačních období, snížení oblačnosti, vyšší počet hodin světla, který také ovlivňuje teplotu půdy (Pytl a Broncová-Klicperová, 2012).

Klima má vliv na to, jak se utváří půdy, a to z hlediska teplot a srážek a společného poměru v dlouhodobějším rozsahu. Hlavním faktorem není pouze teplota vlastní, a to jaká panuje vlhkost, ale také jak dlouho trvají určité klimatické okolnosti a v jaké míře kolísají. Příkladem je tropické klima, které panuje v oblastech u rovníku. Je poměrně teplé a vyznačuje se tím, že v oblastech, kde se vyskytuje, neproběhlo zalednění po statisíce let. Naopak v oblastech, které se vyznačují mírným klimatem, tak v nich za stejnou dobu statisíce let proběhlo vystřídání několik dob ledových a meziledových (Barker, 2003).

Existuje tzv. Köppenova klasifikace podnebí vytvořená v roce 1884. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších tříd podnebí. Tato klasifikace je vytvořena na základě toho, jakou teplotu má vzduch a rozmístění srážek vůči vegetaci. Je určeno 5 klíčových klimatických pásem (Zillman, 2009).

Jedná se o podnebí tropické, suché, mírné, polární a alpské a kontinentální. Díky těmto uvedeným klimatickým pásmům na Zemi se dá stanovit i zonalita půd. Tyto zóny jsou stanovené na pásmovitosti (šířkové), stupňovitosti (výškové) a posledně na kontinentalitě. Vymezují se ale i půdy nazývané azonální. Ty se vyznačují tím, že nejsou tolik závislé na tom, jaké panuje bioklima. Příkladem jsou mladší půdy nacházející se v podmínkách, které nejsou příznivé pro pedogenezi. Dále existují půdy intrazonální. Ty jsou zcela nezávislé na tom, jaké panují bioklimatické okolnosti, ale jsou poutané na nezvyklý substrát. Klima má vliv na to, jak rychle půdy zvětrávají a na to jaké následně vznikají výtvořiny zvětrávání. Dále ovlivňuje režim vody v půdě, vegetační pokryv nebo i jak dlouho trvá délka vegetačních období. Je známo, že dostatečné množství srážek má za příčinu vznik lepších diferenciovaných půd. Naopak při nedostatku zase vznikají především půdy, které jsou méně diferenciované (Zillman, 2009).

4. Půda

Půda je přírodním samostatným historickým útvarem vyvinutým z povrchových zvětralin zemské kůry a z organických zůstatků působením půdotvorných činitelů. Obsahuje složky plynné a kapalné. Dále zahrnuje i půdní organismy, tedy edafon. Její vznik je řízený pedogenezí za ovlivnění času a dále vnějšími faktory. Je dílem přeměny organických a minerálních látek (Jandák a kol. 2004).

4.1 Význam

Půda má mnoho významů. Je úložištěm i zdrojem určitých látek a souvisle reguluje její koloběh. Díky tomu funguje stabilita ekosystémů a vyváženost energií. Slouží jako základní článek v potravním řetězci a je substrátem pro rostlinstvo. Také je významná tím, že funguje jako zásobárna vody. Je to bohatství přírody, o které je nutné se správně starat a dobře s ním hospodařit, protože se jedná o faktor, který je nezbytný pro lidi a přírodu i do budoucích let (Jandák a kol. 2004).

4.2 Pórovitost

Pórovitost v půdě je kromě struktury nejdůležitějším bodem jejího uspořádání prostoru. Póry lze definovat jako volnou plochu, mezery či prázdno uvnitř půdního profilu. Díky nim je pak možný pohyb vzduchu i vody v půdě. Odehrávají se v nich přeměny látek a reakce, kdy dochází k výměnám mezi rostlinami a mikroorganismy (Šantrůčková, 2014).

Póry lze rozdělit na jemné a hrubé neboli také kapilární a nekapilární. Ty jemné nemají průměr vyšší než 0,02 milimetru. Díky jejich přítomnosti voda v půdě vzlíná, a tak ovlivňují vázání v půdním profilu. Póry hrubé s průměrem větším, než 0,02 milimetrů berou vodu z horní části půdy do jejích hloubek. Podílí se na podpoře výměny plynů, a to mezi atmosférou a dále půdou (Šimek, 2003).

Zemědělské půdy mají celkovou pórovitost u ornice přibližně 40-50 %. Podorničí má pórovitost už zhruba jen 30-40 %. Pórovitost lze ovlivnit způsobem hospodaření s půdou. Mezi tyto faktory patří například orba kypření nebo i vláčení (Jandák a kol. 2004).

4.3 Struktura půdy

Struktura půdy je fyzikální vlastností půdy, která vyjadřuje, jakým způsobem jsou uspořádané tuhé pevné částice – agregáty. Agregát je složen shlukem částic. Ty jsou původu minerálního i organického. Půdní struktura je uspořádání částic vyskytujících se v půdním profilu (Šantrůčková, 2014).

4.4 Textura půdy

Textura půdy se vymezuje tím, jaký panuje poměr zastoupení konkrétních frakcí v půdním profilu. Je také fyzikální vlastností, která určuje fyzikální frakcionizaci. Má podíl na půdních procesech, ale utváří i ekologickou a agronomickou charakteristiku půdy (Šantrůčková, 2014).

Dělení půd na základě zrnitosti je jednou z nejstarší možností dělení půd. Zrnitost se určuje například pomocí vyplavování, usazování či používáním sít. Půdy se rozdělují podle Nováka (viz. následující tabulka). Jsou přiděleny do různých skupin díky procentuálnímu obsahu určitých frakcí (Šimek, 2003).

SKUPINY PŮD PODLE OBTÍŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ	PŮDNÍ DRUH	OBSAH JÍLNATÝCH ČÁSTIC V %
Těžké půdy	Jíl	>75
	Jílovitá půda	60-75
	Jílovitohlinitá	45-60
Střední půdy	Hlinitá	30-45
	Písčitohlinitá	20-30
Lehké půdy	Hlinitopísčité	10-20
	Písčité	0-10

Tabulka 1 Dělení půdy na základě textury (Andreoli a kol. 2009).

4.5 Vlhkost půdy

Dle pedologie termín vlhkost půdy vyjadřuje charakteristiky jako hydrolimity a vodní konstanty v půdě. Agrometeorologické pojetí vlhkosti půdy definuje vlhkost půdy jako množství vody obsažené v půdě.

Voda je velice důležitá složka půdy. Obsah vody v půdě je velmi proměnlivý a závisí na pedologických vlivech a meteorologických podmínkách. Vyskytuje se v různorodých podobách a vazbách vzájemně s částicemi půdy a na tomto závisí, jak je dostupná pro rostliny (Jandák a kol. 2004).

Voda v půdě se vyskytuje od minimálního množství v suchých půdách až do plného zaplnění veškerých pórů v mokřích půdách, tj. při hodnotách úplné kapacity. Poměr obsahu vody u pevné fáze půdy je definován hodnotami vlhkosti hmotnostní či objemové.

Momentní půdní vlhkost je množství vody v určitém okamžiku v půdním profilu a je základním množstevním znakem mezi vodou a půdou. Je určována poměrem množství vody v půdě a hmotností k objemu suché půdy nebo k hmotnosti (Wilhite a Glanz, 1995).

Pro stanovení objemové či hmotnostní vlhkosti lze využít vzorce uvedené níže.

Objemová vlhkost půdy

Jaký panuje poměr množství vody k tomu, jaký objem má vzorek půdy.

$$\Theta = V_w / V_s$$

V_w – objem vody

V_s – objem vzorku půdy

Hmotnostní vlhkost půdy

Jaký panuje poměr mezi hmotností vody a hmotností půdy v tuhé fázi.

$$w = m_w / m_z$$

m_w - hmotnost vody

m_z - hmotnost půdy při vlhkosti 0

Vzájemný přepoččet

$$\Theta = w \cdot \rho_d / \rho_w$$

ρ_d = objemová hmotnost půdy

ρ_w = objemová hmotnost vody rovno 1

Matriční síly jsou označením pro různé druhy sil působící na vodu v půdním profilu. Ty jsou podmíněné pórovitým prostředím v půdě, tedy přitažlivostí sil mezi půdními částicemi, které jsou pevné a mezi vodou. Dále k nim patří síly podmíněny ionty (volné), hydrostatickým tlakem a atmosférickým tlakem vzduchu, který je uzavřený v pórech. Neposledně působí na vodu síla tíhy a její možné pohybování je omezeno třením roztoku v půdě.

Mezi základní dělení způsobů, jakým se měří vlhkost v půdě, patří měření laboratorní a polní, resp. terénní. Dále se pak rozlišuje měření nedestruktivní (v případě, že nebyla narušena při měření celistvost profilu) a destruktivní (v případě, že pro určení půdní vlhkosti není jiná možnost než odběr vzorku z půdy). Posledním typem dělení měření vlhkosti půdy je měření přímé (je zjišťován reálný obsah vody v půdním profilu) a nepřímé (vlhkost v půdě je odvozována z vlastních čidel, které se umístí do půdy a má na ně vliv půdní vlhkost) (Carlson a kol. 1999).

4.6 Proudění vody v porézním prostředí

Půdu lze označit jako porézní prostor, ve kterém neustále proudí voda. Ta se pohybuje půdními póry. Místo které se nachází v prostoru okolo částic, ve kterém může voda proudit, je limitováno a maximálně odpovídá objemu pórů. Jakým způsobem se voda pohybuje v půdním prostředí závisí na rozdílech v potencionální energii. Voda teče z těch míst, která mají vyšší energii a následně proudí do prostorů, které se vyznačují nižší energií. Na vodu působí v půdním profilu mnoho sil. Ty jsou ovlivněny porézním prostředím půdy, poutavými silami, které panují mezi půdními pevnými prvky v půdě a vodou. Mezi ně se řadí i síly, které jsou podmíněné díky přítomnosti vyskytujících se volných iontů. Dále toto ovlivňuje i hydrostatický tlak nebo tlak vzduchu (atmosférický i uzavřený v pórech) a neposledně i gravitační síla (Jandák a kol. 2004).

Půdní vodu lze vymežit na tři různé formy dle sil, které na ni v půdním prostředí působí. Prvním typem je voda gravitační (volná). Ta se vyznačuje tím, že se neváže pevně na další pevné složky vyskytující se v půdě. Nachází se především v pórech a pohyb se řídí nejvíce díky gravitační síle. Tato voda se vyskytuje jen dočasně po

určitou dobu, a to po závlahách, při změnách podzemní hladiny vody. Díky jejímu rychlejšímu transportu je klíčová pro přenos koloidů a dalších látek. Označuje se jako významný pedogenetický činitel. Druhý typ půdy je označován jako voda kapilární (může být lehce i těžce pohyblivá – lentokapilární). Z jejího názvu lze vyčíst, že její chod se řídí kapilárními energiemi. Ty jsou aktivní pouze v přijatelně úzkých pórech, v případě že adhezní i kohezní síly jsou převažujícími nad silou gravitační. Pak může nastat problém se vztlínáním vody a souvisle s tím tyto síly drží vodu v půdním profilu a nepovolí jí téct profilem. Tato voda je významná ke vztahu života na povrchu i v jejím prostředí. Hodí se jako voda na přijímání živin prostřednictvím rostlin. V půdě se vhodně poutá, tak aby po srážkách hned nezmizela do nedostupných hloubek, ale není poutána takovou silou, aby byla nedostupnou pro rostliny a ostatní organismy. Voda, která je nedostupná a silně poutána je označována jako adsorpční. Adsorpční síly ji vážou k povrchu. Zpravidla jde o tenčí povlaky půdních částic s mocností několika nanometrů. Je téměř nepohyblivá a nemá schopnost rozpouštění (Kutílek a kol. 2004).

Jakým způsobem se voda pohybuje je rozhodováno pomocí sil, které v půdě na vodu působí. Pro určení směru, kudy se voda pohybuje, je nutno zjistit jaká panuje energie na konkrétním místě. Daná energie, která se vztahuje na jednotku vody pak nabyde rozměru tlaku. A v případě, že je ve vztahu na jednotku hmotnosti vody, pak se dá hovořit o tlakové výšce (Kutílek a kol. 2004).

4.7 Retence

Retence vody v oborech hydrologie a pedologie znamená přirozené či krátkodobé dočasné zadržování vody v krajině. Voda může být držena na mnoha místech, kterými mohou být například půdní profil, koryto toku, vodní nebo suchá nádrž, záchytný příkop či průleh, travní porost, křoviny nebo na povrchu lesního stromoví (Pokorná a Zábranská, 2007).

Retence je důležitý faktor pro uchycení srážek a přeměnu povodňových vln (Kraus a Kvítek, 2018).

Půda však dokáže pojmout jen určitý objem vody. Při překročení limitu dojde k fázi, která se nazývá perkolační fáze. V tomto bodě se přestane voda zadržovat. Pórovitost zaručuje procházení, zachycování plynů a vlhkost uvnitř půdního profilu. Způsobilost zadržování vody závisí na tom, jakých rozměrů dosahují půdní částice. Pravidlem je, že molekuly vody korelují silněji s částicemi, které jsou jemné a z hlinitých půd naopak od částic, které jsou hrubější a jsou z půd písčitéch.

Tím pádem více vody zadrží půdy jílovité a lepší průtok vody půdním profilem zvládají půdy písčité (Slavík a Neruda, 2007).

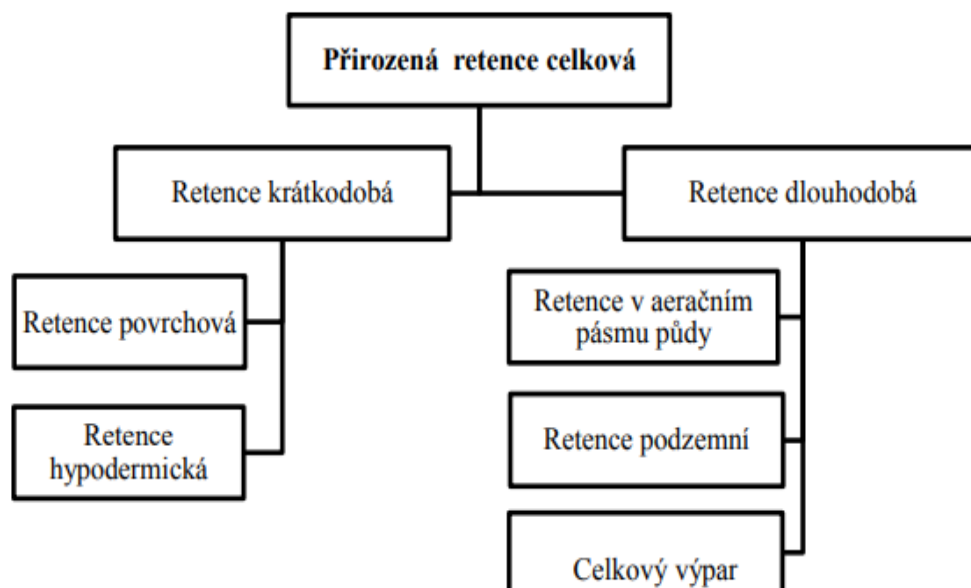
Během vegetačního období se retenční běh utváří z fází, které se neustále střídají. Jsou jimi fáze akumulární a perkolační.

Fáze perkolační je jevem, kdy převážná část vody ze srážek teče půdním profilem do podloží a není u toho v půdě nijak zadržena. Tato fáze je zamezena v tom momentu, kdy množství vody v půdě začne klesat a dostane se až pod hornější hranici. Kapacita retence půdy je rozdílem horní a dolní hodnoty množství vody v půdním profilu.

Během akumulární fáze se infiltrovaná srážková voda v půdě hromadí. Rostliny ji pomalu odčerpávají pro svoje potřeby, zejména pro transpiraci. Pokud je infiltrace srážek převýšena odběrem transpirací, plní vsakovaná voda půdní profil až do momentu, kdy množství akumulované vody dosáhne limitu horní hranice. Následně poté dochází k odtékání velkého objemu vody směrem k podloží (Slavík a Neruda, 2007).

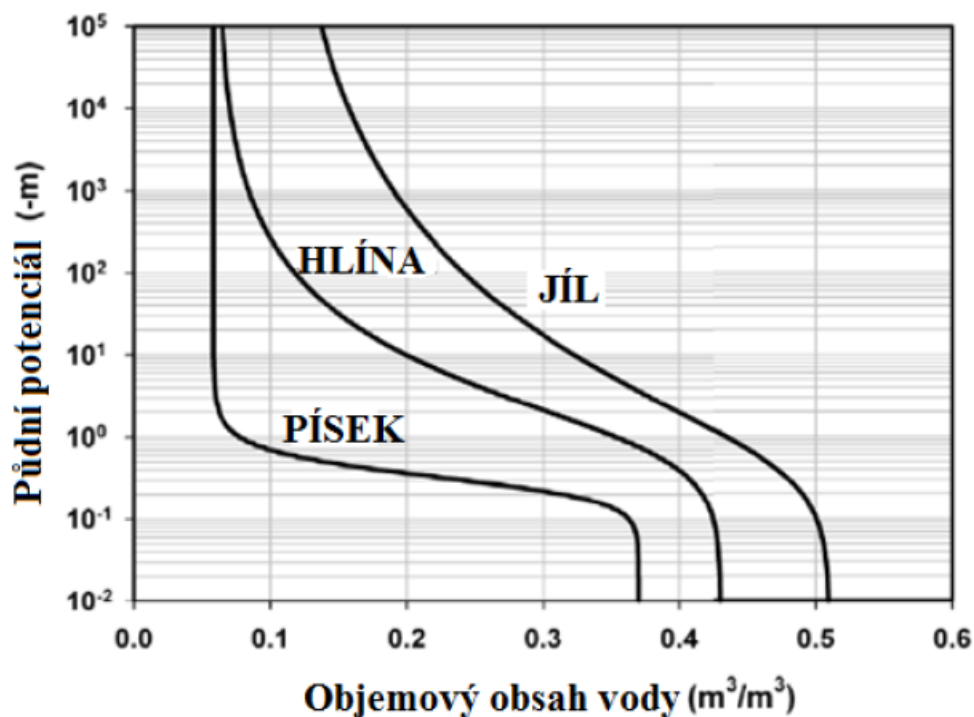
Přirozená retence lze vymezit na 5 částí.

- Retence povrchová je zadržení vod ve vodotečích a dále na povrchu krajiny.
- Retence výparu obsahuje transpiraci a intercepci, tedy výpar z rostlin a výpar ze srážek, který uváznuje na rostlinách.
- Retence podzemní zahrnuje vsakovanou vodu, která zvětšuje zásobu vod podzemních.
- Retence hypodermická je sdružování vod hned pod povrchem, nesahá k hranici spodních vod.
- Retence v aerační oblasti půdního profilu složená z vod zachycených v kapilárách půdy, kde se nachází nenasycená zóna a vody vsakované do podzemních vod (Kraus a Kvítek, 2018).



Obrázek 1: Rozdělení retenční (Šantrůčková a kol. 2014).

Křivka retenční půdy ukazuje rovnícný objem vody, který je zadržén v půdním profilu při konkrétní maticové látce (Kraus a Kvítek, 2018). Následující graf zobrazuje ukázkové křivky retenční určené půdám s různými texturami, prezentující působení pórovitosti.



Obrázek 2: Křivky retenční určené půdám s různými texturami za působení pórovitosti (Matula, 1989).

Na tuto činnost má vliv mnoho činitelů prostředí. Těmi nejvíce důležitými jsou struktura půdy, objem organických látek, rozměry pórů a hloubka. Křivka v grafu zobrazuje, jaký panuje vztah výšky tlaku, sacím tlakem a vlhkostí v půdě. Křivka slouží k posouzení dostupnosti vody v různých půdních druzích. Zobrazuje retenční možnosti navzdory vnějším silám (Němec a kol. 2006).

Zadržení vody v půdě je velmi zásadním a důležitým životním faktorem. Umožňuje tak poskytování vody pro rostliny, které ji vyžadují ke svému přežití a k možnému rozvíjení se. Celkový smysl retence tkví hlavně v zadržení vody v prostředí i v období bez srážek. Retence vody v přírodě pomáhá před suchem, ale chrání i před záplavami. Povodně jsou zpomaleny díky pomalejšímu odtékání vody z krajiny. Jsou tak sníženy maximální průtoky povodní a dále i rozloha oblastí, které jsou zaplaveny.

V této době ale tato funkce není tak intenzivní jako dříve díky degradaci půd. Například těžké stroje v zemědělství půdu velmi utužují a krajina tak začíná mít se zadržováním vody problém. Krystalické horniny, které se vyskytují na více než 60% území jsou známé nízkou schopností retence. Povrchem těchto horninových podloží jsou zpravidla kambizemě s nižší až střední rychlostí infiltrace (Kraus a Kvítek, 2018).

Nedostatečné množství vody v krajině a způsobené sucho mohou zapříčinit značné úbytky v oblastech, kde se využívá voda. Dále dopady environmentálního charakteru jako například biologická diverzita. Kvalita vody, úbytky mokřadů, eroze, dezertifikace a další faktory mohou dané území negativně ovlivnit (Kraus a Kvítek, 2018).

Pomalejší zadržování vody u povodí je příčinou vzniku bleskových záplav. Během nich již intenzita daných srážek je za limitem možného vsakování vody do půdního profilu. Na svazích nastane odtok, který bere vše sebou. To se týká hlavně svrchní části půdy, která je právě nejdůležitější. Způsobená eroze je pak dalším typem degradace půdy (Němec a kol. 2006).

4.8 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost K je koeficientem, který se vyskytuje v Darcyho rovnici. Jedná se o veličinu označující, jak dokáže voda proudit v porézním prostředí. Je nejčastěji měřena v metrech za sekundu. Nejvíce používané jednotky K_s jsou $(m \cdot s^{-1})$, $(cm \cdot d^{-1})$, $(cm \cdot s^{-1})$. Hydraulická vodivost je využívána zejména v oboru hydrologie, kde se díky tomuto měření dá následně vyjádřit schopnost prostředí vést vodu. Zastarale se hydraulická vodivost nazývá také jako filtrační koeficient nebo Darcyho koeficient, ale v podstatě oba pojmy jsou nesprávné (Pavlů, 2018).

Schopnost proudění vody je ovlivněna několika podmínkami porézního prostředí. Jedním z hlavních bodů je zrnitost a jaký tvar mají póry a zrna. Dále je řešená celková pórovitost a povrch a posledně se bere v potaz proudící kapalina a její hustota a viskozita (Zhang a Schaap, 2019).

V následující tabulce jsou zobrazeny hodnoty K_s patřícím různým druhům půd.

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

Tabulka 2 Hodnoty K_s vůči druhům zeminy (Kaoli, 2003).

Hydraulická vodivost ovlivňuje skoro všechny typy využití půdy. Je základem pro pochopení celku vodní rovnováhy. Je používána pro zhodnocení přidávání podzemních vod skrz vadózní nenasycenou oblast. Naměřené hodnoty jsou pro hydrology důležité zejména v modelování. Výzkumní pracovníci je používají pro

zhodnocení, zda je půda zdravá nebo pro predikce, jakým stylem bude voda proudit v půdě v rozličných lokacích polí. Hydraulická vodivost je také jedním z předpokladů pro určení dávek závlahy v sektoru zemědělství, pro možnou erozi nebo možné vyplavování živin pryč z půdy. Dalším využitím hydraulické vodivosti je použití k určování působnosti závážky, které kryjí skládky odpadů. Geotechnici ji využívají pro návrhy retenčních nádrží, jímek, vsakovacích pásů, silničních těles nebo pro kterýkoliv celek sloužící k držení vody odtoku z povrchových vod. Další možné využití je při zjišťování dosažitelné vody u rostlin v umělých substrátech, kde není obsažena voda (Deb, 2012).

Nasyčená hydraulická vodivost lze vyjádřit pomocí rovnice. Ta určuje závislost hydraulické vlastnosti půdy na tom, jak je pórovitá.

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

Kde:

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

K – propustnost [m^2]

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

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

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

4.8.1 Měření hydraulické vodivosti

Určování hydraulické vodivosti se stanovuje na základě přímých a nepřímých metod měření.

Metody přímé se dělí na postup laboratorní či terénní. Terénní metoda se rozlišuje podle toho, kde se měří, tedy nad hladinou či pod hladinou podzemních vod. Laboratorní metoda měření hydraulické vodivosti se dělí na metodu, kde hraje hlavní roli konstantní spád a v druhé variantě spád proměnný. Podle toho, jaký se využije při měření materiál, se následně zvolí odpovídající vybraná metoda. Vzorky, které jsou středně až vysoce propustné se měří metodou konstantního spádu.

Naopak vzorky, které se vyznačují nižšími hodnotami K_s jsou měřeny spádem proměnným. V těchto případech se zpravidla jedná o vzorky, v kterých je obsaženo velké množství jílu (Kutílek, 1993).

Při metodách nepřímých se díky lehceji stanovitelným půdním vlastnostem dá vyvodit hodnota K_s . Těmito vlastnostmi jsou myšleny například množství obsaženého humusu v půdě, její textura, objemová hmotnost či strukturální charakter. Tyto metody však ve větší míře nejsou úplně přesné a jsou pouze přibližným odhadem. Jsou používány zejména díky vysokým nákladům a časové náročnosti u přímé metody (Kutílek, 1993).

4.8.2 Laboratorní metody

V případě měření laboratorními metodami a určení K_s se nejvíce využívá laboratorní permeametr. Měření je prováděno hlavně na vzorcích, které nejsou nijak porušené a jsou odebrané zpříma v terénu nebo na umělých vzorcích, které jsou hutněné v laboratoři. Zpravidla se používají takzvané Kopeckého válečky. Jejich objem je 100 cm³ (Kutílek, 1993). Ne vždy ale díky jejich malému objemu je pak výsledek správně naměřen. Výsledné hodnoty dvou nastejno odejmutých prvků jsou ve většině případů odlišné. Z tohoto důvodu se spíše odebírá vyšší počet vzorků nebo je zvolena metoda terénního měření. Laboratorní metody mají i své nevýhody. Jednou z nich je, že v porovnání s metodou polní, se měří vzorky s menším objemem. Naopak výrazná výhoda je určení na základě rovnice – Darcyho zákona. Dále pak přímé stanovení a ověření podmínek okraje jako hydraulický spád a teplota (Šarpatka, 1996).

Detailní charakteristika a popis a pracovní metodiky ohledně laboratorního permeamtru lze dohledat v příručce od společnosti Eijkelkamp. Způsob, jakým se měří při konstantním spádu je udržování stálých odlišností tlakových výšek u obou stran daného vzorku a při měření, kolik objemu vody proteče za jednotku času díky byretě. Válec naplněný zeminou se uchytí do konkrétního držáčku a naměří se úpadek vrchní hladiny. Dolní hranice hladiny by měla být stálá, neměnná. Naopak ta vrchní by měla být rozdílná. U měření proměnného spádu je proces relativně obdobný jako při měření konstantního. Rozdíl mezi nimi panuje v měření namísto objemu, který proteče byretou v měření odlišnosti hydraulického náklonu za jednotku času. Čas měření se může protáhnout i na více dní díky nižší propustnosti vzorků. Je doporučováno používat korekci na výpar (Lilly a kol. 2008).

Při měření u konstantního spádu platí následující rovnice.

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

K_S = hydraulická nasycená vodivost

A_v = plocha průtoku válce

t = čas, za jak dlouho vzorkem proteče V_p

ΔH = jaký panuje odchyl hladin uvnitř a vně vzorku

V_p = množství proteklé vody vzorkem

L_v = délka válce

Při měření u proměnného spádu platí následující rovnice.

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

K_S = hydraulická nasycená vodivost

A_v = plocha průtoku válce

t_1 a t_2 = čas

A_d = plocha průřezu trubky držáku prvků

L_v = délka válce

ΔH_1 = odchyl hladin vody na začátku měření při daném čase

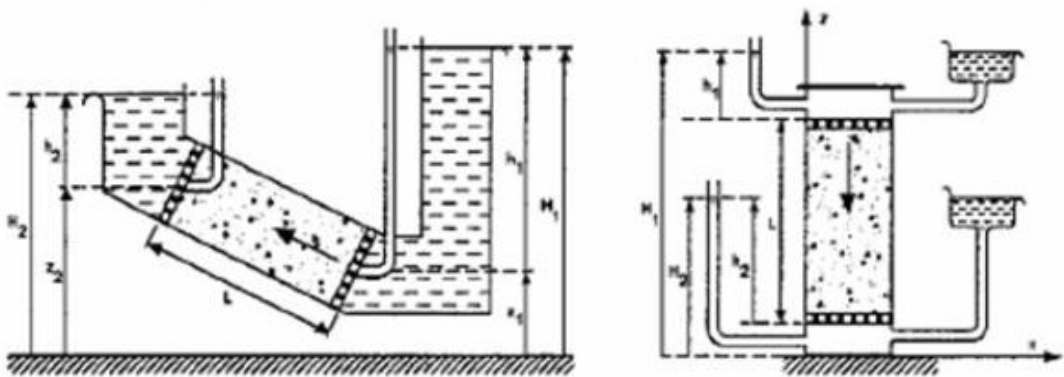
ΔH_2 = odchyl hladiny vody měření při daném čase

4.8.3 Darcyho zákon

Darcyho zákon je v podstatě matematickým vzorcem, který vymezuje, jak rychle protéká kapalina nasyceným pásmem daného pevného porézního tělesa. Odvodil ho francouzský inženýr Henry Darcy v roce 1856. Popisuje, jak rychle protéká kapalina či plyn v prostředí, které je homogenní a porézní. Je stanoven na principu, kdy voda proudí v naplněném válci pískem (Liakopoulos, 2010).

Ten je veskrze nasycený tekutinou a objem vody, který vtéká do daného válce za určitý čas, je rovno objemu vody, který z válce zas vytéká. Tento proces byl proveden poprvé v Dijonu. Henry Darcy tehdy měřil průtok pomocí trubice, která byla naplněna porézní látkou. Trubice byla vložena do prostoru uprostřed dvou nádrží naplněných tekutinou. Díky tomu stanovil, že průtočné množství je přesně v souladu s nasycenou hydraulickou vodivostí, ploše průtoku, odlišnosti výšek tlaku i ne zcela přímo úměrný tomu, jakou má sloupec či jiný vzorek délku (Liakopoulos, 2010).

Nákres, kterým byl Darcyho zákon vysvětlen je znázorněný na následujícím obrázku.



Obrázek 3: Schéma Darcyho výzkumu (Valentová, 1998).

Výsledky se pak vyjadřují na základě níže uvedené Darcyho rovnice.

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

Q = průtok

K_s = nasycená hydraulická vodivost

S = průtočná plocha

L = délka vzorku

H₁ = rozdíl pizometrických výšek (na začátku)

H₂ = rozdíl pizometrických výšek (na konci)

5. Biouhel

Biouhel je látka, která se přidává do půdy za účelem následného zlepšení půdních vlastností a zvýšení úrodnosti, a to především z hlediska fyzikálních vlastností. Předponou „Bio“ lze vysvětlit dvěma charakteristikami. Rozdíl mezi dřevěným uhlím spočívá v tom, že uhelnatění nekončí na „kusové dříví“, ale na drobnozrnné částice a že se následně nevyužívá jako palivo. Obecně se nazývá veškerá zuhelnatělá látka uhlím (do angličtiny přeloženo jako „char“) (Amonette a Jospheh, 2009).

5.1 Historie biocharu

O historii používání biocharu se lze dočíst jak v literatuře, tak se dají dohledat informace i z archeologických výzkumů. K zúrodnování půdy se využíval dříve v celém světě. Tento „vynález“ se v různých kulturách používal již dávno zejména pro zlepšování úrodnosti půd. Především ve vlhkých tropech se vytvářela černá půda, která se nazývá „Terra preta de índio“, která se přeměňovala z pralesní půdy, co nebyla úrodná na úrodnou černozem. Těchto půd se nejvíce nachází v Amazonii (Schmidt, 2010). Nejstarší důkazy o využívání biocharu sahají do Japonska a právě Amazonie.

Tento způsob domorodců zúrodnování půdy v Amazonii je starý cca 2000 let. Biouhel vznikl pravděpodobně při spalování dřeva, které sebou neslo produkci odpadních materiálů (např. popel, dřevěné uhlí). Uhlí bylo přidáváno k výkalům a do dalších odpadů v tamních osadách. Tento materiál se pak společně s hnojivem přidával do půdy a ta pak byla úrodnější a kvalitnější. O hnojení biocharem jsou dochované zmínky i v zemích mírného pásma. Od jeho používání se začalo pomalu ustupovat díky nástupu umělých hnojiv. Pokusy s touto látkou se ale provádějí doteď a stále jich přibývá (Schmidt, 2010).

5.2 Prvkové složení

Biochar je složen ze základních biogenních prvků. Těmi jsou H, C, O – tedy vodík, uhlík a kyslík. Množství obsaženého uhlíku v biocharu poměrně kolísá. Může být obsažen v rozsahu od 30 % až po 80 %. Toto závisí především na tom, jaký je zvolen druh pyrolýzy při výrobě biocharu (Coma, 2014).

Pravidlem je, že pro ty biouhly, které jsou původem z biomasy, například ze dřeva, tak mají koncentrace uhlíku vyšší než ostatní. Jejich procentuální zastoupení v dřevě, které je suché, se pohybuje okolo 50% hmoty. Za procesu pyrolýzy se ze suroviny dřeva vytěsňuje dusík, kyslík a vodík. Naproti těmto prvkům se zvyšuje zastoupení uhlíku, který může dosáhnout podílů na celistvé hmotě za teploty pyrolýzy 750 °C až 90 % (Hardie a kol. 2014).

5.3 Výroba biouhlu

Biochar vzniká v podstatě z jakékoliv organické zbytkové látky - organické hmoty, kterou je nejvíce odpad z lesnictví a zemědělství (např. štěpky ze dřeva, rýžové stonky nebo i hnůj, ale také je možno využít separáty z bioplynových stanic) za pomoci termického rozkladu látek bez přístupu kyslíku – pyrolýzy (Amonette a Joseph, 2009). Jedná se o proces, kdy dochází působením tepla k rozkládání organických látek na jednodušší složky. Je při něm zamezeno přístupu kyslíku, vzduchu i jiných zplyňovacích látek. Jsou definovány různé typy pyrolýz (nízkoteplotní, středněteplotní a vysokoteplotní) a proto rozmezí teploty sahá od 300 až do 2000 stupňů. Během těchto teplot se přeměňují některé z jeho vlastností, a to zejména vlastnosti chemické – poté se stává méně náchylným vůči mikrobiálnímu rozkladu. Pyrolýza může být také dělena jako pomalá, rychlá nebo blesková (případně také označena jako pyrolitické zplyňování). Při výrobě biocharu bývá

zvolena varianta pomalá, kterou lze docílit nejvyššího profitu. Kdyby byl použit jiný způsob, biochar by pak vznikal jenom jako vedlejší výtvar (Blažek a kol. 2014).

Proces pyrolýzy má několik základních podmínek, které ovlivňují konečné vlastnosti a profit biouhlu. Jimi jsou rychlost ohřevu, teplota a jak dlouho trvá celkový děj. Výtěžek biocharu se snižuje se zvyšujícím se teplem. Za to však povrch plochy a jeho obsah se zvyšuje.

Proces pyrolýzy	Teplota (ve °C)	Rychlost ohřevu (ve °C/min)	Prostředí	Čas	Cílový produkt
Pomalá pyrolýza	350-700	2-7	Bez O ₂ nebo omezené množství	Hodiny-dny	Biouhel
Rychlá pyrolýza	400-600	> 300	Bez O ₂	Sekundy	Bio-olej
Blesková pyrolýza	750-1000	> 1000	Bez O ₂	Sekundy	Bio-olej
Pyrolytické zplynování	800-1600	-	Bez O ₂ nebo omezené množství	Sekundy-minuty	Syntézní plyn

Tabulka 3 Druhy pyrolýzy, podmínky a cílový produkt (přebráno z Valentová, 1998)

Při pyrolýze vznikají i další produkty. Těmi hlavními jsou tuhé zbytky, organický produkt (kapalný) - pyrolýzní olej, pyrolýzní plyn a pyrolýzní voda, která vzniká díky vlhku v odpadu. Pyrolýzní plyn i olej lze následně využít jako palivo (Blažek a kol. 2014).

5.4 Zásobník živin a zlepšení úrodnosti

Biouhel může být označen jako zásobník živin. Jejich dostupnost je závislá na základu suroviny, ze které se biochar vyráběl a také jaký způsob pyrolýzy byl použit k jeho výrobě. Čím vyšší teploty během procesu pyrolýzy byly použity, tím nižší bývá přístupnost živin.

Biochar tvoří uhlík a dále také prvky jako železo, měď, vápník, hořčík, draslík nebo zinek. Dále jsou v něm obsaženy i nekovové makroprvky, kterými jsou síra a fosfor. Biochar se vyznačuje nízkým obsaženým množstvím dusíku (Richter, 2001).

5.5 Navýšení pH v půdě

pH Biocharu se pohybuje v rozmezí tzv. alkalického charakteru, tedy 8 - 10 pH. Díky této vlastnosti může přispět ke zvyšování pH v půdě. Tento atribut se projevuje v půdách, které jsou kyselé a chudé na organickou hmotu. Biochar se hodí jako vhodný materiál pro degradované půdy, které jsou poškozeny kyselými dešti. Jeho výsledky jsou velmi obdobné jako při vápnění půdy (Blackwell a kol. 2009).

5.6 Retence půdy

Zvyšování retence vody v půdním profilu díky aplikování biocharu velmi ovlivňuje především půdy, v kterých se nachází vyšší podíl písku. V těchto půdách se voda zadržuje omezeně a její nedostatečné množství by mohlo ohrozit následný růst rostlin nebo jejich už počáteční vývoj. Navýšení vody v půdě je také významné pro zachování vyváženého prostředí v půdním profilu a k uchování funkcí biologického hlediska (Lehmann a kol. 2011).

5.7 Vázání uhlíku

Oxid uhličitý je asimilován rostlinami z atmosféry a po procesu pyrolýzy formou biocharu je půda obohacována. Uhlík již není uvolňován nazpátek do atmosféry jako CO₂, ale v půdě přetrvává až stovky, pravděpodobně až tisíce let a jeho uvolňování a rozklad probíhá velmi pomalu (Blackwell a kol. 2009).

5.8 Sorpční schopnost půdy

Jedním z potencionálů biocharu je adsorpce živin na jeho povrchu. V některých případech se může stát, že vykáže lepší schopnosti zadržování na rozdíl od huminových kyselin. Sorpce je ovlivněna několika podmínkami. Těmi jsou například velikost daného povrchu biouhlu, pórovitost a aktivní skupiny na jeho povrchu. Tyto parametry jsou ovlivněny tím, jaká byla provedena pyrolýza (Blackwell a kol. 2009).

5.9 Imobilizace nežádoucích prvků

Jednou z dalších mnoha kladných vlastností biocharu je schopnost vázání nežádoucích prvků v půdě. Je tedy vhodný pro imobilizaci rizikových látek. Dokáže sorbovat kontaminanty organického charakteru, kterými jsou farmaka, polycyklické aromatické uhlovodíky nebo pesticidy (Richter, 2001).

5.10 Tepelná energie

Během výroby biocharu při spalování odpadů vzniká tepelná energie, která umožňuje výrobu například teplé vody nebo páry. Produkty pyrolýzy jsou pyrolýzní plyny a organický kondenzát. Oba lze využít jako palivo.

Při pyrolýze vznikají i další produkty. Těmi hlavními jsou tuhé zbytky, organický produkt (kapalný) - pyrolýzní olej, pyrolýzní plyn a pyrolýzní voda, která vzniká díky vlhku v odpadu. Pyrolýzní plyn i olej lze následně využít jako palivo (Sohi a kol. 2010).

5.11 Využití v kompostu

Kompostování je jedním z nejvíce využívaných opatření k recyklaci zemědělských zbytků. Ty se tak zvládnou vyhnout negativům přímého aplikování surových odpadů přímo na půdu (př. fytotoxicita). Biochar lze využít v tomto případě jako sušící činidlo a také je zdrojem energie pro mikroorganismy. Také dokáže tlumit zápach nebo je přidáván do krmiv hospodářských zvířat, čímž lze docílit omezení nebo snížení alergií (Richter, 2001).

5.12 Ve stavebnictví

Biochar se vyznačuje velmi nízkou vodivostí tepla. Dokáže do sebe vstřebávat vodu, a to cca až šestkrát ve srovnání se svojí hmotností. Díky tomuto jeho charakteru je vhodným pomocníkem při izolování a usměrňování vnitřních vlhkostí domů. Biochar dohromady s hlínou a maltou (vápenná, cementová) lze namíchat pospolu s pískem. Vznikne pak vnitřní omítka, která je velmi prodyšná a dokáže udržet v pokoji vlhkost v hranicích od 45 % do 70 % a to během léta i zimy. Kromě použití této směsi na obytné budovy se hodí u průmyslových budov, skladů nebo i budov, kde se shlukuje velké množství lidí, jako jsou například školy. Biochar také velmi dobře absorbuje elektromagnetické záření (Drumea a kol. 2015).

5.13 Dopad na životní prostředí

Biochar má vůči ochraně přírody velmi rozmanité využití. Je nápomocen v odvětví obnovy znečištěných kontaminovaných půd, produkce energie, změn klimatu, zacházení s odpadem a aspektů týkajících se trvale stabilního rozvoje. Biochar slouží jako prostředek ke zlepšování vodních systémů, konkrétně odstraňování nechtěných nečistot. Dalším využitím je například sorpce fosforu, kovů i antibiotik (Coma, 2014).

Vyrábění biocharu je jedním z možných způsobů, jak se dá ponížít potřeba likvidování materiálu živočišného i rostlinného. Biomasa zemědělského původu, kaly ze splašků a odpad živočišného původu, který je biologicky rozkladatelný se dá použít pro vyrábění energie za procesu pyrolýzy. Aplikování biocharu se celkově vymezuje jako médium pro vylepšení úrodnosti půd a následně pak i k utlumení klimatických změn (Sohi a kol. 2010).

5.14 Vliv biocharu na chemické, hydrologické a fyzikální vlastnosti půd

Biochar má vliv na biologickou, chemickou i fyzikální stránku půd. Změny vlastností půdy, ke kterým dojde, jsou zapříčiněny chemickými a fyzikálními vlastnostmi biocharu. Mezi ně se může řadit například pórovitost, dostupnost a zadržování živin (zejména u aplikování do písčitých půd) nebo plošný rozměr povrchu. Biochar dokáže utlumit negativní dopad sucha a způsobeného stresu v suchých oblastech a také pohybuje s hodnotami půdního pH (Coma, 2014).

Dalším využitím biocharu může být remediace kontaminantů (organické i anorganické) v půdním a vodním prostředí. Podle současných studií, které se zaměřují především na změny fyzikálně-chemické, které ovlivňují půdní vlastnosti díky aplikaci biocharu ukazují, že by biouhel mohl být do budoucích let médiem k vylepšení fyzikálních vlastností v půdním prostředí, a to včetně i navýšení pórovitosti, potenciálním úložištěm vody a zredukováním hmotnosti objemu. Co se týče chemických vlastností půdy, tak se dá biochar také označit jako doplněk k vylepšení půdy. Množství obsaženého popelu, který je bohatým zásobníkem kationtových prvků (K, Mg, Ca, Na). Biouhel také umí pozměnit nutriční a mikrobiální okolnosti půdy okolo kořene, a to díky změnám fyzikálních podmínek půdního prostředí, kterými jsou pórovitost, hmotnost objemu, plocha distribuce částic (Richter a kol. 2005).

5.15 Uvolňování skleníkových plynů za pomoci biocharu

Zvyšující se objem skleníkových plynů má za příčinu změny klimatu. Tvorba biopaliv a obnovitelných energií pomocí pyrolýzy se považuje za nadějný způsob, který může být využit do budoucích let ke snižování koncentrace CO₂. Rostliny přijímají energii z minerálů a organických prvků v půdním profilu. Styl hospodaření s půdou a zemědělské zacházení poškozuje přirozené půdní procesy zahrnující například cyklování, absorbování a uvolňování potřebných živin. Nejvhodnějším způsobem řešení odčerpávání je úprava půd ve formě aplikování hnojiv do půd, které obsahují

ty nejdůležitější živiny jako jsou draslík, dusík a fosfor. Komerční i anorganická hnojiva ale napomáhají vzrůstu skleníkových plynů (Richter, 2001).

Svojí strukturou je biochar velmi pevnou formou uhlíku (C), čímž napomáhá fyzikálně chemickým i biologickým podmínkám půdy. Biouhel dokáže také významně ovlivnit snížení podílu skleníkových plynů. Na základě mnoha experimentů lze tvrdit, že po přidání biocharu do půdního profilu může vést ke snížení skleníkových plynů. Aplikací biocharu totiž dojde ke změně složení mikrobiálních společenstev, což má za následky snížení emisí N_2O . Také se biochar přidává do krmiv hospodářských zvířat. To vede ke snížení emisí při trávení zvířat. Ke snížení emisí může dojít i díky přidávání biocharu do kompostu. Dojde tak k rychlejšímu kompostování a sníží se hodnoty emisí skleníkových plynů (nejvíce oxid dusný a metan). Také se sníží ztráty amoniaku, vylepší se celková struktura a je zmírněn zápach (Drumea a kol. 2015).

5.16 Hydraulická vodivost a biochar

V současné době se pozoruje, jak biochar ovlivňuje proudění a množství vody, kterou je půda schopna v sobě zadržet. Biochar do jisté míry ovlivňuje hydraulickou vodivost. Jak moc velký je jeho vliv závisí na tom, jakými vlastnostmi fyzikálního a chemického charakteru se daný biochar vyjímá (Lehmann a kol. 2011).

Tento názor sdílí například Lim a kol. 2016 a další autoři. V uvedeném článku se testoval biouhel, klasicky vyrobený za pomoci pyrolýzy ale různého původu. Materiály zkoumaných biocharů pocházely například z borovice, javoru cukrového, ovesných slupek a dubu letního.

Důvod, proč se tento výzkum prováděl, byl vytvořit takový nástroj, který by předpovídal následný účinek aplikovaného biouhlu na Ks. Čtyři zmíněné druhy biocharu byly zkoumány ve 4 různých typech půdy, a to v jílu, jemném a hrubém písku a v hlíně. Výsledkem bylo, že v jemném a hrubém písku se hydraulická vodivost snížila, a naopak hydraulická vodivost se zvýšila u hlín jílovitých. Záleží tedy hodně na původu biocharu i na typu půdy (zrnitostním složení), do které je tento přírůstek aplikován (Lim a kol. 2016).

Aplikování organické hmoty, kterou je zmíněný biochar, reprezentuje jednu z možných variant, jak ovlivnit půdy s vyšším množstvím obsaženého písku. U těchto půd je totiž větší prostor mezi částicemi a vzniká tak dostatečně velká plocha k možnému proudění vody. Voda následně tedy proudí pozvolněji, ale současně je díky vázání na organickou hmotu zadržována v půdě efektivněji (Lone a kol. 2015).

5.17 Retence a biochar

Zadržení vody v půdním profilu je zásadním faktorem k lepší produktivitě u všech plodin. Stanovuje přijímání i transportování vody pomocí rostlin, což může způsobit ovlivnění fyziologie rostlin a celkový výnos. Výsledky z experimentů, kde je zkoumaná retence s využitím biocharu ukazují, že jeho aplikování pomáhá zadržovat vodu v půdě. Příčinou může být například vysoká poréznost, velký specifický povrch biocharu a také výskyt hydrofilních domén. Výsledky, jak moc je půda ovlivňována či změněna po tomto přídatku, jsou proměnlivé. Velmi záleží totiž na charakteristice daného biouhlu, typu půdy i délce trvání. Zaznamenané změny množství vody v půdě se ukázaly zejména při experimentech, kdy byl aplikován do půd se středně hrubou až hrubou strukturou. Naopak tomu bylo při vkládání do půd jemnějších, tedy v tomto případě došlo naopak ke snížení retence. Charakteristiky biouhlu, které nejvíce ovlivňují retenční schopnosti, jsou konkrétně jeho plocha povrchu, množství pórů a jejich velikosti (Fatemeah a kol. 2020).

Další studie poukazují, že velký vliv na hydraulické vlastnosti má také teplota, při které je prováděna pyrolýza a rychlost míchání biocharu. Samozřejmě záleží na tom, jakého původu je aplikovaný biochar (Vijayaraghavan, 2021).

Biochar také navyšuje zadržování dusíku v půdním profilu, a to nižším vyplavováním a úbytkem plynů. Zvyšuje i dosažitelnost fosforu díky snížení celkového chodu vyplavování. Draslík a další živiny však nevykazují konzistentní následné ovlivnění na půdu (Němec a kol. 2006).

5.18 Negativní stránky

Toxicitu lze popsat jako látku, která dokáže poškodit, otrávit či dokonce zabít živé organismy, a to vdechnutím, požitím nebo i vstřebáním přes kůži. Toxin je tedy označení pro škodlivou, respektive jedovatou látku. Biochar nemá samozřejmě jen samá pozitiva. Jedním z jeho možných problémů při aplikování je určitá pravděpodobnost kontaminování polycyklickými uhlovodíky či těžkými kovy. Ty jsou typické pro biouhel, který vznikl při druhu pomalé pyrolýzy. U polycyklických aromatických uhlovodíků dochází k maximálním koncentracím při teplotách, které dosahují až 500 stupňů. Ve výzkumech o ovlivňování teplot při pyrolýzách na možnou toxicitu biouhlu byly polycyklické aromatické uhlovodíky zpravidla během teplot 300 – 400 stupňů a rozličné typy dioxinů se našly v biouhlech vyráběných v teplotách 250 – 900 stupňů (Gruss a kol. 2019).

Také se může stát, že je kontaminovaný párami kondenzované pyrolýzou. Bylo zjištěno, že se v biouhlech mohou nacházet i persistentní volné radikály. Ty mohou zapříčinit inhibici růstu u rostlin.

Biochar se proto musí testovat a musí se provádět pravidelný monitoring, zda je vše v pořádku, protože jeho hlavní použití je přece jen aplikace do půdního prostředí. Testuje se fytotoxicita, čímž se rozumí zkoumání semen a jejich klíčení, celkový vývoj rostlin, a to především růst, vývoj kořene se zaměřením na pásmo elongace, ovlivňování mikroflóry v půdě, zkoumání kroužkovců nacházejících se v půdním prostředí a také jak se biochar chová k organické hmotě. Zkoumání biocharu prokázalo výsledky, že výrobní postup, tedy pyrolýza může navýšit potenciál koncentrace škodlivých prvků původní látky v důsledku ztracení její hmotnosti (Gruss a kol. 2019).

6. Metodika

Experiment byl prováděn v laboratoři KVHEM České zemědělské univerzity s pomocí vedoucího diplomové práce Martina Kováře. Výzkum se uskutečnil v letech 2022 až 2023.

Půda, která byla používána pro experiment, byla odebrána v území Litavka.

6.1 Příprava a měření retenčních bodů

Pro výzkum byla využita předem připravená homogenizovaná zemina, kde byla část zeminy rozmíchána s biocharem vyrobeného ze dřeva (wood) a ze zbytků rostlin (plant). Oba typy biocharu byly připraveny v různé hmotnostní koncentraci (1% a 2%). Zbylá část zeminy zůstala bez přídavku biocharu. Celkově bylo připraveno 5 vzorků zeminy pro naplnění ocelových válečků (Kopeckého válečky) o objemu 100 cm³.

Válečky byly položeny na sebe a pro lepší držení byly omotány izolepou a zespoda byla umístěna gáza, která byla následně zajištěna gumičkou. Do takto připravených válečků byla volně nasypána zemina. Ta byla nasypána zhruba 1 centimetr pod okraj hořejšího válečku.

Připravené vzorky zeminy s biocharu v Kopeckého válečkách jsou vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 4: Příprava půdních vzorků v Kopeckého válečkách (vlastní zpracování).

Takto připravené vzorky byly přemístěny ke stabilizaci do pískového tanku, do kterého byla přidána demineralizovaná voda. Na vzorky bylo potřeba následně lehce zatlačit, aby byly v dobrém hydraulickém kontaktu s písčítým povrchem v tanku. Vzorky se nechaly dva dny sytit.

Vzorky naskládané v pískovém tanku s vodou lze vidět na následující pořizené fotografii.



Obrázek 5: Půdní vzorky vložené v pískovém tanku (vlastní zpracování).

Dále byly některé vzorky zatíženy externím závažím. To vážilo 600 gramů, což odpovídá zhruba 15 cm hloubce. Tento proces se jmenuje konsolidace neboli zhutňování a byl prováděn kvůli přiblížení se reálným podmínkám v terénu. Barevné modré a černé „kelímky“ na následující fotografii jsou právě zmíněným závažím.



Obrázek 6: Konsolidace zeminy (vlastní zpracování).

Po tomto procesu byla voda z pískového tanku vypuštěna (s nastaveným podtlakem 50 cm), čímž došlo k finálnímu dohutnění našich vzorků. Dále bylo potřeba vzorky seříznout, aby vznikl standardní neporušený půdní vzorek o známém objemu. Ze vzorku byl opatrně sejmuto horní váleček a k seříznutí byl použit laboratorní nůž (viz Obrázek 7). Následně byla odříznuta přebývající vrstva, která již nebyla potřebná pro další měření. Tímto vznikl neporušený půdní vzorek o objemu 100 cm³. Tento postup byl zhotoven kvůli přiblížení se reálnému vzorku, který je standardně odebírán v terénu. K seříznutí došlo kompletně u všech testovaných půdních vzorků.



Obrázek 7: Půdní vzorek těsně před seříznutím (vlastní zpracování).

Dále bylo započato přendávání půdních vzorků do pískového tanku kvůli následnému měření retenčních bodů, z kterých mohou být odvozeny potřebné výsledné retenční čáry. Okolo vzorků byla nalita voda a pískový tank byl nastaven na pF_0 , což souhlasí s nulovým podtlakem. Následně byly vzorky syceny vodou a během dvou dnů byla postupně doplňována demineralizovaná voda do pískového tanku, a to až do té doby, než voda dosáhla úrovně okraje daných válečků. Poté byly nasycené vzorky vyjmuty. Proběhlo krátké odkapání, které zabralo přibližně 5 sekund. Každý vzorek byl postupně zvážen a jeho hmotnost byla zaznamenána do předem připravené tabulky. Po určení hmotnosti bylo započato měření dalšího retenčního bodu, tedy vzorky byly navraceny zpět do pískového tanku a byl nastaven bod pF_1 . Proces měření hmotnosti byl opakován. V tomto případě byl pískový tank nastaven na $pF_1,5$, což odpovídá cca 0,32m vodního sloupce. Dále byly nastaveny hodnoty na $pF_1,8$ (rovno podtlaku cca 0,63 m u vodního sloupce). Následně hodnota byla pozměněna až na pF_2 (rovno podtlaku 1 m vodního sloupce). pF_2 se rovná polní vodní kapacitě. U každého bodu měření byl vzorek půdy zvážen a hmotnost zaznamenána do tabulek. Na následujícím obrázku lze vidět půdní vzorky v Kopeckého válečcích umístěné v pískovém tanku po posledním měření.



Obrázek 8: Půdní vzorky umístěné v pískovém tanku (vlastní zpracování).

U pískového tanku šla nastavit maximální hodnota do jednoho metru, a tak další měření muselo proběhnout v tanku kaolínovém, kde díky čerpadlu lze dosáhnout vyšších hodnot.

Následně byly půdní vzorky umístěny do tanku kaolíno-pískového. Jejich rozmístění bylo stejné jako v předchozím případě u pískového tanku. V kaolíno-pískovém tanku bylo nastaveno $p_f 2,3$ (souhlasí s výškou vodního sloupce dvou metrů). Byl opakován podobný postup jako v případě tanku pískového. Po každém měření následovalo zvážení hmotnosti půdního vzorku. Dále bylo nastaveno $p_f 2,7$, což se shoduje s výškou 5 metrů vodního sloupce a je konečným možným maximálním nastavitelným bodem u kaolínového tanku.

Protože u retenční čáry je cílem se dostat z bodu nasycení až do bodu vadnutí, který odpovídá podtlaku 150 metrů, kdy rostliny již vadnou, bylo potřeba s měřením pokračovat v přetlakových aparaturách.

Vzorky půdy byly umístěny do takzvané přetlakové aparatury, která funguje na bázi „vytlačování vody“. Po umístění vzorků byla aparatura hermeticky uzavřena, bez přístupu vzduchu. Dále byly nastaveny určité podtlaky pro následné určení retenčních bodů a čar. Body byly v tomto případě pf 3, pf 3,7 a 4,18. Každý z těchto bodů byl ponechán takto zhruba dva měsíce. Po uplynutí doby 2 měsíců v jednom bodě byla přetlaková aparatura otevřena a bylo započato vážení hmotnosti půdních vzorků. Následovalo vrácení půdních vzorků zpět do přetlakové aparatury, nastavení dalšího bodu a ten samý proces až do nastavení posledního tlaku 4,18, což odpovídá již 150 metrům, tedy bodu vadnutí rostlin. Hmotnosti vzorků byly opět zaznamenány do připravené tabulky.

6.2 Objemová vlhkost

Pro vypočítání objemové vlhkosti byl použit následující vzorec. Pro tento výpočet byl využit program Excel, do kterého byly přepsány všechny hmotnosti vzorků naměřené v příslušných tlacích.

$$\theta = VW/VS$$

θ = objemová vlhkost, (cm³ /cm³).

VW = souhlasí s gramáží vody v daném vzorku, (v gramech).

VS = objem daného válečku, (100 cm³).

Pro stanovení hmotnosti vody v daném vzorku, musely být předem vzorky řádně vysušeny v sušárně a to 3 dny při 60 stupních. Hmotnost vody byla vypočtena z rozdílu mezi hmotnostmi vzorku při vážení v jednotlivých bodech retenční čáry a vysušeného vzorku.

Takto vypočítaná objemová vlhkost tvoří spolu s měřenými podtlaky body retenčních čar, které byly následně vytvořeny v programu Excel.

6.3 Nasycená hydraulická vodivost měřená v laboratoři

Nasycená hydraulická vodivost byla měřena ve školní laboratoři KVHEM (Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování) a to laboratorním permeametr. Byla zvolena metoda tzv. konstantního spádu. K měření byly použity stejné vzorky jako u měření retenčních bodů a měření se opakovalo třikrát pro každý jednotlivý vzorek.

Nejdřív se připravil permeametr. K měření pak byla použita voda, která byla demineralizovaná. Ta pak byla nalita do hořejší části nádrže u permeamtru, kde se pak vzorky později umístily, a i do zásobníku na vodu pod permeamtr. Vzorky byly umístěny do držáčků. Voda se k nim mohla dostat pouze ze spodní části díky propustné destičce umístěné zespod.

Dále došlo k vložení násosek do držáčků se vzorky a tím byla snížena hladina vody nad vzorkem, protože voda začala odtékat trubicí do byret, a tak bylo dosaženo pohybu vody skrze vzorky díky neustálému rozdílu hladin. Díky proudění vody skrz vzorek bylo dosaženo odtékání vody do byrety, na které se nachází ryska, takže lze vidět kolik vody nateklo za daný čas. Čas byl měřen pomocí laboratorních stopek.

Stopky se zastavily až v případě, kdy se naplnila byreta do takového objemu, který byl předem stanoven. Když se zapsal konečný čas měření, kohoutek byrety se opět otevřel a voda tak mohla volně téct. Tímto způsobem byly vzorky měřeny i na podruhé a na potřetí. Po změření každého jednotlivého vzorku mohlo dojít k další výpočtům díky získaným datům.

Změřená data se pak vyhodnocovala v Excelu s použitím hlavního vzorce – upravený Darcyho zákon určený na měření proteklého objemu za určitý čas. V tomto případě V je objemem vody, který vzorkem protekl a L je délkou měřeného vzorku. A je plochou příčného průřezu válečkem a t je dobou, za kterou stihlo množství vody natéct a posledně Δh je rozdílem hladin v držácích vzorků i mimo ně.

$$K_s = \frac{V * L}{A * t * \Delta h}$$

K_s = nasycená hydraulická vodivost (m/s)

V = množství vody (ml)

L = délka našeho vzorku (cm)

A = plocha příčného řezu válečkem (cm²)

t = čas, za který stihl objem vody natéct (s)

Δh = je rozdílem hladin v držácích vzorků i mimo ně (cm)

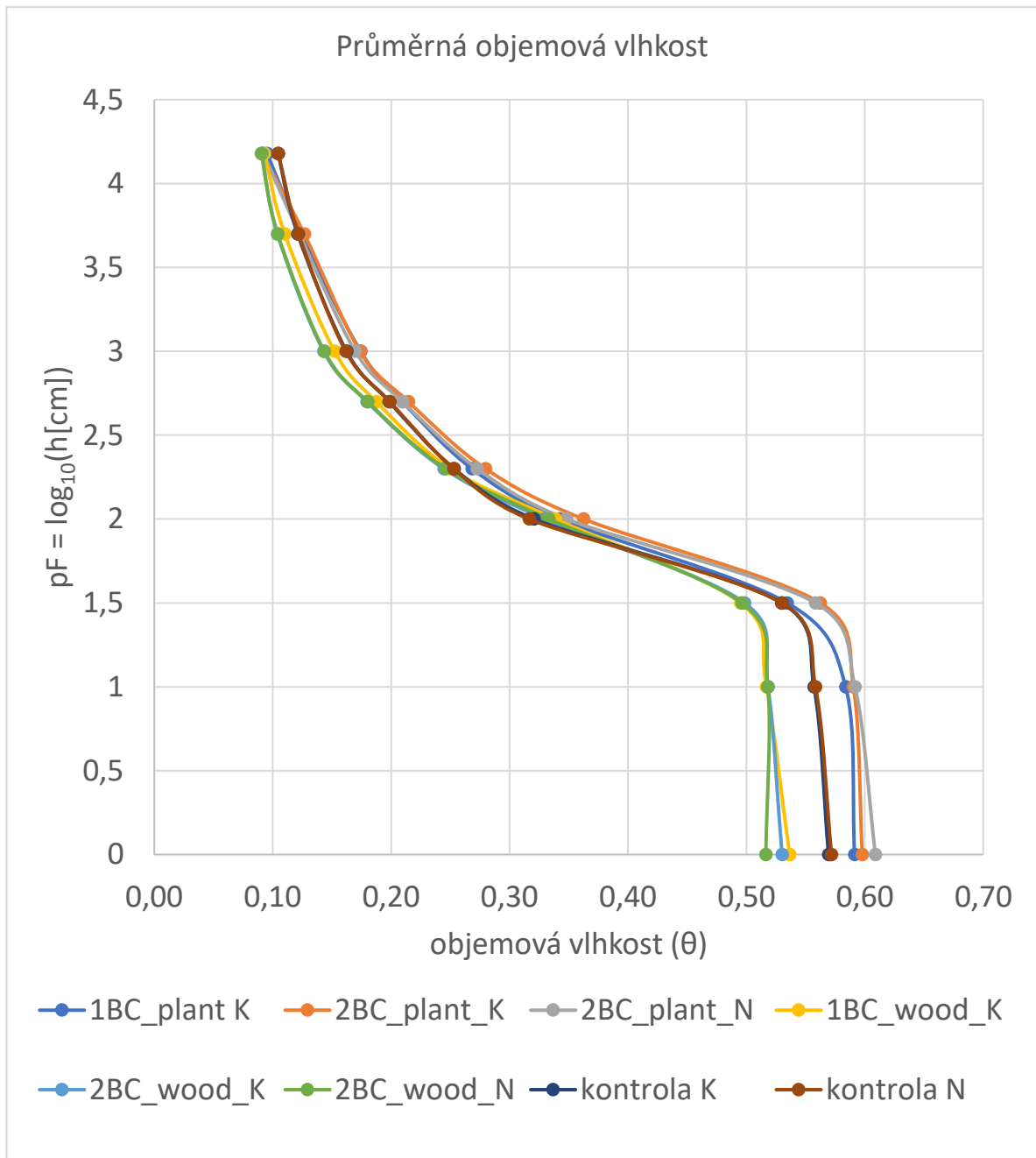
7. Výsledky

7.1 Retence

Pro přehledné vyhodnocení výsledků měření retence byla zvolena možnost zapisování dat do Excelu a následné grafické znázornění, kde pomocí retenčních křivek lze viditelně rozpoznat, které prvky byly nejefektivnější v zadržování vody, z hodnot použitých pro sestavení retenčních křivek byly vypočítány základní hydrolimity.

Na následujícím bodovém grafu „Průměrná objemová vlhkost“ lze vidět vývoj a výsledky všech konsolidovaných i nekonsolidovaných prvků s přidavkem biocharu (původem ze dřeva a rostlin) i bez přidavku. Nejefektivněji se projevil při plném nasycení vzorek 2_BC_plant_N (nekonsolidovaný prvek s přidavkem rostlinného biocharu). Druhým vzorkem s nejvyššími hodnotami dosáhl půdní vzorek 2_BC_plant_K (konsolidovaný vzorek s přidavkem rostlinného biocharu). Naopak nejnižší výsledky prokázal vzorek 2_BC_wood_N (nekonsolidovaný půdní vzorek s přidavkem biocharu ze dřeva). Druhý nejméně efektivní prvek vyšel vzorek 2BC_wood_N (nekonsolidovaný půdní vzorek s přidavkem biocharu původem ze dřeva). Výsledné hodnoty u pF bodu 4,18 (bod vadnutí) prokázaly téměř přibližné hodnoty u všech zkoumaných prvků v rozmezí 0,9 až 0,10. Vyšší data byla naměřena u kontrolních vzorků bez aplikovaného přidavku a konsolidovaný prvek s přidavkem biocharu viz tabulka č. 4.

Závěrem lze říci, že se při měření nejvíce projevíly oba zkoumané biochary a to v nejnižších i nejvyšších hodnotách. Z výsledků vyplývá, že nejvhodnějším prvkem pro zvýšení retence je půdní prvek s aplikovaným rostlinným biocharem, který měl již od začátku prokazoval nejvyšší stupeň vlhkosti.. Naopak prvky s přidavkem biocharu původem ze dřeva vyšly v obou fázích (začáteční i končená) pod nejnižšími hodnotami. Dle naměřených výsledků lze konstatovat, že konsolidace prvků neměla výrazný vliv ani spojitost s konečnými hodnotami.



Obrázek 9: Graficky znázorněné retenční křivky (vlastní zpracování).

Vzorek	Plná vodní kapacita (pF 0)*		Polní vodní kapacita (pF 2)		Bod vadnutí (pF 4.18)		Odhad využitelné vodní kapacity pro rostliny (pF 2 - pF 4.18)**
1BC_plant_K	0,59	± 0,009	0,34	± 0,014	0,10	± 0,009	0,25
2BC_plant_K	0,60	± 0,009	0,36	± 0,011	0,09	± 0,001	0,27
2BC_plant_N	0,61	± 0,008	0,35	± 0,003	0,09	± 0,008	0,26
1BC_wood_K	0,54	± 0,002	0,34	± 0,004	0,09	± 0,006	0,25
2BC_wood_K	0,53	± 0,009	0,33	± 0,005	0,09	± 0,001	0,24
2BC_wood_N	0,52	± 0,023	0,33	± 0,006	0,09	± 0,002	0,24
kontrola K	0,57	± 0,007	0,32	± 0,009	0,10	± 0,012	0,22
kontrola N	0,57	± 0,006	0,32	± 0,006	0,10	± 0,013	0,21

* Plná vodní kapacita je odhadem celkové pórovitosti zeminy

** Maximální množství vody v půdě potenciálně dostupné pro s rostliny

(Polní vodní kapacita půdy představuje maximální množství vody, kterou je půda po zavlažení schopna udržet vlastními vnitřními silami v téměř rovnovážném stavu proti působení gravitační síly).

Tabulka 4 Hydrolimity (vlastní zpracování).

7.2 Objemová hmotnost

Vzorek	Průměr	Smodch
1BC_plant_K	1,00	± 0,023
2BC_plant_K	1,00	± 0,010
2BC_plant_N	0,97	± 0,005
1BC_wood_K	1,18	± 0,012
2BC_wood_K	1,18	± 0,012
2BC_wood_N	1,18	± 0,012
Kontrola K	1,11	± 0,011
Kontrola N	1,10	± 0,007

Tabulka 5 Souhrn dat z objemové hmotnosti (vlastní zpracování).

K zjištění objemové hmotnosti se používala laboratorní váha. Půdní vzorky byly váženy postupně a opakovaně, a to po stabilizaci a seřiznutí vzorku. Podle označených válečků (pomocí čísel) se jednotlivě zapisovala data, z kterých byl tvořen

průměr. Bylo vyhodnoceno, že nejnižší objemovou hmotnost má vzorek 2BC_plant_N s hodnotou 0,97. Nejvyšší výsledky byly naměřeny stejně u 3 vzorků – 1BC_wood_K, 2BC_wood K, 2BC_wood_N v hodnotě 1,18. Ani v tomto případě neměla konsolidace výraznou spojitost ani vliv na konečné hodnoty.

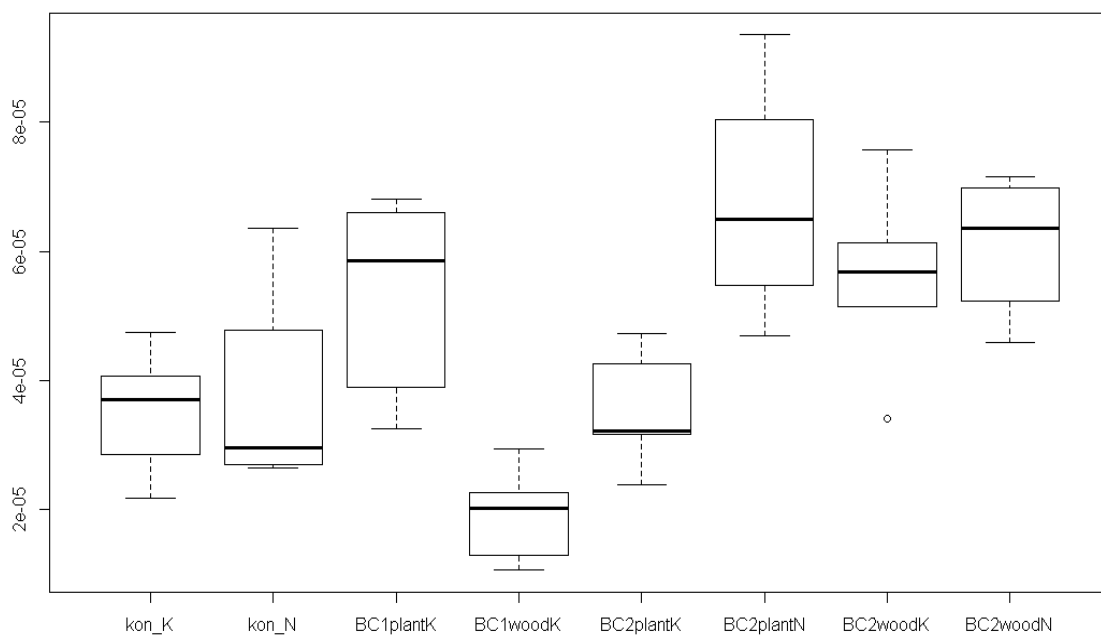
7.3 Nasycená hydraulická vodivost

Pro přehledné výsledky měření hydraulické nasycené vodivosti byl zhotoven následující graf tzv. „Boxplot“ v softwaru RStudio. Z konečných hodnot je patrné, že při měření K_s vyšel s nejvyššími hodnotami „2BCplantN“ (nekonsolidovaný půdní vzorek s přidavkem rostlinného biocharu). Konsolidovaný zkoumaný prvek „BC1plantK“ se pohyboval v nižších hodnotách než uvedený prvek nekonsolidovaný, ale i tak jen o nepatrnou odchylku, z čehož vyplývá, že při měření nasycené hydraulické vodivosti jednoznačně nejefektivnějším půdním vzorkem byl právě půdní vzorek s přidavkem rostlinného biocharu. V daném experimentu byly zkoumané tři vzorky s přidavkem rostlinného biocharu, avšak s rozdílnou koncentrací aplikovaného biocharu. Třetí tento vzorek „BC2plant_K“ (konsolidovaný půdní prvek s přidáním rostlinným biocharem) s koncentrací aplikace 2% vyšel s hodnotami poměrně nižšími, než ostatní dva vzorky.

Nejnižší hodnoty při měření nasycené hydraulické vodivosti prokázal prvek „BC1woodK“ (konsolidovaný půdní vzorek s přidavkem biocharu), jehož výsledky se významně lišily od ostatních zkoumaných půdních vzorků. Měřeny byly celkem 3 půdní prvky s přidavkem biocharu původem ze dřeva s rozdílnou koncentrací aplikovaného biocharu.

Další dva prvky s vyšší koncentrací – 2% - „BC2woodK“ (konsolidovaný půdní vzorek s přidavkem biocharu ze dřeva) a „BC2woodN“ (nekonsolidovaný půdní vzorek s přidavkem biocharu ze dřeva) vyšly podobně jen s drobnou odchylkou. V tomto případě konsolidace půdních vzorků neměla pravděpodobně žádný vyšší vliv na konečné hodnoty.

Ostatní měřené konsolidované i nekonsolidované prvky „kon_K“ i „kon_N“ bez přidaného biocharu vyšly s očekáváním v průměrných hodnotách. Konsolidovaný prvek byl naměřen s lehce vyššími hodnotami, avšak konsolidace pravděpodobně neměla opět žádný velký vliv na jejich naměřená data.



Obrázek 10: Výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (vlastní zpracování).

Pro kompletní statistiku k měření nasycené hydraulické vodivosti byla vytvořena celková tabulka se statistikou a naměřenými daty pro jednotlivé půdní vzorky viz příloha č. 2.

8. Diskuze

Při měření retenční schopnosti půdních vzorků bylo zjištěno u sledovaných konsolidovaných i nekonsolidovaných půdních vzorků s přidavkem biocharu různého typu i bez přidaného biocharu, že jejich výsledky se výrazně neliší. Druhým nejlépe vyhodnoceným vzorkem se stal půdní prvek s přidavkem biouhlu rostlinného původu, a to jen o nepatrný zlomek. Naopak nejhůře dopadl prvek biocharu původem ze dřeva. Mnoho studií např. (Liu a kol. 2017) ve své studii vyzdvihuje právě biochar rostlinného původu za ten nejúčinnější.

U výsledků z měření půdních prvků konsolidovaných i nekonsolidovaných a obohacených i neobohacených o různé druhy biocharu u hydraulické vodivosti nejvyšších hodnot dosahoval biochar rostlinného původu (konsolidovaný i nekonsolidovaný), což bylo očekávané vzhledem k tomu, co bylo zpozorováno v mnoha jiných studiích (Hardie a kol. 2011; Glab a kol. 2015; Limet a kol. 2013). Nejnižších hodnot dosahoval půdní vzorek, do kterého byl aplikovaný biochar ze dřeva (konsolidovaný). Zvláštností je, že biochar ze dřeva, který nebyl konsolidovaný vyšel, co se týče hydraulické vodivosti velmi dobře.

Snížení hydraulické vodivosti v praxi za pomoci aplikování přídatku biouhlu by šlo využít zejména pro propustné půdy, díky čemuž by se snížilo, jak rychle by byla voda infiltrována a také pro rostliny by voda byla dostupnější po delší časový úsek než za běžných podmínek, což by pomohlo řešit problémy zejména v obdobích, kdy panuje sucho. Během posledních 100 let průměrné globální teploty vzduchu při povrchu země vzrostly o 0,5 °C (Niang a kol. 2015). Zvyšování teploty a pokles srážek v atmosféře by mělo za příčinu zvýšení míry evapotranspirace půdy a dále by vedlo k poklesu infiltrování vody do půdy, zadržování vody a snižování množství vody pro rostliny (Karmakar a kol. 2016).

Změny v hydraulické vodivosti, které nebyly zrovna významné, mohly být zapříčiněny mnoha možnými faktory, které hrály roli během experimentu. Prvním z nich je obsah biocharu v půdním prvku, který nebyl vysoký. Nízká koncentrace biocharu se tak nemohla projevit v relativně vysokých rychlostech. Také při předběžném připravování a odběru daných vzorků mohlo navzdory veškeré opatrnosti dojít k poškození. To mohlo následně vést k ovlivnění výsledků měření. Uvnitř půdních vzorků se mohly vyskytovat preferenční cesty, což nemuselo být při odběrech pozorovatelné.

Nedávné studie označily biouhel jako možný nástroj pro zvýšení a ovlivnění množství půdní vlhkosti (Basso a kol. 2016).

Biouhel tedy může ovlivnit či změnit půdní poměry a zvyšovat odolnost zemědělských systémů vůči suchu, ale záleží na mnoho různých faktorech biocharu a jeho vlastnostech. První věcí, na které záleží je původ biocharu. Vstupní materiál neboli výrobní surovina může být jakákoliv organická zbytková látka, kterou je nejvíce odpad ze zemědělství či lesnictví, tedy nejvíce se používají štěpky ze dřeva, rostliny, rýžové stonky nebo i hnůj. V mnoha studiích je podporován biochar rostlinného původu jako ten nejefektivnější (Liu a kol. 2017).

Nejen typ přídatku ale dále ovlivňuje výsledek i to jaká byla zvolena metoda pyrolýzy při výrobě biouhlu od nízkoteplné pyrolýzy (do 500 stupňů), středně teplé (500 až 800 stupňů) až po vysokoteplné pyrolýzy (teploty dosahující i nad 800 stupňů).

Dalším parametrem, který je nutno zohlednit je, do jaké půdy je přídatek aplikován (písčité až jílovité). Například Veheijen a kol. (2010) uvádí ve své studii a kladou velký důraz na to do jakého typu půdy se má jaký druh biocharu a v jaké koncentraci správně aplikovat. To sebou nese i důležitý charakter typů půdy, a to je velikost půdních částic a půdních pórů. Největší částice se vyskytují v půdách písčitých, a proto jsou velmi propustné. Naopak půdy jílovitého charakteru obsahují půdní částice velmi malé, což má za příčinu velmi nízkou až skoro nepropustnou vlastnost. V každém typu půdy se tedy biochar chová naprosto rozlišně a je potřeba přistupovat individuálně. Ve většině případů při studiích bylo prokázáno, že aplikování biocharu zvyšuje retenci v půdě, a to zejména v půdách písčitých, což je přičítáno zvýšené mikropórovitosti a velmi vysoké porézní struktuře biouhlu. Naopak i některé studie zase ukázaly, že aplikování tohoto přídatku nemělo vliv na půdní vlhkost (Mollindeo a kol. 2015).

Také studie ukazují rozpory mezi výsledky v terénu a výsledky provedenými v laboratořích. Příčinami mohou být rozdíly ve vlastnostech půdy, počasí a podmínek v prostředí daného terénu. Proto je dobré provádět více polních pokusů k zjištění, jak biochar ovlivňuje půdní prostředí a sledovat procesy v delším časovém období. Výzkum uvedený v této diplomové práci tedy musí brát výsledky s nepatrnou rezervou při hodnocení výsledků a použitím v praxi. Jedním z faktů je, že tento výzkum byl vyhotovený v laboratoři, nikoliv přirozeném terénním prostředí. To sebou neslo i pár výhod, a to upravenou homogenizovanou zeminu bez i s již aplikovaným biocharem. Dalšími výhodami byly stejné podmínky (teplota a vlhkost). Nevýhodou bylo naopak izolovanost půdy od běžného prostředí, kde by panovaly jiné podmínky vlivem půdních organismů (zejména ovlivněním žížal), vegetace či bioturbace (Hardie

a kol. 2013). Nemohly být projeveno ani ovlivnění změn vlhkosti a teplot, které jinak přirozeně kolísá.

Dle výsledků studií také roli hraje stáří použitého aplikovaného biocharu, kdy nejčerstvější bývá tím nejprospěšnějším. Také je díky své molekulární konfiguraci biologicky i chemicky více stabilní, než jeho původní materiál a těžko se rozkládá. Proto může v půdním prostředí zůstat stovky i tisíce let (Krull a kol. 2018). Co se týče množství, tak v experimentech se používaly nejvíce aplikační dávky biocharu 30 t/ha.

Vzhledem k vysokým nákladům na biochar je částečně nepravděpodobné, že by tato dávka vedla k návratnosti vložených prostředků.

Proto je hodně vědců i přes velké množství výhod biocharu k tomuto prvku skeptických, protože ekonomicky je to velmi náročná metoda vylepšování půdního prostředí a stát zatím dotace na tyto projekty neposkytl.

9. Závěr

Výsledky daného výzkumu diplomové práce ukázaly, že aplikování biocharu má určitý vliv na retenční schopnost půdy a hydraulickou nasycenou vodivost, avšak velmi záleží na typu biocharu, tedy jeho druhu (původu) a zvoleném množství aplikované směsi (koncentrace). Detailnější lze ještě řešit například při jakém druhu pyrolýzy byl biochar zhotoven, ale toto v daném výzkumu nehraje roli.

Nejlepší výsledky při měření retenční schopnosti prokázal nekonsolidovaný vzorek bez přidaného biocharu (2BC_plant_N). Druhým nejefektivnějším prvkem se stal konsolidovaný prvek s přidaným rostlinným biohlem (2BCplantK), který se od prvního vzorku lišil jen o pár setin. Naopak statisticky nejméně významný byl nekonsolidovaný půdní prvek s přidaným biocharem ze dřeva (2BC_wood_N). Konsolidování půdních prvků, dle výsledků nemělo žádný velký vliv na měření retenční schopnosti. Konsolidace v tomto případě nelze určit jako ovlivňující faktor měření, protože se prvky chovaly pokaždé jinak a ve výsledcích nebyly nalezeny žádné souvislosti, které by vykazovaly vyšší prosperitu jako konsolidované či naopak.

Při měření hydraulické nasycené vodivosti prokázal nejlepší účinnost také půdní prvek s přídavkem rostlinného biocharu. Tedy závěrem lze při měření retenční schopnosti a hydraulické vodivosti říci, že nejefektivnějším přídavkem se stal právě biochar rostlinného původu. Důvodem tohoto měření bylo zjistit, jaká směs je nejvhodnější pro vylepšení vlastností půd, a to zejména těch hydrofyzikálních.

Pro další eventuální výzkumy podobného typu a záměru by bylo vhodné provádět měření v terénu, kde panuje reálné prostředí a výsledky tak nejsou ovlivněny simulací z prostředí laboratoře. Přirozeným měřením by pak bylo docíleno přesnějších výsledků.

K objemové hmotnosti lze konstatovat, že nejnižší výsledek prokázal prvek s rostlinným biocharem a to ve všech měřených typech tohoto druhu s lehkou odchylkou u typu nekonsolidovaného (jen tři desetiny). Objemová hmotnost u prvků s biocharem ze dřeva vyšla u všech typů stejně a výrazně s vyššími hodnotami oproti biocharu rostlinnému.

Hydrolimity nevykázaly větší odchylky mezi měřenými vzorky. Nejméně vhodnými vzorky vyšly právě prvky bez aplikace přídavku, tedy nejméně vhodné pro rostliny a jejich prosperitu. Naopak opět prvky s aplikovaným biocharem rostlinného původu. Tedy přidaný biochar prokazuje pozitivní výsledky na půdní prostředí.

Otázkou však zůstává, jestli tento prvek i přes všechny své mnohé klady bude v budoucnu využíván kvůli svým vysokým nákladům při jeho výrobním procesu.

Protože je samostatná aplikace biocharu poměrně komplikovaná a zároveň finančně náročnější, bylo by vhodné biochar zkusit kombinovat s jiným dalším aplikačním přídatkem. Tím by mohlo dojít k snížení potřeby velkého množství biocharu a tedy i k poklesu nákladů na něj.

Látkami, které by mohly doplňovat aplikovaný biochar by mohly být například hnůj či kompost či jiné organické látky. Spojení těchto látek podle posledních průzkumů pomůže podpořit aktivitu půdních organismů. Otázkou současné doby je, zda je ale hnoje dostatek. Většina zemědělců nyní trpí jeho deficitem. Proto by bylo vhodné látky spolu nakombinovat a finanční stránka biocharu a současný nedostatek hnoje by byl tímto spojením vyřešen. Další alternativy aplikačních látek do půdy mohou být například hydrogel nebo neosol.

10. Přehled literatury a použitých zdrojů

- Amonette J. E., Joseph S., 2009: Characteristics of Biochar: Microchemical Properties. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. 17: 33-43. ISBN 978-1-84407-658-1.
- Barker T., 2003: Representing global climate change, adaptation and mitigation. *Global Environmental Change* 13: 1-6.
- Blackwell P., Riethmuller, G., Collins M., 2009: Biochar Application to Soil. *Science and technology* 1: 207–226.
- Blažek J., Sýkorková I., Havlecová M., 2014: „Black carbon“ jako produkt nedokonalého spalování – vznik, vlastnosti, výskyt, stanovení. *Chemické listy*. 108: 861, 863.
- Brázdil R., Kotyza O., 2010: History of weather and climate in the Czech lands, *Strong Winds*. 14: 61-64. ISBN 80-210-1404-0.
- Carlson T. N., Gillies R. R., Schmuge T. J., 1999: An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 191 – 205. ISSN 0238-9123
- Cimo G., 2014: Characterization of chemical and physical properties of biochar for energy purposes and enviromental restoration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 64: 78.
- Deb S., 2012: Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Sciences*. 7: 499-502.

- Drumea P., Matecha G., Pavel I. 2015. The importance of the byproduct biochar achieved in the process of obtaining energy from biomass. *Renewable Energy & Rural Development*. 227: 41-45.
- Enders A., Hamley K., Whitman O., Joseph S., Lehmann J., 2012: Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114: 644-653.
- Fatemeh R., Obour P., Arthur F., 2020: Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*. 361: 42-46.
- Hardie M., Clothier B., Bound A., Matyas G., Closer D., 2014: Does biochar influence soil physical properties and soil water availability. *Plant and Soil*. 16: 47.
- Jandák, J., Prax, A., Pokorný, E., 2004: *Půdoznalství skriptum*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Brno. 49.
- Kanagawa Y., 2019: *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Elsevier. Amsterdam.14: 81-84.
- Kraus J., Kvítek T., 2018: Retence vody, ochrana půdy a ekonomické aspekty zemědělské výroby. *Vodní hospodářství* 14: 1-5.
- Kutílek M., Císlerová M., Kuráž F. 1993. *Hydropedologie*. ČVUT. Praha. 168.

- Kutílek M., Kuráž V., Císlarová M., 2004: *Hydropedologie 11*. České vysoké učení technické v Praze. Praha. 176.
- Lehmann J., Rillig, M. C., Thies J., Masiello, A., Hockaday W., Crowley, D., 2011: Biochar Effects on Soil Biota - A Review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43. 1812–1826.
- Liakopoulos C., 2010: Darcy's coefficient of permeability as symmetric tensor of second rank. *International Association of Scientific Hydrology*. 30: 56-58.
- Lilly A., Nemes A., Rawls W. J., Pachepsky Y. A., 2008: Probabilistic Approach to the Identification of Input Variables to Estimate Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 52: 19–24.
- Lim T. J., Spokas K. A., Feyereisen G., Novak J. M., 2016: Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*. 142: 139–142.
- Lone A., Najar G., Gamie M. Sofi J., Ali T., 2015: Biochar for Sustainable Soil Health: A Review of Prospects and Concerns. *Pedosphere*. 5: 639-643.
- Němec J., Hladný K., Blažek V., 2006: *Voda v České republice*. Consult Praha. 78.
- Němeček J., Muhlehanšlová M., Macků J., Vokoun J., Vavříček D., Novák P., 2011: *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky*. Česká zemědělská univerzita, Praha. 2. 96. ISBN: 978-80-213-2155-7.

- Pavlů L., 2018: Základy pedologie a ochrany půdy. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. 78s. ISBN: 978-80-213-2876-1.
- Pokorná D., Záborská J., 2007: Hydrologie a hydroopedologie. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha. 114s.
- Pytl V., Broncová-Klicperová D., 2012: Podzemní vody České republiky. Česká meteorologická společnost. Praha. 117s. ISBN 978- 80-87577-62-2.
- Richter R., 2001: Půdní úrodnost. Vyd. 2. Praha: Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR. ISBN 8071051454.
- Richter R., Hlušek J., Tesařová M., 2005: Pomocné látky ovlivňující biologickou složku půdy. Úroda, ISSN 0139-6013.
- Schmidt H., 2010: Anwendungen von Pflanzenkohle. Journal für Terroirwein und Biodiversität. ISSN 1663-0521.
- Schneider H. S., Root L. T., Maastrandea D. M., 2011: Encyclopedia of Climate and Weather, Oxford University press, Oxford. 148s. ISBN: 9780199765324.
- Schwartz J, Morris R., 2011: Use and Function in Soil. Advances in Agronomy. 105: 47-82.
- Slavík L., Neruda M., 2007: Voda v krajině. Fakulta životního prostředí UJEP. Ústí nad Labem.

- Sohi S.P. , Krull E., Lopez-Capel E., Bol R., 2010: Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy*. 115: 47-52.
- Sun, F., Lu, S., 2014: Biochars improve aggregate stability, water retention. *Geoderma*. 178: 24-30.
- Šantrůčková H., 2014: *Základy ekologie půdy*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. České Budějovice. 125 s.
- Šarapatka B., 1996: *Pedologie*. Univerzita Palackého, Olomouc
- Šimek M., 2003: *Základy nauky o půdě*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 120 s.
- Vijayaraghavan K., 2021: The importance of mineral ingredients in biochar production, properties and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51: 113-139.
- Weber K., Quicker P., 2017: Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31: 273.
- Wilhite M. R., Glantz A.D., 1995: Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 11: 91-102. ISSN 1642-4703.
- Zhang Y., Schaap M. G., 2019: Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 57: 101–103.

- Zillman, W. J., 2009: A history of climate activities. WMO Bulletin. 58. 141-150.

10.1. Internetové zdroje

- Břendová K., Tlustoš P., Sazáková J., Bohounek, M., 2014: Využití biouhlu k úpravě půdních vlastností (online) [cit.2022.10.3], dostupné z <https://biom.cz/cz/odborneclanky/vyuziti-biouhli-biocharu-k-uprave-pudnich.com>.
- ČHMÚ, ©2014: Česká televize. (online) Meteorologové vypočítali nové klimatické normály. Ukazují, jak se Česko otepluje. [cit. 2022-10-09], dostupné z https://ct24.ceskatelevize.cz/pocasi/3439870-meteorologove-stanovili-nove-klimaticke-normaly-ukazuji-jak-se-ceskootepluje?fbclid=IwAR00GITH_FDJVL-7Czlns75VIPmqqDMST5Zi296I55VyOVg2JissfQutbCk.
- Keményová Z., 2001: Uhlíkovou stopu ukládají do polí a kravské podestýlky. Český fond zachytává CO₂ v biouhlu, který pak zlepšuje farmářům půdu (online) [cit.2022. 11.10],dostupné z <https://sj.news/uhlikovou-stopu-ukladaji-do-poli-a-kravske-podestylky-cesky-fond-zachytava-co2-v-biouhlu-ktery-pak-zlepsuje-farmarum-pudu/>.

11. Přehled použitých obrázků

Obrázek 1: Rozdělení retence (Šantrůčková a kol. 2014).

Obrázek 2: Křivky retence určené půdám s různými texturami za působení pórovitosti (Matula, 1989).

Obrázek 3: Schéma Darcyho výzkumu (převzato z: Valentová, 1998).

Obrázek 4: Příprava půdních vzorků v Kopeckého válečcích (vlastní zpracování).

Obrázek 5: Půdní vzorky vložené v pískovém tanku (vlastní zpracování).

Obrázek 6: Konsolidace zeminy (vlastní zpracování).

Obrázek 7: Půdní vzorek těsně před seříznutím (vlastní zpracování).

Obrázek 8: Půdní vzorky umístěné v pískovém tanku (vlastní zpracování).

Obrázek 9: Graficky znázorněné retenční křivky (vlastní zpracování).

Obrázek 10: Výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (vlastní zpracování).

12. Přehled použitých tabulek

Tabulka 1: Dělení půdy na základě textury (Andreoli a kol. 2009).

Tabulka 2: Hodnoty K_s vůči druhům zeminy (Kaoli, 2003).

Tabulka 3: Druhy pyrolýz, podmínky a cílový produkt (převzato z: Valentová, 1998).

Tabulka 4: Hydrolimity (vlastní zpracování).

Tabulka 5: Souhrn dat z objemové hmotnosti (vlastní zpracování).

13. Přílohy

	číslo válečku	obj. hm.	průměr	směrodatná odchylka
1BC_plant_K	66	0,98	1,00	0,023
	53	0,97		
	68	1,01		
	59	1,01		
	62	1,03		
2BC_plant_K	31	1,01	1,00	0,010
	45	1,00		
	57	0,99		
	70	1,00		
	75	0,99		
2BC_plant_N	96	0,97	0,97	0,005
	76	0,97		
	95	0,97		
	88	0,98		
1BC_wood_K	104	1,18	1,18	0,012
	113	1,20		
	119	1,17		
	105	1,18		
	110	1,18		
2BC_wood_K	108	1,17	1,18	0,012
	93	1,18		
	114	1,19		
	74	1,19		
	85	1,16		
2BC_wood_N	99	1,16	1,18	0,012
	87	1,17		
	94	1,19		
	83	1,18		
Kontrola K	41	1,1118	1,11	0,011
	42	1,0911		
	44	1,1212		
	40	1,1057		
	39	1,1003		
Kontrola N	37	1,1092	1,10	0,007
	36	1,0912		
	67	1,0991		
	56	1,1004		

Příloha 1: Objemová hmotnost po stabilizaci a seříznutí vzorku (vlastní zpracování).

	kon_K	kon_N	BC1pl ntK	BC1wo odK	BC2pl ntK	BC2pl ntN	BC2wo odK	BC2wo odN
nbr.val	5,00E+00	4,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	5,00E+00	4,00E+00	5,00E+00	4,00E+00
nbr.null	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
nbr.na	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	1,00E+00
min	2,17E-05	2,64E-05	3,25E-05	1,05E-05	2,38E-05	4,68E-05	3,40E-05	4,59E-05
max	4,74E-05	6,35E-05	6,81E-05	2,93E-05	4,73E-05	9,36E-05	7,58E-05	7,16E-05
range	2,57E-05	3,71E-05	3,56E-05	1,88E-05	2,35E-05	4,67E-05	4,17E-05	2,56E-05
sum	1,75E-04	1,49E-04	2,64E-04	9,54E-05	1,77E-04	2,70E-04	2,79E-04	2,44E-04
median	3,69E-05	2,96E-05	5,85E-05	2,01E-05	3,21E-05	6,49E-05	5,67E-05	6,35E-05
mean	3,50E-05	3,73E-05	5,28E-05	1,91E-05	3,55E-05	6,75E-05	5,59E-05	6,11E-05
SE.mean	4,52E-06	8,82E-06	7,23E-06	3,39E-06	4,20E-06	9,71E-06	6,80E-06	5,75E-06
CI.mean. 0.95	1,26E-05	2,81E-05	2,01E-05	9,42E-06	1,17E-05	3,09E-05	1,89E-05	1,83E-05
var	1,02E-10	3,11E-10	2,61E-10	5,75E-11	8,84E-11	3,77E-10	2,31E-10	1,32E-10
std.dev	1,01E-05	1,76E-05	1,62E-05	7,58E-06	9,40E-06	1,94E-05	1,52E-05	1,15E-05
coef.var	0,29	0,47	0,31	0,40	0,27	0,29	0,27	0,19
skewnes s	1,12E-01	7,10E-01	-2,35E-01	1,15E-01	7,80E-02	2,91E-01	-1,39E-01	-3,31E-01
skew.2S E	6,12E-02	3,50E-01	-1,29E-01	6,29E-02	4,27E-02	1,44E-01	-7,60E-02	-1,63E-01
kurtosis	1,89E+00	1,72E+00	2,14E+00	1,91E+00	1,95E+00	1,87E+00	1,55E+00	2,03E+00
kurt.2SE	4,73E-01	3,28E-01	-5,35E-01	-4,77E-01	-4,87E-01	-3,57E-01	-3,89E-01	-3,88E-01
normtest. W	9,81E-01	7,38E-01	8,73E-01	9,57E-01	9,46E-01	9,58E-01	9,84E-01	9,30E-01
normtest. p	0,94	0,03	0,28	0,79	0,71	0,77	0,95	0,60

Příloha 2: Kompletní statistika k nasycené hydraulické vodivosti (vlastní zpracování).

pF	0	1	1,5	2	2,3	2,7	3	3,7	4,18
1BC_plant_K	0,59	0,58	0,53	0,34	0,27	0,21	0,17	0,12	0,10
2BC_plant_K	0,60	0,59	0,56	0,36	0,28	0,21	0,17	0,13	0,09
2BC_plant_N	0,61	0,59	0,56	0,35	0,27	0,21	0,17	0,12	0,09
1BC_wood_K	0,54	0,52	0,50	0,34	0,25	0,19	0,15	0,11	0,09
2BC_wood_K	0,53	0,52	0,50	0,33	0,24	0,18	0,14	0,10	0,09
2BC_wood_N	0,52	0,52	0,50	0,33	0,25	0,18	0,14	0,10	0,09
kontrola K	0,57	0,56	0,53	0,32	0,25	0,20	0,16	0,12	0,10
kontrola N	0,57	0,56	0,53	0,32	0,25	0,20	0,16	0,12	0,10

Příloha 3: Data K průměrné vlhkosti K +N (vlastní zpracování).

	pF	0	2	4,18
1BC_plant_K	66	0,5774	0,3248	
	53	0,5999	0,3311	0,0893
	68	0,5915	0,3464	0,0909
	59	0,5961	0,3503	0,092
	62	0,5919	0,3583	0,1083
2BC_plant_K	31	0,6038	0,3734	0,0927
	45	0,6061	0,3664	0,0907
	57	0,6026	0,3607	0,091
	70	0,5864	0,3683	0,0904
	75	0,5903	0,3438	
2BC_plant_N	96	0,6028	0,3457	0,0883
	76	0,6132	0,349	0,1037
	95	0,6186	0,3455	0,0875
	88	0,6011	0,3524	0,0884
1BC_wood_K	104	0,5344	0,343	0,0836
	113	0,5359	0,3426	
	119	0,5385	0,3352	0,0956
	105	0,5371	0,3358	0,0963
	110	0,5365	0,3363	0,0958
2BC_wood_K	108	0,536	0,3264	0,0898
	93	0,542	0,333	0,091
	114	0,5274	0,3368	0,0914
	74	0,5238	0,325	
	85	0,5212	0,328	0,0904
2BC_wood_N	99	0,5255	0,3268	0,0884
	87	0,4824	0,3307	0,0896
	94	0,5326	0,3392	0,0918
	83	0,5253	0,3362	0,091
Kontrola K	41	0,57564	0,32664	0,11204
	42	0,55854	0,30934	0,10944
	44	0,56774	0,33094	0,08614
	40	0,57154	0,32034	0,11024
	39	0,57324	0,31534	
Kontrola N	37	0,58104	0,32284	0,11314
	36	0,56994	0,30844	0,10904
	67	0,56914	0,31554	0,11034
	56	0,56734	0,31924	0,08584

Příloha 4: Výsledná data z měření retence a hydrolimit (vlastní zpracování).