

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv aplikace biocharu na nenasycenou hydraulickou
vodivost a vodoodpudivost půdy**

Diplomová práce

**Bc. Pavlína Trauč Pokorná
AGRIMR**

Ing. Miroslav Fér, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv aplikace biocharu na nenasycenou hydraulickou vodivost a vodoodpudivost půdy" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.4.2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Miroslavu Férovi, Ph.D. za vedení diplomové práce.

Vliv aplikace biocharu na nenasycenou hydraulickou vodivost a vodoodpudivost půdy

Souhrn

Diplomová práce obsahuje teoretickou a praktickou část, které popisují vliv aplikace biocharu na nenasycenou hydraulickou vodivost a vodoodpudivost půdy. V teoretické části je vysvětlen biochar, jeho možnosti výroby, pozitivní vlastnosti a možnosti využití pro zlepšení kvality půd. Výroba biocharu pomocí termochemického procesu zvaného pyrolýza, která probíhá několika různými způsoby, přičemž rozdíl výroby spočívá v teplotě a vstupní surovině biomasy. Dále jsou popsány fyzikální vlastnosti půd, zrnitost, pórovitost, objemová hmotnost, specifická hmotnost především ale i hydraulické vlastnosti, hydraulická vodivost, nasycená a nenasycená.

Praktická část se zabývá popisem odběrových míst vzorků, kde byly odebrány porušené i neporušené půdní vzorky. Následně jsou zkoumány základní vlastnosti jednotlivých půdních vzorků po smíchání s určitým množstvím biocharu. Experiment probíhal na třech různých půdních typech konkrétně na vzorcích ze Středočeského kraje a z kraje Vysočina. Každý půdní vzorek byl rozdělen na šest variant, kde vždy byla jedna varianta takzvaně kontrolní, čistá, bez biocharu. Ty byly poté v laboratoři smíchány různým množstvím biocharu. Který poskytla Akademii českých věd, Ústav chemických procesů a zároveň byly poskytnuty základní vlastnosti biocharu. Po smíchání půdních vzorků s biocharem, byly jednotlivé varianty nahutněny do válců, kde byla poté pomocí Minidisk infiltrometry značky METER group měřena nenasycená hydraulická vodivost půdy. Při tomto experimentu byla zkoumána sorptivita vody i etanolu. Na každém půdním vzorku probíhalo měření ve třech opakování jak s vodou, tak i etanolem, celkem bylo pracováno s osmnácti půdními vzorky. Měření na jednotlivých půdních vzorcích probíhalo do ustáleného proudění, které nastalo po 30 minutách. Výsledky byly zapisovány každých 15 vteřin.

Na základě tohoto laboratorního měření byla vyhodnocena data, která jsou popsána ve výsledcích. Nenasycená hydraulická vodivost byla nejvíce snížena u lokality Semice. Kde se zvyšujícím množstvím biocharu klesala nenasycená hydraulická vodivost. U lokality Milčice a Humpolec byly hodnoty v závislosti na aplikačních dávkách biocharu kolísavé. Index repelence byl zvýšen u experimentované lokality Semice po přidání biocharu v závislosti na množství. Naopak u varianty Humpolec a Milčice došlo ke zvýšení indexu repelence se zvyšující se dávkou biocharu.

Jelikož se jednalo o laboratorní experiment, ve kterém bylo experimentováno se smáčivými půdy, nelze potvrdit velmi pozitivní výsledek biocharu. Je proto možné doporučit ho, k použití a prozkoumání pouze do terénních podmínek, měření.

Klíčová slova: nenasycená hydraulická vodivost, biochar, repelence půdy

Effect of biochar application on soil unsaturated hydraulic conductivity and water repellency

Summary

The thesis contains theoretical and practical parts, which describe the effect of biochar application on unsaturated hydraulic conductivity and water repellency of soil. In the theoretical part biochar, its production possibilities, positive properties and possible applications for soil quality improvement are explained. The production of biochar by a thermochemical process called pyrolysis, which takes place in several different ways, the difference in production being the temperature and the biomass feedstock. The physical properties of the soils, grain size, porosity, bulk density, specific gravity, but also hydraulic properties, hydraulic conductivity, saturated and unsaturated are also described.

The practical part deals with the description of the sampling points where disturbed and undisturbed soil samples were collected. Subsequently, the basic properties of each soil sample after mixing with a certain amount of biochar are investigated. The experiment was carried out on three different soil types, namely samples from the Central Bohemia Region and the Vysočina Region. Each soil sample was divided into six variants, where there was always one so-called control variant, pure, without biochar. These were then mixed in the laboratory with a given amount of biochar. Which was provided by the Academy of Sciences, Institute of Chemical Processes, and the basic properties of biochar were also provided. After mixing the soil samples with the biochar, the different variants were packed into cylinders where the unsaturated hydraulic conductivity of the soil was then measured using a Minidisk infiltrometer from the METER group. In this experiment, both water and ethanol sorptivity were examined. Measurements were performed on each soil sample in triplicate with both water, and ethanol, for a total of eighteen soil samples. The measurements on each soil sample were carried out until steady flow, which occurred after 30 minutes. Results were recorded every 15 seconds.

Based on these laboratory measurements, the data were evaluated and are described in the results. Unsaturated hydraulic conductivity was most reduced at the Semice site. Where the unsaturated hydraulic conductivity decreased with increasing amounts of biochar. At the sites Milčice and Humpolec the values varied depending on the application rates of biochar. The repellency index was increased at the experimental site Semice after the addition of biochar depending on the amount. On the contrary, for the Humpolec and Milčice variants, the repellency index increased with increasing biochar dose. As this was a laboratory experiment in which the with wetting soils, it is not possible to confirm the very positive result of biochar. It is therefore possible to recommend it, for use and investigation only to field conditions, measurements.

Keywords: unsaturated hydraulic conductivity, biochar, soil repellency

Obsah

1 Úvod	8
2 Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3 Literární rešerše	10
3.1 Biochar	10
3.1.1 Výroba	10
3.1.2 Vlastnosti	12
3.1.3 Vliv biocharu na půdní vlastnosti	16
3.2 Fyzikální vlastnosti půd	18
3.2.1 Zrnitost	18
3.2.2 Specifická hmotnost půdy	19
3.2.3 Obejmová hmotnost půdy	19
3.2.4 Pórovitost	19
3.2.5 Půdní struktura	21
3.2.6 Obsah vody v půdě	21
3.3 Hydraulické vlastnosti půd	22
3.3.1 Hydraulická vodivost	23
3.3.1.1 Nasycená hydraulická vodivost	24
3.3.1.2 Nenasycená hydraulická vodivost	24
3.3.2 Vodoodpudivost	25
4 Metodika	27
4.1 Popis místa odběru vzorků	27
4.2 Analýza půdních vzorků	28
4.2.1 Základní půdní vlastnosti	28
4.2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti	28
4.2.1.2 Základní chemické vlastnosti	30
4.3 Míchání vzorků	32
4.4 Půdní vzorky s biocharem	33
4.5 Půdní vlastnosti namíchaných vzorků	34
4.6 Hydraulické vlastnosti	35
4.7 Statistika	37
5 Výsledky	38
5.1 Základní vlastnosti půd	38
5.2 Nenasycená hydraulická vodivost	41
5.3 Sorptivita, index repelence	44
5.4 Statistické zhodnocení výsledků	47

6	Diskuze	51
7	Závěr	54
8	Literatura.....	55

1 Úvod

Půda se vyvíjela důsledkem působením půdotvorných faktorů a podmínek. Její vývoj obsahuje tři fáze. První fáze byla fáze vzniku půdy, dále evoluci půdy, a nakonec metamorfózu půdy. Celkově půdu tvoří živé organismy, minerální částice různých velikostí, organické zbytky hub, rostlin a zvířat. Jedná se o neobnovitelný zdroj, kdy půdotvorný proces trvá dlouho dobu, přičemž degradace půdy může působit velmi rychle (Kozák et al. 2009).

Problémy se suchem způsobeným tropickým klimatem v suchých a polosuchých oblastech závažně ovlivňuje růst a vývoj rostlin, plodin. Nižší retence vody v půdě, nadměrný povrchový odtok či nesprávné hospodaření s vodními zdroji, to vše vede ke stresovému stavu půdy suchem. Úpravou půdy přidáním biocharu jako půdního kondicionéru je výzkumníky považováno za jeden z efektivních postupů hospodaření. Jelikož může zlepšit zadržování vody v půdě, infiltraci vody, provzdušňování, a tím celkově zlepšit strukturu pórů půdy (Hussain et al. 2021).

Úpravou půdy biocharem může dojít ke zlepšení zadržování vody v půdě především v hrubozrnných půdách, zatímco v jemnozrnných půdách nemusí být ovlivněno zadržování vody. Přidávání biocharu do půd potenciálně ovlivňuje fyzikální i hydraulické vlastnosti půdy. (Lei et al. 2013)

Biochar označuje pevný zbytek, který je získáván pyrolýzou biomasy. Pyrolýza je thermochemický rozklad biomasy při zvýšených teplotách a bez přídavku vnějšího kyslíku. Biochar je považován za účinný materiál pro ekologické aplikace. Skládá se z důležitých vlastností, jako je především vysoká poréznost, která z něj činí účinný adsorbent. Biochar lze vyrábět z různých surovin například z rostlinných surovin a zemědělských. Proto se jeho vlastnosti liší v závislosti na použité surovině. Především se skládá z popela a uhlíku (Ding et al. 2023).

V zemědělství je biochar považován za praktickou úpravu půdy, která je v souladu s metodami udržitelného zemědělství a může výrazně zvýšit dostupnost živin, zdraví a produkci půdy. Kromě toho může dále biochar zlepšit i stav kyselých půd a zvýšit zadržování vody v půdě. V důsledku změn půdních vlastností může aplikace biocharu dále omezit uvolňování uhlíku a dusíku (Hamidzadeh et al. 2023).

Hydraulické vlastnosti jsou důležité pro popis toku vody v porézním prostředí. K měření hydraulických vlastností jsou obvykle prováděny laboratorní experimenty. Tyto vlastnosti přímo souvisí s propustností půdy, což je vnitřní parametr spojený s texturou půdy. Proto, abychom získali přesnější odhad hydraulických vlastností je nezbytné studovat strukturu porézní půdy (Nourani et al. 2022).

Ve studii Verheijen et al. 2010 bylo dokázáno, že biochar jako půdní doplněk zlepšuje chemické vlastnosti půdy. Celkově přídavek biocharu zlepšuje fyzikální a hydraulické vlastnosti půdy, přidáním porézních látek do půdy, zvýšení zadržování vody a zpracovatelnost půdy. Dále byly hlášeny různé účinky související s typem půdy a dávkami biocharu. Obecně platí, že výraznější přínosy byly pozorovány u půd s hrubozrnnou texturou, nízkým pH (Verheijen et al. 2010).

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Diplomová práce obsahuje rešeršní část, kde byl popsán biochar, jeho výroba, vlastnosti, použití. Dále byly popsány základní fyzikální vlastnosti půd, především poté hydraulické vlastnosti, vodoodpudivost a voda v půdě.

Dále praktickou část, která popisuje laboratorní experiment vliv biocharu na hydraulické vlastnosti půd. Pro tento experiment byly zvoleny tři odběrové lokality s rozdílnými půdními typy. Každý půdní vzorek byl navážen a následně rozdělen na šest stejných půdních vzorků. Dohromady bylo experimentováno s osmnácti půdními vzorky. Následně bylo v laboratoři provedeno smíchání každého vzorku s daným množstvím biocharu a u každého půdní vzorku byla stanovena i kontrolní varianta. Po smíchání půdních vzorků s biocharem byla měřena nenasycená hydraulická vodivost půdy Minidisk infiltrometry s variantou s vodou a s etanolem. Na základě těchto výsledků byla spočítána sorptivita vody a sorptivita etanolu.

Hypotéza:

- 1) Změní se nenasycená hydraulická vodivost po aplikaci biocharu do půdních vzorků?
- 2) Může být ovlivněna vodoodpudivost půdy přidáním biocharu do půdy?

3 Literární rešerše

3.1 Biochar

Původ objevení biocharu je spojován se starověkými indickými populacemi z oblasti Amazonie. Pomocí techniky „slash-and-char“ byla vytvořena takzvaně temná země tedy biochar. Místo spalování biomasy bylo použito její řezání. Byl objeven díky své vynikající schopnosti zlepšování úrodnosti a udržitelnosti půdy.

Podle Lehmana et al. 2007 je definován jako produkt bohatý na uhlík, když se biomasa, jako je dřevo, hnůj nebo listí zahřívá v uzavřené nádobě s malým nebo nedostupným vzduchem.

Shackley et al. 2012 popisuje biochar jako porézní uhlíkatou pevnou látku, která je produkována termochemickou přeměnou organických materiálů v atmosféře, ochuzenou o kyslík a má fyzikálně-chemické vlastnosti vhodné pro bezpečné a dlouhodobé skladování uhlíku v životním prostředí.

Verheijen et al 2010 biochar vysvětlili jako biomasu, která byla pyrolyzována v prostředí s nulovým nebo nízkým obsahem kyslíku, aplikována na půdu na konkrétním místě, u kterého se očekává, udržitelné množství uhlíku a současné zlepšení funkce půdy.

3.1.1 Výroba

Biochar můžeme definovat jako pevný produkt bohatý na uhlík vyroben pyrolýzou z biomasy. Představuje vedlejší produkt termochemické přeměny, jako je pyrolýza, zplyňování, karbonizace uhlíkaté biomasy. Kterou představují zemědělské zbytky, biomasa z řas, lesní zbytky, hnůj, aktivovaný kal, digestát, energetické plodiny (Huang et al. 2023).

Biochar lze získat z různých organických zbytků, včetně lesních zbytků, zemědělského odpadu, tuhého komunálního odpadu, zbytků buničiny, papíru z průmyslu, zvířecí hnůj a čistírenské kaly. Kromě podmínek pyrolýzy hraje použitá surovina důležitou roli ve fyzikálně-chemických vlastnostech, tedy ve schopnosti vázat znečišťující látky a účinnost sorpce (Lima et al. 2022).

Při úplné či částečné nepřítomnosti kyslíku lze tepelným rozkladem rostlinné biomasy takzvaně pyrolýzou upravit tak, aby kromě oxidu uhličitého byly získané hořlavé plyny, těžké oleje, páry, a především pevný zbytek bohatý na uhlík, který je obecně označován jako zuhelnatělý. Obvykle obsahuje uhlí vznikající z biomasy určené k aplikaci do půd. Typickým znakem biocharu je obsah převážně stabilních aromatických forem organického uhlíku (Sohi et al. 2010).

Vzhledem k tomu, že se sloučeniny ligninu v biomase mohou rozkládat v širším teplotním rozsahu, snížením teploty během pyrolýzy dochází ke zvýšení obsahu sloučeniny ligninu v biocharu, a to zlepšuje uhlíkový cyklus a úrodnost (Hamidzadeh et al. 2023).

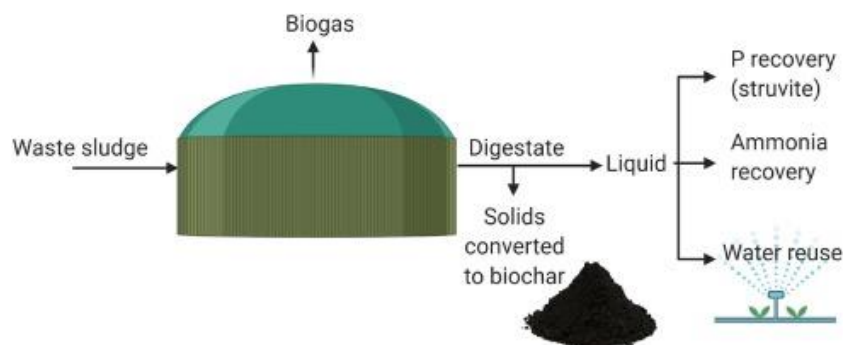
Různé vlastnosti biocharu jsou v důsledku podmínek pyrolýzy, například teplota, rychlost ohřevu, doba, reakční prostředí, předběžná a následná úprava. Teplota pyrolýzy během výroby biocharu je jedním z nejdůležitějších strukturních faktorů a fyzikálně-chemických vlastností. Během pyrolýzy různé teplotní rozsahy rozkládají složky dřeva, hemicelulóza při 200-260 °C, celulóza 240-350 °C a lignin 280-500 °C, což vede k odchylkám výsledků studií jeho použití (Lima et al. 2022). V Tabulce 1 jsou zobrazeny thermochemické procesy k výrobě biocharu, jejich rozmezí teplot a výtěžnost.

Tabulka 1 Teploty během výrobních procesů biocharu (upraveno dle Ahmed et al. 2016).

Proces	Teplota (°C)	Výtěžnost (%)
pomalá pyrolýza	100-1000	15-40
rychlá pyrolýza	300-1000	10-25
zplyňování	700-1500	10
hydrotermální karbonizace	175-300	30-72

Existují různé druhy pyrolýzy, mezi ty nejvíce používané řadíme konvenční a mikrovlnnou. Konvenční pyrolýza je populární přístup k výrobě biocharu, který závisí na rychlosti ohřevu. Rychlý typ, kde teplota dosahuje nad 100 °C/s nebo pomalý typ s teplotou 0,1-1 °C/s. Klíčovým faktorem je však především složení použitého kalu. Nevýhodou konvenční pyrolýzy je ztráta části energie, která je absorbována molekulami vody uvnitř biomasy. Opačný stav nastává u mikrovlnné pyrolýzy, jelikož na bázi mikrovln u vody dochází ke zlepšení kapacity ohřevu. Což se doporučuje pro mokrou biomasu. Dostupná literatura dokonce uvádí i zvýšení pH sklizeného biouhlu (Samadoney et al. 2022).

U pyrolýzy organických odpadů pomocí mikrovlnné pyrolýzy bylo prokázáno, že mikrovlnný výkon i reakční teplota přímo souvisí s množstvím biocharu, hustou a indexu porozity. Optimální podmínky s maximálním výtěžkem byly hlášeny při 300 °C (Hamidzadeh et al. 2023). Na Obrázku 1 je znázorněna technologie zpracování a využití kalu.



Obrázek 1 Technologie zpracování a využití odpadního kalu (Lima et al. 2022).

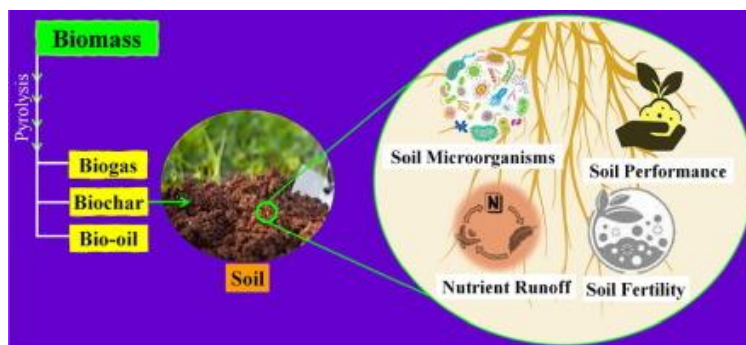
V případě pomalé pyrolýzy jsou většinou využívány vsádkové pece a šnekové reaktory. Surovina biomasy se zde protlačuje reaktorem pomocí šneku, kdežto pevný odpad se typicky vysypává gravitací do sběrné nádrže. Jednou z klíčových výhod těchto reaktorů je jejich schopnost velké adaptability, na přijetí různých druhů, tvarů a velikosti surovin. Doba zdržení flexibilně a spolehlivě probíhá pomocí šneku. Další pozitivní vlastnost spočívá v transportu a jejich kompaktnosti, což umožňuje požívání i v odlehlých oblastech s velkým množstvím surovin (Hamidzadeh et al. 2023).

Pyrolýza probíhá za podmínek při teplotě 300 až 900 °C a bez kyslíku. Během tohoto procesu jsou tvořeny pevné, kapalné a plynné produkty. Kapalná a pevná látka se obvykle nazývají biochar. Tento proces zahrnuje rychlou a pomalou pyrolýzu. Rozdíl mezi nimi spočívá v době umístění suroviny do reaktoru. V případě rychlé pyrolýzy se surovina přidává do reaktoru poté, co teplota dosáhne požadované hodnoty. Přičemž u pomalé se surovina umísťuje do reaktoru ihned na začátku procesu (Wang et al. 2019).

Pyrolýza odpadní biomasy, především zvířecího hnoje a splaškových kalů zabíjí veškeré přítomné mikroby, díky čemuž jsou zároveň snižovány účinky na zdraví životní prostředí (Lehmann et al. 2011).

Pyrolýza z biomasy je spolehlivý proces, a především cenově dostupný, jejím výsledkem je výroba dřevěného uhlí, syntézního plynu a bio-olejů (Hamidzadeh et al. 2023).

Velký potenciál v použití biocharu souvisí se snížením znečištění životního prostředí, jelikož nakládá s odpadem pocházejícím z rostlin či zvířat. Tudíž odpadní biomasa pro výrobu je jak ekonomická, ale i přínosná (Wang et al. 2019).



Obrázek 2 Jednotlivé produkty vznikající pyrolýzou z biomasy (Hamidzadeh et al. 2023).

3.1.2 Vlastnosti

Biochar je považován za takzvaný půdní kondicionér šetrný k životnímu prostředí. Četné články naznačují, že jeho aplikace může vyvolat změny ve většině půdních vlastností a zlepšit tak úrodnost půdy. Závisí však na množství aplikovaného biocharu a textuře půdy. Například ve výzkumu Wu 2022 přidání biocharu snížilo objemovou hustotu o 3-31 % v 19 z 22 půd. Důležité jsou ale i suroviny pro jeho výrobu, různé typy mají různé účinky na vlastnosti půdy (Wu et al. 2022).

Biochar má několik jedinečných vlastností, které z něj činí účinný, nákladově efektivní a ekologický materiál pro odstraňování různých nečistot. Proměnlivost fyzikálně-chemických vlastností poskytuje maximalizaci jeho účinnosti pro určité aplikace. V posledních letech existuje značný zájem o biochar pro různé aplikace v životním prostředí. Například odstraňování znečišťujících látek a meliorace půdy. Díky svým charakteristickým vlastnostem (Huang et al. 2023).

Akumulace organického uhlíku v půdě je zásadní pro zlepšení půdních vlastností, přidáním doplňku obohacených o uhlík, jako je biouhel, zlepšuje vlastnosti půdy. Biochar obsahuje průměrně 60–80 % uhlíku. Je tedy přínosný pro půdy s nízkým obsahem organického uhlíku (Blanco 2017).

Biochar má všeobecně neutrální až zásadité pH, byl však popsán též i kyselý. Závisí na různých faktorech včetně termochemického procesu výroby a typu použité suroviny. Alkalické pH biocharu způsobuje vápnění na kyselých půdách, a tím pravděpodobně zvyšuje produktivitu rostlin (Ahmad et al. 2014).

Příkladem je biochar z papírenského průmyslu, pyrolyzován při teplotě 550 °C s hodnotou vápnění okolo 30 %. Při jeho použití byla zpozorována také větší mikrobiální aktivita a populace v půdách (Ahmad et al. 2014).

Biochar významně snižuje objemovou hmotnost substrátu a snižuje pórovitost půdy. Aplikace biocharu z čistírenského kalu a biocharu z rostlinné slámy snižuje objemovou hmotnost půdy a zvyšuje pórovitost. Zlepšuje dostupnost půdního fosforu a ovlivňuje frakcionaci půdních rizikových prvků (Wu et al. 2022).

Nejen že biochar odstraňuje znečišťující látky z půdy, ale také zlepšuje fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půd (Oliveira et al. 2017).

Biochar je unikátní obnovitelný zdroj, který má významný potenciál řešit mnoho ekologických problémů, se kterými se v posledních letech setkáváme. Aplikace biocharu by mohla zlepšit kvalitu půdy, vody a ovzduší. Vzhledem k tomu, že se kvalita a výkon biocharu značně liší v závislosti na typech použitých surovin a podmínkách pyrolýzy je nutné, aby vývoj biouhlu v budoucnu pokračoval (Oliveira et al. 2017).

Ve výzkumu Wei, 2023 byla zkoumána aplikace biocharu jako možnost pro ochranu půdy a vody. Jeho vliv na erozi půdy je však nedostatečně objasněn.

Gholami et al. (2019) tvrdili, že biochar zvyšuje dobu odtoku a snižuje erozi půdy. Naopak Li et al. (2019) uvedli, že jeho aplikace podporuje ztrátu půdy při vyšších aplikačních dávkách

5 % až 7 %, ale je omezena při nižších aplikačních dávkách 1 % až 3 % (Wei et al. 2023).

Primárně se však biochar zaměřuje na úpravu půdy, díky své schopnosti ukládat uhlík, zvyšovat kapacitu výměny kationtů, kapacitu zadržování vody a populace mikroorganismů, snižování vyplavování živin a mírnou kyselost půdy. Potenciál biocharu jako levného sorbentu pro sanaci životního prostředí. Jeho přítomnost funkčních skupin obsahujících kyslík a porézní struktura podporuje zadržování různých druhů kontaminantů, včetně toxických kovů a organických sloučenin. Několik studií analyzovalo potenciální využití k nápravě půdy a kontaminované vody pesticidy (Lima et al. 2022).

Překážky pro zavádění technologie biocharu způsobuje nedostatek komerčního biocharu dostupného pro zemědělce, a především legislativní překážky, které brání jeho aplikaci na půdu. Další důvod pro jeho nezahrnutí do zemědělské politiky způsobuje velká nejistota ohledně dlouhodobého chování biocharu. Jeho negativní dopady na kvalitu půdy a skutečnost, že jej nelze po přidání z půdy reálně odstranit. Biochar dokáže například stimulovat ztrátu přirozené půdní organické hmoty, zavádět do půdy xenobiotika nebo bránit působení některých druhů herbicidů. Z nichž by byly všechny tyto vlastnosti vnímány jako negativní. Dále může jeho produkce škodit lidskému zdraví, může vyvolat kácení lesních oblastí za účelem produkce zuhelnatělého uhlí. Naopak ale byly prokázány i velice pozitivní vlastnosti. Přidáním biocharu bylo zjištěno pozitivní snížení emisí N_2O v půdě, potlačování chorob rostlin, zlepšení růstu rostlin, snížení ztráty vyplavování živin, zlepšení kyselosti půdy a stimulování půdní mikrobiální aktivity. Stále však existuje málo dlouhodobých zkoušek, delších než 12 měsíců, pro to, aby bylo možné doporučení pro zemědělce o jeho používání dlouhodobě (Jones et al. 2012).

Nejvíce pokusů s aplikací biocharu bylo provedeno v laboratořích během krátkých časových období, což je stěžejní pro převod výsledků do polních podmínek (Jones et al. 2012).

Charakteristika biocharu je ovlivněna technologiemi výroby, což znamená dobou a teplotou pyrolýzy. Aplikací může být snížena objemová hustota v půdách s hrubou strukturou více než v půdách s jemnou texturou. Ale i snížená objemová hmotnost, největší pokles byl ve studii Blanco et al. 2017 zjištěn u písčitých půd.

Změna hustoty částic a objemové hmotnosti po přidání biocharu přímo ovlivňují pórovitost půdy. Hustota biouhelných částic biouhelných materiálů se pohybuje od 1,5 do 2 $g.cm^{-3}$, zatímco hustota částic půdy by se mohla pohybovat od 2,4 v 2,8 $g.cm^{-3}$, v závislosti na třídě textury. Zadržování vody v půdě se zdá být konzistentnější než účinky na jiné hydraulické vlastnosti půdy. Přehled studií dokazuje, že biouhel zvýšil zadržování vody v 17 z 19 půd. Což nasvědčuje schopnosti zadržování vody v půdě až v 90 % případů (Blanco et al. 2017).

Zvýšením vody dostupné pro rostliny s biouhlem potvrzuje, že s aplikací na zemědělskou půdu dochází ke snížení frekvence zavlažování. To může být velice důležité v oblastech omezených vodou. Pozitivní vliv na zvýšení retence vody byl pozorován s písčitých půdách než v jílovitých půdách. Jelikož se půdy s hrubou texturou vyznačují nižší mikroporézností a menším specifickým povrchem nežli jílovité půdy. Kromě toho mohou částice biouhlu poskytovat organická pojiva písčitém půdám, což zlepšuje agregaci půdy. Nejen že se zvyšuje celková pórovitost, ale také se mění distribuce velikosti půdních pórů. Velikost pórů má větší vliv na tok vzduchu, vody a tepla. Množství použitého biocharu ke zlepšení vlastností půdy může záviset na typu půdy i na klimatu. Jedním z faktorů, který ovlivňuje vliv na fyzikální vlastnosti půdy, je množství aplikovaného biouhlu. Se zvyšováním množství dochází k větším změnám ve vlastnostech půdy. Spojení biouhlu a anorganického hnojiva nebo jiných organických zbytků, by mohlo zvýšit pozitivní účinky na vlastnosti půd více než samotný biochar (Blanco et al. 2017).

Kromě odstranění rizikových prvků a organických polutantů může biochar neutralizovat také kyselou půdu, zvýšit kapacitu výměny kationtů a úrodnost půdy. Moon et al. (2017) uvádí, že ke zlepšení kyselosti půdy byl použit biochar ze sójových bobů a z dubu se po jednom měsíci zvýšilo pH. Zároveň se zvýšila kapacita výměny kationtů a zvýšil se růst kukuřice.

Zlepšení úrodnosti půdy přidáním biocharu je způsobeno zvýšenou kapacitou zadržování vody v půdě, zvýšením stability půdních agregátů, zmírněním zhutnění půdy, snížením objemové hmotnosti půdy a zároveň zvýšením pórovitosti. Mnoho pokusů poukázalo na to, že biochar dokáže odstraňovat znečišťující látky včetně anorganických a organických znečišťujících látek z odpadních vod prostřednictvím adsorpce. Například antibiotika se stávají všude přítomnými organickými polutanty v životním prostředí. Bylo dokázáno, že právě biochar z kalu je efektivní jak z hlediska nákladů, ale i opakovatelně použitelný adsorbent pro odstranění těchto léčiv (Wang et al. 2019).

Vyššího obsahu popela obvykle dosahuje biochar získán z čistírenských kalů, díky existenci vysokému množství minerálních látek ve svých frakcích (Samadoney et al. 2022).

Bylo zjištěno, že složení kyslíku, uhlíku, dusíku a vodíku závisí na teplotě. Biochar získaný z kalu při adsorpci odhalil neuvěřitelné výsledky, jedná-li se o znečišťující látky jako těžké kovy, barviva či chemikálie z různých průmyslových činností. Důvod tohoto výsledku je dán vysokým obsahem popela, v rozmezí od 54 % až do 82 % (Samadoney et al. 2022).

Aplikací biocharu může dojít ke změně pórovitosti půd, což v konečném důsledku ovlivňuje schopnost půdy v zadržování vody. Několik studií potvrzuje zvýšený obsah půdní vlhkosti. Závisí však na typu půdy (Tang et al. 2023).

Dlouhodobý nedávný experiment odhaduje průměrnou dobu zadržení uhlíku z biocharu od 90 do 1600 let v závislosti na složkách. Dále některé studie potvrdily, že může snížit metan, oxid dusný a emise z půdy (Ahmad et al. 2014).

Hlavním mechanismem biocharu je adsorpce, vede k odstranění těžkých kovů a organických znečišťujících látek. Adsorpční kapacita souvisí hlavně s fyzikálně-chemickými vlastnostmi. Jimiž jsou distribuce velikosti pórů, funkční skupiny, plocha povrchu, kapacita výměny kationtů. Je potvrzeno, že produkované při vysoké teplotě obsahuje vyšší množství uhlíku a má vyšší povrch, z důvodu zvětšení objemu mikropórů způsobeném odstraněním těkavých organických sloučenin při vysoké teplotě (Chen et al. 2018).

Pomáhá ke snižování vyplavování dusíku do podzemních vod a současně snižuje spotřebu hnojiv, která jsou zdrojem nadbytečného dusíku. Půdy s obsahem biocharu mohou též poskytovat zemědělcům větší možnosti pro výběr plodin (Glaser et al. 2015).

Po aplikaci do půdy byla obecně dokázána jeho prospěšnost pro pěstování plodin. Obsahuje stabilní uhlík a po jeho aplikování do půdy zůstává uvolňován mnohem delší dobu, nežli by tomu bylo ve formě uhlíkové organické. Může být tedy používán jak produkt samotný či jako složka ve směsném produktu s řadou aplikací jako prostředek pro zlepšenou účinnost využívání zdrojů, zlepšení půdy nebo ochranu proti určitému znečištění životního prostředí a cestu pro zmírnění skleníkových plynů (Agegnehu et al. 2017).

Bylo zjištěno, že přidáním 1 mg. ha⁻¹ biocharu do 200 kg minerálního hnojiva, se zvýšila účinnost kukuřice o 20 %. Kombinací hnojiva a biocharu byla zvýšen příjem draslíku, hořčíku, zinku v kukuřici a současně snížen příjem niklu, mědi, sodíku a kadmia (Hamidzadeh et al. 2023).

Další možností využití biocharu, který je vyroben z čistírenských kalů může být pro výstavbu nových bariér k ochraně vyplavování pesticidů. Podél okrajů vodního toku, nádrže nebo pole by mohlo být ohraničení 30-50 cm hlubokou bariérou, vytvořenou právě z biocharu pro odfiltrování pesticidů (Madžarić et al. 2018).

Tři hlavní produkty vzniknou při výrobě biomasy, jsou jimi biochar, syngas a bioolej. Jedná se o obnovitelný zdroj energie, o kterých v budoucnu možná ještě uslyšíme, jelikož mohou zastupovat fosilní paliva. Tím by mohlo dojít ke snížení spotřeby fosilních paliv, snížilo by se tak množství uvolňovaného uhlíku do ovzduší. Zásadní cíl výroby biocharu spočívá ke snížení emisí, které by byly značně větší, v případě, že by se biomasa rozložila, což by mělo negativní vliv na množství skleníkových plynů (Mulabagal et al. 2015)

Rostlinné usazeniny známé jako biomasa a zemědělské odpady jsou již tradičně farmáři spalovány v pozdější fázi sklizně. Tím je zvýšená produkce různých toxických polutantů a skleníkových plynů, což má přímý dopad pro náš každodenní život (Mulabagal et al. 2015).

Z důvodu velkého růstu emisí CO₂, změnám klimatu nastává čas pro podporu udržitelných zdrojů materiálů a energie. V rámci rozsáhlého použití biomasy a velkého potenciálu se dostává biocharu velké pozornosti. Jeho aplikace přináší cenné výhody a je uznáván moderní vědou a technikou (Hamidzadeh et al. 2023).

V experimentu Hamidzadeh et al. 2023 bylo zjištěno, že aplikace biocharu do hloubky 10 cm může být účinná ke snížení nitrace, emise NO₂. Především ale i v kontrolování transportu doplňků jako je draslík, regulátor kvality vody, a tím umožňovat kvalitnější vývoj rostlin. Kombinací několika forem biocharu může být použit pro sanaci rizikových prvků a zpracování odpadu. Pomocí modifikovaného biocharu lze úspěšně odstranit kontaminanty. Příkladem je enzymatická aktivace biocharu, které se dosáhne v přítomnosti žížal.

3.1.3 Vliv biocharu na půdní vlastnosti

V pokusu Hussain et al. (2021) byla zvýšena celková pórovitost po úpravě půd biocharem. Celková pórovitost byla teoreticky vypočtena z naměřené specifické hmotnosti a hustoty zhuštěné holé a biocharem upravené půdy. Dále byla pozorována vyšší kapacita absorpce vody v důsledku přítomnosti vnitřních pórů. Kapacita absorpce vody je množství vody absorbované v pórech v půdě. Kromě toho přidáním 5 % a 10 % biocharu měla za následek zvýšení optimálního obsahu vlhkosti v písčité půdě.

Nejen že biochar může odstraňovat organické polutanty a rizikové prvky z půdy, může také neutralizovat kyselou půdy, zvýšit kapacitu výměny kationtů a celkovou úrodnost půdy. Přídavek biocharu může zvýšit i úrodnost půdy, biochar získán z papírny měl různé účinky na plodiny (Zwieten et al. 2010).

Přidáním biocharu z papírny došlo ke zvýšení růstu ředkviček, ale nikoliv pšenice ani sóji. Naopak přídavek biocharu pocházejícího zvýšil výnos a růst kukuřice (Doan et al. 2015).

Přídavek biocharu sice vedl ke snížení objemové hmotnosti půdy, ale zvýšil poréznost, což může poskytovat více dostupné vody. Tyto důvody by mohly podpořit růst kořenu a dále zvýšit růst plodin a výnosy. Vyzrálý biochar navíc vykazoval jiné vlastnosti než čerstvý biochar. Vyzrálý biochar vykazoval vyšší mineralizaci, nežli čerstvý biochar (Yadav et al. 2019).

Úprava půdy biocharem změnila fyzikální vlastnosti půd, snížila měrnou hmotnost a sušinu v průměru o 6-15 %. Vnitřní porézní struktura biocharu způsobila změnu vlastností po úpravě. Zadržování vody bylo pozorováno zvýšená průměrně o 30-50 % v písčitéch půdách. Ke změnám retence vody přispěla změněná distribuce velikosti pórů a porozita půd po úpravě biocharem. Dále bylo zjištěno, že nenasycená hydraulická vodivost půd se po úpravě biocharem snížila v průměru o jeden až dva řády. Naopak zvýšená retence vody a snížení nenasycené hydraulické vodivosti v půdách upravených biocharem má za následek vyšší množství dostupné vod pro rostliny a nižší ztrát odpařováním z půd (Hussaian et al. 2021).

Přínos zvýšení pH půdy díky aplikaci biocharu byl významnější v kyselých půdách a organický uhlík v půdě byl výraznější v alkalických půdách. Polní pokusy ukázaly, že aplikace biocharu významně snížila emise CO₂ až o 4,9 % v alkalických půdách. Zatímco největší nárůst emisí CO₂ byl v neutrálních půdách v laboratorních podmínkách. V této studii souhlasí s předchozími zjištěními, že přínos biocharu ve výnosy je výraznější v kyselých půdách, primárně kvůli vápnění biocharu (Huang et al. 2023).

Ve studii Li et al. (2022) přídavek biocharu zlepšil akumulaci uhlíku a dusíku v degradovaných travních porostech. Biochar je látka bohatá na uhlík, proto může zvýšit půdní uhlík, když je aplikován do půdy jako zdroj uhlíku. Biochar má také speciální strukturu a vlastnosti, které zpomalují rozklad organické hmoty v půdě, čímž podporují akumulaci organické hmoty. Dále také snižuje objemovou hustotu půdy, což přispívá k fixaci dusíku v půdě. Snížením objemové hmotnosti půdy dochází ke snížení propustnosti půdní vody, snížení ztráty dusíku. Pórovitost biocharu a silná adsorpční kapacita také zvyšují absorpci fosforu a schopnost zadržovat vodu (Li et al. 2022).

Přidání biocharu do půdy může modifikovat pH půdy, výměnnou kapacitu iontů půdy, obsah půdních živin a půdní agregáty. Nicméně několik studií pozorovalo, že biochar nemá žádný vliv na výměnnou kapacitu iontů. Stárnutí biocharu v půdě by mohlo způsobit posuny v jejích fyzikálních a chemických vlastnostech, včetně pH, obsahu živin. Půdní emise CO₂ pocházející především z mineralizace půdní organické hmoty zůstaly sníženy nebo nezměněny po přidání biocharu. Bylo pozorováno, že nízkoteplotní biochar (300–400 °C) zvyšuje obsah rozpuštěné organické hmoty. Díky tomu, že biochar poskytuje stanoviště půdním mikroorganismům a zlepšuje tím fyzikálně-chemické vlastnosti půdy. Které jsou důležité pro mikrobiální růst, může způsobit změny v biologických vlastnostech půdy (Yang et al. 2022).

3.2 Fyzikální vlastnosti půd

Půda se skládá z pevných půdních částic různých velikostí, tvarů a vlastností. Díky kterým lze určovat texturu půdy. Sjednocením těchto částic vznikne struktura půd a pórový systém, kde protéká voda, půdní roztok. Tím vzniká místo pro mikroorganismy a růst rostlin.

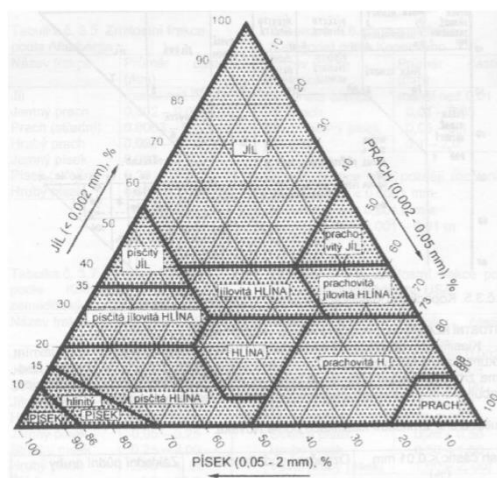
3.2.1 Zrnitost

Textura půdy či zrnitost půdy je soubor velikostí, tvarů a podílů půdních zrn v horizontu (Špička 1964). Jedná se o velice důležitou fyzikální půdní vlastnost, která významně ovlivňuje mnoho procesů v půdě. Příkladem je složení, obsah organických složek půd, velikost povrchové plochy, energie, průběh infiltrace, poměr vody, vzduchu v půdě, poměr nekapilárních a kapilárních pórů (Prax et al. 1997). Zrnitostní složení je dáno podílem částic s různými velikostmi, frakcí v jemnozemi. Částice se podle rozsahů seskupují do jednotlivých skupin což je označováno jako zrnitostní frakce.

Tabulka 2 Klasifikace půdního druhu podle Nováka

% obsah částí < 0,01 mm	označení frakce (zkratka)	označení druhu půdy
< 10%	písčítá (P)	lehká půda
10 – 20 %	hlinitopísčítá (HP)	lehká půda
20 – 30 %	písčitohlinitá (PH)	středně těžká půda
30 – 45 %	hlinitá (H)	středně těžká půda
45 – 60 %	jílovitohlinitá (JH)	těžká půda
60 – 75 %	jílovitá (JV)	těžká půda
> 75 %	jíl (J)	těžká půda

V České republice je používána stupnice klasifikace dle Nováka (tabulka1), kde obsah částic je menších než 0,01 mm a dělíme ji na sedm skupin. Též je využíván i trojúhelníkový diagram zrnitosti půd podle taxonomického klasifikačního systému, který obsahuje dvanáct zrnitostních tříd.



Obrázek 3 Trojúhelníkový diagram zrnitosti (www.nrsc.usda.gov).

3.2.2 Specifická hmotnost půdy

Je vyjádřena hmotností jednotkového objemu pevné fáze půdy bez pórů (ρ_z). Pevné částice vyplňující daný prostor. Lze definovat jako poměrné číslo, které udává kolikrát je určité množství zeminy vysušeno na teplotu 105 °C oproti stejnému množství objemu vody s teplotou 4 °C. Minerální orné půdy mají průměrnou hodnotu v rozmezí 2,5 – 2,7 g. cm⁻³. Specifická hmotnost organické hmoty je nižší přibližně 1,1 – 1,4 g. cm⁻³ Ovlivňujícím faktorem je množství podílu humusu, přičemž větší podíl hodnotu snižuje, naopak zvyšuje obsah těžkých kovů (Prax 1997).

3.2.3 Obejmová hmotnost půdy

Objemová hmotnost půdy vyjadřuje hmotnost jednotky objemu půdy v neporušeném půdním stavu. Odlišuje se rozdílným obsahem půdních pórů. Lehčí, písčité půdy mají vyšší objemovou hmotnost než půdy těžší, hlinité a jílovité. Částice obsahující větší množství organické hmoty mají tendenci agregovat více a tvořit porézní agregáty, především se jedná o částice těžších půd. Naopak částice lehčích půd s menším obsahem jílovitého materiálu a organické hmoty obsahují více písčité a prachové částice, které vyplňují prostor. Následkem toho dochází ke snížení pórovitosti a zvýšení objemové hmotnosti (Šimek Borůvka 2019 a).

Závisí také na uspořádání částic v půdním tělese a zhutnění půdy (Saeedi 2022).

3.2.4 Pórovitost

Půda je tvořena půdními póry, vytváří zásadní složku uspořádání objemu půdy. Pórovitostí nazýváme určité části půdy, kde se nevyskytují pevně částice, ale jsou zde obsaženy půdní voda a vzduch (Bedrna et al. 1988).

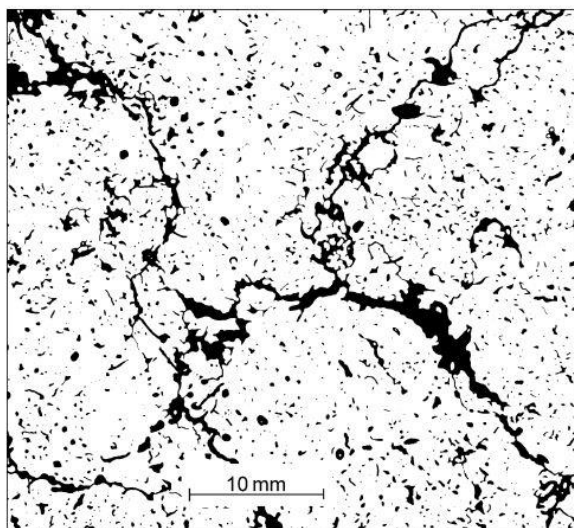
Celkový objem půdy k objemu pórů v půdě je definován jako pórovitost. Póry jsou charakterizovány specifickou velikostí a tvary, neustále se mění. K neustálým změnám dochází z důvodu pohybu vzduchu, vody v půdě a celkovému objemu půdy. Rozdělujeme dva druhy pórů, kapilární a nekapilární (Kutílek et al. 2006).

Nekapilární póry mají velikost větší než 0,2 mm naopak kapilární jinak řečeno vláskovité póry dosahují velikosti menší než 0,2 mm. Dále se můžeme setkat i s biopóry, které vzniknou během průchodu žíhal půdou, díky tlaku kořenů rostlin či působením přímými vlivy flóry a mikrofauny. Mezi agregáty se nejběžněji nachází póry o velikosti 10–200 μ m, v případě dobře agregované půdy na 1 mm. Jsou nazývány makropóry. Menší póry uvnitř agregátů o velikosti 0,2-10 μ m definujeme jako mikropóry (Kutílek et al. 2006).

Organické horizonty dosahují pórovitosti až 80 % a klesá s hloubkou půdního profilu. Minerální horizonty mají minimální hodnoty mezi 35-40 % (Zbíral 2002).

Půdní póry s různými poloměry vykazují rozdílné akumulční vlastnosti, voda v makropórech se při vnějším zatížení lehce rozptýlí, zatímco voda mikropórech je pevně vázána pomocí stěny pórů (Dong et al. 2023).

Základní charakter pórového prostoru v půdě řídí téměř vše, co se vyskytuje v půdě, pohyb vody, vzduchu a jiných tekutin, doprava a reakce chemikálií, kořeny a další biota. Podle definic pórů prostor nezahrnuje kapalinové kapsy, které jsou uzavřené v pevném materiálu (Nimmo 2005).



Obrázek 4 Průřez půdou s půdními póry (Nimmo 2005).

Zhutněním půdy dochází ke změnám objemové hmotnosti a pórovitosti. Snížení pórovitosti půdy bylo potvrzeno u mechanicky zhutněných půd. V polních podmínkách se pórovitost půdy mění přirozeně s časem a místem. Pro in-situ charakterizaci je používán diskový infiltrometr v povrchových půdách (Fu et al. 2019b).

Pórovitost lze definovat jako poměr nepevného objemu k celkovému objemu půdy. Pro produkci plodin je právě pórovitost důležitá pro vedení vody, vzduchu a živin do půdy. Distribuce velikosti pórů poskytuje schopnost půdy ukládat vodu a vzduch v kořenové zóně nezbytné k růstu rostlin (Indoria et al. 2020).

Pórovitost a distribuce velikosti pórů v půdě přímo ovlivňuje hydraulické vlastnosti půd, jako jsou hydraulická vodivost, retenci vody, infiltraci a dostupnou vodní kapacitu. Pórovitost půdy a charakteristické uvolňování vody přímo ovlivňuje řadu půdních indexů, včetně kapacity provzdušňování půdy, dostupné vodní kapacity rostlin, relativní polní kapacity. V případě změny teploty dochází také k rozdílnosti poréznosti půdy, zejména v těžké půdě s vysokým obsahem jílu. Biologická aktivita půdy a růst kořenů závisí na vlastnostech pórovitosti půd. Oteplováním klimatu může dojít k pozmeněnému vývoji kořenů a biologické aktivity (Indoria et al. 2020).

Prostor pórů je nezbytný k průchodu plynů kromě částic a průchodu vody. Celkové množství pórového prostoru ovlivňuje texturu půdy. Menší póry se nachází více u jílovitých půd než písčitých. Póry jsou velice důležité, jelikož nabízejí skvělé podmínky pro mikrobiální vývoj. Biochar může poskytovat díky své struktuře pórů úkryt mnoho mikrobům. Porézní struktura navíc poskytuje ochranu půdním mikroorganismům (Habidzadeh et al 2023).

Aplikováním biocharu do půdy dochází k interakci s půdními částicemi, což ovlivňuje půdní mikrobiální společenstva (Habidzadeh et al 2023).

Tabulka 3 Dělení půdních druhů dle velikosti (upraveno podle Donget al. 2023).

Druh póru	Velikost(μm)	Popis
mikropóry	< 0,15	největší výskyt v jílovitých půdách
mezopóry	0,15-30	přístupná kapilární voda rostlinám
makropóry	> 30	

3.2.5 Půdní struktura

Prostorovým uspořádáním půdních částic organického i anorganického původu, kde dochází kde stabilitě v agregátovém stavu, vznikají půdní póry o různé velikosti se definuje struktura půdy. Je spjata s environmentálním a agronomickým procesem v půdě. Funkce distribuční koordinuje dostupnou vodu, kyslík a prostupnost půdy pro kořeny rostlin. Její procesy dělíme na transportní a hydraulické (Giménez et al. 1997).

Velice důležité je samotné hospodaření s půdou. Struktura půda je výsledkem textury půdy, podíl písku, bahna, jílu, organické hmoty a způsobu hospodaření s půdou v průběhu času. V závislosti na struktuře je zadržováno různé množství vody, z nichž většina patří rostlinám. Většina plodin potřebuje půdy, které jednak rychle odtékají, ale také zadržují dostatek vody pro zajištění vody mezi srážkami nebo zavlažováním (Shapiro et al. 2017).

Určité druhy půd vytvářejí pevnou, velkou hmotu bez struktury označenou jako masivní. Další druh označení je granulární, kde je hmota složena z malých, porézních agregátů, s tendencí jednotného zaobleného tvaru. Tato struktura je žádoucí k růstu plodin, má silný strukturální vliv na schopnost půdy zadržovat vodu během srážek a zavlažování. Struktura půdy představuje klíčový atribut kvality a zdraví půdy, významně ovlivňující infiltrace vod (Basset et al. 2023).

Může být změněna antropogenními nebo přírodními faktory, včetně způsobu hospodaření s půdou. Analýza předešlých experimentů odhalila významné dopady půdní struktury na infiltraci vody. Což bylo dále připisováno využíváním půdy, hospodařením, úpravou půdy, hospodařením s plodinami a samotné zpracování půdy (Basset et al. 2023).

3.2.6 Obsah vody v půdě

Voda v půdě je důležitý faktor, ovlivňující výměnu hmoty a energie mezi povrchem země a atmosférou. Informace o časoprostorových charakteristikách obsahu vody v půdě jsou klíčové k udržitelnému hospodaření s vodou a úspěšné obnově vegetace. Běžné dostupné metody pro přímé měření obsahu vody v půdě zahrnují metodu sušení v peci, technologii neutronových sond a reflektometrii. Obecně se obsah vody v půdě liší mezi jednotlivými vrstvami půdy (Zhu et al. 2023).

V mělkých vrstvách je ovlivněn především klimatickými faktory, jako je průměrná roční teplota a srážky. Mezi neklimatické důvody řadíme využití půdy, obsah jílu, sklon svahu, které působí spíše v hlubokých vrstvách půdy (Zhu et al. 2023).

Metody pro stanovení obsahu vody v půdě se dělí na metodu přímou a nepřímou. Přímá metoda znamená tepelné sušení, především sušení v peci. Vyjadřuje průměrný obsah vody v půdním bloku, odběrem vzorků půdy (Schmugge et al. 1980).

Tato metoda je jednoduchá, avšak není vhodná pro testování v terénu. Pro práci v terénních podmínkách lze použít takzvaně metodu pálení alkoholu, vhodná pouze pro půdy s nízkým podílem organické hmoty (Ma et al. 2016)

Je známo, že přímá metoda narušuje pole a zároveň mění hydromechanické vlastnosti půdního vzorku, jelikož se mění obsah vody v půdě. Z tohoto důvodu výzkumníci vyvinuli metody nepřímé. Mezi tyto metody k nedestruktivnímu měření byly vyvinuty metody neutronový rozptyl a rentgenové počítačové tomografie (Balaghi et al. 2018).

Půdní voda je uložena v půdních pórech. Její stav a množství závisí na velikosti pórů. Ve velkých pórech $> 10 \mu\text{m}$ se voda nemůže zadržovat a odtéká samospádem z půdy, v případě, že nepropustná vrstva nevyvolá zavodnění. V malých pórech $< 0,2 \mu\text{m}$ zůstává voda pevně zadržována půdou, až natolik, že ji rostliny nejsou schopny vytáhnout, avšak může být extrahována kořeny (Leeuwen 2022).

Senzory TDR jsou považovány za přesné přístroje, v případě, že jsou dobře kalibrovány pro půdu, ve které měření probíhá. Měří zdánlivou dielektrickou konstantu půdy. Celkově mají tyto senzory dobrou přesnost měření, proto mají široké využití ve výzkumech. Avšak i přes tuto jejich pozitivní schopnost, představují tyto přístroje vysoké pořizovací náklady. Z toho důvodu je tu alternativa s názvem kapacitní senzory. Ty je možné pořídit za nižší cenu, jsou tvořeny oscilátorem, který kvantifikuje vlny čtvercového tvaru ve vztahu k nabití či vybití jeho kondenzátorů (Nascimento et al. 2022).

Většina těchto senzorů byla v posledních dvaceti letech navržena na základě technologie založené na elektrickém odporu a elektromagnetických principech. Senzory elektromagnetických principů spoléhají na dielektrické vlastnosti půdy k odhadu obsahu vody v půdě, využívají široké spektrum metod. Ty jsou založeny na různých frekvencích.

Hlavní faktory ovlivňující senzory půdní vody jsou technologie senzorů, kalibrace, textura půdy, salinita půda a specifikace instalace (Datta et al. 2023).

3.3 Hydraulické vlastnosti půd

Hydraulické vlastnosti půdy se významně podílejí na hydrologické kvantifikaci, hospodaření se zemědělskými zdroji, geoprostředí, znečišťující dopravě, geotechnice pro stavební a silniční inženýrství a výstavbě vodních zdrojů, projektů zavlažování a odvodňování (Saeedi 2022).

Hydraulické vlastnosti půdy hrají důležitou roli pro určování kvality půdy, prostředí a schopnosti půdy sloužit ekosystému (Saravanan et al. 2019).

Řídí rychlost proudění vody, zadržování vody, osud živin, chemikálií znečišťujících látek v půdě a určují dostupnost rostlin pro příjem vody, růst plodin a kvalitu životního prostředí. Jsou prospěšné pro předpovídání vztahu voda a rostlina, k zavlažování, odvodňování, pohybu a skladování vody (Saravanan et al. 2019).

Hydraulické vlastnosti půdy jako je hydraulická vodivost, zadržování vody a dostupná vodní kapacita jsou do určité míry ovlivněny rozdílnými vlastnostmi půdy. Jimiž jsou textura, struktura, objemová hmotnost, pórovitost, organická hmota. Dalšími faktory hospodaření s půdou, které mají také významný vliv na hydraulické vlastnosti jsou obdělávání půdy, typ vegetace a agronomické postupy. Avšak jedno z nejdůležitějších faktorů ovlivňující tvorbu půdy je klima. To do značné míry mění půdotvorné procesy, čímž dochází ke změně fyzikálních, chemických a biologických vlastností půdy (Saeedi 2022).

Srážky a teplota hrají důležitou roli pro určování charakteru hydraulických vlastností určité půdy. Hydraulické vlastnosti půdy souvisí se strukturou půdního porézního systému, kde se nachází půdní póry různé velikosti. To se poté odráží i na struktuře, půdní biotě, slanosti, utěsněná a teplotě půdy. Optimální hydraulické vlastnosti půdy jsou potřebné pro rostlinnou produkci a minimalizaci znečištění životního prostředí. Množství změn těchto vlastností a vztahujících se faktorů je závislé na schopnosti půdy odolávat oteplování klimatu. Změny teplot ovlivňují vlastnosti vody, hustotu, což dále působí na hydraulické vlastnosti (Indoria et al. 2020).

3.3.1 Hydraulická vodivost

Hydraulickou vodivost lze definovat jako schopnost tekutiny procházet skrz póry a rozbitými horninami. Vodivost závisí na typu půd, které se v dané oblasti nacházejí (Saravanan 2019).

Definuje, jak snadno pórová tekutina uniká ze zhuštěného prostoru pórů. Zvyšující se hydraulická vodivost sedimentu zvyšuje množství tekutiny z pórů, které unikne za jednotku času (Aird 2019).

Seelheim 1880 popsal hydraulickou vodivost jako vztah k druhé mocnině charakteristického průměru pórů. Nasycená hydraulická vodivost je rozhodující pro výpočty enviromentální geologie, hydrogeologického toků.

Ahuja et al. 1993 vyvinuli polní metodu k určení hydraulické vodivosti půdy a toho, jak se mění v prostoru a v čase. Kozeny-Carmanova rovnice ukázala, jak je nasycená hydraulická vodivost spojená s efektivní porézností půdy. Obecně se měří v laboratořích pomocí metod konstantní a klesající permeability.

Andrea a Boadu 2001 použili model založen na regresi k odhadu nasycené hydraulické vodivosti různých typů půd. Tento model obsahoval parametry, které reprezentovaly distribuci velikosti zrn. Na základě těchto parametrů zeminy byly charakterizovány texturní a hydraulické vlastnosti a kombinace těchto vlastností byla použita. Zjistili že rovnice Kozeny-Carmanova docela přesně předpovídá nasycenou hydraulickou vodivost pro většinu půd, včetně jílu.

3.3.1.1 Nasycená hydraulická vodivost

Nasyčenou hydraulickou vodivost je možné stanovit v laboratoři díky přístrojům s proměnným a konstantním spádem.

K výpočtu nasycené hydraulické vodivosti je používána rovnice Darcyho zákona:

$$\frac{V}{A_2 t} = v = K_S \frac{h}{L_S} \quad \text{potom } K_S = \frac{L_S V}{h A_2 t}$$

Ve které V je objem proteklé vody, A_2 je průřezová plocha, t je čas, h je tlaková výška, K_S je nasycená hydraulická vodivost L_S je vzdálenost mezi dvěma body.

Nasycená hydraulická vodivost půdy je z velké části funkcí velikosti pórů, půdy s hrubou strukturou mají větší póry a vyšší nasycenou vodivost než půdy s jemnou texturou (Indoria et al. 2020).

Nasycená hydraulická vodivost ovlivňuje proudění podzemní vody a transport znečišťujících látek. V přírodních podmínkách se vyznačuje rozsáhlou prostorovou heterogenitou (Flammini et al. 2023)

3.3.1.2 Nenasycená hydraulická vodivost

Podtlakový diskový permeametr je používán pro měření nenasycené hydraulické vodivosti v terénních podmínkách. Je složen z prohlubávající věže, zásobníku vody, membrány, která propouští vodu. Podtlak vody je nastavený trubicemi ve věži a membrána je dána těsně na půdu. Výsledky vodivosti jsou určeny nastavením tlakové výšky a hodnotou hydraulické vodivosti (Kodešová 2019). Měření nenasycené hydraulické vodivosti pomocí Minidisk infiltrometru během experimentu viz Obrázek 5.



Obrázek 5 Minidisk infiltrometr METER Group během experimentu.

Velkou výhodou tohoto měření je schopnost nastavit tlak. Což způsobuje omezení proudění v pórech (Dohnal et al. 2010).

Pro tento pokus byl využíván Minidisk infiltrometr od firmy METER Group. Obsahuje porézní kovový disk, který snadno přilne k povrchu půdy. Jeho výška je 32,7 cm, objem nádrčky činí 135 ml, tloušťka porézní destičky je 3 mm a nastavení podtlaku je 0,5 – 7 cm vodního sloupce.

Minidisk infiltrometr je složen z probublávací věže, zásobníku vody, polopropustné membrány viz Obrázek 6. Zásobník vody byl naplněn vodou, pomocí věže nastaven tlak. Ten bývá nastaven podle druhu půdního typu. V případě pokusu byl tlak nastaven na -2 cm. Porézní kovový disk na spodní části se umístí na půdu, poté začne pomocí membrány voda vytékat do válce naplněného půdou, rychlostí, která je určena hydraulickými vlastnostmi půdy. Množství vody vtékající do půdy bylo zaznamenáváno každých 15 vteřin.



Obrázek 6 Popis Minidisk infiltrometru (upraveno podle METER group 2018).

3.3.2 Vodoodpudivost

Půdní vodoodpudivost se vyskytuje celosvětově a je příčinou mnoha důležitých jevů, jako je špatná infiltrace vody, heterogenní vzorce vlhkosti půdy, zvýšený průtok, snížená účinnost závlahové vody a špatný růst rostlin (Bachmann et al.2022). Neboli hydrofobicita je běžný enviromentální jev (Turski et al. 2022).

Vodoodpudivé půdy vykazují v suchém stavu hydrofobní vlastnosti, odolávají nebo zpomalují infiltraci vody. Rychlost infiltrace může být řádově snížena i v půdách, které se zdají být vizuálně v normálně vlhké (Wallis et al. 1992).

Vodoodpudivost půdy se může vyskytovat v jakémkoliv půdním typu, avšak běžně je pozorována v písčitých půdách především kvůli malému povrchu částic písku. Nastává také pokud jsou částice půdy potaženy hydrofobními organickými látkami, například houbami, humínovými kyselinami, rostlinným odpadem. Dále se může objevit i při suchu a velkém množství organické hmoty (Yost et al 2019)

Další definicí je snížení rychlosti zadržování vody v půdě způsobené přítomností hydrofobních povlaků na částicích půdy. Během produkce plodin či údržbě trávníku je odpuzování vody stresující pro rostliny. To má za následek zhoršenou kvalitu výnosů. Větší vysychání půd snižuje jejich schopnost zadržování vody. Což ovlivňuje pohyb organických látek do půdy, pokud je dosaženo kritického obsahu vodu, může se vytvořit vodoodpudivá bariéra. Omezující rychlost a kapacitu absorpce vody. Dokonce v nějakých suchých oblastech došlo k takovému zhoršení, že pokračování v zemědělské výrobě není již možné bez nákladných meliorací (Hallett et al. 2001).

Pro hodnocení vodoodpudivosti existuje několik variant. Jednou z nich je rozdělení do celkem 5 tříd vodoodpudivosti založených na době potřebné k pronikání vody půdou viz Tabulka 4.

Tabulka 4 Hodnocení vodoodpudivosti na základě doby (Yost et al. 2019).

Název třídy	Čas (s)
Smáčivé	< 5 s
Mírně odpuzující	5-60 s
Silně odpuzující	60-600 s
Silně repelentní	600-3600 s
Extrémně repelentní	>3600 s

Sloučeniny pocházejí z rozkladu půdní organické hmoty listů, kořenů, řas, lišejníků. Mezi hlavní abiotické faktory ovlivňující vodoodpudivost řadíme texturu půdy, jílové frakce, agregace, úroveň zhutnění a pH. Hydrofobní sloučeniny snižují povrchovou volnou energii půdy a činí půdu odolnou vůči zamokření. Je to přechodná vlastnost v závislosti na stavu půdní vody. Ve studiích se ukázalo, že se vodoodpudivost povrchové půdy často zvyšuje s poklesem obsahu vody v půdě a pod určitou hodnotu se půda stává hydrofobní. Vymezení nerepelentní a hydrofobní podmínky jsou známy jako kritický obsah nebo práh půdní vody (Yost et al 2019).

Jako funkce obsahu vody v půdě se vyznačuje křivka půdní vodoodpudivosti. Ačkoliv se vodoodpudivost vyskytuje často v místech, kde je nízký obsah vody v půdě, není omezena pouze na suché klima. Jelikož ve vlhčím klimatu může existovat během léta nebo krátkých suchých období. Kritický obsah vody v půdě a tvar křivky půdní vodoodpudivosti se může lišit v závislosti podle obsahu organické hmoty v půdě. Je dokázáno, že povrchová voda odpuzující vodu omezuje rychlost infiltrace. Mezi nepřímé účinky povrchové odpuzivosti lze zmínit snížení klíčivosti, ale také růst a usazování rostlin v důsledku omezeného pohybu vody směrem k semenům a kořenům (Turski et al. 2022).

4 Metodika

Pro praktickou část diplomové práce byla vybrána tři místa pro odběr vzorků s rozdílnými půdními typy. Jeden vzorek byl odebrán z kraje Vysočina, konkrétně z obce Humpolec a půdním typem kambizem. Druhý a třetí půdní vzorek pocházel ze Středočeského kraje z obce Milčice, kde půdní typ je černice a Semice s půdním typem regozem. Tyto vzorky byly odebrány v březnu roku 2020, v hloubce 0–20 cm, z orničního horizontu Ap, vytvořeným orbou a běžnou kultivací.

4.1 Popis místa odběru vzorků

Odběr vzorků byl proveden na třech odlišných místech České republiky. Byly odebrány dva půdní vzorky ve Středočeském kraji, konkrétně okres Nymburk v obci Milčice a Semice. Třetí půdní vzorek byl odebrán z kraje Vysočina, z obce Humpolec. Na základě Českého klasifikačního systému půd byly určeny půdní typy (Němeček et al. 2011). U prvního vzorku byl stanoven půdní typ černice, druhý odebraný vzorek byl určen jako regozem. Poslední, třetí vzorek byl odebrán z kraje Vysočina, z obce Humpolec s půdním typem kambizem.

Tyto vzorky byly dopraveny do laboratoře Katedry pedologie a ochrany půd na České zemědělské univerzitě v Praze. Jednalo se o neporušené i porušené půdní vzorky. Následně byly porušené půdní vzorky sušeny na vzduchu, drceny a na závěr přesátý na 2 mm sítu. Analýza těchto vzorků obsahovala chemické a fyzikální vlastnosti, při konstatní laboratorní teplotě 20 °C, a to standardizovanými metodami. V následující Tabulce 5 jsou uvedeny průměrné úhrny srážek, nadmořské výšky a průměrné teploty.

Tabulka 5 Průměrné nadmořské výšky, úhrny srážek a průměrné teploty odběrových míst (zdroj ČHMÚ).

Odběrové místo	Nadmořská výška	Úhrn srážek	Průměrná teplota
Milčice	190 m.n.m.	500–600 mm	8 °C
Semice	179 m.n.m.	780 mm	6,8 °C
Humpolec	561 m.n.m.	601–800 mm	7,1-9 °C

Pomocí Taxonomického klasifikačního systému půd České republiky byly určeny půdní typy na těchto lokalitách.

Odběrová lokalita Milčice se dle Taxonomického klasifikačního systému klasifikovala jako půdní typ černice. Černozem a černice spadají do referenční skupiny Černosoly. Tato skupina půd se nachází v oblastech suššího klimatu. Jsou vyvinuty ze sypkých karbonátových substrátů jinak řečeno spraše. Jedná se o velmi úrodné, kvalitní půdy, optimálních fyzikálních vlastností i chemického složení. Z tohoto důvodu vhodné pro zemědělské využití. Černosoly jsou specifické vysokou schopností bioakumulace, procesu dlouhodobě ukládajícího organickou hmotu do půdy.

Je zde zastoupeno velké množství makroedafonu, vytvářejícího speciální novotvary nazývané krotoviny. Což jsou nory naplněné materiálem, pocházejícího z odlišného půdního horizontu, než se nachází.

Na lokalitě v Semicích byl podle Taxonomického klasifikačního systému určen půdní typ regozem spadající do referenční třídy Regosoly. Ty vznikají syrkými sedimenty. Jedná se o neuzpevněné sedimenty jako písek, spraš, štěrkopísek. Vyznačují se jako půdy chudší na minerály (Němeček et al. 2011, Pavlů 2021).

Kambizem, půdní typ, který byl klasifikován v Humpolci, patří do referenční skupiny Kambisolů. Tato skupina je nejvíce rozšířena v České republice, přibližně asi na 45 % rozlohy. Základní znak kambizemě je přítomný kambický horizont B, který vzniká vnitropůdním zvětráním. Řadíme sem pískovec, žulu, bazalt a břidlici, jsou velice variabilní chemickým složením.

4.2 Analýza půdních vzorků

Z těchto lokalit byly vzorky odebrané a následně převezeny do laboratoře Katedry pedologie a ochrany půd (KPOP) na České zemědělské univerzitě v Praze. V laboratoři proběhlo sušení na vzduchu, rozdrčení a přesátí přes síto na 2 mm. V analýze těchto půdních vzorků byly určeny základní fyzikální a chemické vlastnosti při teplotě 20 °C. Zbytek půdních vzorků byl použit pro měření vlivu biocharu na hydraulickou nasycenou vodivost a vodoodpudivost.

4.2.1 Základní půdní vlastnosti

4.2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti

Byla určena specifická hmotnost půdy, označována jako ρ_z a měřena pyknometrem. Zrnitost byla stanovena podle Novákova, pórovitost a objemová hmotnost byly vymezeny podle metodiky Dane & Topp 2002.

Specifická hmotnost půdy

Specifická (měrná) hmotnost půdy, značena jako p_z vyjadřuje hmotnost objemové jednotky vysušené pevné fáze půdy. Měření bylo provedeno pomocí pyknometru, který byl naplněn k okraji destilovanou vodou, otevřen temperován při 20 °C, uzavřen a následně zvážen PH_2O . Následně byl půdní vzorek s hmotností 10 g vařen v misce, aby došlo k rozbití menších agregátů na jednotlivé částice. Jakmile půdní vzorek vychladl, byl přemístěn do pyknometru, který byl doplněn destilovanou vodou. Otevřený byl temperován na 20 °C. Následně byl uzavřen, zvážen (PZ).

Pomocí následující rovnice byla poté spočítána specifická hmotnost půdy:

$$\rho_z = \frac{N_z \cdot \rho_v}{(N_z + P_{H_2O} - P_z)} \quad [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

Ve které N_z vyjadřuje navážku půdy (g), ρ_v značí hustotu vody ($1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), P_{H_2O} váhu pyknometru s destilovanou vodou (g), P_z je váha pyknometru se suspenzí půdy (g). Nejčastěji se hodnoty specifické hmotnosti půdy pohybují v rozmezí od 2,2 do $2,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Flint & Flint 2002).

Objemová hmotnost půdy

Objemová hmotnost půdy značena ρ_d vyjadřuje hmotnost objemové jednotky vysušené půdy v neporušeném stavu. Měření bylo provedeno pomocí Kopeckého válečku, který byl odebrán z terénu, následně vysušen a zvážen. Dle následující rovnice byl proveden výpočet:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

Ve které m_s značí hmotnost vysušeného vzorku (g) a V objem (cm^3). Nejčastěji se hodnoty objemové hmotnosti půdy pohybují v rozmezí od 1,2 do $1,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Pórovitost

Pórovitost značena písmenem P vyjadřuje celkový podíl pórů v půdním vzorku. Díky určení pórovitosti lze dále vyhodnotit ulehlost půdy. Dle následující rovnice probíhá výpočet pórovitosti:

$$P = \frac{(\rho_z - \rho_d)}{\rho_z} \times 100 \quad [\%]$$

Ve které ρ_z značí specifickou hmotnost půdy ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a ρ_d značí objemovou hmotnost půdy ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Nejčastěji se hodnoty pórovitosti pohybují v rozmezí od 40 od 50 % (Zbiral 2002).

Zrnitostní složení

Pomocí hustoměrné metody bylo provedeno měření zrnitosti. Půdní agregáty byly nejdříve rozrušeny a následně byl vyloučen půdní vzduch za pomoci dispergačního činidla, které představoval hexemetafosfát Na. To bylo použito v poměru 10 ml na 10 g navážky vzorku půdy, následně vaření. Jakmile suspenze vychladla, byla převedena do válce, jenž byl doplněn k rysce 1000 ml. Do rozmíchané suspenze byl vložen hustoměr. Po určitých jednotlivých intervalech byly zaznamenávány hodnoty hustoměru R spolu s teplotou.

Pro první čtyři časové intervaly zůstal hustoměr v suspenzi, na ostatní měření byl vyndán ze suspenze. Získané hodnoty tvořily základ pro vyobrazení křivky zrnitosti a následně stanovení obsahu frakcí. Zrnitost půdy byla určena dle Nováka (Tabulka; Zbíral 2002)

Tabulka 6 Klasifikace půdního druhu dle Nováka (Zbíral 2002)

Obsah částí < 0,01mm	Označení frakce	Označení druhu půdy
< 10%	Písčítá (P)	Lehká půda
10-20 %	Hlinitopísčítá (HP)	Lehká půda
20-30 %	Písčitohlinitá (PH)	Středně těžká půda
30-45 %	Hlinitá (H)	Středně těžká půda
45-60 %	Jílovitohlinitá (JH)	Těžká půda
60-75 %	Jílovitá (JV)	Těžká půda
> 75%	Jíl (J)	Těžká půda

4.2.1.2 Základní chemické vlastnosti

Aktivní a výměnná půdní reakce byla stanovena podle standardizované normy ISO 10390 (1994). Obsah organického uhlíku byl určen standardizovanou laboratorní metodou (Skjemstad and Baldock, 2008), během které je uhlík obsažen v organické hmotě takzvaně zoxidován kyslíkem dvojchromanu draselného, a to v prostředí sírové kyseliny. Elektrická vodivost alkoholovým extraktem. A na závěr podle metodiky navrhnuté Pospíšilem (1981) byla hodnocena kvalita humusu. Všechny tyto metody byly stanoveny standardizovanými metodami v laboratoři.

Salinita

Ve vodném extraktu bylo zjištěno kvantitativní stanovení salinity neboli specifické vodivosti. Pro každý půdní vzorek bylo zváženo 10 g půdy, následně pomocí 50 ml destilované vody třepán v PVC lahvi. Na závěr ve filtrátu změřena konduktometrem salinita (Rhoades 1996).

Tabulka 7 Stanovení míry zasolení půdy (Zbíral 2002).

Salinita	půdy
do 30	minimálně zasoleny
30 - 60	bez negativních účinků solí
60 - 120	zvýšené zatížení solí
nad 120	vysoké zatížení solí

Obsah organického uhlíku

Obsah organického uhlíku (C_{ox}) byl zjištěn pomocí modifikované Tjurinovy metody. Kyslíkem dychromanem draselným v kyselino-sírovém prostředí byl uhlík organické hmoty zoxidován. Následně titrací Mohrovy soli bylo určeno určité množství nespotřebovaného oxidantu. Pracováno bylo s 0,2 g zeminy a následným zalitím 10 ml chromsírové směsi. Tato přikrytá směs hodinovým víčkem byla vložena do sušárny s teplotou 125 °C po dobu 45 minut. Na závěr byla vložena Pt elektroda. Mohrovou solí byl vzorek titrován do doby, než došlo k vychýlení se ručičky na galvanometru (Skjemstad & Baldock 2008).

Tabulka 8 Stanovení obsahu obsahu podle obsahu C_{ox} (Zbíral 2002).

C_{ox} (%)	Humus (%)	označení obsahu
<0,6	<1	velmi nízký
0,6-1,1	1,0-2,0	nízký
1,1-1,7	2,0-3,0	střední
1,7-2,9	3,0-5,0	vysoký
>2,9	>5,0	velmi vysoký

Stanovení kvality humusu

Barevný kvocient $Q_{4/6}$ byl měřen spektrofotometricky pro stanovení kvality humusu. Do lahvičky o objemu 200 ml bylo vloženo 5 g vzorku půdy jemnozeme, poté zalito 100 ml extrakčním roztokem pyrofosforečnanem sodným. Půdní alkalický pyrofosfátový výluh byl zbarven fulvokyselinami a humínovými kyselinami. Po uplynutí 60 minut extrakce byl vzorek z třepačky přemístěn do centrifugy a umístěn do spektrofotometru. Při vlnových délkách 31, 400 a 600 nm byly získány hodnoty absorpance.

Jestliže dosahuje při 465 nm absorpance vyššího čísla, nežli je 1,3 následuje ředění roztoku extrakčním činidlem.

Dle následujícího vzorce byl spočítán barevný kvocient:

$$Q_{4/6} = \frac{A_{400}}{A_{600}}$$

Ve kterém A_{400} představuje absorpance extrakčního činidla během 400 nm a A_{600} vyjadřuje absorpance extrakčního činidla během 600nm. Kvalita humusu je horší, v případě vyšší hodnotě barevného kvocientu (Zbíral 2002).

4.3 Míchání vzorků

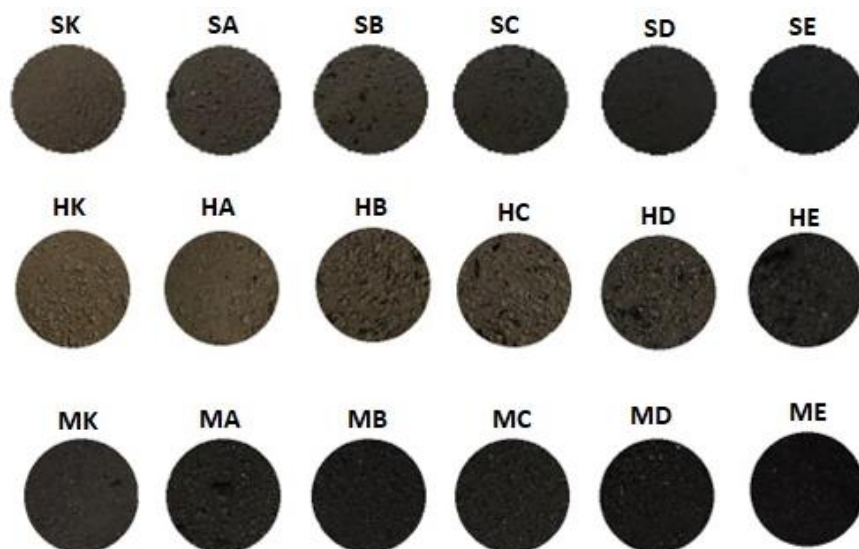
Hlavní cíl této práce byl zjistit vliv biocharu na nenasyčenou hydraulickou vodivost a vodoodpudivost. Každý půdní vzorek byl rozdělen na dalších 6 vzorků, celkem se tedy jednalo o 18 variant, kde 3 varianty byly takzvaně kontrolní, pouze čistý vzorek bez přidání biocharu.

Poté bylo do každé varianty přidáno určité množství biocharu. Množství přidaného biocharu v jednotlivých variantách odpovídalo 0,5, 1, 2,5, 5 a 10 %. Toto zastoupení bylo zvoleno na základě reálného používaného množství v zemědělství, které činí 5 a 10 t/ha. Také byly použity i dávky 25,50, 100 t/ha. Ty simulují zvýšenou dotaci půd s biocharem v zemědělství.

V Tabulce 9 je zobrazen přehled všech používaných půdních vzorků dle procenta hmotnostního zastoupení biocharu v každém vzorku. Vzorky z Milčič jsou označeny písmenem M, vzorky ze Semic písmenem S a vzorky z Humpolce písmenem H.

Tabulka 9 Procentuální zastoupení biocharu ve vzorcích

Vzorek	Biochar (%)
SK, HK, MK	0
SA, HA, MA	0,5
SB, HB, MB	1
SC, HC, MC	2,5
SD, HD, MD	5
SE, HE, ME	10



Obrázek 7 Vizuální rozdíly jednotlivých variant (DP Kalkušová 2021).

4.4 Půdní vzorky s biocharem

Pro tento experiment byl zvolen vysokoteplotní biochar, vyroben v komerčním vícestupňovém zplynovači spolu s teplem a elektřinou. Rostlina byla rozdělena do dvou nádob umístěných nad sebou. Tento biochar byl vyroben pomocí autotermní pyrolýzy po dobu 6 hodin a teplotě 500–600 °C. Sekundární vzduch k částečné oxidaci těkavých látek byl nasměrován do horní části zplynovače. Částečná oxidace probíhala ve volném prostoru a produkovala teplo k zplyňování zuhelnatělého uhlí. Teplota zde přesahovala 1200 °C, proto došlo k odstranění dehtů. Generátor využíval principu vícestupňového zplyňování, z důvodu, že se jednalo o dvou ohňový zplyňovač. Biochar byl získán od Akademie věd České republiky, Ústav chemických procesů. Též byly poskytnuty i jeho základní vlastnosti viz Tabulka 10.

Tabulka 10 Základní vlastnosti použitého biocharu v experimentu.

Parametr	Jednotka	Vzorek 1
Specifický povrch, S_{BET}	m ² /g	412
Specifický povrch mesopórů, S_{meso}	m ² /g	91
Specifický celkový objem pórů, V_{tot}	mm ³ _{liq} /g	239
Specifický objem mikropórů, V_{micro}	mm ³ _{liq} /g	165
Specifický intruzní objem, V_{intr}	cm ³ /g	
pH (voda, 1:10)	–	9,9
Vodivost, EC (voda, 1:10)	mS/cm	1,16
Vlhkost, W	hm. %	2,3
Popel, A ^d	hm. %	3,4
Prchavá hořlavina, V ^d	hm. %	7,0
Neprchavá hořlavina, FC ^d	hm. %	87,3
Spalné teplo, Q _s ^d	MJ/kg	32,4
Výhřevnost, Q _i ^d	MJ/kg	32,2
Obsah uhlíku, C ^d	hm. %	92,9
Obsah vodíku, H ^d	hm. %	0,7
Obsah dusíku, N ^d	hm. %	1,1
Obsah celkové síry, S ^d	hm. %	0,0
Obsah kyslíku, O ^d	hm. %	1,9
Obsah fosforu, P	g/kg	0,62
Obsah draslíku, K	g/kg	3,41

Obsah vápníku, Ca	g/kg	6,06
Obsah hořčíku, Mg	g/kg	1,37
Obsah sodíku, Na	g/kg	2,11
Obsah hliníku, Al	mg/kg	659
Obsah železa, Fe	mg/kg	611

4.5 Půdní vlastnosti namíchaných vzorků

Po namíchání půdních vzorků s biocharem byly změřeny základní půdní vlastnosti. Byly stanoveny základní chemické vlastnosti půdy, výměnná půdní reakce pH (KCl), aktivní půdní reakce pH (H₂O), obsah oxidovatelného uhlíku a salinita. Výsledky z těchto stanovení jsou znázorněny v Tabulce 11.

Půdní výměnná reakce pH (KCl) byla vyhodnocena jako kyselá reakce, přičemž změřená aktivní půdní reakce H₂O byla nižší, ale stále se jednalo o kyselou půdu.

Tabulka 11 Vlastnosti půd

Lokalita	Semice	Humpolec	Milčice
ph KCl	4,4	4,68	6,6
pH KCl sm.od.	0,037	0,011	0,87
pH H ₂ O	6,06	6,1	8,34
pH H ₂ O sm. Od.	0,046	0,33	0,011
EC /salinita)	23,6	50,6	162,2
EC sm.odch.	0,5	0,15	0,15
COX	0,49	1,61	2,99
COX sm.odch	0,05	0,04	0,08
Q4/6	3,32	3,3	2,88
Q4/6 sm.odch.	0,092	0,17	0,163
ρZ	2,623	2,538	2,504
ρZ sm. Odch	0,028	0,018	0,049

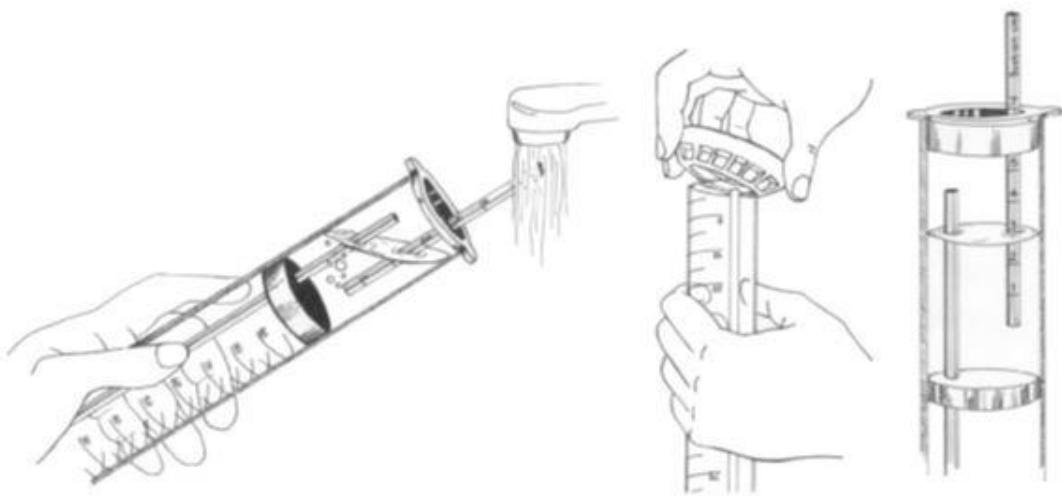
Tabulka 12 Půdní vlastnosti jednotlivých odběrových míst.

Lokalita	Půdní druh	fyz.jíl	I. Z.k.	II. Z.k.	III. Z.k.	IV. Z.k.	Sand	Silt
Semice	hlinito písčité	8,38	12,29	4,09	9,78	73,82	83,6	8,02
Humpolec	hlinitý	22,6	43,89	21,9	7,4	26,8	34,2	43,2
Milčice	hlinitý	28,18	44,12	21,53	5,61	28,72	34,33	37,49

4.6 Hydraulické vlastnosti

Na začátku měření byla vzduchem vysušená půda vložena do ocelového válce o objemu 665 cm³, průměru 11 cm a výšky 7 cm. Následně byla půda zhutněna a dále byla měřena nenasycená hydraulická vodivost.

Pomocí Mini Disk infiltrometrů značky METER Group byla měřena nenasycená hydraulická vodivost. Pro účely této diplomové práce byl použit etanol a voda. Pro měření byla stanovena tlaková výška -2 cm, které je doporučena přímo výrobcem. Také je mezní hodnotou mezi kapilárními a gravitačními póry. Postup naplnění infiltrometru a zvolení tlakové výšky je zobrazen v Obrázku 8. Infiltrometr byl vždy naplněn 90 ml vodou či etanolem.



Obrázek 8 Obrázek Mini disk Infiltrometr, postup plnění vodou či etanolem (METER Group 2018).

Infiltrometr byl položen na půdní vzorek a následně byl každých 15 sekund zapisován objem etanolu či vody v infiltrometru, po dobu 30 minut, než došlo k ustálenému proudění. Měření bylo pro každý půdní vzorek provedeno ve třech opakování. Viz Obrázek 9.



Obrázek 9 Mini disk infiltrometr během měření.

Nenasycená hydraulická vodivost byla spočítána dle metody Woodinga (1968). Který navrhl následující rovnici:

$$Q = \pi r_0^2 K(h_0) \left(1 + \frac{4}{\pi r_0 \alpha_G}\right)$$

Ve které Q vyjadřuje ustálený tok vody, h_0 je tlaková výška, r_0 je průměr minidisku (2,22 cm), α_G značí konstantu v Gardnerově rovnici (1958), která zobrazuje vztah mezi nenasycenou hydraulickou vodivostí a tlakovou výškou.

Následně byla vyhodnocena i sorptivita vody (S_W) a sorptivita etanolu (S_E) a vypočten index repelence RI, sloužící k popisu vodoodpudivosti půdy. Výpočty probíhaly dle následujících rovnic:

$$S_W(-2cm) = I/t^{1/2}$$

$$S_E(-2cm) = I/t^{1/2}$$

Kde I je kumulativní infiltrace (cm) a T je čas (s).

Výpočet pro sorptivitu vody a sorptivitu etanolu byl použit podle Pekárové et al. (2015), ve kterém se používá kombinace všech sorptivit pro každou variantu. Dříve byl postup odlišný, jelikož výpočet byl prováděn podle párového uspořádání. Podle následující rovnice byl vypočten index repelence (RI).

$$RI = 1,95 S_E/S_W$$

Výsledky byly následně vyhodnoceny dle indexu repelence viz Tabulka 13.

Tabulka 13 Hodnotící stupnice indexu repelence

Kategorie	Hodnota indexu repelence	Zařazení půdy
1	RI < 1,95	smáčivé půdy
2	1,95 ≤ RI < 10	mírně vodoodpudivé půdy
3	10 ≤ RI < 50	středně vodoodpudivé půdy
4	50 ≤ RI < 110	silně vodoodpudivé půdy
5	RI ≤ 110	extrémně vodoodpudivé půdy

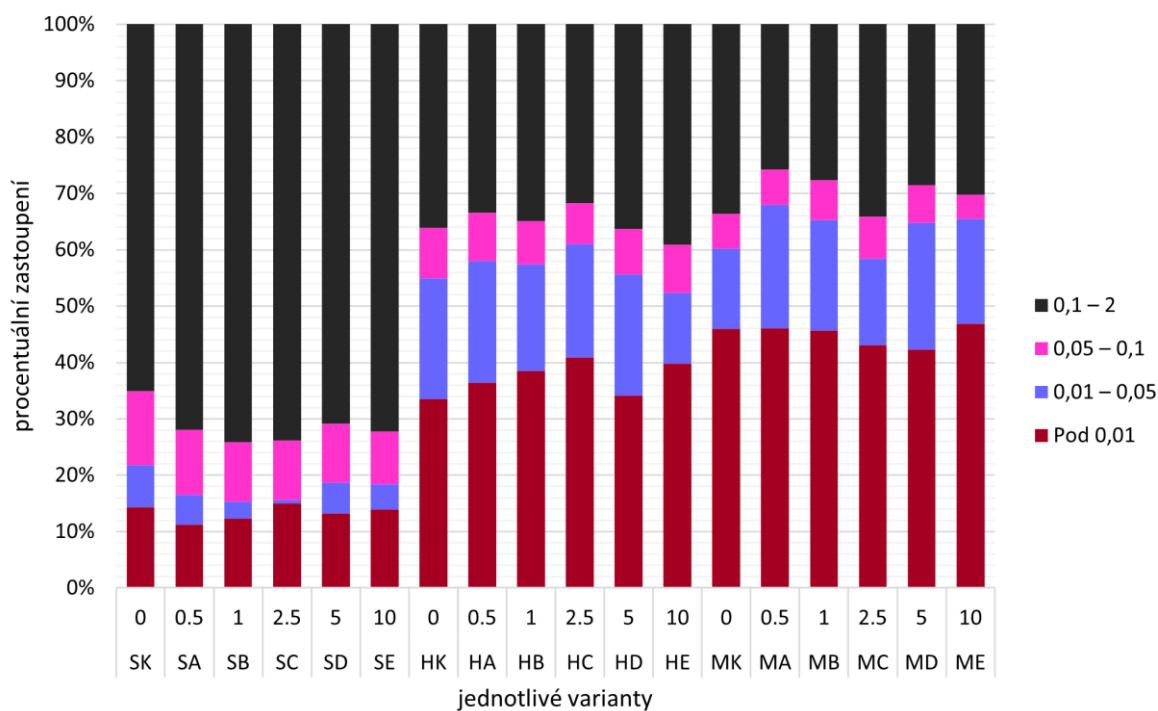
4.7 Statistika

V systému Statistica 12 byl zhodnocen vliv biocharu na nenasycenou hydraulickou vodivost, na všech experimentových půdních vzorcích, a to pomocí testu ANOVA s interakcí, bez směrodatných odchylek, metodou nejmenších čtverců. K hodnocení byly vybrány průměry všech nenasycených hydraulických vlastností, index repelence a sorptivity lokalit Semice, Humpolec, Milčice, dále v interakci s množstvím použitého biocharu.

5 Výsledky

5.1 Základní vlastnosti půd

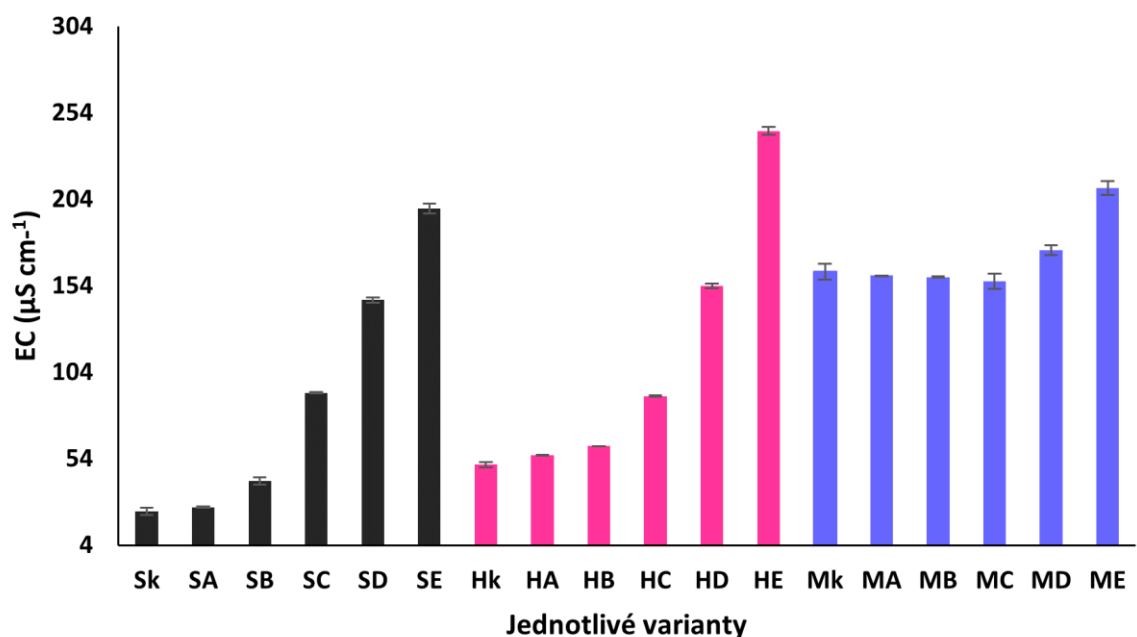
Zrnitostní složení v jednotlivých půdních variantách smíchaných s biochar. Jak vyplývá z Obrázku 10 u půdních vzorků Semic bylo největší zastoupení částic o velikost 0,1 – 2 mm, u kontrolní varianty 65 %, u varianty SB dokonce až 74 %. Nejmenší obsah částic 0,01 – 0,05 připadá na variantu SC s obsahem 0,60 %. U varianty Humpolec, se zrnitostní složení odlišuje. Převažuje zde především obsah částic menších než 0,01 mm, nejvíce u varianty HC se 40 %. Ale i o velikosti 0,1 – 2 mm, kde u varianty HE dosahuje 39 %. Varianta Milčice má obdobné zrnitostní složení jako varianta Humpolec, opět zde převažuje obsah částic menších než 0,01 mm, kde u varianty ME obsahuje 46,9 %. Nejmenší obsah částic o velikosti 0,05 – 0,1 mm byl v Milčicích 4,29 %.



Obrázek 10 Grafické znázornění zrnitostního složení biocharu v jednotlivých půdních vzorcích.

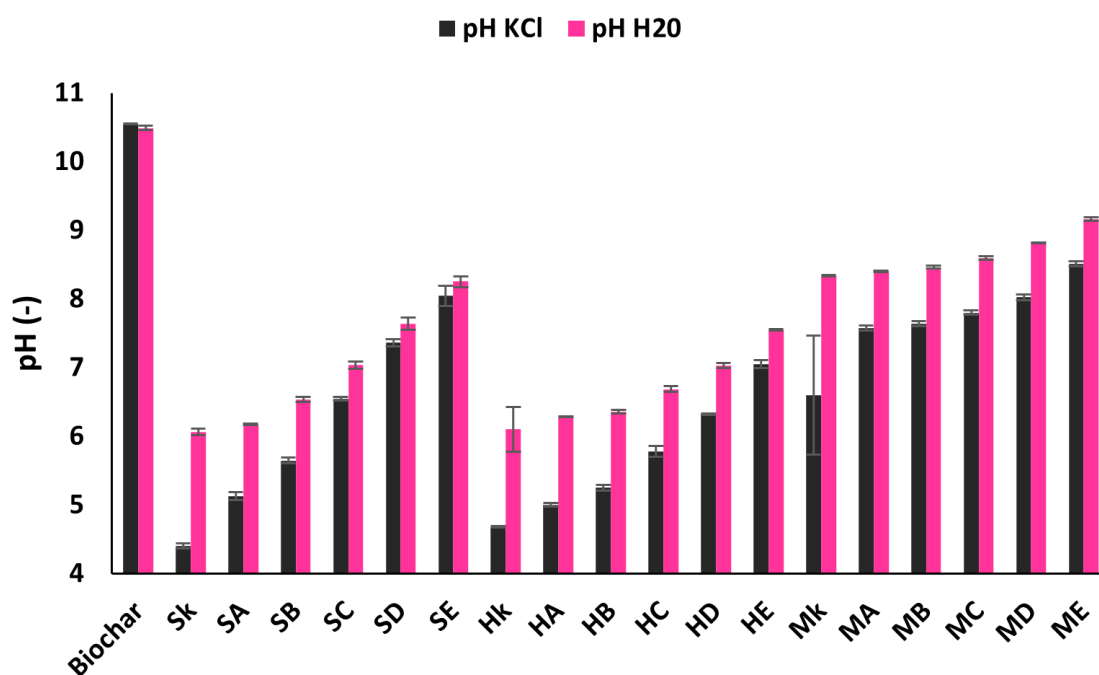
Pro tuto diplomovou práci byla vybrána tři různá místa pro odběr půdních vzorků, jednalo se o Semice, Milčice a Humpolec. Na těchto vzorcích byl určen půdní typ dle Českého Klasifikačního systému půd. Kdy půdní vzorek z Milčic byl určen jako černice, půdní vzorek z Humpolce klasifikován jako kambizem a půdní vzorek ze Semic jako regozem.

Na obrázku 11 jsou znázorněny všechny experimentované varianty a jejich salinita. Můžeme si všimnout, že největší salinity zde dosahuje půdní vzorek z Humpolce. Konkrétně varianta Humpolce E, ve které se nacházelo největší množství biocharu, a to 10 % biocharu. Naměřená hodnota salinity v této variantě činila $243,5 \mu\text{S cm}^{-1}$. To stejné platí i pro varianty Semice E, kde salinita byla $198,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ a Milčice E se salinitou $210,5 \mu\text{S cm}^{-1}$. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u varianty Semic, ovšem pouze v prvních variantách s menším obsahem biocharu, obdobné výsledky jsou i u variant Humpolec a Milčice. Pro porovnání v kontrolní variantě Semic byla salinita $23,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ a ve variantě Semice E $198,6 \mu\text{S cm}^{-1}$.



Obrázek 11 Graf salinity, jednotlivých variant, kde S jsou Semice, H značí Humpolec a M jsou Milčice.

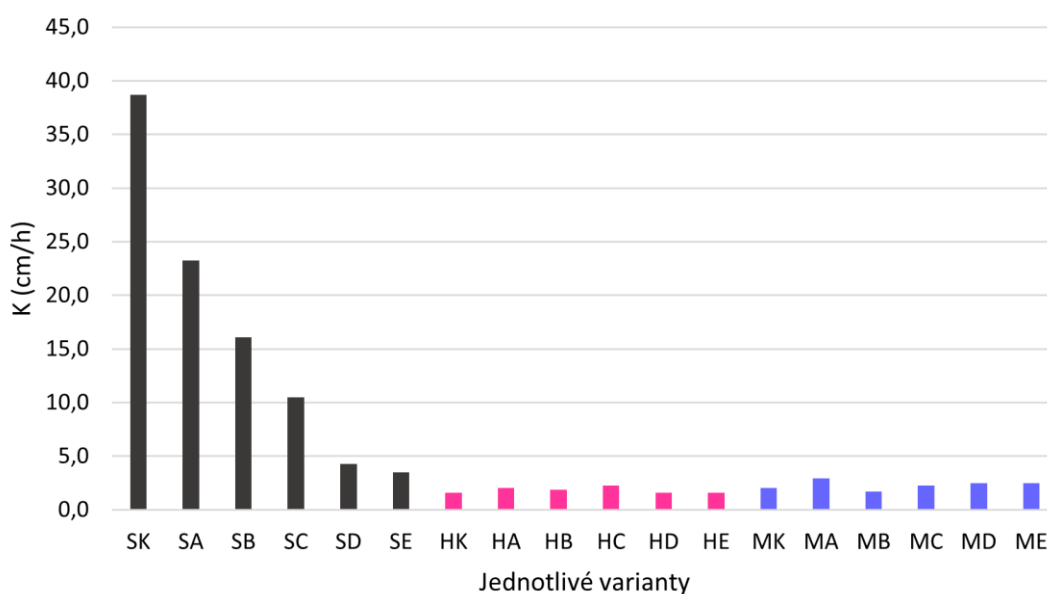
Na Obrázku 12 je vyjádřené pH KCl a pH H₂O. Jak již bylo zmíněné v literární rešerši, nejvyšší pH připadá na samotný čistý biochar, pH biocharu s vodou činilo 10,49. Podobné hodnoty bylo dosaženo i ve variantě s etanolem a to 10,55. Následně dle přidávaného množství biocharu do každého půdního vzorku roste i pH všech variant. Tudíž čím více bylo přidáno biocharu, tím více se zvětšila hodnota pH jak u vody, tak i u etanolu. Vyšších hodnot pH bylo dosaženo u variant s použitím vody. Nejvyšší hodnota u varianty v Semicích s největším množstvím biocharu byla 8,25 s vodou a 8,05 s etanolem.



Obrázek 12 Graf pH KCl a pH H₂O, kde S značí Semice, H je Humpolec a M jsou Milčice.

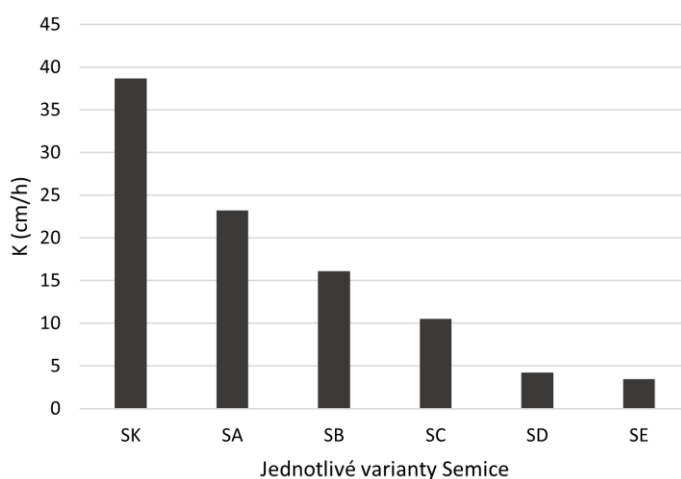
5.2 Nenasycená hydraulická vodivost

U každého půdního vzorku bylo měření pomocí Minidisk infiltrometru opakováno dohromady třikrát. Následně byly hodnoty zprůměrované a vyhodnoceny. Jak vyplývá z Obrázku 13 nejvyšší nenasycená hydraulická vodivost byla změřena u půdních vzorků Semic, u varianty kontrolní byla naměřena K 38,6 cm/h. S postupným zvyšováním množství biocharu zde klesala, a to až na 3,4 cm/h. Půdní druh v Semicích byl klasifikován jako hlinito-písčitý. Konkrétně se jednalo o půdní druh regozem.



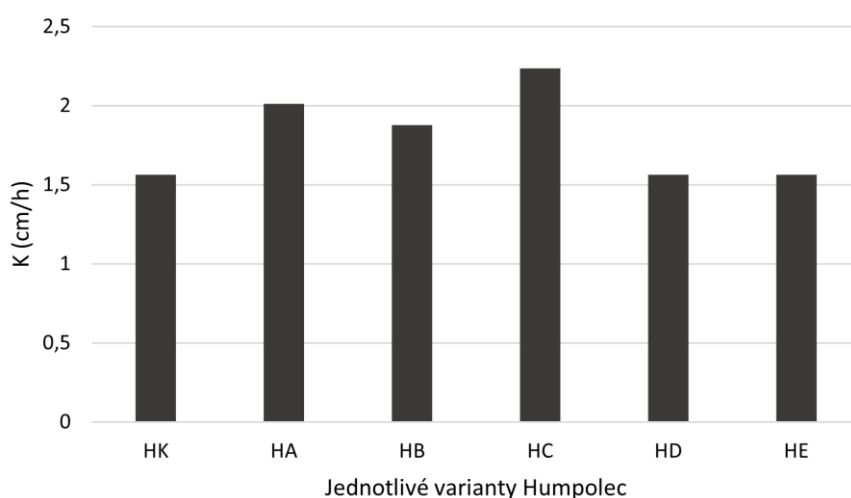
Obrázek 13 Nenasycená hydraulická vodivost ve všech měřených variantách, kde S jsou Semice, H je Humpolec a M jsou Milčice.

Jak již bylo zmíněno výše, nejvyšší nenasyčená hydraulická vodivost v půdních vzorcích v Semicích byla naměřena u kontrolní varianty, bez použití biocharu K 38,6 cm/h. S postupným zvyšováním množství biocharu v dávkách 0,5 %, 1 %, 2,5 %, 5 %, 10 % se nenasyčená hydraulická vodivost snižovala viz Obrázek 14. Při obsahu 0,5 % biocharu byla K 16,09 cm/h a s obsahem 10 % biocharu klesla až na 3,4 cm/h. V tomto případě měl biochar vliv na snížení hydraulické vodivosti.



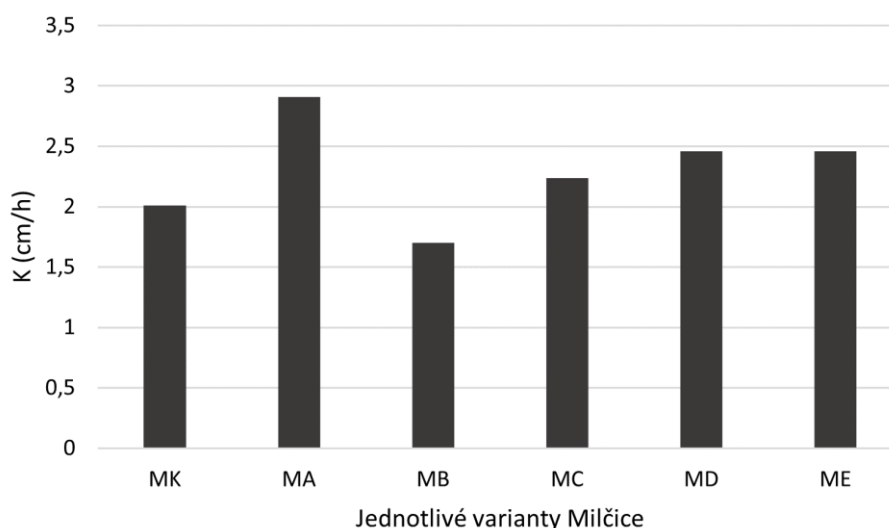
Obrázek 14 Nenasyčená hydraulická vodivost Semic v závislosti na množství aplikovaného biocharu.

Jak vyplývá z Obrázku 15 odlišných výsledků bylo dosaženo již u Humpolce, kde hodnoty nenasyčené hydraulické vodivosti byly velice kolísavé v závislosti na množství přidaného biocharu. Ačkoliv se jedná o hlinitý půdní druh, konkrétně půdní druh kambizem. První varianta kontrolní s 0 % biocharu měla K 1,56 cm/h, s přidáním 0,5 % došlo k opačnému jevu nežli u Semic, a to ke zvýšení na K 2,01 cm/h. Ovšem u varianty s 1 % biocharu se K snížilo a u další varianty opět zvýšilo. U posledních dvou variant, kde množství biocharu bylo 5 % a 10 % byly hodnoty stejné jako na začátku u kontrolní varianty.



Obrázek 15 Nenasyčená hydraulická vodivost Humpolec v závislosti na množství aplikovaného biocharu

Jiné výsledky byly zjištěny i u varianty Milčice. Kdy u kontrolní varianty, s 0 % biocharu dosahovala nenasycená hydraulická vodivost hodnoty 2,011 cm/h. Poté dle Obrázku 16 došlo s přidáním 0,5 % biocharu ke zvýšení K na 2,9 cm/h. Dále nastalo opět snížení na nejnižší hodnotu, a to u varianty s 1 % biocharu, kde K bylo 1,69 cm/h. Zajímavé je, že stejně tomu bylo i u varianty Humpolec, kde se také s 1 % biocharu hodnota nenasycené hydraulické vodivosti zvýšila. Avšak s dalším zvyšováním aplikační dávky biocharu, byla zvýšena i nenasycená hydraulická vodivost.



Obrázek 16 Nenasycená hydraulická vodivost Milčice v závislosti na mn ožství aplikovaného biocharu.

Jelikož se jednalo o sypané půdní vzorky s vysokou pórovitostí a malou objemovou hmotností. Nebyla potvrzena hypotéza, že se zvyšujícím množstvím biocharu dochází k velkému zvýšení nenasycené hydraulické vodivosti. I přes velké hutnění půdy do válců, nepotvrzuje tento experiment extrémní efektivnost biocharu v sypaných půdních vzorcích na nenasycenou hydraulickou vodivost.

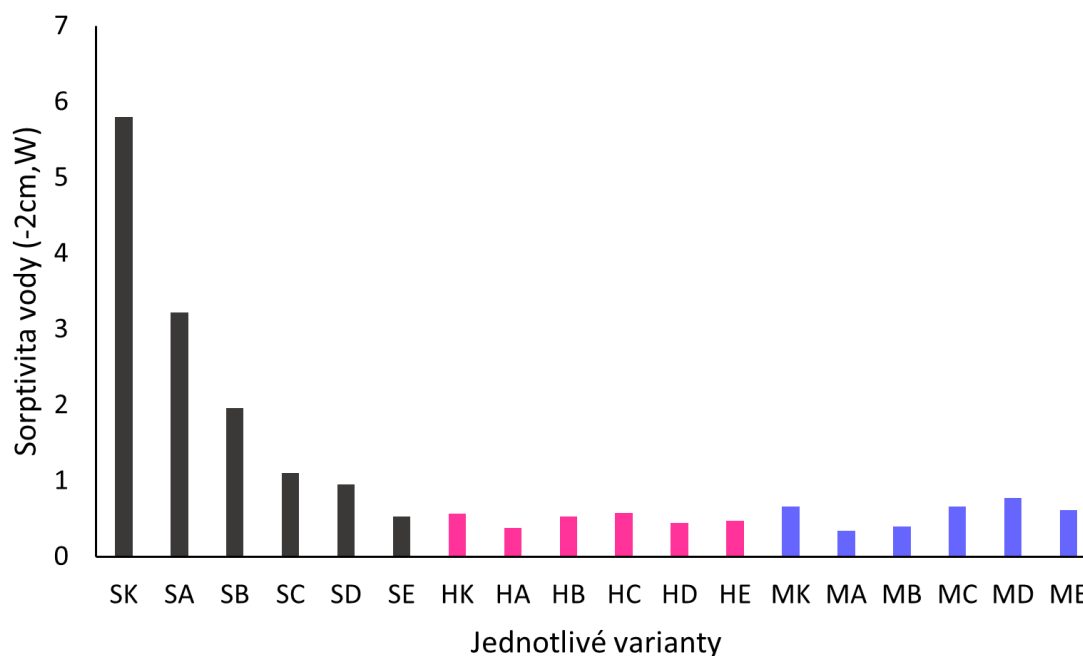
Tabulka 14 Nenasycená hydraulická vodivost ve všech variantách, včetně průměru a směrodatné odchylky.

Lokalita	K1 (cm/h)	K2 (cm/h)	K3 (cm/h)	průměr	sm. Odchylka
SK	59,7	26,8	29,5	38,7	18,25
SA	20,1	20,1	29,5	23,2	5,42
SB	14,1	20,8	13,4	16,1	4,08
SC	11,4	8,7	11,4	10,5	1,55
SD	5,4	4,7	2,7	4,2	1,40
SE	4,7	3,7	2,0	3,5	1,36
HK	1,3	1,3	2,0	1,6	0,39
HA	2,7	1,3	2,0	2,0	0,67
HB	2,0	2,0	1,6	1,9	0,23
HC	2,7	2,0	2,0	2,2	0,39
HD	2,7	1,3	0,7	1,6	1,02

HE	2,0	1,3	1,3	1,6	0,39
MK	2,0	1,3	2,7	2,0	0,67
MA	2,7	2,7	3,4	2,9	0,39
MB	1,3	1,1	2,7	1,7	0,86
MC	2,0	2,0	2,7	2,2	0,39
MD	2,0	2,7	2,7	2,5	0,39
ME	2,7	2,7	2,0	2,5	0,39

5.3 Sorptivita, index repelence

Jak vyplývá z Obrázku 17, nejvyšší sorptivita vody SW 5,796 (-2 cm, W) byla ve variantě kontrolní v Semicích. Dále s postupným zvyšováním množství biocharu do půdních vzorků, klesala sorptivita vody. Nejnižší hodnota u varianty v Semicích s největším množstvím biocharu činila 0,523 (-2 cm, W). V dalších variantách jak v Humpolci, tak i v Milčicích byly hodnoty kolísavé. V půdním vzorku z Hupmolce s 2,5 % biocharu byla sorptivita vody 0,576 (-2 cm, W). Naopak s přidáním 5 % biocharu klesla hodnota na 0,445 (-2 cm, W) a s přidáním 10 % biocharu opět lehce vzrostla na 0,475 (-2 cm, W).

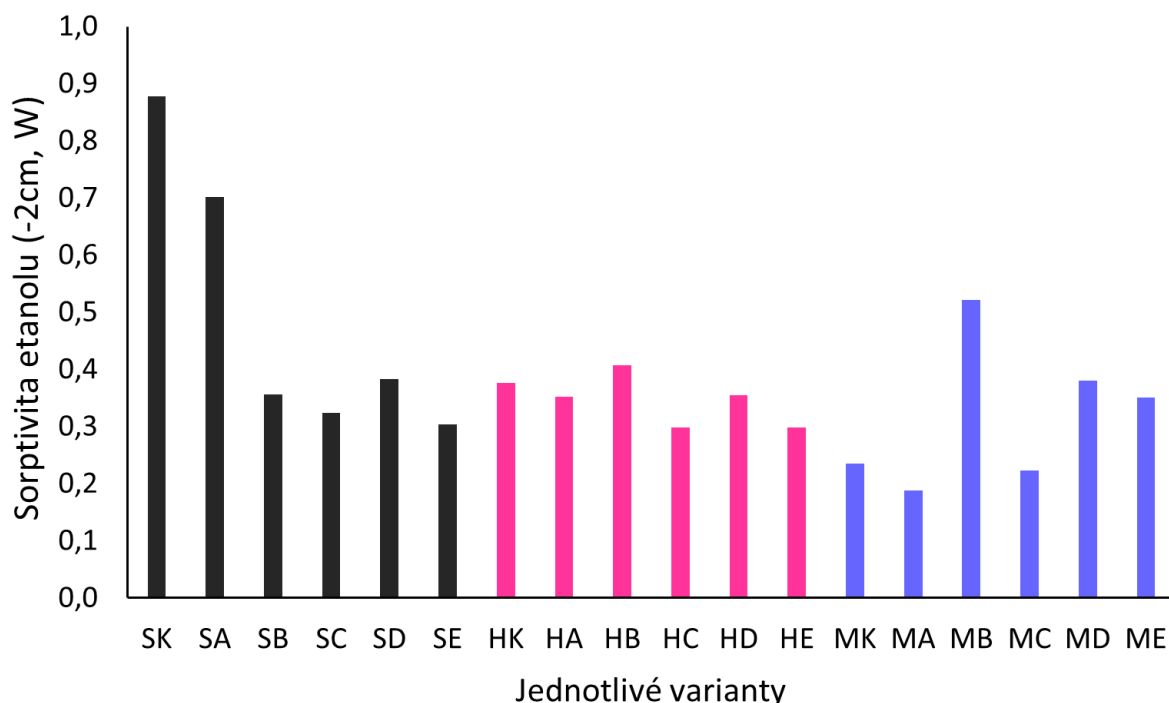


Obrázek 17 Sorptivita vody ve všech variantách

Tabulka 15 Procentuální množství biocharu přidávaného do jednotlivých půdních vzorků

Vzorek	Biochar (%)
SK, HK, MK	0
SA, HA, MA	0,5
SB, HB, MB	1
SC, HC, MC	2,5
SD, HD, MD	5
SE, HE, ME	10

Sorptivita etanolu dosáhla vyšších hodnot nežli sorptivita vody. Nejvyšší sorptivita 0,877 (-2 cm, W) byla opět u půdního vzorku Semic u kontrolní varianty, viz Obrázek 18. Dále hodnota klesala až na variantu, kde bylo přidáno 5 % biocharu. Kolísavé hodnoty byly zjištěny i v půdních vzorcích z Humpolce, kde až poslední dvě varianty dokazují snížení sorptivity etanolu s vyšším množstvím biocharu. Kontrolní varianta Humpolce 0,376 (-2 cm, W) naopak varianta HE 0,299 (-2 cm, W) dokazuje snížení s přidáním 10 % biocharu.

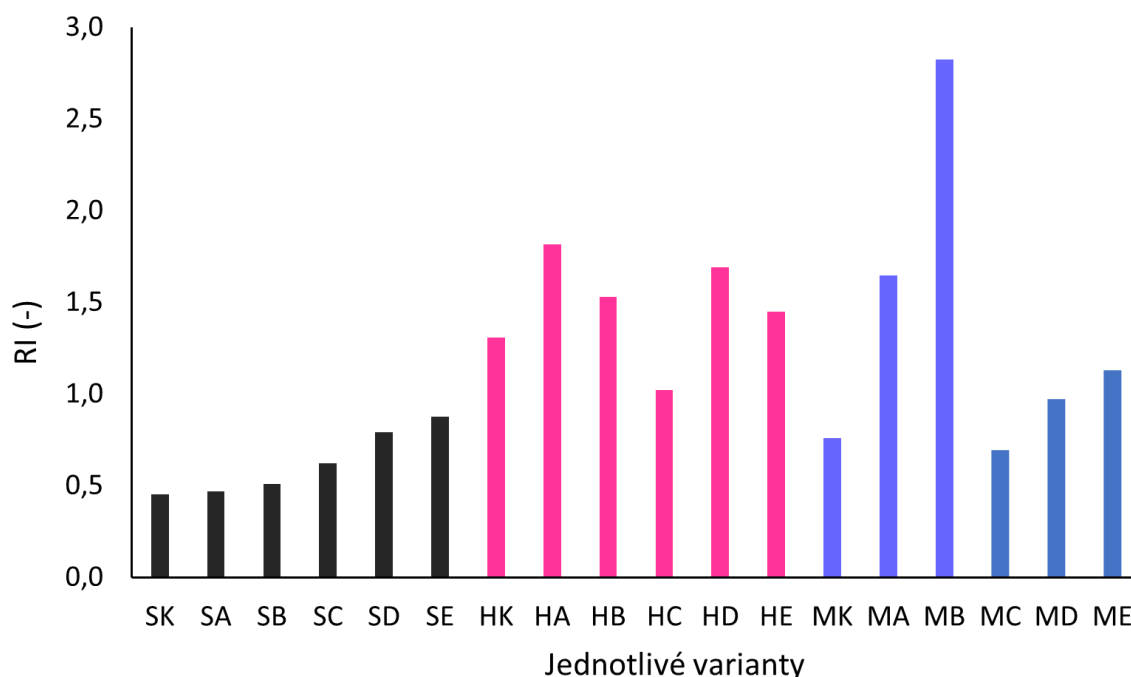


Obrázek 18 Sorptivita etanolu ve všech variantách

Tabulka 16 Sorptivity vody a sorptivity etanolu ve všech variantách půdních vzorků s biocharem.

Semice	SW (-2 cm, W)	SE (-2 cm, W)	Humpolec	SW	SE	Milčice	SW	SE
SK	5,796	0,877	HK	0,564	0,376	MK	0,664	0,235
SA	3,217	0,702	HA	0,380	0,352	MA	0,341	0,189
SB	1,954	0,356	HB	0,524	0,407	MB	0,399	0,522
SC	1,099	0,324	HC	0,576	0,299	MC	0,663	0,224
SD	0,954	0,383	HD	0,445	0,355	MD	0,773	0,380
SE	0,523	0,304	HE	0,475	0,299	ME	0,613	0,351

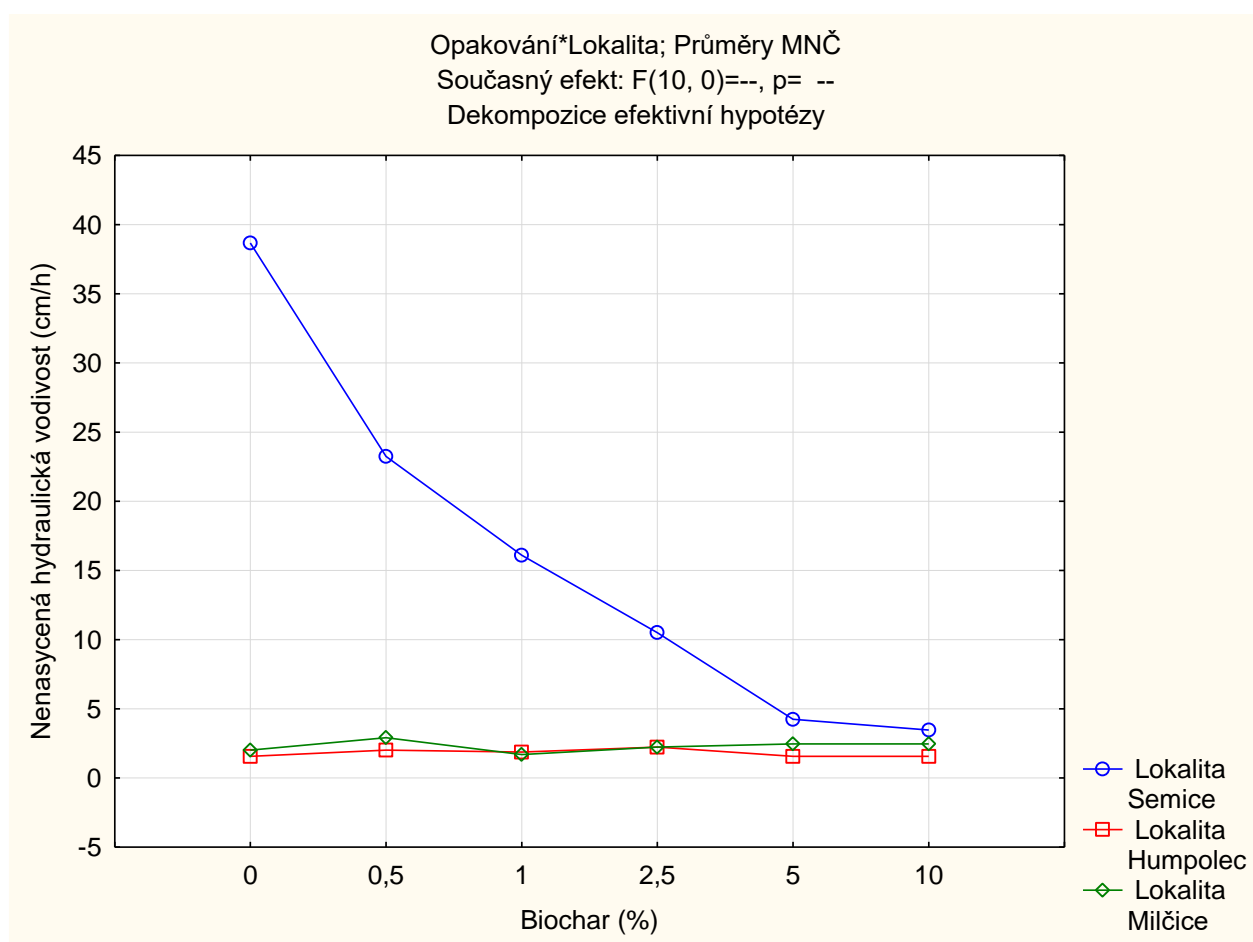
Vypočítaný index repelence dokazuje, že všechny půdní vzorky dle hodnotící stupnice, spadají do smáčivých půd. Jelikož hodnota indexu repelence (RI) je nižší než 1,95. Pouze u druhé varianty Milčic s 1 % biocharu, dosahuje vyšší hodnoty a řadila by se mezi mírně vodoodpudivé půdy.



Obrázek 19 Index repelence pro všechny varianty.

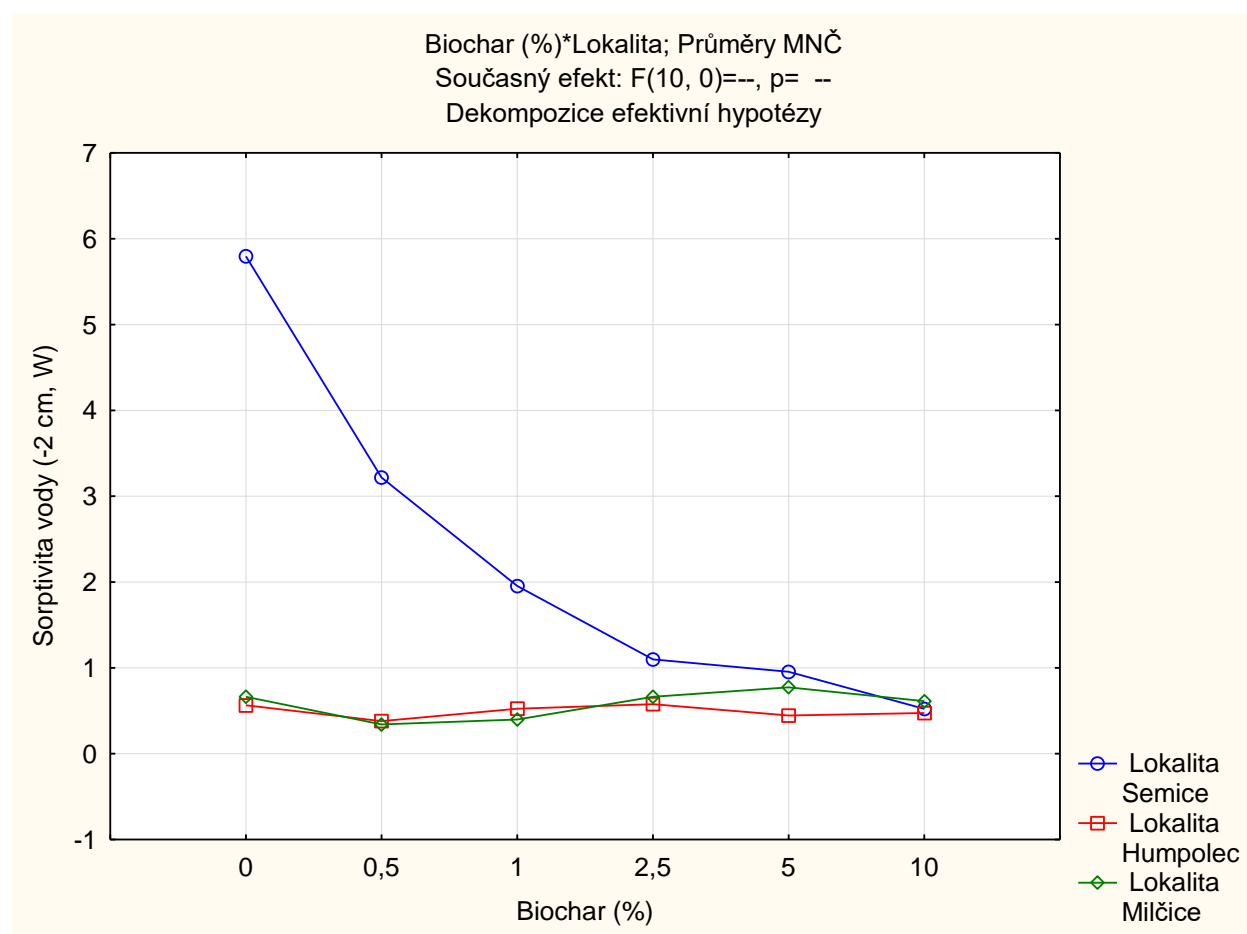
5.4 Statistické zhodnocení výsledků

Statistické vyhodnocení výsledků z měření nenasyčené hydraulické vodivosti vyjadřuje interakci mezi množstvím použitého biocharu v jednotlivých variantách. Z Obrázku 20 vyplývá, že největší vliv biocharu byl u lokality Semice, jak potvrzují samotné výsledky. Zde došlo ke snížení nenasyčené hydraulické vodivosti na základě přidávání většího množství biocharu. U lokality Humpolec a Milčice je rozdíl nepatrný, jelikož přidáním daného množství biocharu došlo jak ke zvýšení, tak následně ke snížení nenasyčené hydraulické vodivosti.



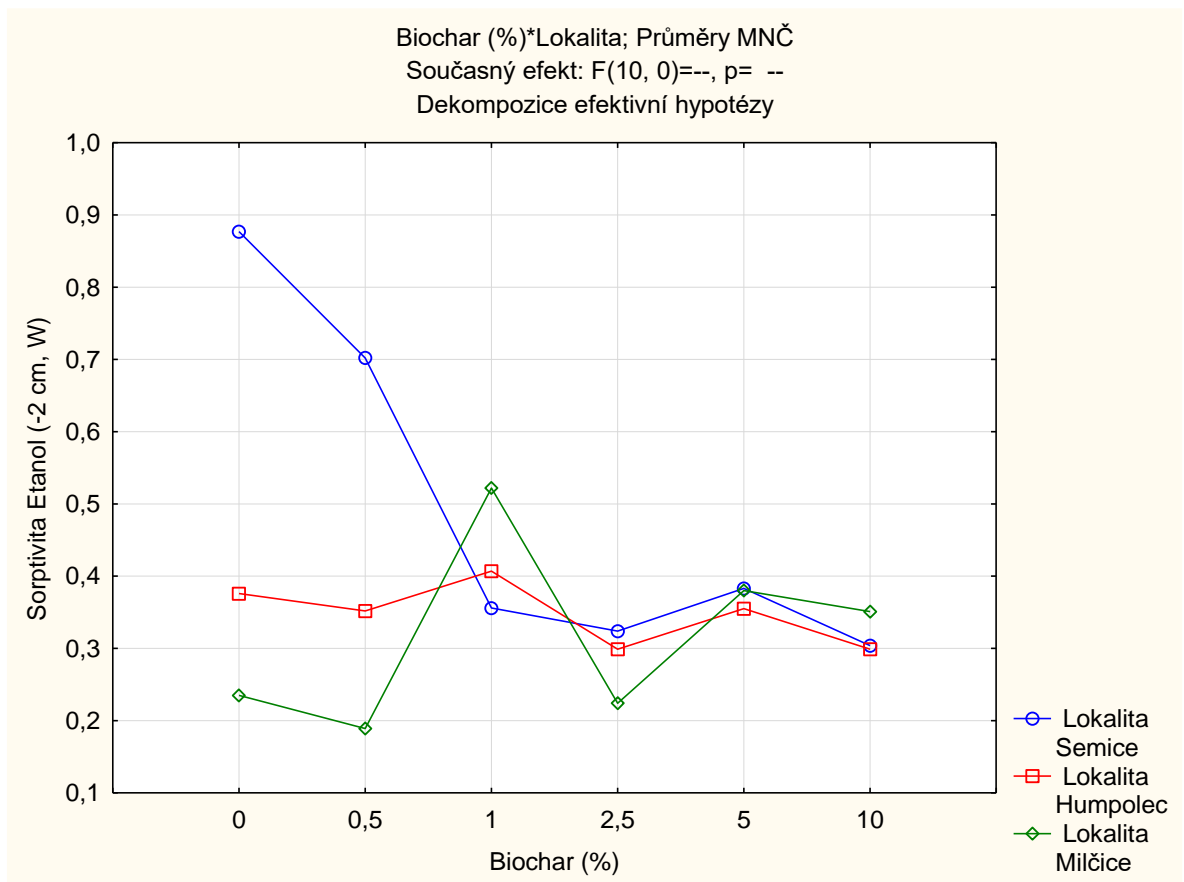
Obrázek 20 Statistické vyhodnocení nenasyčené hydraulické vodivosti s interakcí biocharu jednotlivých lokalit.

Jak vyplývá z Obrázku 21 použití biocharu mělo vliv na sorptivitu vody. Se zvyšujícím množstvím biocharu docházelo ke snížení sorptivity vody v jednotlivých půdních vzorcích dané lokality. Minimální vliv byl v tomto případě u lokality Milčice a Humpolec. Největší vliv byl vyhodnocen u lokality Semice, kdy ihned při první aplikační dávce biocharu, došlo k patrnému snížení sorptivity vody. Zde byl zpozorován velký vliv při aplikaci prvních dávek biocharu.



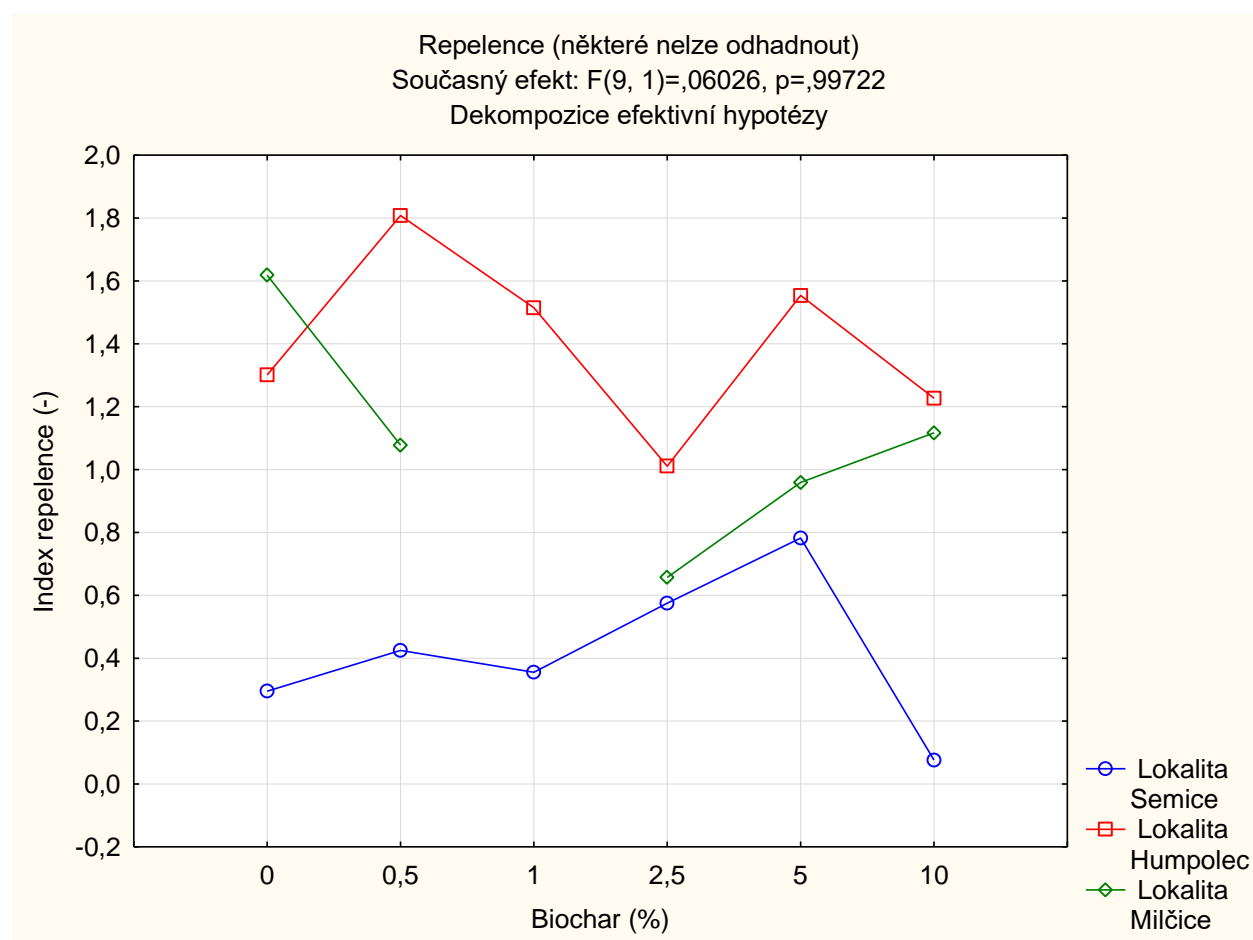
Obrázek 21 Statistické vyhodnocení rozdílů sorptivity etanolu a vody s interakcí biocharu.

Z grafu je patrné, že vliv biocharu na sorptivitu etanolu byl velice kolísavý. U lokality Semice z počátku docházelo ke snížení sorptivity etanolu po přidání aplikační dávky biocharu. Avšak po přidání 5 % biocharu došlo i ke zvýšení a následně po aplikaci největší dávky biocharu opět je snížení sorptivity. Největší rozdíl byl zjištěn o lokality Milčice, kdy výsledky byly velice nestabilní. Došlo zde



Obrázek 22 Statistické zhodnocení sorptivity etanolu v závislosti na množství biocharu.

Ze statistického vyhodnocení indexu repelence viz Obrázek 23 vyplývá, že nejvyšší hodnoty byly dosaženy u lokality Humpolec. Po přidání první aplikační dávky biocharu došlo k patrnému zvýšení indexu repelence, poté se s dalšími dávkami snižoval. Až na předposlední dávku biocharu, kde došlo opět k zvýšení a u poslední ke snížení na hodnotu, která byla u kontrolní varianty. U lokality Semice došlo k postupné zvýšení indexu repelence, výjmkou poslední aplikační dávky biocharu, kdy došlo ke snížení na hodnotu menší, nežli byla v počátku u kontrolní varianty, bez použití biocharu. U statistického zhodnocení varianty Milčice, z neznámých důvodů není vyhodnocena celá linie této lokality. Avšak i tak je zřejmé, že díky biocharu, zde zprvu došlo ke snížení, následně k postupnému zvýšení indexu repelence.



Obrázek 23 Statistické vyhodnocení indexu repelence s interakcí aplikační dávky biocharu.

6 Diskuze

Pro tento experiment byla vybrána tři odběrová místa, s odlišnými půdními vlastnostmi. Jednalo se o lokalitu Semice značeny S, Humpolec označován jako H a Milčice označovány písmenem M. Na každém půdním vzorku byl určen půdní typ, dle Klasifikačního systému půd. Jelikož se jednalo o velmi smáčivé půdy, nebyl potvrzen extrémně pozitivní vliv biocharu na hydraulické vlastnosti půd. A to i přes velké hutnění každého půdního vzorku do válce.

Běžný proces pro přípravu biocharu je pyrolýza, která probíhá za podmínek bez kyslíku v rozsahu teploty 300 až 900 °C. Během procesu pyrolýzy se tvoří pevné, kapalné a plynné produkty. Právě pevná látka vznikající z toho procesu se nazývá biochar. Podmínky přípravy, včetně rychlosti ohřevu, teploty, podmínek vzduchu mají důležitý vliv na fyzikálně-chemické vlastnosti biocharu (Wang et al. 2019). Pro tento laboratorní experiment byl zvolen vysokoteplotní biochar, který byl vyroben autotermní pyrolýzou o teplotě 500–600 °C po dobu 6 hodin. I rozdílný postup výroby či použití odlišných surovin pro výrobu může mít vliv na celkovém účinku biocharu na fyzikálně-chemické vlastnosti.

Obvykle má biochar neutrální až zásadité pH. Samozřejmě závisí na mnoho faktorech včetně termochemického procesu a typu použité suroviny (Ahmad et al. 2014). Biochar může kromě odstranění rizikových prvků také neutralizovat kyselou půdu, tím dochází ke zvýšení kapacity výměny kationtů a úrodnosti půdy.

Moon et al. (2017) uvedl, že ke zvýšení kyselosti půdy byl použit biochar vyroben z dubu a sójových bobů. Po jednom měsíci se pH zvýšilo z 5,4 na 7,42. V mém experimentu nejvyšší pH připadalo na samotný čistý biochar. U biocharu s vodou pH činilo 10,49 a u varianty s etanolem 10,55.

Jak dokazují už i předchozí studie Moon et al. (2017), čím více biocharu bylo přidáno do půdního vzorku, tím rostlo i pH u všech experimentovaných variant. U variant s vodou byly dosaženy vyšší hodnoty pH, v Semicích s největším množstvím biocharu 10 % činilo pH s vodou 8,25 a s etanolem 8,05.

Ve studii Khaledi et al. (2023) uvádí, že se zvyšujícím se množstvím biocharu dochází ke zvýšení pH. Hodnoty pH v jejich pokusu dosahovaly hodnot v rozmezí od 8,5 do 8,7. Biochar zvyšuje pH díky své zásadité povaze. Dále došly k závěru, že ani různé velikosti částic biocharu neměli vliv na pH půdy.

Nejvyšší salinity v experimentovaných variantách bylo dosaženo u půdních vzorků s největším množstvím biocharu, a to 10 %. Naměřená hodnota salinity u varianty Humpolec E činila 243,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Obdobné výsledky byly dosaženy i u varianty Semice E se salinitou 198,6 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a varianta Milčice E s naměřenou salinitou 210,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Pro srovnání výsledků, ve variantě Semice pouze čistý půdní vzorek, bez aplikace biocharu činila hodnota salinity 23,6 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Ve studii Blanco et al. (2017) popisují, jak aplikace biocharu může snížit objemovou hustotu v půdách s hrubou strukturou více než v půdách s jemnou strukturou.

Biochar v tomto pokusu snížil objemovou hmotnost o 14,2 % u půd s hrubou strukturou a o 9,2 % u půd s jemnou strukturou. Největší pokles byl zaznamenán u písčité půdy. Biochar měl v tomto případě nižší objemovou hmotnost než půda. Aplikací biocharu tedy došlo ke snížení objemové hustoty půdy prostřednictvím míchání (Blanco et al. 2017).

V terénním pokusu Yadav et al. (2019) bylo měření každého půdního vzorku ve třech opakování. Jednalo se o hlinitopísčitou půdu. Také zde měli takzvaně kontrolní variantu bez použití biocharu a poté variantu s použitím biocharu. Biochar byl vyroben pyrolýzou při teplotě 450 °C po dobu 60 minut z listů trav z čeledi lipnicovité. Dávka použitého biocharu byla 4 t/ha. Bylo zjištěno, zvýšení kapacity zadržování vody až o 45 % a tím větší dostupnost živin pro rostlinu.

Hussaian et al. (2021) potvrzují, že úpravou půdy biocharem došlo ke změně fyzikálních vlastností půdy, a to ke snížení měrné hmotnosti a sušiny přibližně o 6–15 %. Tento důsledek byl připisován vnitřní porézní struktuře biocharu. Také zpozorovali zvýšení zadržování vody průměrně o 30–50 % v písčitých půdách. K čemuž přispěla změněná velikost pórů, ale i pórozita půd po úpravě biocharem.

Zvýšená celková pórovitost byla teoreticky vypočtena z naměřené specifické hmotnosti a hustoty zhutněné holé a biocharem upravené půdy. Dále byl potvrzen i výsledek mého experimentu tím, že došlo ke snížení nenasycené hydraulické vodivosti po úpravě půdy biocharem u experimentované lokality Semice. Zvýšená retence vody a snížení nenasycené hydraulické vodivosti v půdách upravených biochar způsobuje vyšší množství dostupné vody pro rostliny. Přidáním 5 % a 10 % biocharu mělo za následek zvýšení optimálního obsahu vlhkosti v písčitých půdách.

Naopak v experimentu Hussain et al. (2021) byl potvrzen pozitivní vliv biocharu na hydraulické vlastnosti půdy. Nenasycená hydraulická vodivost byla po úpravě půdy biocharem snížena. Důvodem tohoto opačného výsledku může být fakt, že tento pokus probíhal v terénních podmínkách oproti mému, který byl prováděn v laboratorních podmínkách. Jak uvádí Khaledi et al. 2023 vliv biocharu na vlastnosti půdy jsou rozporuplné, což lze přičíst jeho typu, z čeho a jak je vyroben.

Půda obohacená biocharem může zadržovat vodu po delší dobu, což zlepšuje efektivitu využití vody a snižuje potřebu zavlažování. Každý půdní vzorek byl měřen třikrát pomocí Minidisk infiltrametrem značky Metergroup. Vyhodnocením naměřených hodnot vyplynulo, že nejvyšší sorptivity vody dosáhla kontrolní varianta v Semicích Kh 5,796 (-2 cm, W), kde půdní druh byl hlinitopísčítý. Naopak varianta s největším množstvím biocharu značena SE měla hodnotu sorptivity vody 0,523 (-2 cm, W). V těchto půdních vzorcích bylo dosaženo snížení sorptivity vody přidáním většího množství biocharu.

Nenasycená hydraulická vodivost půdy je jedním z parametrů pohybu půdní vody, což má velký význam pro celkové využití vody například v období sucha. V laboratorním experimentu Shi et al. (2022) tvrdí, že biochar má malý vliv na nenasycenou hydraulickou vodivost půdy a velký vliv na účinek má samotný obsah vody v půdě. Pokud byl ale obsah vody vyšší než 0,28 cm³, nenasycená hydraulická vodivost se s rostoucím obsahem vody rychle zvyšovala.

Půdní vlhkost hraje důležitou roli v růstu plodin. Výsledky z experimentu ukázaly, že biochar může zlepšit parametry půdní vody. Pohyb půdní vody byl ovlivněn půdní strukturou.

Samotná struktura biocharu je jedním z faktorů ovlivňující vlhkost půdy. Například Fu et al. (2019) zjistili, že množství aplikovaného biocharu a poréznost byl hlavní důvod pro změnu charakteristik půdní vody. Podobné výsledky byly prokázány ve studii Amoakwah et al. 2017. Ti prokázali, že zvýšení zadržování vody v půdě po aplikaci biocharu způsobilo zvětšení půdních pórů.

Naopak ale jiní vědci uvedli, že biochar nemá žádný vliv na schopnosti půdy zadržovat vodu. Například Hardie et al. (2014) prokázali, že biochar neměl žádný vliv na obsah vody v půdě ani po 30 měsících. Což opět potvrzuje, různé druhy biocharu a různé struktury pórů mají odlišné účinky při aplikaci do půdy. Také záleží na druhu experimentu, laboratorní měření mohou mít zkreslené výsledky oproti terénnímu měření.

Villagra-Mendoza a Horn (2018) uvedli, že čím větší je množství aplikovaného biocharu, tím vyšší byla nenasycená hydraulická vodivost půdy. Podobných výsledků bylo dosaženo u varianty Milčice, kde u kontrolní varianty nenasycená hydraulická vodivost činila 2 cm/h. Po přidání první dávky biocharu 0,5 % nastalo zvýšení K na 2,9 cm/h, poté ovšem došlo ke snížení na 1,69 cm/h. Ale s dalším zvýšením aplikační dávky biocharu byla nenasycená hydraulická vodivost zvýšena na 2,5 cm/h.

Naopak Zornoza et al. (2016) zjistili, že čím větší bylo množství aplikovaného biocharu, tím nižší byla nenasycená hydraulická vodivost. Těchto výsledků bylo dosaženo i u experimentované lokality Semice v této diplomové práci. Nejvyšší nenasycená hydraulická vodivost zde byla u kontrolní varianty K 38,6 cm/h, kde nebyl použit biochar. Poté s postupným zvyšováním biocharu docházelo ke snižování, a to až na 3,4 cm/h. U Semic byl klasifikován hlinito-písčité půdní druh.

Zatímco Major et al. (2012) prokázali, neovlivnění nenasycené hydraulické vodivosti po aplikaci biocharu. Důvodem může být, že různé typy půd a odlišné aplikační metody působí na nenasycenou hydraulickou vodivost jinak. Což potvrzuje i tato práce, jelikož u experimentované varianty Humpolec, byly výsledky opravdu kolísavé. Kontrolní varianta, kde nebyl použit biochar činila K 1,56 cm/h. Po přidání první aplikační dávky biocharu došlo ke zvýšení nenasycené hydraulické vodivosti na K 2,01 cm/h. S druhou aplikační dávkou biocharu nastalo snížení nenasycené hydraulické vodivosti ovšem s třetí aplikační dávkou biocharu došlo opět ke zvýšení. Až u posledních dvou experimentovaných variant s 5 % a 10 % biocharu byly výsledky stejné jako na začátku u kontrolní varianty, bez použití biocharu.

7 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo vyhodnotit vliv biocharu na nenasycenou hydraulickou vodivost a vodoodpudivost půdy.

Pro účely laboratorního experimentu byly odebrány porušené i neporušené půdní vzorky ze třech lokalit v České republice v hloubce 0-20 cm. Na základě Českého klasifikačního systému půd byly určeny půdní typy. Jednalo se o lokalitu Semice ve Středočeském kraji s půdním typem regozem a hlinito-písčitého půdní druh. Druhá lokalita Milčice byla také ze Středočeského kraje ovšem s půdním typem černice a písčitého půdním druhem. Poslední lokalita byla Humpolec z kraje Vysočina, kde půdní typ byl klasifikován jako kambizem. Pomocí standardizovaných podmínek byly určeny základní vlastnosti půd, na kterých poté probíhal experiment. Vysokoteplotní biochar byl získán od Akademie věd České republiky, Ústav chemických procesů.

V laboratoři byly půdní vzorky rozděleny na šest variant, které byly následně smíchány s určitým množstvím biocharu, konkrétně byla vždy jedna varianta s 0 % biocharu, takzvané kontrolní. Následovalo smíchání s množstvím biocharu 0,5 %, 1 %, 2,5 %, 5 % a 10 %. Nenasycená hydraulická vodivost byla měřena ve třech opakování pomocí Minidisk infiltrometrů do ustáleného proudění, výsledky byly zapisovány po 15 vteřinách. Dle Woodinga 1968 byla vypočítána nenasycená hydraulická vodivost.

První hypotéza změní se nenasycená hydraulická vodivost po aplikaci biocharu do půdních vzorků? Bylo prokázáno, že po aplikaci biocharu do půdních vzorků se změnila nenasycená hydraulická vodivost. Ovšem u každé experimentované lokality tomu bylo jinak. Na půdních vzorcích ze Semic došlo ke snižování nenasycené hydraulické vodivosti na základě přidávání větších aplikačních dávek biocharu. Čím větší množství biocharu obsahoval půdní vzorek, tím nižší byla nenasycená hydraulická vodivost. Odlišných výsledků bylo dosaženo u lokality Humpolec, kde s první aplikační dávkou biocharu došlo ke zvýšení nenasycené hydraulické vodivosti. S další vyšší aplikační dávkou biocharu ke snížení, poté opět ke zvýšení a u posledních dvou nejvyšších dávek biocharu nastalo snížení na hodnotu nenasycené hydraulické vodivosti kontrolní varianty bez použití biocharu. Poslední experimentovaná lokalita Milčice dosáhla také jiných výsledků. Po přidání první aplikační dávky biocharu byla zvýšena nenasycená hydraulická vodivost, ovšem po druhé aplikační dávce došlo ke snížení. Poté čím více biocharu obsahoval půdní vzorek, byla zvýšena i nenasycená hydraulická vodivost. Byla potvrzena hypotéza, že aplikace biocharu má vliv na nenasycenou hydraulickou vodivost ať zvýšením či snížením. Každopádně určitě ale záleží na množství použitého biocharu, půdním typu půdy a druhu experimentu.

8 Literatura

- Agegnehu G, Srivastava AK, Bird MI. 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology* **119**:156-17.
- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Lee SS. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* **99**:19-33.
- Ahuja LR, Wendroth O, Nielsen DR. 1993. Relationship between initial drainage of surface soil and average profile saturated conductivity. *Soil Science Society of America Journal* **1**:19- 25.
- Aird P. 2019. Chapter 3 – Deepwater Pressure Management. *Deepwater Drilling* **1**:69-109.
- Amoakwah E, Frimpong KA, Okae-Anti D, Arthur E. 2017. Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam. *Geoderma* **3**:189-197.
- Andrea RD, Boadu FK. 2001. Hydraulic conductivity of Soils from Grain-size Distribution: New Models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **10**:899-900.
- Bachmann J, Goebel MO. 2022. Soil water repellency. Reference module in Earth Systems and Environmental Sciences **20**:91-146.
- Balaghi S, Ghal-Eh N, Mohammadi A, Vega-Carrillo HR. 2018. A neutron scattering soil moisture measurement system with a linear response. *Applied Radiation and Isotopes* **142**:167-172.
- Basset CH, Najm MA, Ghezzehei T, Hao X, Daccache A. 2023. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and Tillage Research* **2**:105-157.
- Bedrna Z a kol. 1989. Podne režimy. Veda, Bratislava
- Blanco-Canqui H. Biochar and Soil Physical Properties. 2017. Review – Analysis – Soil Physical Hydrology **4**:687-711.
- Dane JH, Topp GC. 2002. Methods of soil analysis, part 4, physical methods. SSSA book series no 5. Soil science Society of America Madison USA. ISBN: 0-89118-841-X.
- Datta S, Taghvaeian S. 2023. Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States: A systematic review of literature. *Agricultural Water Management* **27**:108-148.
- Ding Z, Ge Y, Gowd S, Singh E, Kumar V, Chaurasia D, Kumar V, Rajendran K, Wu P, Lin F, Harirchi S, Sirohi R, Binod P. 2023. Production of biochar from tropical fruit tree residues and ecofriendly applications – A review. *Bioresource Technology* **15**:128-903.
- Doan TT, Henrydestureaux T, Rumpel C, Janeau JL, Jouquet P. 2015. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment **51**:147-154.

- Dohnal M, Dusek J, Vogel T. 2010. Improving Hydraulic Conductivity Estimates from Minidisk Infiltrometer Measurements for Soils with Wide Pore-Size Distributions. *Soil Science Society of America Journal* **3**:804-811.
- Dong J, Lyu H, Xu G. 2023. A nuclear magnetic resonance based quantification of pore water distribution in unsaturated soils. *Transportation Geotechnics* **38**:10-92.
- Flammini A, Morbidelli R, Corradini C, Dari J, Saltali C, Goyal A, Govindaraju RS. 2023. A statistical approach for the assessment of the saturated hydraulic conductivity applied to an Austrian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **45**:101-310.
- Flint AL, Flint LE. 2002. Particle density. Pages 229-240 in Dane JH, Topp GC, editors. *Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Fu Q, Zhao H, Li T, Hou RJ, Liu D, Ji Y, Zhou Z, Yang LY. 2019. Effects of biochar addition on soil hydraulic properties before and after freezing-thawing. *Catena* **17**:112-124.
- Fu Y, Tian Z, Amoozegar A, Heitman J. 2019. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. *Soil and Tillage Research* **193**:114-121.
- Giménez D, Perfect E, Rawls WJ, Pachepsky Y. 1997. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. *Engineering Geology* **4**:161-183.
- Gholami P, Dinpazhoh L, Khataee A, Orooji Y. 2019. Sonocatalytic activity of biochar – supported ZNO nanorods in degradation of gemifloxacin: Synergy study, effect of parameters and phytotoxicity evaluation. *Ultrasonics Sonochemistry* **55**:44-56.
- Glaser B, Wiedner K, Seelig S, Schmidt HP, Gerber H. 2015. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development* **35**:667-678.
- Hallett PD, Baumgartl T, Young IM. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society of America Journal* **65**:184-190.
- Hamidzadeh Z, Ghorbannezhad P, Ketabchi MR, Yeganeh B. 2023. Biomass-derived biochar and its application in agriculture. *Fuel* **341**:127-171.
- Hardie M, Clothier B, Bound S, Oliver G, Close D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil* **3**:347-361.
- Huang WH, Wu RM, Chang JS, Juang SY, Lee DJ. 2023. Manganese ferrite modified agricultural waste-derived biochars for copper ions adsorption. *Bioresource Technology* **1**:128-303.
- Hussaian R, Ravi K. 2021. Investigating unsaturated hydraulic conductivity and water retention characteristics of compacted biochar-amended soils for potential application in bioengineered structures. *Journal of Hydrology* **63**:127-140.
- Chen T, Luo L, Deng S, Shi G, Zhang S, Zhang Y, Deng O, Wang L, Zhang J, Wei L. 2018. Sorption of tetracycline on H₃PO₄ modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresource Technology* **26**:431-437.
- Indoria AK, Sharma KL, Reddy KS. 2020. Chapter 18 – Hydraulic properties of soil under warming climate. *Climate change and Soil interactions* **2**:473-508.

- Iovino M, Pekárová P, Hallett PD, Pekár J, Lichner L, Mataix-Solera J, Alagna V, Walsh R, Raffan A, Schacht K, Rodný M. 2018. Extent and persistence of soil water repellency induced by pines in different geographic regions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **66**:360–368.
- Jones DL, Rousk J, Edwards-Jones G, DeLuca TH, Murphy DV. 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry* **4**:113-124.
- Khaledi S, Delbari M, Galavi H, Bagheri H, Chari M. 2023. Effects of biochar particle size, biochar application rate, and moisture content on thermal properties of an unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* **22**:105-579.
- Kodešová R, Nikodem A, Jakšík O, Klement A, Fér M. 2015b. Metodika průzkumu hydroopedologických podmínek na území ovlivněném vodní erozí. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd, Praha.
- Kodešová R. 2019. Modelování v pedologii. Česká zemědělská univerzita v Praze, katedra pedologie a ochrany půd, FAPPZ. Praha.
- Kozák J, Němeček J, Borůvka L, Lérová Z, Němeček K, Kodešová R, Janků J, Jacko K, Hladík J, Zádorová T. 2009. Atlas půd České republiky. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Kutílek M, Jenděle L, Panayiotopoulos KP. 2006. The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-modal soils. *Soil and Tillage Research* **1**:27-37.
- Leeuwen C. 2022. 9 – Terroir: The effect of the physical environment on vine growth, grape ripening, and wine sensory attributes. *Managing Wine Quality* **2**:314-393.
- Lehmann J, Joseph S. 2009. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. In: Lehmann J, Joseph S (eds), Earth Scan, London & Sterling. London, GB: Easrthscan 2009
- Lehmann J, Kinyangi J, Solomon D. 2007. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms. *Biochemistry* **85**(1):45-57. DOI:10.1007/s10533-007-9105-3
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday W, Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil biology and Biochemistry* **9**:1812-1836.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry* **43**(9):1812-1836. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Lei O, Zhang R. 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Soils and Sediments* **13**:1561-1572.

- Li J, Shao X, Huang D, Liu K, Shang J, Zhao T, Yang X. 2022. Short-term biochar effect on soil physicochemical and microbiological properties of a degraded alpine grassland. *Pedosphere* **3**:426-437.
- Lima JZ, Ogura AP, Silva CM, Nauerth IMR, Rodrigues VGS, Espíndola EL, Marques JP. 2022. Biochar – pesticides interactions: An overview and applications of wood feedstock for atrazine contamination. *Journal Of Environmental Chemical Engineering* **5**:108-192.
- Ma Y, Qu L, Wang W, Yang X, Lei T. 2016. Measuring soil water content through volume/mass replacement using a constant volume container. *Geoderma* **271**:42-49.
- Madžarić S, Kos M, Drobne D, Hočevar M, Kokalj AJ. 2018. Integration of behavioral tests and biochemical biomarkers of terrestrial isopod *Porcellio scaber* is a promising methodology for testing environmental safety of chars **4**:804-811.
- Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. 2012. Nutrient leaching in a Colombian savanna oxisol amended with biochar. *Journal of Environmental Quality* **41**:1076-1086.
- METER Group Inc. 2018. Mini Disk Infiltrometer. METER Group Inc., Pullman, Washington.
- Moon DH, Hwang I, Chang YY, Koutsospyros A, Cheong KH, Ji WH, Park JH. 2017. Quality improvement of acidic soils by biochar derived from renewable materials. *Environmental Science and Pollution Research* **24**:4194-4199.
- Mulabagal V, Baah DA, Egiebor NO, Chen WY. 2015. Biochar from Biomass: A Strategy for Carbon Dioxide Sequestration, Soil Amendment, Power Generation, and CO₂ Utilization. *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* 1-31. DOI: 10.1007/978-1-4614-6431-0_80-1
- Nascimento FAL, Silva ALP, Freitas FTO, Fernandes RDM, Veimrober Junior LA. 2022. Sensors and frequencies of soil water content measurement affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture* **194**:106-176.
- Němeček J, Rohošková M, Macků J, Vokoun J, Vavříček D, Novák P. 2008. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Nimmo JR. 2005. Porosity and pore-size distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment* **1**:295-303.
- Nourani V, Ojaghi A, Zhang Y. 2022. Saturated and unsaturated seepage analysis of earth-fill dams using fractal hydraulic conductivity function and its verification. *Journal of Hydrology* **6**:128-143.
- Oliveira FR, Patel AK, Jaisi DP, Adhikari S, Lu H, Khanal SK. 2017. Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology* **2**:110-122.
- Pavlů L, Kodešová R. 2021. The impact of various mulch types on soil properties controlling water regime of the Haplic Fluvisol. *Soil and Tillage Research* **205**: 6-12.

- Pospíšil F. 1981. Group – and fractional composition of the humus of different soils. In transactions of the fifth international soil science conference **1**:135-138. Research Institute for Soil Improvement Prague
- Prax A, Jandák J, Pokorný E. 1997. Půdoznalství. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.
- Rhoades JD, Chanduvi F, Lesch S. 1999. Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57, Rome, Italy.
- Saeedi AH. 2022. Characterizing physical and hydraulic properties of soils in Al-Ahsa, Kingdom of Saudi Arabia. Saudi Journal of Biological Sciences **5**:3390-3402.
- Samadoney M, Awad HM, Tyagi VK, Tawfik A. 2022. Chapter 21 – Values added products recovery from sludge. Clean energy and Resource Recovery **2**:373-380.
- Saravanan S, Parthasarathy KS, Sivaranjani S. 2019. Chapter 10 – Assessing Coastal Aquifer to Seawater Intrusion: Application of the GALDIT Method to the Cuddalore Aquifer, India. Coastal zone Management **2**:233-250.
- Seelheim F. 1880. Methods for determining the permeability of the soil. Zeitschrift für Analytische Chemie **1**: 378-418.
- Shackley S, Carter S, Knowles T, Middelink E, Haefe S, Haszeldine S. 2012. Sustainable gasification biochar systems. A case study of rice husk gasification in Cambodia, part II: field trial results, carbon abatement, economic assessment and conclusions. Energy Policy **41**:618-623. DOI: 10.1016/j. enpol.2011.11.023
- Shapiro CA, Elmore RW. 2017. Agricultural Crops. Encyclopedia of Applied Plant Sciences **3**:1-8.
- Shi G, Wu Y, Li T, Fu Q, Wei Y. 2022. Mid – and long-term effects of biochar on soil improvement and soil erosion control of sloping farmland in a black soil region, China. Journal of Environmental Management **3**:115-192.
- Schmutge TJ, Jackson TJ, Mckim HL. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Research **6**:961-979.
- Skjemstad JO, Baldock JA. 2008. Total and organic carbon. Pages 225-237 in: Carter MR, Gregorich EG, editors. Soil Sampling and Method of Analysis. Canadian Society of SoilScience, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Sohi SP, Krull E, Capel EL, Bol R. 2010. Chapter 2–A Review of Biochar and Its use and Function on Soil. Advances in Agronomy **10**:47-82.
- Šimek M, Borůvka L. 2019a. Fyzikální vlastnosti půdy. Pages 326-342 in Šimek M, editor. Živá půda: Ekologie, využívání a degradace půdy. Academia, Praha.
- Špička A. 1964. Vlastnosti půdy a její zpracování. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Tang H, Chen M, Wu P, Faheem M, Feng Q, Lee X, Wang S, Wang B. 2023. Engineered biochar effects on soil physicochemical properties and biota communities: A critical review. Chemosphere **2**:137-155.

- Turski M, Lipiec J, Chodorowski J, Sokolowska Z, Skic K. 2022. Vertical distribution of soil water repellency in ortseinic soils in relation to land use. *Soil and Tillage Research* **3**:105-220.
- Verheijen FGA, Jeffery S, Bastos AC, van der Velde M, Diafas I. 2010. Biochar application to soils – a critical scientific review of effects on soil properties, processes and function. EUR24099EN. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Villagra-Mendoza K, Horn R. 2018. Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics* **32**:373-378.
- Wallis MG, Horne DJ. 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science* 20:98-103.
- Wang J, Wang S. 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production* **1**:1002-1022.
- Weber K, Quicker P. 2018. Properties of biochar. *Fuel* **217**:240-261.
- Wei L, Li F, Cai D, Liu Y, Luo D, Wen Y. 2023. Investigating the effect of biochar application on raindrop-driven soil erosion under laboratory rainfall experiments. *Geoderma* **4**:116-291.
- Wu D, Peng W, Bao L, Yu X, Dong X, Lai M, Liang Z, Xie S, Jacobs D. 2022. Biochar alleviating heavy metals phytotoxicity in sludge-amended soil varies with plant adaptability. *Environmental Research* **1**:114-248.
- Yadav V, Jain S, Mishra P, Khare P, Shukla A, Singh AK. 2019. Amelioration in nutrient mineralization and microbial activities of sandy loam soil by short term field aged biochar. *Application Soil Ecology* **13**: 144-155.
- Yang Y, Sun K, Liu J, Chen Y, Han L. 2022. Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of The Total Environment* **8**:156-333.
- Yost JL, Hartemink AE. 2019. Chapter four – Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in Agronomy* **1**:217-310.
- Zbírál J. 2002. Analýza půd I – Jednotné pracovní postupy. ÚKZÚZ, Brno.
- Zhu Z, Zhao Ch, Jia X, Wang J, Shao M. 2023. Prediction of deep soil water content (0–5 m) with in-situ and remote sensing data. *Catena* **2**:106-852.
- Zornoza R, Moreno-Barriga E, Acosta JA, Munoz MA, Faz A. 2016. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere* **144**:122-130.
- Zwieten LV, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* **32**:235-24

