

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká
zemědělská
univerzita
v Praze**

**Dlouhodobý vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické
charakteristiky půdy**

Diplomová práce

Bc. Eliška Macků

Ochrana a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce prof. Ing. Jiřina Száková, CSc.

Konzultant doc. Mgr. Lukáš Trakal, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Dlouhodobý vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky 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 vedoucí mé diplomové práce paní prof. Ing. Jiríně Szákové, CSc., za její trpělivost, cenné rady, vstřícnost a čas, který mi při tvorbě práce věnovala. Děkuji také panu doc. Mgr. Lukášovi Trakalovi, Ph.D. za poskytnuté informace a paní Ing. Janě Najmanové a Ing. Haně Zámečnickové za pomoc v laboratoři. V neposlední řadě bych moc ráda poděkovala mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Dlouhodobý vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy

Souhrn

Vhodné fyzikálně-chemické charakteristiky půdy jsou z hlediska půdní úrodnosti, rostlinné produkce a rostoucího počtu obyvatel planety Země velice aktuální téma. Tato diplomová práce se zabývá tématem dlouhodobého vlivu biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy. Využití biocharu by mohlo být do budoucna šetrným řešením pro zlepšení požadovaných charakteristik půdy.

V této diplomové práci byla aplikována série analytických metod, které vedly k posouzení vlivu aplikace biocharu na základní fyzikálně-chemické charakteristiky půdy klasifikované jako písčitohlinitá regozemě v polních podmínkách. Biochar použitý pro tuto studii byl vyroben z dřevní štěpky. Půda byla ošetřena biocharem a biocharem ve směsi s chlévským hnojem a vzorky byly odebrány 6 měsíců po aplikaci. Směs biocharu a chlévského hnoje byla aplikována do půdy v různém procentickém podílu (MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar v poměru 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar v poměru 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar v poměru 50:50).

V odebraných vzorcích byly stanoveny vybrané charakteristiky půdy pomocí různých metod. Výměnné pH bylo stanoveno použitím 0,01 mol/L CaCl_2 , kationtová výměnná kapacita (KVK) pomocí metody ISO 11 260 a dostupný obsah makro/mikroživin extrakcí metodou Mehlich III. Celkový C, N, S a C/N byl stanoven s pomocí CHNOS elementárního analyzátoru s využitím teplotně vodivostního detektoru a dostupný obsah C a N pak pomocí automatizovaného systému SKALAR SANplus s kontinuálním průtokovým segmentačním analyzátozem. Následně byly hodnoceny rozdíly mezi jednotlivými variantami a kontrolou, kdy byl použit výpočtový program Microsoft Excel pro základní statistické vyhodnocení a software Statistica 12 pro výpočet jednofaktorové ANOVY s využitím Tukeyova HSD testu.

Výsledky byly zpracovány v podobě grafů a tabulek. Aplikace biocharu společně s chlévským hnojem vedla ke zvýšení hodnoty pH, KVK, vybraných dostupných množství mikro a makroživin jako K, Mg, Cu, Fe, Mn, Na, dusičnanů, amonného dusíku i rozpustného C. Byla dokázána schopnost biocharu zabránit vyplavování dusíku, který je považován za velice mobilní prvek, z půdy. Lze tedy konstatovat, že biochar vyrobený z dřevní štěpky v kombinaci s chlévským hnojem má pozitivní vliv na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy a zároveň dokáže zlepšit zásobenost půdy živinami.

Klíčová slova: biochar, živiny, dlouhodobý účinek, dostupnost

The long-term biochar effect on selected physicochemical characteristics of soils

Summary

Appropriate physicochemical soil characteristics are a very topical issue in terms of soil fertility, crop production, and the growing population of planet Earth. This thesis deals with the topic of long-term effects of biochar on selected physicochemical characteristics of soil. The use of biochar could be a future friendly solution to improve the desired soil characteristics.

In this thesis, a series of analytical methods were applied to assess the effect of biochar application on the basic physicochemical characteristics of soil classified as loamy-sand Regosol under field conditions. The biochar used for this study was made from wood chips. This soil was treated with the biochar, farmyard manure and their blend and samples were collected 6 months after application. The mixture of biochar and farmyard manure was applied to the soil in different percentages (MB10 - manure + high-temperature biochar in 90:10 ratio, MB50 - manure + high-temperature biochar in 50:50 ratio, MBh50 - manure + medium-temperature biochar in 50:50 ratio).

Selected soil characteristics were determined in the collected samples using different methods. The exchangeable pH was determined using 0,01 mol/L CaCl₂, the cation exchange capacity (CEC) using the ISO 11 260 method and the available macro/micronutrient content by extraction using the Mehlich III method. Total C, N, S, and C/N were measured with the use of a CHNOS elemental analyser using a thermal conductivity detector, and available C and N contents were quantified by means of an automated SKALAR SANplus system with a continuous flow segmentation analyser. Subsequently, the differences between the variants and the control were evaluated for when the Microsoft Excel calculation program was used for the basic statistical evaluation and Statistica 12 software was used to calculate the single-factor ANOVA using Tukey's HSD test.

The results were processed in the form of graphs and tables. The application of biochar along with manure resulted in an increase in pH, CEC, and selected available amounts of micro and macronutrients such as K, Mg, Cu, Fe, Mn, Na, nitrate, ammonium nitrogen, and soluble C. The ability of biochar to prevent the leaching of nitrogen, which is considered a highly mobile element, from the soil, was demonstrated. It can therefore be concluded that biochar produced from wood chips in combination with manure has a positive effect on selected physicochemical soil characteristics and can also improve soil nutrient supply.

Keywords: biochar, nutrients, long-term effect, availability

Obsah

1	Úvod	9
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	10
3	Přehled literatury	11
3.1	Biochar	11
3.2	Výroba biocharu.....	12
3.2.1	Pomalá pyrolýza	13
3.2.2	Rychlá pyrolýza	13
3.2.3	Biochar podle pyrolýzní teploty	14
3.3	Využití biocharu	14
3.4	Vliv biocharu na klimatickou změnu	15
3.5	Klíčové vlastnosti biocharu	16
3.5.1	Vodní kapacita biocharu	16
3.5.2	Stabilita biocharu v půdě	17
3.5.3	Reverzibilní zadrž živin	17
3.6	Vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy	17
3.6.1	Vliv biocharu na půdní pórovitost	18
3.6.2	Vliv biocharu na objemovou hmotnost půdy.....	19
3.6.3	Vliv biocharu na půdní agregaci	19
3.6.4	Vliv biocharu na schopnost půdy zadržovat vodu	20
3.6.5	Vliv biocharu na pH půdy.....	21
3.6.6	Vliv biocharu na elektrickou vodivost.....	21
3.6.7	Vliv biocharu na kationtovou výměnnou kapacitu půdy	22
3.6.8	Vliv biocharu na živiny v půdě.....	22
3.6.8.1	Dusík	23
3.6.8.2	Fosfor	24
3.6.8.3	Draslík	25
3.6.9	Zlepšení účinnosti používání hnojiv	26
3.6.9.1	Biochar z dřevní biomasy.....	26
3.6.9.2	Chlévský hnůj.....	26
3.7	Potenciálně negativní vliv biocharu.....	27
4	Metodika	29
4.1	Vzorkování.....	29
4.2	Materiál.....	30
4.3	Analytické metody.....	31
4.3.1	Stanovení půdní reakce.....	31
4.3.2	Stanovení kationtové výměnné kapacity	31

4.3.3	Stanovení obsahu dostupných živin.....	31
4.3.4	Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N	32
4.3.5	Stanovení dostupného obsahu C a N	32
4.4	Statistické vyhodnocení	32
5	Výsledky	33
5.1	Horizontální odběr vzorků – do 25 cm.....	33
5.1.1	Stanovení půdní reakce.....	33
5.1.2	Stanovení kationtové výměnné kapacity	34
5.1.3	Stanovení obsahu dostupných živin.....	35
5.1.3.1	Makroživiny.....	35
5.1.3.2	Mikroživiny	37
5.1.4	Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N	39
5.1.5	Stanovení dostupného obsahu C a N	42
5.2	Vertikální odběr vzorků – do 100 cm.....	43
5.2.1	Stanovení půdní reakce.....	43
5.2.2	Stanovení kationtové výměnné kapacity	44
5.2.3	Stanovení obsahu dostupných živin.....	45
5.2.3.1	Makroživiny.....	45
5.2.3.2	Mikroživiny	47
5.2.4	Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N	49
5.2.5	Stanovení dostupného obsahu C a N	54
6	Diskuze	56
7	Závěr.....	61
8	Literatura.....	63

1 Úvod

Téma zhoršujícího se stavu zemědělských půd je, se stále narůstající lidskou populací, čím dál tím více aktuální. Do roku 2050 je očekáváno, že lidská populace dosáhne 9 miliard. Tím bude vyvinut tlak na produkční schopnost půdy a globální potravinový systém, čímž se bude muset zemědělská produkce zvýšit o 70–100 % (Bindraban et al. 2012). Mezi hlavní důvody zhoršujícího se stavu půd patří nesprávné obhospodařování, eroze, zasolení, kontaminace, nadměrné využívání syntetických hnojiv, která jsou často spojována s okyselením a degradací půdy a problémy s lidským zdravím (Adekiya et al. 2020), zhoršování půdních fyzikálně-chemických charakteristik jako je např. obsah živin, půdní agregace, vodní režim půd, pH, pórovitost, objemová hmotnost apod. Syntetická hnojiva jsou velice finančně nákladná a pro drobné zemědělce nedostupná. Proto se jako slibná technologie do budoucna jeví biochar, který vzniká spalováním zemědělských a lesnických odpadních materiálů (Spears 2018). Aplikace organických materiálů, jako je právě biochar, by mohla zvýšit úrodnost půdy a produkci plodin tím, že dochází k minimalizaci vyplavování živin nebo jsou živiny přímo dodávány rostlinám (Adekiya et al. 2020).

Biochar je látka s vysokým obsahem uhlíku. Výroba probíhá prostřednictvím procesů, kdy je čistý organický odpadní materiál přeměňován na cenný produkt s charakteristickými fyzikálně-chemickými vlastnostmi, který může přispět ke zlepšení fyzikálně-chemických charakteristik půd (Lehmann & Joseph 2009; Pohořelý et al. 2019) a k dobrému půdnímu prostředí pro lepší výkonnost plodin (Adekiya et al. 2020). Jednotlivé vlastnosti biocharu jsou silně ovlivněny vstupní surovinou a teplotou pyrolýzy. Bylo dokázáno, že biochar vyrobený z rostlinného odpadního materiálu není primárně užíván jako zdroj živin. Proto je velice často kombinován s dusíkatými hnojivy jako je např. kravský hnůj, nebo je z dusíkatých hnojiv přímo vyráběn.

Biochar má schopnost zmírnit klimatickou změnu skrze sekvestraci uhlíku a adsorbovat CO₂ z atmosféry. Tím je celá technologie a výroba biocharu považována za udržitelnou technologii a uhlíkově negativní proces (Abel et al. 2013; Spears 2018).

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

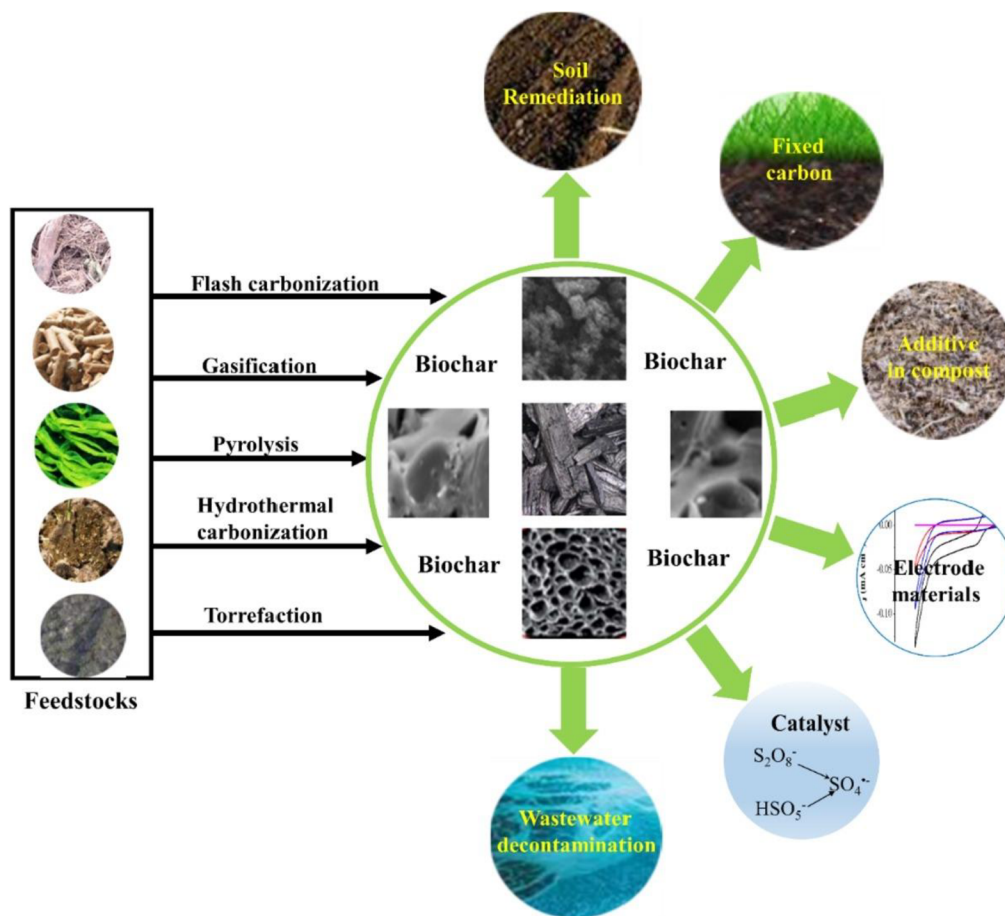
V posledních letech je velká pozornost věnována využití tzv. biocharu (pyrolyzované biomasy) pro zlepšení fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy. Chování biocharu v půdě pak závisí na fyzikálně-chemických i biologických vlastnostech půdy, kdy se bude biochar chovat jinak v půdách s nízkou sorpční kapacitou a jinak v půdách s vysokým obsahem jílovitých minerálů a organické hmoty. Důležitá je role biocharu ve zlepšení půdní struktury a zvýšení retenční schopnosti půdy. Je známo, že biochar připravený pyrolýzou dřevní biomasy zpravidla neslouží v půdě jako zdroj živin, protože jejich obsah v biocharu je nízký nebo jsou živiny v biocharu pevně vázány a neuvolňují se do půdního roztoku. Proto se aplikace biocharu často kombinuje s aplikací hnojiv, zejména dusíkatých. Biochar v tomto případě může snížit mobilitu dusíku v půdě a zamezit jeho vyplavování. Cílem této práce je tedy zhodnotit účinek aplikace biocharu společně s chlévským hnojem na mobilitu živin v ošetřené půdě a míru vyplavování těchto živin.

Hypotéza: Společná aplikace biocharu a chlévského hnoje zlepší zásobenost půdy živinami.

3 Přehled literatury

3.1 Biochar

Biochar neboli biouhel je substance podobná dřevěnému uhlí (Spears 2018), tj. porézní látka bohatá na uhlík (Pohořelý et al. 2019). Na rozdíl od dřevěného uhlí neslouží k produkci tepelné energie, ale pro aplikaci do půdy a zlepšení půdních vlastností (Lehmann & Joseph 2009). Mezi možné metody výroby uhlí ze vstupních surovin patří karbonizační procesy jako rychlá karbonizace, zplyňování, pyrolýza, hydrotermální karbonizace a torefakce (Obr. 1).



Obr. 1 Schéma výroby biocharu (zdroj: Wang & Wang 2019)

Příprava biocharu pyrolýzou je snadná a levná, což přispívá k ekologické udržitelnosti (Wang & Wang 2019). Jako vstupní biomasa slouží organický odpadní materiál zemědělského a lesnického původu – dřevní štěpka, listí, odumřelé rostliny, zemědělské zbytky, hnůj (Spears 2018) či kaly pocházející z čistíren odpadních vod apod. Tyto běžné odpady jsou ve světě produkovány ve velkém množství a jejich využití ve formě biocharu by mohlo být jednou z možností, jak zajistit udržitelnost životního prostředí (Lehmann & Joseph 2009; Wang & Wang 2019). Například při pyrolýze vstupních surovin na bázi dřeva vznikají hrubé a odolné biochary s vysokým obsahem uhlíku (až 80 %), protože se ve zbytcích biocharu zachovává tuhá lignitická povaha výchozího materiálu (Kookana et al. 2011).

Mezi fyzikální vlastnosti biocharu patří tmavé zbarvení, poréznost, lehkost, jemnozrnnost (Spears 2018), stabilní struktura a velký specifický povrch (Wang & Wang 2019). Proto je biochar využíván ke zvýšení zadržky vody a živin v půdě (Pohořelý et al. 2019).

Chemické složení biocharu je ovlivněno druhy vstupních surovin a technikami zahřívání používaných k výrobě (Spears 2018). Hlavní stavební jednotkou je z 50-95 % uhlík (Pohořelý et al. 2019). Zbývající podíl tvoří ostatní prvky jako je kyslík, dusík, vodík a popeloviny (vápník, draslík atd.) (Novak et al. 2009). Aromatické uspořádání struktury z aromatických sloučenin charakterizovaných šesti atomy uhlíku inhibuje rozklad v půdě. Pomocí prvků kyslíku, vodíku a uhlíku lze stanovit náchylnost biocharu k oxidativním změnám (Spokas 2010).

Ačkoli je přidávání pyrolyzované biomasy do půdy již dlouho používanou technikou, samotná technologie biocharu je považována za relativně moderní metodu sekvestrace uhlíku. Sekvestrace neboli ukládání uhlíku do půdy spočívá v tom, že uhlík v půdě nepodléhá následné oxidaci a rozkladu. Metoda vychází z 2000 let staré techniky v povodí Amazonky, kde domorodí obyvatelé vytvořili úrodné a bohaté půdy dnes známé jako Terra Preta (doslova „tmavá země“). Zda půdu vytvořili domorodci záměrně, nebo se jednalo o vedlejší produkt zemědělských metod, není zřejmě dosud známo (Spears 2018). Na základě poměru kyslíku a uhlíku (0,008) lze odhadnout životnost biocharu až na 51 000 let, což zajišťuje jeho dlouhodobý účinek (Spokas 2010).

Biochar je díky svým vlastnostem a schopnostem do budoucna slibnou technologií pro regenerativní zemědělství. Zlepšováním půdních vlastností, zvyšováním míry retence vody a snižováním spotřeby umělých hnojiv pomáhá zmírňovat změnu klimatu. Pozitivní vliv na půdní úrodnost navíc podporuje růst rostlin, které spotřebovávají CO₂ z atmosféry, což dělá z procesu výroby biocharu uhlíkově negativní proces (Spears 2018).

3.2 Výroba biocharu

Výroba biocharu pyrolýzou spočívá v termochemické přeměně vstupní suroviny bez přístupu kyslíku v pyrolýzních nebo zplyňovacích reaktorech (Pohořelý et al. 2019). Prostřednictvím procesu pyrolýzy se čistý organický materiál (nejčastěji odpadní) přeměňuje na pevnou část (biochar), plyn (syngas), bioolej a teplo. Biochar je pevná část s charakteristickými fyzikálně-chemickými vlastnostmi, která může přispět k dobrému půdnímu prostředí pro lepší výkonnost rostlin (Adekiya et al. 2020). Plyn (syngas) obvykle obsahuje oxid uhličitý, vodík a oxid dusný. Bioolej lze následně čistit a dále zpracovávat k výrobě kvalitnějších paliv, zplyňovat k výrobě elektrické energie nebo jej lze rafinovat k výrobě chemických surovin, jako jsou pryskyřice, hnojiva s pomalým uvolňováním, a také z něj získávat selektivní potravinářské chemikálie (Lehmann & Joseph 2009). Teplo lze využít k zajištění čisté energie (Spears 2018).

Výběr vhodného zařízení závisí na povaze vstupní suroviny. V případě pyrolyzování velmi vlhkého materiálu je třeba předsušení, které může probíhat v nízkoteplotní sušárně na prvním stupni technologické linky. Zařízení určená pro výrobu biocharu pracují na různých principech. Jedná se např. o využití fluidní vrstvy, nehybné či pomalu se sunoucí vrstvy částic biomasy, o vertikální etážové pece s prohrabováním etáží, o vyhřívání zařízení s jedním či dvěma šneky ve žlabu, s dutým šnekem (spirálou) ve žlabu, s vyhříváním žlabem i vyhřívanou

vnitřní trubkou, dále o rotační pece, o centrifugálně fungující pyrolyzéry, vícestupňové generátory a o další typy pyrolýzních a zplyňovacích zařízení různých velikostí a způsobů provozu (Pohořelý et al. 2019).

Proces pyrolýzy jako celek lze rozdělit na tři fáze. V první fázi procesu dochází při teplotách do 120 °C převážně k sušení materiálu. Druhá fáze probíhá při teplotách od 120 °C do 500 °C a dochází k suché destilaci. Dochází ke štěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměně makromolekulárních struktur na plynné a kapalně organické produkty a pevný uhlík. Třetí fáze probíhá při teplotách od 500 °C do 1200 °C. V této fázi se štěpí produkty suché destilace a dochází k tvorbě plynu (Peer et al. 2019).

Nejvlivnější faktor v procesu pyrolýzy je teplota v generátoru. Ta ovlivňuje kvalitu a výtěžek biocharu, rozklad a volatilitu organických látek v biomase nebo látek vzniklých při samotném procesu a schopnost zadržování vody a živin v půdě. Mezi další faktory patří např. druh použité vstupní biomasy, rychlost ohřevu vstupního materiálu a čas zdržení v aktivní zóně reaktoru (Pohořelý et al. 2019).

Pyrolýzu dělíme dvěma způsoby: podle dosahované teploty a podle doby zdržení paliva. Podle dosahované teploty dělíme pyrolýzu dále na:

- nízko-teplotní pyrolýzu s teplotou do 500 °C,
- středně-teplotní pyrolýzu s teplotou 500–800 °C,
- vysoko-teplotní pyrolýzu s teplotou nad 800 °C.

Podle doby zdržení paliva dělíme pyrolýzu dále na:

- rychlou neboli bleskovou,
- pomalou neboli karbonizační (Peer et al. 2019).

3.2.1 Pomalá pyrolýza

Pomalá neboli karbonizační pyrolýza využívá, jak je již z názvu zřejmé, pomalejší rychlost zahřívání, a to ~ 5 °C/min až 30 °C/min (Lehmann & Joseph 2009). K vložení vstupní suroviny dochází ihned na začátku procesu (Wang & Wang 2019). Maximální teplota procesu činí 400°C a doba zdržení biomasy v reaktoru je od 30 minut do několika hodin. Díky tomu může vstupní surovina nabývat větších rozměrů – celé větve, kmeny apod. Pomalá pyrolýza produkuje oproti rychlé pyrolýze relativně více biocharu než biooleje – 35 % hm. biocharu, 30 % biooleje a 35 % plynu (Lehmann & Joseph 2009; Al Arni 2018).

3.2.2 Rychlá pyrolýza

Oproti tomu rychlá neboli blesková pyrolýza spočívá v rychlém teplotním nárůstu, krátké době zdržení po dobu několika sekund (Lehmann & Joseph 2009; Břendová et al. 2014; Al Arni 2018) a vložení vstupní suroviny do reaktoru poté, co teplota dosáhla žádoucí hodnoty (Wang & Wang 2019). Finální teplota procesu činí 1200 °C. Oproti pomalé pyrolýze produkuje rychlá pyrolýza více pyrolýzního biooleje. Procentuální zastoupení produktů rychlé pyrolýzy je: biochar 15-25 % hm., bioolej 60-75 % hm. a plyn 10-20 % hm. (Lehmann & Joseph 2009; Břendová et al. 2014; Al Arni 2018).

3.2.3 Biochar podle pyrolýzní teploty

Vzniklý biochar lze dělit do 3 skupin podle toho, jaká teplota byla při procesu pyrolýzy použita:

1. **Nízko-teplotní biochar** vzniká při teplotě do 400 °C. K jeho typickým vlastnostem patří především vysoká hydrofobicita, která je způsobena vysokým podílem funkčních skupin. Mezi další vlastnosti patří malá stálost v půdě, nízký specifický povrch, vysoká KVK, nižší pH, vyšší výtěžek. Póry nízko-teplotního biocharu bývají zaneseny primárními dehty, které neprocházejí při takto nízké teplotě transformací na terciární a kvartérní dehty. Dehty tvoří tzv. rozpustný uhlík, který podporuje růst mikroorganismů v půdě.
2. **Středně-teplotní biochar** vzniká při teplotě od 400-600 °C. Středně-teplotní biochar býval považován za kompromis mezi nízko-teplotním a vysoko-teplotním biochemem z hlediska jejich výhod a nevýhod. Dnes lze konstatovat, že středně-teplotní biochar se nevyznačuje žádnou zásadní výhodou nízko-teplotního biocharu ani vysoko-teplotního biocharu.
3. **Vysoko-teplotní biochar** vzniká při teplotě nad 600 °C a na rozdíl od nízko-teplotního biocharu se na jeho povrchu vyskytuje méně funkčních skupin, má nižší hydrofobicitu (Pohořelý et al. 2019) a vyšší obsah uhlíku (Wang & Wang 2019). Dále je typický dlouhodobou stálostí v půdě, velkým specifickým povrchem s otevřenými póry (Pohořelý et al. 2019), které vznikají odstraněním těkavých organických látek při vysoké teplotě (Wang & Wang 2019), a vyšším pH (Pohořelý et al. 2019).

3.3 Využití biocharu

Možností využití biocharu je celá řada, od zlepšování půdních vlastností, snižování množství odpadu až po zmírnění změny klimatu (Spears 2018; Weber & Quicker 2018). Z důvodu intenzifikace zemědělství a aplikace enormního množství průmyslových hnojiv a pesticidů do půdy dochází ke snižování kvality půdy, úbytku organické hmoty a následné degradaci půdy (Peer et al. 2019). Pro případ zlepšení půdních vlastností a kvality půdy lze biochar využít ke:

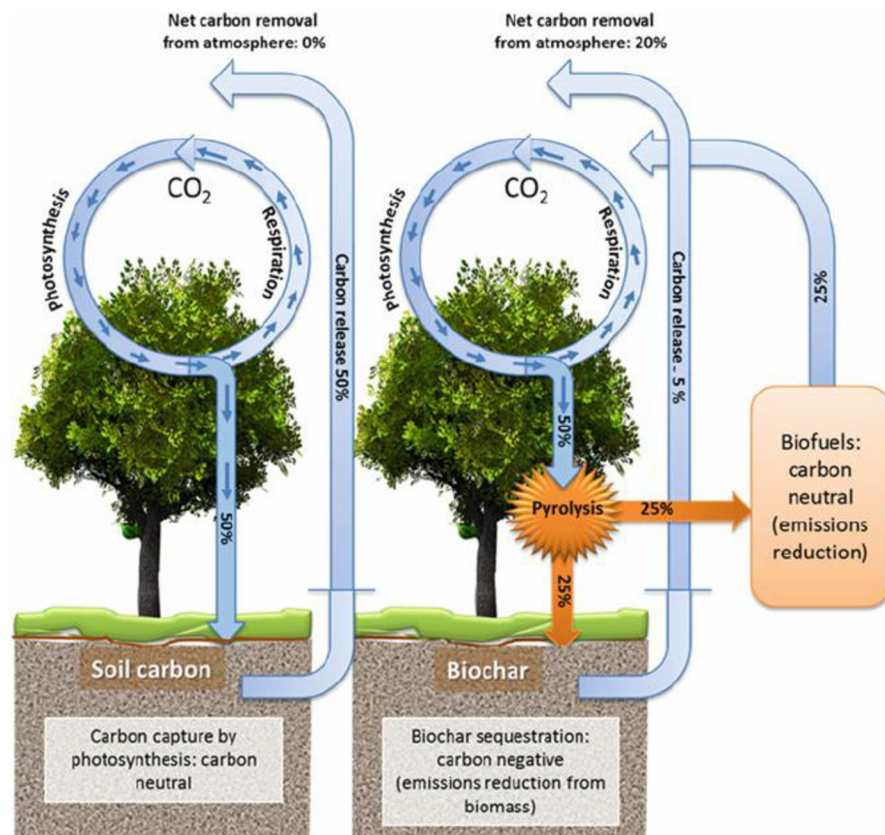
- zlepšení půdní struktury,
- zvýšení retence vody a agregace,
- snížení kyselosti,
- snížení emisí oxidu dusného,
- zlepšení pórovitosti,
- regulaci vyplavování dusíku,
- zlepšení elektrické vodivosti,
- zlepšení mikrobiálních vlastností (Spears 2018),
- zlepšení využití biogenních prvků z hnojiv,
- snížení průniku výživových látek do podzemních vod (Spears 2018; Pohořelý et al. 2019).

Biochar je vhodný i jako přídavek do kompostu, kde zabraňuje ztrátám živin, podporuje mikrobiální aktivitu, čímž urychluje proces kompostování. Dále snižuje zápach, objemovou hmotnost a ztrátu amoniaku v kompostu (Spears 2018).

3.4 Vliv biocharu na klimatickou změnu

Ekosystémy na Zemi směřují k rychlé, závažné a trvalé změně klimatu v důsledku nárůstu antropogenních emisí oxidu uhličitého (CO₂) (Lehmann et al. 2006). Výzkumníci a vědci se dohodli na závazku snížit emise skleníkových plynů o 40-70 % oproti hodnotám z roku 2010 a udržet nárůst teploty na 1,5 °C do poloviny století (Arif et al. 2020). Ke zpomalení či zmírnění této změny jsou zapotřebí včasná opatření s dlouhodobým účinkem. V několika studiích bylo dokázáno, že ke stabilizaci globální průměrné teploty povrchu Země je třeba udržet kumulativní antropogenní emise skleníkových plynů pod maximální hranicí (Broecker 2007; Matthews & Caldeira 2008; Solomon et al. 2009, Allen et al. 2009; Meinshausen et al. 2009). Znamená to, že se budoucí antropogenní emise budou muset blížit nule (Woolf et al. 2010). Lehmann et al. (2006) navrhli biochar z farmářského dřevěného odpadu jako slibnou metodu pro integraci sekvence uhlíku.

Biochar má potenciál napomáhat ke zmírňování klimatické změny prostřednictvím sekvence uhlíku (Obr. 2), dlouhodobého účinku v půdě a často i snížením emisí oxidu dusného (Subedi et al. 2015).



Obr. 2 Sekvestrace uhlíku (zdroj: Verma et al. 2014)

Dále bylo zjištěno, že biochar, který zůstává v původní formě nebo projde fyzikální či chemickou aktivací je vynikajícím adsorbentem CO₂ se stabilní recyklovatelností a regenerací (Arif et al. 2020) a i samotná výroba biocharu snižuje obsah CO₂ v atmosféře, tzn. že se jedná o uhlíkově negativní proces. Při přirozeném rozkladu rostlinné biomasy dochází k uvolňování většího množství CO₂ do atmosféry než v případě, kdy se biomasa použije pro výrobu biocharu (Spears 2018).

Procento uhlíku, které zůstává zachováno z původní biomasy po jejím spálení nebo přirozeném biologickém rozkladu je malé. U procesu spálení tato hodnota činí 3 % a u přirozeného biologického rozkladu tato hodnota odpovídá <10-20 % po 5 až 10 letech. Přeměna uhlíku z biomasy na uhlík z biocharu pomocí procesu pyrolýzy může vést k sekvestraci až 50 % původního uhlíku, což je oproti předešlým zmiňovaným procesům výhodnější (Lehmann et al. 2006).

Při výrobě biocharu dochází k přeměně nestabilního uhlíku z rozkládajícího se rostlinného materiálu na stabilní formu uhlíku, která nereaguje s kyslíkem a je uložena do biocharu. Při aplikaci biocharu do půdy je uhlík v něm bezpečně uložen na bezpečné místo (Spears 2018).

Mezi další možnosti zmírňování změny klimatu pomocí biocharu patří schopnost biocharu zvyšovat provzdušnění půdy, čímž dochází ke snižování aktivity metanogenů a následně i ke snižování emisí metanu. Biochar zvyšuje poměr C:N v půdě, což podle některých výzkumníků může přispět ke snížení emisí oxidu dusného z půdy (Cayuela et al 2014). Ukázalo se také, že biochar je účinným sorbentem organických a anorganických odpadů včetně těžkých kovů a pesticidů (Arif et al. 2020) a může být zdrojem živin, čímž snižuje potřebu a spotřebu chemických hnojiv a opět dochází ke snížení emisí skleníkových plynů. V obohacené půdě pak dochází ke zlepšení úrodnosti rostlin a stimulaci jejich růstu, a výsledkem je více rostlin, které v procesu fotosyntézy spotřebovávají oxid uhličitý z atmosféry (Spears 2018).

3.5 Klíčové vlastnosti biocharu

Pro efektivní použití biocharu jako půdního aditiva je třeba, aby se používaný biochar vyznačoval 3 nejdůležitějšími vlastnostmi. Tyto klíčové vlastnosti jsou:

1. vodní kapacita,
2. stabilita,
3. reverzibilní zadrž živin.

3.5.1 Vodní kapacita biocharu

Vodní kapacita neboli schopnost biocharu zadržovat vodu je přímo či nepřímo měřitelná. Přímé měření je prováděno tak, že je stanovené množství biocharu ponořeno do vody na předem určenou dobu, poté se zváží a změří se jeho nasákavost (Zhang & You 2013; Weil & Brady 2016). Proveditelnost tohoto způsobu měření je jednoduchá, ale má nízké vypovídající vlastnosti. Nepřímé měření probíhá skrze měření objemu pórů a specifického povrchu. Celkový objem pórů, porozita a specifický povrch biocharu mají pozitivní vliv na jeho afinitu k vodě. Na určování vodní kapacity má vliv také hydrofobicita, která je dána především alifatickými skupinami na povrchu biocharu (Zhang & You 2013; Gray et al. 2014; Das et al. 2015; Batista et al. 2018; Pohořelý et al. 2019).

3.5.2 Stabilita biocharu v půdě

Stabilita biocharu je zásadní pro jeho využití v environmentálním managementu, konkrétně pro aplikaci do půdy jako půdní aditivum. Stabilita určuje, jak dlouho bude uhlík obsažený v biocharu sekvestrován a jak dlouho může sekvestrací přispívat ke zmírnění klimatické změny. A dále, jak dlouho bude biochar působit na zlepšení půdních vlastností a kvalitu půdy a vody (Lehmann & Joseph 2009).

Čím vyšší je teplota výroby biocharu, tím jeho stabilita, z důvodu zvyšující se aromaticity, roste. Stanovení stability biocharu je rozdělováno do 3 skupin:

- **Alfa metody** – poskytují nízkonákladové rutinní odhady stability,
- **Beta metody** – mohou být použity pro kalibraci alfa metod a přímo kvantifikují stabilitu biocharu,
- **Gama metody** – poskytují teoretické fyzikálně-chemické základy pro alfa a beta metody (Budai et al. 2013; IBI 2015; Pohořelý et al. 2019).

3.5.3 Reverzibilní zadrž živin

Schopnost biocharu zadržovat živiny je dána veličinami jako je kationtová výměnná kapacita (KVK) a aniontová výměnná kapacita (AVK). Ty jsou určeny kapacitou vázání kationtů a aniontů hlavních makronutrientů rostlin. Biochar usnadňuje zachycování živin tím, že kladně a záporně nabitá místa na povrchu slouží jako donory aniontů a kationtů. Navíc je schopen živiny z půdy a hnojiv udržet déle v blízkosti kořenů (Mukherjee et al. 2011). KVK a AVK lze zesílit tím, že se zvýší pH výluhu biocharu. K tomu je potřeba zvýšit teplotu, se kterou se zároveň zvyšuje právě hodnota pH, z důvodu většího podílu popelotvorných látek vůči látkám těkavým (Lee et al. 2011; Cha et al. 2016).

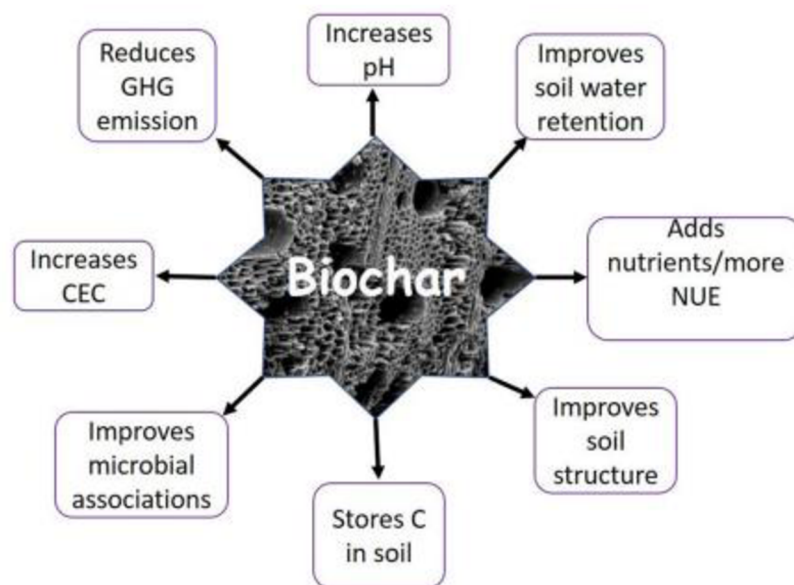
Kationtová výměnná kapacita může s rostoucí teplotou a dobou zdržení biomasy v aktivní zóně reaktoru i klesnout. A to z důvodu stoupající aromaticity, respektive klesajícího podílu alifatických skupin (Lehmann et al. 2011; Kloss et al. 2012; Enders et al. 2012; Weber & Quicker 2018; Pohořelý et al. 2019).

3.6 Vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy

Pro udržitelné hospodaření na písčitéch půdách je potřeba aplikovat takové postupy, které udržují a zlepšují fyzikálně-chemické charakteristiky půdy a zároveň dlouhodobě udržují výnosy rostlin na optimální úrovni. Pro udržení a zlepšení fyzikálně-chemických a biologických charakteristik půdy se běžně používají organická či anorganická hnojiva. Problematické bývá zlepšení půdy písčitého charakteru. Pro chudé zemědělce je tento proces často finančně náročný, proto využívají jako primární zdroj živin organická hnojiva.

Organická hnojiva mají v půdě krátkou trvanlivost, protože dochází k rychlému rozkladu organické hmoty. Trvanlivost je většinou jen po několik pěstitelských sezón, kdy dochází k mineralizaci organického hnojiva díky vysokým teplotám a provzdušňování. Organická hnojiva se z důvodu udržení produktivity půdy aplikují každý rok. Řešením krátké trvanlivosti by mohl být biochar, který je stabilní, organického charakteru (Uzoma et al. 2011) a jeho setrvání v půdě se odhaduje až na 51 000 let (Spokas 2010). Aplikace biocharu do půdy má potenciál zlepšit celou řadu fyzikálně-chemických a biologických charakteristik, jako např.

hydraulickou vodivost, hustotu půdy, celkovou pórovitost, vodní kapacitu, rozložení a velikost pórů, obsah půdní vlhkosti, pH, KVK, mikrobiální aktivitu nebo obsah vody dostupný rostlinám (Obr. 3) (Hardie et al. 2014). Lze konstatovat, že biochar bude mít největší účinky na kyselých, degradovaných a hrubozrnných půdách. A to proto, že má vápnicí účinek, zvyšuje kationtovou výměnnou kapacitu a sorpci organické hmoty (Burell et al. 2016).



Obr. 3 Model vlivu biocharu na fyzikálně-chemické charakteristiky půdy (zdroj: Hossain et al. 2020)

3.6.1 Vliv biocharu na půdní pórovitost

Biochar je vysoce porézní materiál. Aplikací do půdy může docházet k ovlivnění půdní pórovitosti (Hardie et al. 2014). Půdní pórovitost lze definovat jako poměr pórů k celkovému objemu půdy. Jedná se o velmi důležitou vlastnost půdy ve spojitosti se zemědělskou produkcí. Zásadně ovlivňuje provzdušňování, pohyb vody a její zadržování, distribuci živin – tím ovlivňuje růst rostlin a dále poskytuje útočiště půdním mikroorganismům. Velikost pórů v půdě lze rozdělit na 3 skupiny: makropóry, mezopóry a mikropóry (Aslam et al. 2014). Biochar přispívá ke zvětšení půdní pórovitosti rovnou 3 způsoby, a to: 1. přímo přispívá svými samotnými póry, 2. vytváří obalové nebo akomodační póry mezi sebou a okolními půdními agregáty, 3. prostřednictvím zlepšení perzistence půdních pórů v důsledku zvýšené stability agregátů.

Stejně jako biochar samotný, tak i jeho porozita (konkrétně velikost pórů) je ovlivněna vstupní surovinou, technikami zahřívání používaných k výrobě a teplotou procesu. Velikost pórů biocharu se může významně lišit, a to až o několik řádů (Hardie et al. 2014). Některé studie uvažují, že má většina biocharů z 95 % průměr pórů menší než 0,002 μm (Major et al. 2009). To je problematické pro rostliny, z nichž není většina schopna odebírat vodu z půdních pórů, které jsou menší než 0,2 μm . A proto byly uskutečněny studie na důkaz toho, že biochary obsahují i velké množství makropórů v rozmezí velikostí od 1 do 10 μm .

Přímý příspěvek pórů biocharu potenciálně zvyšuje počet pórů o průměru 0,03 až 0,0003 μm v půdě, do které byl aplikován. Tvorba obalových nebo akomodačních pórů mezi biocharem a okolními agregáty podporuje zvýšení mezoporozity, tedy póry o průměru 0,2 – 0,29 μm . Tento způsob vlivu biocharu na pórovitost je samozřejmě ovlivněn velikostí částic biocharu, velikostí půdních agregátů a stupněm zhutnění půdy. Zlepšení perzistence půdních pórů v důsledku zvýšené půdní stability agregátů pomocí biocharu je ovlivněna tím, že aplikace biocharu do půdy vyžaduje obdělávání půdy a její kultivaci. To, na jakou velikost půdních pórů má tento způsob vliv, je třeba dále zkoumat (Hardie et al. 2014).

3.6.2 Vliv biocharu na objemovou hmotnost půdy

Objemová hmotnost půdy navazuje na půdní pórovitost. Je významnou charakteristikou půdy, co se týče růstu rostlin a schopnosti absorbovat vodu. Popisuje to, jak pevně jsou půdní částice stlačeny k sobě. Obecně se jedná o poměr hmotnosti půdy k objemu půdy v neporušeném stavu (Aslam et al. 2014; Sářka et al. 2018). Pokud má půda vysokou objemovou hmotnost ($>1,6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$), tak má malou kapacitu absorbovat vodu a je velmi odolná vůči pronikání kořenů rostlin skrz půdu, což výrazně ovlivňuje jejich růst. Aplikace biocharu dokáže díky vysoké pórovitosti zvýšit pórovitost půdy a tím snížit objemovou hmotnost půdy (Aslam et al. 2014). Dochází k tzv. „naředění“ půdy biocharem s nižší hustotou (Burell et al. 2016).

Burell et al. (2016) aplikovali biochar z dřevní štěpky, slámy a odřezů z vinic na černozem, kambizem a hrubozrnnou planosol. Nejvýrazněji klesla objemová hmotnost při použití biocharu z dřevní štěpky, a to u všech třech půd v rozmezí od 3,9 % do 5,1 %. Githinji (2014) prokázal, že přídavek biocharu do hlinitopísčité půdy snížil objemovou hmotnost z $1,325 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ na $0,363 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kromě schopnosti snížit objemovou hmotnost půdy dokáže biochar zlepšit její strukturu, provzdušnění, dostupnost živin a schopnost zadržet vodu (Burell et al. 2016).

3.6.3 Vliv biocharu na půdní agregaci

Agregace půdy znamená vzájemné přilnutí koloidních částic půdy k sobě, na základě vzájemně působících přitažlivých sil. Půdní agregace má schopnost zlepšovat dostupnou vodní kapacitu, stabilizovat a chránit půdní organickou hmotu před rozkladem, zlepšovat infiltraci půdy a hydraulickou vodivost. Dobře agregovaná půda nejen zvyšuje produkci plodin, ale také zmírňuje změnu klimatu prostřednictvím dlouhodobé sekvence uhlíku v půdě (Islam et al. 2021). Pokud má půda dobrou strukturu, znamená to dobré prostředí pro pohyb živin, vody a jejich dostupnost rostlinám. Na půdní agregaci mají vliv i mikroorganismy. Ty vylučují polysacharidy, které zvyšují adhezi půdních koloidních částic a agregaci půdy (Aslam et al. 2014).

Islam et al. (2021) uvedli, že aplikace biocharu do půdy významně zlepšila agregaci půdy o $16,4 \pm 2,5 \%$ u neutrálních a kyselých půd, mezitím co u alkalických půd nebyla agregace významně změněna. Tito autoři dále uvádí, že biochar posílil agregaci půdy v jílovitých půdách, a to až o 19,9 %, oproti půdám písčítým, kde tato hodnota dosahovala 13,4 %. Han et al. (2020) na základě publikovaných údajů pro 36 párů pozorování provedli přehled a analýzu změn půdní agregace a výsledkem bylo zlepšení v rozmezí 15,9 až 101 %. Vliv

biocharu na půdní agregaci je závislý na faktorech jako je aplikační dávka, vstupní surovina a teplota pyrolýzy biocharu.

Islam et al. (2021) dále uvádí, že nejdůležitější ze všech faktorů je právě aplikační dávka biocharu. Když se dávka použitého biocharu napříč studiemi pohybovala od skupiny půd s aplikační dávkou < 20 t/ha do skupiny půd s aplikační dávkou > 40 t/ha došlo ke zvýšení agregace půdy v průměru o 9,54-23,4 %. Lze tedy konstatovat, že ke zvýšení půdní agregace je třeba vysoká aplikační dávka biocharu, protože biochar zároveň zvyšuje mikrobiální aktivitu, která se spojuje s mikroagregáty a vytváří makroagregáty díky produkovanému slizu a hyfám na rozhraní mezi půdními částicemi a biocharem. Největší vliv na agregaci vykazoval biochar vyrobený ze dřeva při teplotě pyrolýzy nad 650 °C.

Bylo zjištěno, že extrémně vysoké dávky biocharu na hektar jako je např. 96 t/ha, 100 t/ha a 115 t/ha již k dalšímu zvýšení agregace půdy nevedly (Hartley et al. 2016; Burell et al. 2016; Kelly et al. 2017).

Aplikace biocharu má potenciál zlepšit fyzikální vlastnosti půdy, infiltraci vody a může působit jako prevence proti zhutňování půdy (Sánka et al. 2018). Celkově by se mohlo jednat o udržitelnou strategii pro zlepšení půdní struktury. Aby bylo dosaženo požadovaného výsledku je třeba aplikační dávky přizpůsobit dané půdě (Islam et al. 2021).

3.6.4 Vliv biocharu na schopnost půdy zadržovat vodu

Spotřeba vody roste spolu s nárůstem světové populace a tím zvyšujícími se nároky na produkční zemědělství. Zemědělské postupy, které stále ve velké míře využívají neudržitelné způsoby obhospodařování a chemická hnojiva, vedou v mnoha částech světa k degradaci půdy na neúrodné písčité půdy. Písčité půdy nejsou schopné zadržovat vodu, což zvyšuje náchylnost ke ztrátám hnojiv aplikovaných do půdy. Zemědělství v současné době spotřebovává přibližně 75 % sladké vody, což z něj činí celosvětově největšího spotřebitele vody. A proto bylo navrženo použití biocharu jako půdního aditiva, které může zmírnit sucho a zvýšit výnos plodin na půdách, které jsou charakteristické špatnou schopností zadržovat vodu, zvýšeným vyplavováním živin a tím i špatným růstovým potenciálem pro rostliny.

Biochar je díky své vysoké pórovitosti vhodným půdním aditivem do oblastí s půdami náchylnými k vysušení (Novak et al. 2009; Yu et al. 2013). Schopnost biocharu zadržovat vodu v půdě je samozřejmě dána několika charakteristikami dané půdy a to např. velikostí půdních částic, strukturou a obsahem organické hmoty (Verheijen et al. 2010).

Yu et al. (2013) se zabývali dřevním biocharem aplikovaným do písčitohlinité půdy a zjistili, že dochází ke zvýšení vodní kapacity půdy o zhruba 1,7 % hmotnosti na každé 1 % přidaného biocharu.

Bylo zjištěno, že aplikace biocharu zvyšuje obsah dostupné vody v půdě až na 97 % a obsah nasycené vody na 56 % (Uzoma et al. 2011). Yu et al. (2013) navrhli studii, kde bylo cílem zjistit vliv dřevního biocharu na vodní kapacitu písčitohlinité půdy. Biochar byl vyroben z borovice žluté (*Pinus sylvestris* L.) pyrolyzované při 400 °C. Výsledky ukázaly, že se přidáním biocharu vodní kapacita písčitohlinité půdy zdvojnásobila. Novak et al. (2009) popsali zvýšení kapacity zadržování vody přidáním biocharu v rozmezí od 7 % do 14 %.

Na základě těchto studií lze biochar považovat za půdní aditivum, které má potenciál zmírnit sucho a zvýšit výnosy plodin. Dá se i předpokládat, že u aplikace na písčité půdy bude

efekt nejvíce patrný a v případě aplikace na jílovité a hlinité půdy méně. Zvýšením vodní kapacity půdy dochází i ke snížení vyplavování živin, čímž se zlepší přístup rostlin k živinám (Yu et al. 2013).

3.6.5 Vliv biocharu na pH půdy

Biochar je substance typická vysokými hodnotami pH v rozmezí 6,5 – 12,6. Tento vysoce zásaditý charakter je dán přítomností alkálií a alkalických kovů ve vstupních surovinách pro výrobu biocharu, které se během procesu pyrolýzy nevypařují. Zásaditost biocharu je dále dána:

- organickými funkčními skupinami, vznikajícími při pyrolýze biomasy,
- obsahem uhličitanů,
- obsahem anorganických alkálií (Hossain et al. 2020).

Hodnota pH biocharu je ovlivněna rychlostí procesu pyrolýzy, teplotou a vstupní surovinou (Weber & Quicker 2018). Tato vlastnost biocharu je velice užitečná v zemědělství, protože biochar lze využít jako vápnicí materiál a lze zvýšit pH na kyselých a neutrálních půdách, změnit dostupnost živin a následně na nich hospodařit. Zásaditý charakter biocharu však není ve všech druzích vyrobených biocharů stejný (Hossain et al. 2020). Například biochar vyrobený z různých druhů slámy měl hodnotu pH v rozmezí 7,69 – 10,26 (Laghari et al. 2016). Hodnota pH dalšího biocharu z rýžové slámy odpovídala 10,50. Aplikace biocharu do půdy může ve výjimečných případech pH půdy i snížit, záleží na vlastnostech dané půdy (např. pH, textura, struktura).

3.6.6 Vliv biocharu na elektrickou vodivost

Biochar může zvýšit elektrickou vodivost půdy vysokým obsahem rozpustných solí ve své struktuře (Hossain et al. 2020). Výše elektrické vodivosti a obsah solí v biocharu je opět dán druhem vstupní suroviny a teplotou pyrolýzního procesu. Biochary vyrobené při vyšších teplotách mají obecně vyšší elektrickou vodivost. To je zapříčiněno množstvím reziduí a obsahem popelovin po ztrátě těkavých látek během pyrolýzy. Co se vstupní suroviny týče, biochary vyrobené například ze dřeva či papíru mají obecně nižší hodnoty elektrické vodivosti než biochary vyrobené z hnoje (Singh et al. 2017).

Po aplikaci biocharu z rýžové slámy v množství 30 t/ha do písčité půdy došlo ke zvýšení elektrické vodivosti o 385 % (El-Naggar et al. 2018).

Biochary s nadbytečným množstvím solí či příliš vysokou hodnotou elektrické vodivosti mohou být pro rostliny škodlivé, protože po jejich aplikaci dochází k poklesu osmotického potenciálu. Proto je při aplikaci biocharu do půdy potřeba sledovat množství solí a hodnotu elektrické vodivosti, kterou biochar do půdy vnáší. Ideální je udržovat hodnotu elektrické vodivosti na nízkých hladinách, tím je pak zajištěna potřebná dostupnost živin pro růst rostlin (Hossain et al. 2020).

3.6.7 Vliv biocharu na kationtovou výměnnou kapacitu půdy

Proces kationtové výměny je velice důležitý pro půdní chemii (Graber et al. 2017), retenci vody v půdě (Hossain et al. 2020) a půdní úrodnost, protože zajišťuje setrvání živinových kationtů v půdě a nedochází tak k jejich vyplavování. Živiny jsou pak dostupné pro půdní mikroorganismy a rostliny. Kationtová výměnná kapacita (KVK) je měrou schopnosti půdy adsorbovat kationty ve výměnných formách a odpovídá negativnímu náboji půdy (Graber et al. 2017). Vznik KVK v biocharu je zapříčiněn funkčními skupinami jako jsou karboxylové a hydroxylové skupiny, které vznikají během pyrolýzy. KVK biocharu je řízena povrchovou oxidací a adsorpcí vysoce oxidovaných organických látek na povrchu biocharu (Hossain et al. 2020). KVK je přímo závislá na teplotě během pyrolýzy a vstupní surovině. Gaskin et al. (2008) uvedli, že vysoká teplota snižuje KVK, ale oproti tomu Singh et al. (2010) uvádí, pravý opak a to, že vysoká teplota KVK zvyšuje. Biochary ze vstupních surovin na bázi dřeva nedisponují tak vysokou KVK jako například materiály z listí, rostlin apod. (Gaskin et al. 2008; Major et al. 2009; Singh et al. 2010; Kookana et al. 2011).

Potenciální vliv biocharu na zvýšení KVK byl zjištěn v brazilské Amazonii. V půdách s biocharem byla hodnota KVK až dvakrát vyšší než v okolních půdách (Liang et al. 2006). El-Naggar et al. (2018) uvedli, že biochar z rýžové slámy dokázal zvýšit KVK písčité půdy (70 $\mu\text{S}/\text{cm}$) o 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a písčitohlinité půdy (320 $\mu\text{S}/\text{cm}$) o 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ při dávce 30 t/ha.

3.6.8 Vliv biocharu na živiny v půdě

Při spalování biomasy a její přeměně na biochar dochází k mnoha změnám původního obsahu živin, jejich formy i jejich výsledné chemické struktury. Maximální teplota pyrolýzy spolu s rychlostí zahřívání mají silný vliv na zachování živin. Rozdílné teploty těkání různých živin hrají největší roli ve výsledném obsahu živin v biocharu. Např. zatímco C začíná přeměňovat při 100 °C, rozsah oxidačních a transformačních produktů z původního uhlíku je stabilní i přes velký teplotní rozsah a je spojen hlavně s poklesem OH a CH₃. Většina N a S vyprchá při teplotách nad 200 °C, zatímco K a P vyprchávají při vyšších teplotách mezi 700 - 800 °C. Většina biocharů je vyráběna při teplotách mezi 450–550 °C, a proto bývají ochuzeny o N a S. Avšak biochary vyrobené ze surovin bohatých na N při nižší teplotě, např. 450 °C si mohou zachovat až 50 % původního obsahu N a veškerý S, a proto jsou na tyto prvky srovnatelně bohatší než biochary na bázi dřeva vyrobené při vyšší teplotě.

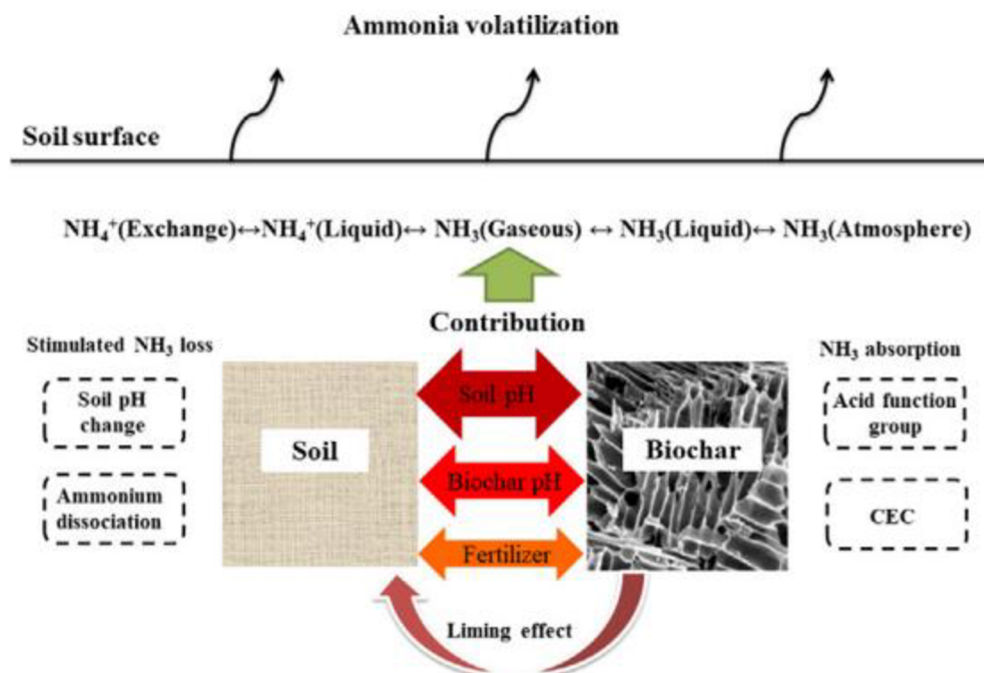
Biochary vyrobené ze dřeva mají extrémně vysoký poměr C/P a C/N. Naopak biochary vyrobené z hnoje, plodin a potravinových odpadů mají tyto poměry mnohem nižší. Biochary, které jsou bohaté na živiny a popeloviny postrádají stabilitu, která je spojena s biochary bohatými na C a vysoce aromatickými a kondenzovanými biochary získanými ze dřeva. Stejně tak, jako má teplota pyrolýzy vliv na fyzikální a chemické vlastnosti biocharu, tak má vliv na extrahovatelnost některých živin: vysokoteplotní biochary (800 °C) mají tendenci mít vyšší pH, elektrickou vodivost a extrahovatelnost, zatímco nízkoteplotní biochary (350 °C) mají větší množství extrahovatelného P a fenolů (DeLuca et al. 2009). Pro extrahovatelnost Mg, Ca a Mn je třeba ještě vyšší teploty (nad 1000 °C) a právě relativně vysoký výskyt těchto alkalických kovů (K, Mg a Ca) může vysvětlovat zvýšené pH mnoha biocharů. (Kookana et al. 2011). Celkově lze tedy konstatovat, že je biochar vhodný spíše jako půdní kondicionér a přeměnu živin v půdě spíše podněcuje, než že by byl jejich primárním zdrojem (DeLuca et al. 2009)

3.6.8.1 Dusík

Pro růst rostlin je dusík nejvíce limitujícím prvkem. Pro to, aby mohla rostlina dusík přijmout je třeba přeměny složité organické formy na formu pro rostliny přijatelnou. Přeměna složité formy začíná amonifikací na NH_4^+ . Amonifikace je biotický proces, který je zprostředkováván heterotrofními bakteriemi a houbami. Následně probíhá nitrifikace na NO_3^- což je také biotický proces, který zajišťují autotrofní organismy, bakterie a archea. (DeLuca et al. 2009). Hlavní cestou ztráty dusíkatých hnojiv z půdy je těkání amoniaku (Obr. 4) (Sha et al. 2018) Bylo dokázáno, že biochar má schopnost:

- zadržovat N v půdě tím, že zvyšuje retenci NH_3 a NH_4^+ ,
- snižovat obsah oxidu dusného (N_2O) a vyplavování dusičnanů (NO_3^-),
- zvyšovat biologickou fixaci N a příznivě ovlivňovat půdní mikrobiální společenstva.

Biochar by mohl díky své stabilitě a velké sorpční kapacitě pomáhat zadržovat dusík v půdě ve formě NH_4^+ , NH_3 , NO_3^- atd. prostřednictvím kyselých funkčních skupin (např. karboxylových a hydroxylových) na svém povrchu skrze kationtovou výměnu (Clough & Condron 2010; Zheng et al. 2013; Sha et al. 2018). Sha et al. (2018) pak potvrzují, že nehraje významnou roli to, při jaké teplotě byl biochar vyroben a zaměřují se spíše na materiál, ze kterého byl vyroben, na výsledné pH biocharu a pH a půdní typ zemědělské půdy. Nejvýrazněji bylo zamezeno těkání amoniaku ze zemědělské půdy při aplikaci kyselého biocharu s hodnotou $\text{pH} \leq 4$ (-42,4 %) a biocharu na bázi dřeva (-34,6 %). Oproti tomu při aplikaci zásaditého biocharu ($\text{pH} > 9$) a biocharu na rostlinné bázi došlo ke zvýšení těkání amoniaku (30,8 %; 11,4 %). Aplikace biocharu do kyselé půdy ($\text{pH} \leq 6$) těkání amoniaku podpořila. Zatímco u půd alkalických a neutrálních nebyly pozorovány žádné významné změny. (Sha et al. 2018).



Obr. 4 Reakce amoniaku na přidavek biocharu do půdy (zdroj: Sha et al. 2018)

Co se týče zvýšení biologické fixace N tak například Clough & Condrón (2010) zkoumali tuto problematiku s fazolem obecným (*Phaseolus vulgaris* L.). Do půdy přidali biochar v množstvích 0, 30, 60 a 90 g/kg půdy. Výsledkem byl zvýšený podíl fixovaného N z 50 % bez přídavku biocharu na 72 % s přídavkem 90 g/kg biocharu. Kromě fixovaného N byly pozorovány i další změny, a to například zvýšení celkového N získaného z atmosféry, který se zvýšil o 49 % s přídavkem 30 g/kg a o 78 % s přídavkem 60 g/kg biocharu do půdy. Dále se vlivem přídavku 60 g/kg biocharu zvýšil i výnos fazolí o 46 % produkce biomasy o 39 %. Ale oproti tomu došlo při nejvyšším přídavku 90 g/kg ke snížení celkového N získaného z atmosféry na 30 %, snížení produkce biomasy a celkového příjmu N oproti kontrole.

Výsledky ukazují potenciál aplikace biocharu pro zlepšení přísunu N do agroekosystémů a zabránění jeho těkání a zároveň poukazují na potřebu dalších a dlouhodobých polních studií pro lepší pochopení účinků biocharu na biologickou fixaci dusíku (Rondon et al. 2007).

3.6.8.2 Fosfor

Fosfor je další důležitá živina pro rostliny. Je charakteristický nízkou rozpustností a pro rostliny je dostupný pouze v anorganické formě jako H_2PO_4^- , H_3PO_4 a HPO_4^{2-} (Glaser & Lehr 2019). Dostupnost fosforu pro rostliny je stejně jako dostupnost dusíku řízená mikroby. Navíc je ale jeho poměr dostupnosti a nedostupnosti určován i abiotickými reakcemi závislými na hodnotě pH (DeLuca et al. 2009).

V současné době se zásoby fosfátových hornin, ze kterých se fosfor získává, odhadují zhruba na dalších 300-400 let. Jako hnojivo s pomalu uvolňujícím se P by mohl sloužit biochar (Glaser & Lehr 2019). Zatím co dusík se z biocharu uvolňuje při teplotě 100 °C, fosfor je odolnější a k jeho uvolňování dochází až při teplotě 700 °C. Obecně lze říct, že v blízkosti biocharu dochází ke zvýšenému příjmu fosforu rostlinami. A to například z důvodu uvolňování solí P z dřevních tkání během zuhelnatění (DeLuca et al. 2009).

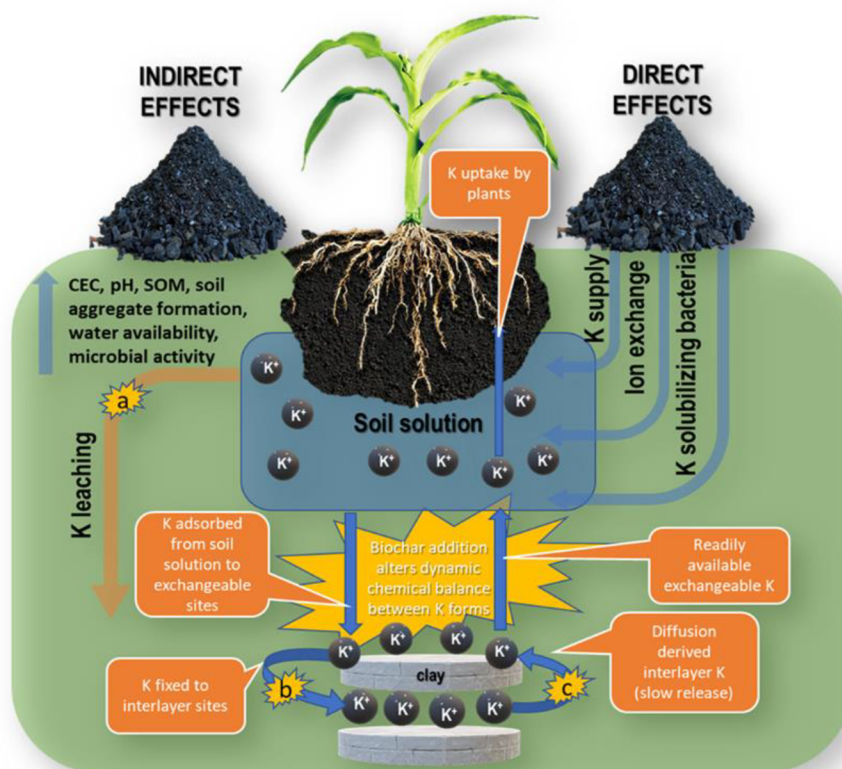
Glaser & Lehr (2019) zjistili, že biochar zvýšil dostupnost P v zemědělské půdě 4,6krát při aplikační dávce alespoň 10 tun/ha. Biochar vyrobený při nízké (400 °C) a střední teplotě (450-600 °C) významně zvýšil dostupnost P v půdách. Zatímco biochar vyrobený při vysoké teplotě (600 °C) nevykazoval vliv na dostupnost P v půdě. Další důležitý parametr je to, do jaké půdy, z hlediska pH, biochar aplikujeme. Při aplikaci do kyselé půdy (pH < 6,5) byla hodnota dostupného P zvýšena 5,1krát. U neutrálních půd (pH 6,5-7,5) a alkalických (pH > 7,5) nebyla zaznamenána žádná významná změna. Vliv biocharu na dostupnost P v půdách je opět závislý i na vstupní surovině, ze které je biochar vyroben. Nejvyšší vliv je předpokládán u biocharu vyrobeného z čistírenských kalů a živočišného odpadu. Nejnižší opět u biocharu na bázi dřeva, jelikož tyto biochary neslouží primárně jako zdroje živin (Glaser & Lehr 2019). Mukherjee & Zimmerman (2013) zjistili, že obsah biologicky dostupného P v biocharu na bázi dřeva (pomalá pyrolýza při 250 °C nebo 650 °C) tvoří 17-61 % celkového P. Azuara et al. (2013) prokázali, že biologicky dostupný P v biocharu vyrobeném z prasečí kejdy (rychlá pyrolýza při 400-600 °C) představuje 60-75 % celkového P.

3.6.8.3 Draslík

Draslík hraje významnou roli v kvalitě půdní úrodnosti a je rostlinami rychle spotřebováván. Odhaduje se, že snaha o doplnění K do půdy v podobě hnojiv doplní pouze 35 % odstraněného K z půdy sklizní nadzemní biomasy ročně. Nedostatek K v půdách je dále zapříčiněn dlouhotrvajícími obdobími sucha způsobenými zintenzivňující se klimatickou změnou. Proto je potřeba nalézt technologii, která vyřeší rozpor mezi požadovanými výnosy rostlin a udržitelným způsobem hnojení, a zároveň zabrání rychlému snižování množství K v půdě a nebude poškozovat životní prostředí a jeho ekosystémy.

Přídavek biocharu do půdy podporuje dostupnost K a snižuje jeho vyplavování. Hlavním mechanismem biocharu, který přispívá k dostupnosti K v půdě, je především kationtová výměnná kapacita, dále zvýšená retenční kapacita, pórovitost a specifický povrch (Obr. 5). Na obsah K v biocharu má vliv teplota pyrolýzy a vstupní surovina. S vysokou teplotou pyrolýzy (>500 °C) se celkový obsah K v biocharu zvyšuje. Při nižších teplotách dochází ke zvyšování rozpustného a výměnného draslíku. Mezi zemědělské odpady bohaté na K patří například kukuřičné klasy, bavlníkové stonky, skořápky vlašských ořechů, rákos a listy cukrové třtiny. Platí, že suroviny s nízkým obsahem ligninu jsou obecně bohatší na množství K než suroviny s vysokým obsahem ligninu (Bilias et al. 2022).

Rasuli et al. (2022) provedli studii, kdy do půdy aplikovali 2 % biochar ze slámy (*Triticum aestivum* L.) a kukuřice (*Zea mays* L.). Výsledkem bylo zvýšení množství K v půdě z 287 mg/kg v kontrolním odběru na 853 mg/kg vlivem aplikace biocharu ze slámy a na 619 mg/kg vlivem aplikace biocharu z kukuřice. Aplikace biocharu do půdy by mohla vést k snadné dostupnosti K pro rostliny a mohla by být alternativním a ekologicky šetrným způsobem obohacování půdy K (Bilias et al. 2022).



Obr. 5 Přímé a nepřímé vlivy biocharu na draslík v půdě (zdroj: Bilias et al. 2022)

3.6.9 Zlepšení účinnosti používání hnojiv

Potenciálnímu využití biocharu v zemědělské půdě je věnována pozornost v celosvětovém měřítku. Pokud by aplikace biocharu do půdy dokázala zvýšit dostupnost N a P zemědělským plodinám, mohl by hrát klíčovou roli při snižování množství vstupů N a P hnojiv do zemědělských půd. Velké množství půd nemá dostatečnou schopnost zásobovat rostliny N a P, a to z důvodů snadných ztrát těchto živin například skrze vyplavování, těkání a srážení.

Použití anorganických hnojiv je nejenom finančně náročné, ale jejich nesprávné použití má za následky zhoršení životního prostředí a ekosystémů. Může například vést k eutrofizaci, okyselení prostředí a zhoršení globálního oteplování (Gul & Whalen 2016).

V biocharu lze nalézt několik organických a anorganických forem N a P, jako jsou amidové skupiny, biologicky dostupný P, NO_3 a NH_4^+ (Kookana et al. 2011; Jindo et al. 2014). Gul & Whalen (2016) shrnují, že koncentrace těchto živin a jejich zadržení je ovlivněno vstupním materiálem a teplotou výroby. Obecně je obsah živin v biocharu vyrobeném ze surovin bohatých na živiny, jako je hnůj a rostlinné zbytky, vyšší než v biocharu vyrobeném z lignocelulózových surovin. Teplota, při které se biochar vytváří, má vliv na přítomné formy dusíku, přičemž při nižších teplotách (kolem 400°C) vzniká více NH_4^+ a při vyšších teplotách (kolem 600°C) vzniká více NO_3 (DeLuca et al. 2009). Dále s rostoucí teplotou výroby dochází k čistým ztrátám rostlinám dostupného N v důsledku volatilizace NH_3 a k poklesu koncentrace rostlinám dostupného P v důsledku krystalizace biologicky dostupného P s nerozpustnými fosforečnany hořečnatými, železitými a vápenatými při vyšších teplotách pyrolýzy (Gul & Whalen 2016).

3.6.9.1 Biochar z dřevní biomasy

Biochar vyrobený pyrolýzou z dřevní biomasy je chudý na složení živin, a proto běžně neslouží jako zdroj živin pro rostliny. Proto je do půdy aplikován spolu s hnojivou, a to organickými nebo minerálními. Xiao et al. (2016), Kammann et al. (2015) a Alburquerque et al. (2013) zjistili u kukuřice (*Zea mays* L.), merlíku (*Chenopodium album* L.) a pšenice (*Triticum aestivum* L.), že biochar je v případě aplikace spolu s hnojivou schopen zvýšit účinnost využití živin, zvýšit zásoby vody v půdě a tím pozitivně ovlivnit růst rostlin, výnos plodin, snížit mobilitu dusíku v půdě a zamezit jeho vyplavování (Lehmann & Joseph 2009; Subedi et al. 2015; Agegnehu et al. 2016).

3.6.9.2 Chlévský hnůj

Chlévský hnůj lze z hlediska obohacování půdy živinami používat v nemodifikované i modifikované formě. Chlévský hnůj obsahuje velké množství snadno dostupných forem N a P, a jeho zapravení do půdy může zvýšit riziko vyplavování a odtokových ztrát N a P a následné znečištění povrchových a podzemních vod. V nemodifikované formě je chlévský hnůj významným zdrojem vypařování amoniaku, který může při aplikaci do půdy způsobit nepříznivý vliv na růst rostlin, a potenciálně nebezpečných patogenů, které se mohou spolu se splachy dostat do povrchových vod a rozšířit se na člověka.

Modifikace slouží především ke snížení počtu patogenů. Mezi možné způsoby modifikace chlévského hnoje patří např. kompostování, sušení a pyrolýza. Kompostování je

typické únikem amoniaku a oxidu uhličitého do atmosféry a může tak přispívat ke globálnímu oteplování klimatu. Nejefektivnější je z tohoto hlediska pyrolýza, která je současně i uhlíkově negativní a pomáhá výrazně snížit emise skleníkových plynů, které by za normálních podmínek unikaly do atmosféry (Lehmann 2007; Uzoma et al. 2011).

3.7 Potenciálně negativní vliv biocharu

Biochar může být tedy do budoucna nejenom inovativní technologií pro zlepšení úrodnosti půd, zmírnění změny klimatu apod., ale může představovat i potenciální nebezpečí pro mikroorganismy, rostliny i člověka (El-Naggar et al. 2019). Biochar může vykazovat známky toxicity kvůli možnému obsahu škodlivých sloučenin (Subedi et al. 2015) (PAU, PCDD/F, rizikové prvky), snížit dostupnost živin pro rostliny nebo snížit mineralizaci C (El-Naggar et al. 2019). Kookana et al. (2011) se ve své studii zabývali možnými negativními důsledky biocharu a uvedli, že rezidua některých znečišťujících látek (např. PAU, krezolů, xylenolů, formaldehydu, akroleinu atd.) by se mohla v biocharu hromadit a představovat riziko pro mikroorganismy, rostliny a zdraví půdy. Podíl některých škodlivých látek může být zvyšován použitými vstupními surovinami a metodami výroby biocharu. Mezi vstupní suroviny zvyšující předpokládané množství škodlivých látek v biocharu patří např. čistírenské kaly, odpad z koželužského průmyslu apod. (Zhang et al. 2019). K technologiím podněcujícím škodlivé látky v biocharu patří například pyrolýza či zplyňování (El-Naggar et al. 2019).

Dále je důležitá teplota procesu pyrolýzy a doba zdržení v reaktoru, která se také ve velké míře podílí na vlastnostech biocharu, jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách. Tímto se zabývali např. Brown et al. (2006), kteří stanovovali koncentrace škodlivých látek v biocharech vyrobených v rozmezí teplot od 450 do 1000 °C. V biocharu vyrobeném při nízké teplotě se nacházelo více nízkomolekulárních PAU, zatímco v biocharu vyrobeném při vysoké teplotě se nacházelo více vysokomolekulárních PAU. Co se týká vlivu doby zdržení v reaktoru, tak bylo zjištěno, že kombinace pomalé pyrolýzy, a tudíž delší doby zdržení vedla k nižšímu obsahu PAU v biocharu, než kombinace rychlé pyrolýzy a krátké doby zdržení biomasy v reaktoru.

Při aplikaci biocharu do půdy je také velice důležité správně určit aplikační dávku. Provedené studie například ukazují, že vysoká dávka biocharu (60 t/ha) měla negativní vliv na výnos sušiny jílku vytrvalého (*Lolium perenne* L.) z důvodu fyzikálních a chemických vlastností půdy (Baronti et al. 2010). Podobný efekt byl pozorován i u kukuřice a pšenice, kde došlo kvůli přidání biocharu v dávce 72 t/ha k poklesu výnosu zrna o 46 % a o 70 %, pravděpodobně vlivem imobilizace N a mikroživin v důsledku zvýšení pH, čímž se snížila dostupnost rostlinám (Karer et al. 2013). Další studie uvádí, že se mladé dřeviny nebyly schopné uchytit a přežít kvůli vysoké akumulaci biocharu v půdě, tím zvýšenému pH a nedostatku mikroživin, který byl biocharem způsobený (Mikan & Abrams 1995). Dále Karer et al. (2013) uvedli, že ačkoli dřevěný biochar zlepšil schopnost kambizemě zadržovat vodu, tak potlačil dostupnost makro i mikroživin pro rostliny.

Koncentrace PAU v biocharu se mohou pohybovat od méně než 0,1 mg/kg po více než 10 000 mg/kg proto jsou pro koncentraci PAU stanovené limity. Konkrétně pro koncentraci 16 PAU, které jsou identifikované jako toxické a mohou se vyskytovat v biocharu jsou Mezinárodní iniciativou pro biocharu (IBI) stanoveny prahové hodnoty a to 6-20 mg/kg. Další

limit stanovuje i Evropská nadace pro biochar a to hodnotu 12 mg/kg sušiny pro základní třídu biocharu a <4 mg/kg pro biochar prémiové kvality (Wang et al. 2017).

Aplikace biocharu do půdy je relativně nová technologie a pro zdokonalení jejího provedení je třeba více dlouhodobých terénních a laboratorních studií. A to zejména pro zhodnocení vlivu na fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, které následně ovlivňují množství živin v půdě, růst, vývoj a výnos plodin. Proto je zapotřebí dalších studií na stanovení vhodných vstupních surovin, vhodné technologie a maximálního množství biocharu aplikovaného do půdy, aby se předešlo jeho potenciálním negativním účinkům (El-Naggar et al. 2019).

4 Metodika

4.1 Vzorkování

Půdní typ pokusného pole v blízkosti vesnice Zvěříněk (50°149' s. š. 15°026' v. d.) (Obr. 6, 7) byl klasifikován jako písčitohlinitá regozemě. Dle rozboru velikosti částic byl nejvíce zastoupený písek (0,05-2 mm) 85,5 %, dále hlína (0,002-0,05 mm) 5,5 % a jíl (<0,002 mm) 9 %. Průměrná objemová hmotnost původní neporušené regozemě byla 1,59 g/cm³, celková pórovitost činila 41,1 %. Výše uvedená procenta jsou průměrné hodnoty, které byly stanoveny pro půdní částice <2 mm pomocí standardní hydrometrické metody (CEN ISO/TS 17892-4 2004, 2004). Tudíž se dal předpokládat nízký obsah organických látek a nedostatečná zásobenost půdy vodou. To může představovat problém pro produkci zemědělských plodin.

Pole bylo v listopadu 2021 ošetřeno různými dávkami registrovaného půdního aditiva biocharu (Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský) a konvenčním hnojivem – konkrétně kravským hnojem včetně společné aplikace biocharu a kravského hnoje. Všechny druhy dávek byly aplikovány v množství 40 t/ha hm.

Vstupní surovinou pro výrobu biocharu byla suchá surová dřevní štěpka, jejíž vysoká počáteční vlhkost odpovídala 40-60 % hm. v mokřém stavu. Štěpka byla v procesu zplyňování zahřívána po dobu 6 hodin při teplotě od 500 do 600 °C. Zplyňování proběhlo v zařízení na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny s pevným ložem. Čerstvý kravský hnůj byl odebrán z farmy ve Zvěřínku a obsahoval směs kravských výkalů, moči a podestýlkové slámy.

Pro výrobu experimentální směsi byly oba materiály smíchány dohromady v různých poměrech a ponechány ve venkovních podmínkách po dobu jednoho měsíce. Poté se vzniklá směs MB, hnůj (M) a biochar (B) vysušily, prošly přes síto s velikostí ok 2 mm a následně použily. Parametry hnoje, biocharu a půdy jsou zaznamenány v Tabulce 1 (Lebrun et al. 2022).

Tabulka 1 Parametry M – hnoje, B – biocharu a půdy (zdroj: Lebrun et al. 2022)

parametr	M	B	půda
pH [-]	8,50	11,12	4,80
KVK [μS/cm]	4 210	1 400	318
N_{celk} [g/kg]	2,50	5,80	0,54
C_{celk} [g/kg]	39,0	817	9,33
C/N [-]	18,2	140	17,3
S [g/kg]	0,40	0,34	0,24
P [g/kg]	7,48	0,89	0,41
Ca [g/kg]	19,1	16,4	1,10
Mg [g/kg]	4,90	2,85	0,22
K [g/kg]	36,0	3,90	8,49



Obr. 6 Mapa ČR – lokalita Zvěříněk (zdroj: Mapy Google)



Obr. 7 Poloha pokusného pole s aplikovanými dávkami (převzato a částečně upraveno dle Trakal 2021)

4.2 Materiál

Po 6 měsících od aplikace, tedy v dubnu 2022, byly odebrány reprezentativní vzorky půdy jak z orniční vrstvy (do hloubky 25 cm), tak i z celého půdního profilu (do hloubky 100 cm). Vzorky byly odebrány pomocí půdní sondy. Z orniční vrstvy (do 25 cm) bylo odebráno od každé z šesti variant 5 vzorků. Z celého půdního profilu (do 100 cm) byly u variant S, K, M, MB10, MB50 odebrány 3 vzorky a u MBh50 byly odebrány vzorky 4. Celkem bylo tedy odebráno 49 vzorků.

Odebrané vzorky byly vysušeny při pokojové teplotě, rozdrceny v porcelánové třecí misce a následně přesety přes síto s velikostí ok 2 mm. V takto připravených vzorcích půd byly stanoveny dostupné obsahy základních makro a mikroživin a základní půdní charakteristiky jako hodnota pH a kationtová výměnná kapacita.

Označení jednotlivých druhů vzorků:

- **S** – neošetřená půda z okolí meteorologické stanice založené na podzim roku 2019; tato varianta byla zařazena proto, že se jednalo o shodnou půdu, která ale nebyla nikdy zemědělsky využívána,
- **K** – půda z pole neošetřena od počátku pokusu (v minulosti hnojeno chlévským hnojem),
- **M** – půda ošetřena pouze chlévským hnojem,
- **MB10** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v objemovém poměru 90:10,
- **MB50** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v objemovém poměru 50:50,
- **MBh50** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v objemovém poměru 50:50.

4.3 Analytické metody

4.3.1 Stanovení půdní reakce

Pro stanovení půdní reakce bylo v poměru 1:10 naváženo 5 g vzorku a smícháno s 50 ml 0,01 M CaCl_2 v 250 ml uzavíratelné plastové nádobě. Připravený roztok byl dále třepán na horizontální třepačce po dobu 60 min a poté byl 60 minut sedimentován. Ustálená suspenze byla měřena digitálním pH metrem.

4.3.2 Stanovení kationtové výměnné kapacity

Kationtová výměnná kapacita byla stanovena výluhem BaCl_2 dle normy ISO (1994). Poměr vzorku a vyluhovadla činil 1:10 - 2 g vzorku a 20 ml 0,1 M BaCl_2 . Vytvořený roztok byl třepán ve 100 ml PE lahvičkách na horizontální třepačce po dobu 2 hodin. Následovala centrifugace roztoku po dobu 10 minut na 5000 otáček. Koncentrace kationtů v roztoku byla stanovena pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP – OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., USA) s využitím dvoukanálové peristaltické pumpy, mlžné komory typu StrumanMasters a pneumatického zmlžovače typu „V-groove“ vyrobeného z inertního materiálu. Podmínky měření byly následující: příkon do plazmatu 1,2 kW, průtok plazmového argonu 15,0 L/min, průtok pomocného argonu 0,75 L/min, průtok argonu zmlžovačem 0,9 L/min.

4.3.3 Stanovení obsahu dostupných živin

Pro stanovení obsahu dostupných živin byla použita metoda extrakce Mehlich III prostřednictvím extrakčního roztoku s obsahem 0,2 M CH_3COOH + 0,25 M NH_4NO_3 + 0,015 M NH_4F + 0,013 M HNO_3 + 0,001 M kyseliny etylen diamintetraoctové (EDTA). Do uzavíratelné PP lahvičky byly v poměru 1:10 naváženy 3 g vzorku, ke kterým bylo odměrným válcem přilito 30 ml extrakčního roztoku Mehlich III. Vzniklý roztok byl extrahován po dobu 5 minut na horizontální třepačce. Dále byl přesunut do centrifugy po dobu 8 minut na 5000

otáček a vzniklý supernatant byl přelit do zkumavek a analyzován (Mehlich 1984). Obsahy sledovaných živin byly stanoveny metodou ICP-OES.

4.3.4 Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N

Celkový obsah uhlíku a dusíku v biocharu byl stanoven s využitím přístroje CHNOS Vario MACRO cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Německo). V tomto přístroji je nejprve 500 mg vzorku spáleno v uzavřeném systému katalytické pece a následně je obsah C, N a S stanoven s využitím teplotně vodivostního detektoru.

4.3.5 Stanovení dostupného obsahu C a N

Stanovení dostupného uhlíku a dostupných forem dusíku bylo provedeno ve výluhu připraveném použitím 0,01 M roztoku CaCl_2 , v poměru 1:10. Vytvořený roztok byl třepán na horizontální třepačce po dobu 2 hodin. Následovala centrifugace roztoku po dobu 10 minut na 3000 otáček (Jaszberenyi et al. 1994).

Následně došlo ke stanovení analytů pomocí automatizovaného systému SKALAR SANplus s kontinuálním průtokovým segmentačním analyzátozem (Skalar, Holandsko). Pro kvantifikaci celkového rozpustného uhlíku byl vzorek nejprve okyselen roztokem kyseliny sírové a probubláván dusíkem, čímž došlo k uvolnění anorganické nebo těkavé organické formy uhlíku. Roztok vzorku byl poté smíchán s persíranem tetraboritým a vystaven působení UV záření. V tomto procesu dochází k oxidaci organického uhlíku na oxid uhličitý, který je poté vyloučen z roztoku probubláváním. Množství oxidu uhličitého bylo měřeno detektorem na principu infračervené spektrometrie. Pro stanovení dostupných forem dusíku byl vzorek smíchán s boraxovým pufrem. Po promíchání byl přidán persíran draselný a směs byla vystavena UV záření.

Obsah dusičnanů byl stanoven Griessovou metodou po redukci dusičnanů na dusitany kademnato-měďnatým činidlem. Absorbance byla měřena spektrofotometricky při 540 nm. Postup pro kvantifikaci obsahů NH_4^+ je založen na modifikované Berhelotově reakci, kde amoniak chlorovaný na monochloramin reaguje se salicylátem za vzniku 5-aminosalicylátu. Po oxidaci vznikne zelená komplexní sloučenina. Absorbance vzniklého komplexu byla měřena při 660 nm.

4.4 Statistické vyhodnocení

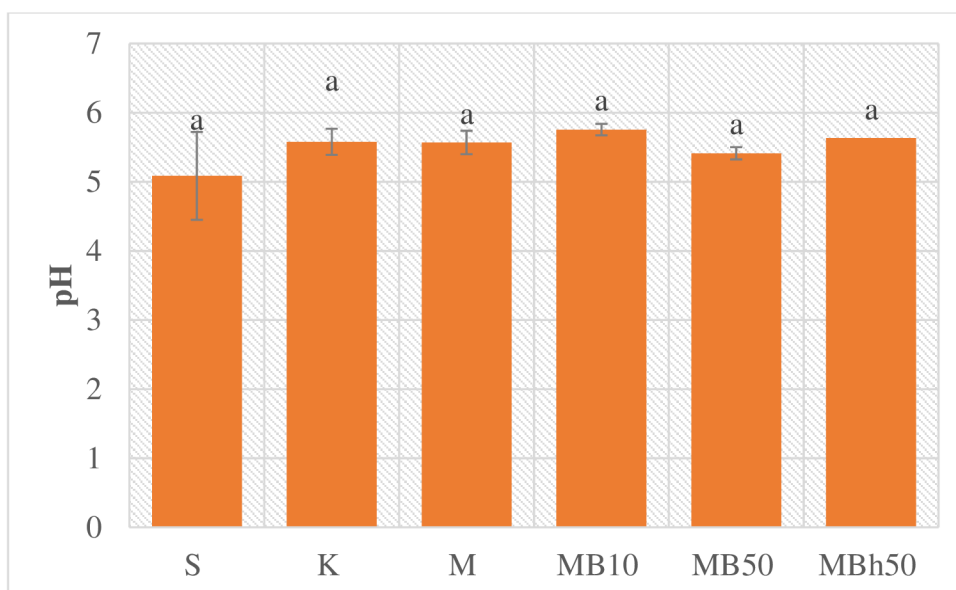
Výsledky byly zpracovány matematicko-statistickými metodami. Základní statistické vyhodnocení dat proběhlo pomocí popisných charakteristik vypočtených programem Microsoft Excel (Excel 2021). Pokročilé statistické vyhodnocení jako jednofaktorová ANOVA s využitím Tukeyova HSD testu proběhlo v prostředí programu Statistica 12 (StatSoft Inc. 2013). Všechny testy byly provedeny na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

5 Výsledky

5.1 Horizontální odběr vzorků – do 25 cm

5.1.1 Stanovení půdní reakce

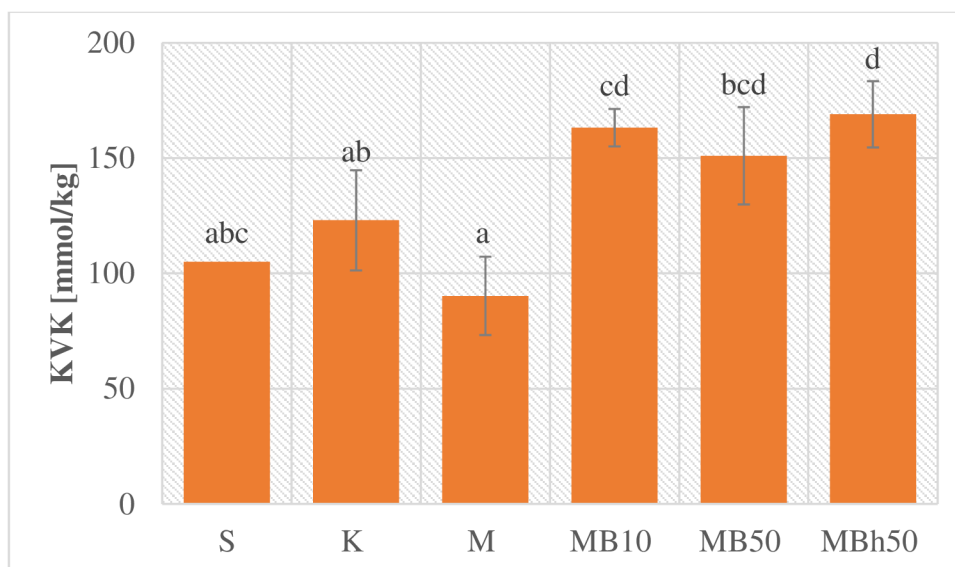
V Grafu 1 jsou uvedeny hodnoty pH. Nejnižší hodnota byla zaznamenána u varianty meteorologické stanice (S). Po aplikaci směsi biocharu a chlévského hnoje do půdy byl zaznamenán největší nárůst u varianty MB10. Při vzájemném porovnání všech variant po aplikaci příslušných opatření se žádná varianta v orniční vrstvě významně statisticky nelišila. Aplikace samotného chlévského hnoje či v kombinaci s biocharem nemá významný vliv na hodnotu pH v orniční vrstvě.



Graf 1. Hodnoty půdní reakce v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).

5.1.2 Stanovení kationtové výměnné kapacity

Hodnoty kationtové výměnné kapacity jsou znázorněny v Grafu 2. Dle výsledků je vidět, že nejvíce hodnotu kationtové výměnné kapacity navyšuje opatření varianty MBh50, a to jak ve srovnání s kontrolou (K), tak ve srovnání s meteorologickou stanicí (S). Hodnota KVK byla zvýšena i přidavkem MB10 a MB50, avšak se zvyšujícím se množstvím vysoko-teplotního biocharu se trend růstu KVK spíše snižuje. Naopak nejmenších hodnot nabývá hodnota KVK u varianty M. Ve srovnání s kontrolou (K) z toho vyplývá, že aplikace samotného chlévského hnoje do půdy snižuje hodnotu KVK a aplikace biocharu v kombinaci s chlévským hnojem KVK zvyšuje.



Graf 2. Hodnoty kationtové výměnné kapacity v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).

5.1.3 Stanovení obsahu dostupných živin

5.1.3.1 Makroživiny

V Tabulce 2 jsou znázorněny dostupné obsahy makroživin v půdě stanovené metodou Mehlich III.

Obsah dostupného draslíku ve srovnání s kontrolou (K) v případě všech opatření narůstal. Nejvyšších hodnot dosahuje oproti kontrole (K) u opatření MBh50, kdy byla aplikována kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu. V případě aplikace kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu bylo vyššího množství dosaženo u opatření MB10, a se zvyšujícím se množstvím vysoko-teplotního biocharu (MB50) docházelo se snižování množství draslíku v půdě. Po kontrole (K) bylo množství draslíku u tohoto opatření nejnižší.

Hořčík byl v dostupné formě nejvíce zvýšen po přidavku opatření kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) ve srovnání s kontrolou (K). Nejnižších hodnot dosahuje množství hořčíku po přidavku samotného chlévského hnoje (M) ve srovnání s kontrolou (K). U aplikace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu bylo opět dosahováno vyšších hodnot v případě menšího množství biocharu (MB10) než vyššího množství (MB50).

Dostupný fosfor byl v půdě obsažen nejvíce po aplikaci samotného chlévského hnoje (M) ve srovnání s kontrolou (K). Oproti tomu nejmenších hodnot dosahuje v případě přidání chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50). Se zvyšujícím se množstvím vysoko-teplotního biocharu v kombinacích MB10 a MB50 bylo množství fosforu zvyšováno spolu se zvyšujícím se množstvím vysoko-teplotního biocharu.

Obsah síry byl ve srovnání s kontrolou (K) nejvíce zastoupen v místě meteorologické stanice (S). Nejmenší množství bylo naměřeno po aplikaci samotného chlévského hnoje (M). Ostatní opatření (MB10, MB50, MBh50) neměla zásadní vliv na obsah síry v půdě ve srovnání s kontrolou (K).

Tabulka 2 Dostupné obsahy prvků K, Mg, P a S v půdě v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření stanovené metodou Mehlich III; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

	K	Mg	P	S
	[mg/kg]			
S	136±2,83	126±0,71	37,5±0,64	17,0±0,57
K	68,1±7,38	101±7,98	42,8±9,03	12,9±2,65
M	94,9±19,6	98,9±14,3	64,6±15,8	9,41±2,39
MB10	112±32,9	151±14,6	19,1±9,64	12,2±3,34
MB50	89,7±16,5	147±29,9	35,9±16,1	12,7±3,60
MBh50	158±53,2	171±19,0	16,1±7,96	12,2±3,17

5.1.3.2 Mikroživiny

V Tabulce 3 jsou znázorněny dostupné obsahy mikroživin v půdě stanovené metodou Mehlich III.

Dostupný obsah mědi byl ve srovnání s kontrolou (K) zvýšen v místě meteorologické stanice (S) a po aplikaci kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu (MB50). Po aplikaci samotného chlévského hnoje (M), kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10) a kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) došlo naopak ke snížení jejího obsahu v půdě ve srovnání s kontrolou (K).

Obsah železa v půdě dosahuje vyšších hodnot ve srovnání s kontrolou (K) v místě meteorologické stanice (S) a v místě aplikace samotného chlévského hnoje (M). Po aplikaci kombinace MB dochází k jeho nárůstu pouze u opatření kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MB50). V případě aplikace opatření kombinace MB10 a MBh50 došlo ve srovnání s kontrolou (K) ke snížení obsahu železa v půdě.

Mangan byl v dostupné formě nejvíce zastoupen v půdě po aplikaci opatření chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10) a chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50). S přibývajícím množstvím obsah manganu v půdě klesl a to tak, že po aplikaci kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50) dosahuje nejnižší hodnoty ze všech odebraných vzorků ve srovnání s kontrolou (K).

U sodíku lze při srovnání s kontrolou (K) pozorovat nejvyšší hodnoty v místě meteorologické stanice (S) a po aplikaci kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50). Ve srovnání s kontrolou (K) zůstalo množství sodíku relativně stabilní pouze v případě aplikace samotného chlévského hnoje (M). I v případě ostatních opatření došlo vždy k navýšení množství sodíku v půdě.

Ve srovnání s kontrolou (K) došlo k výraznému nárůstu zinku v místě aplikace samotného chlévského hnoje (M). Nejnižší obsah dostupného zinku v půdě byl zaznamenán po aplikaci kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) a kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10) ve srovnání s kontrolou (K). Hodnoty ostatních opatření se ve srovnání s kontrolou (K) významně neliší.

Tabulka 3 Dostupné obsahy prvků Cu, Fe, Mn, Na a Zn v půdě v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření stanovené metodou Mehlich III; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

	Cu	Fe	Mn	Na	Zn
	[mg/kg]				
S	2,71±0,04	273±3,54	113±0,71	27,8±0,35	2,53±0,02
K	2,29±0,25	197±51,1	143±52,5	18,1±5,15	2,46±0,36
M	2,14±0,35	213±32,9	117±26,1	18,8±3,33	3,42±0,23
MB10	2,07±0,19	186±40,8	179±26,4	23,4±8,59	2,13±0,33
MB50	2,65±0,77	228±45,7	55,9±9,33	20,4±10,5	2,45±0,52
MBh50	2,15±0,33	185±49,6	154±22,7	27,2±10,1	2,04±0,22

5.1.4 Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N

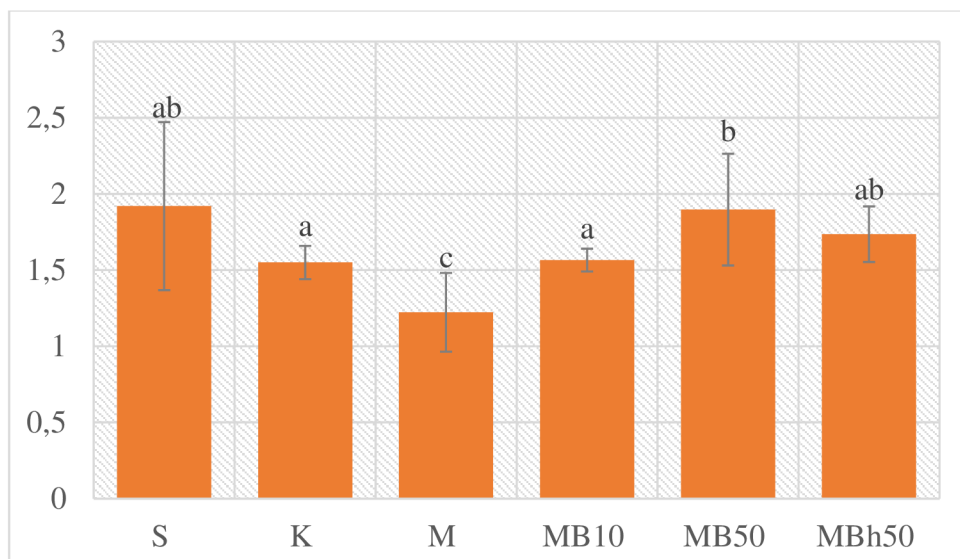
V Grafech 3-6 lze pozorovat obsah celkového C, N, S a poměr celkového C/N.

Výsledky celkového uhlíku ukazují, že ve srovnání s kontrolou (K) došlo v případě opatření kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MB50) a chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50) ke zvýšení procentuální hodnoty. Z toho vyplývá že kombinace biocharu a chlévského hnoje ve vyšším množství zvyšuje množství celkového uhlíku v ornici. Ovšem ve srovnání s meteorologickou stanicí (S) se výsledky obsahu významně neliší. Naopak nejmenších hodnot dosahuje ve srovnání s kontrolou (K) i meteorologickou stanicí (S) půda ošetřená pouze samotným chlévským hnojem (M), kdy došlo ke ztrátě uhlíku z půdy.

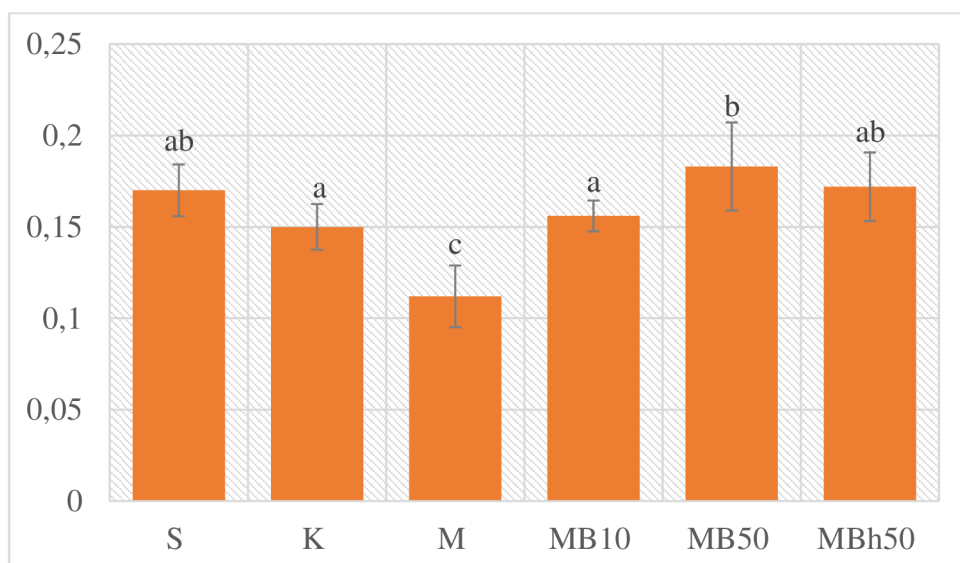
Procentuální množství celkového dusíku bylo obdobně jako procentuální množství celkového uhlíku nejvíce ovlivněno opatřením kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MB50) a chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50) protože došlo ke zvýšení množství dusíku. Ve srovnání s meteorologickou stanicí (S) se výsledky obsahu významně neliší. Ke snížení procentuálního množství celkového dusíku došlo v případě aplikace samotného chlévského hnoje (M) pravděpodobně z důvodu vyplavení dusíku z půdy z důvodu absence biocharu jako sorpčního materiálu.

Z hlediska procentuálního množství celkové síry se ve výsledcích ukázalo, že mezi jednotlivými variantami neexistuje statisticky významný rozdíl.

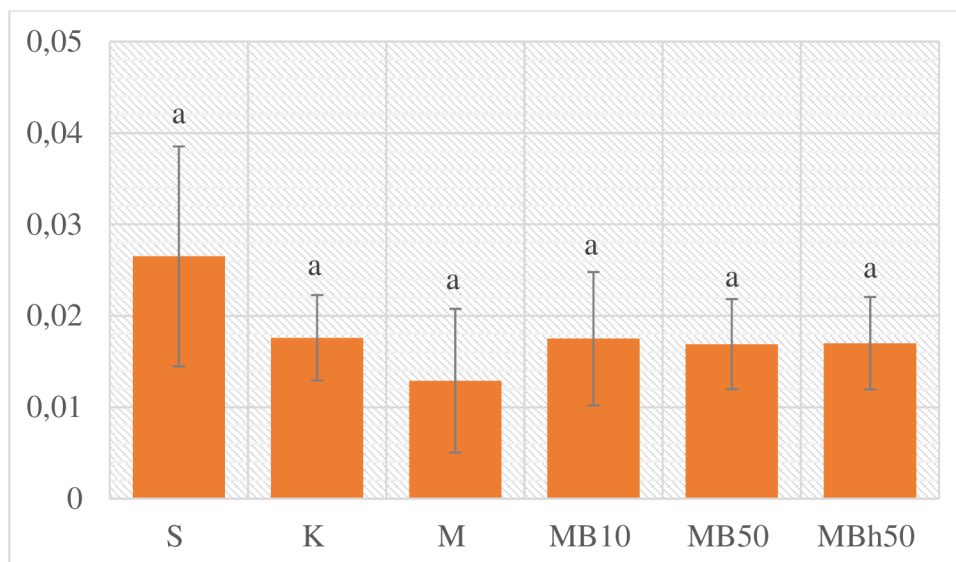
Poměr celkového C/N se od sebe ve všech variantách, kromě MB50, ve srovnání s kontrolou (K) a meteorologickou stanicí (S) významně statisticky neliší. V případě opatření kombinace chlévského hnoje s vysoko-teplotním biocharem v poměru 50:50 (MB50) došlo dle výsledků k poklesu celkového množství C/N ve srovnání s kontrolou (K) i meteorologickou stanicí (S).



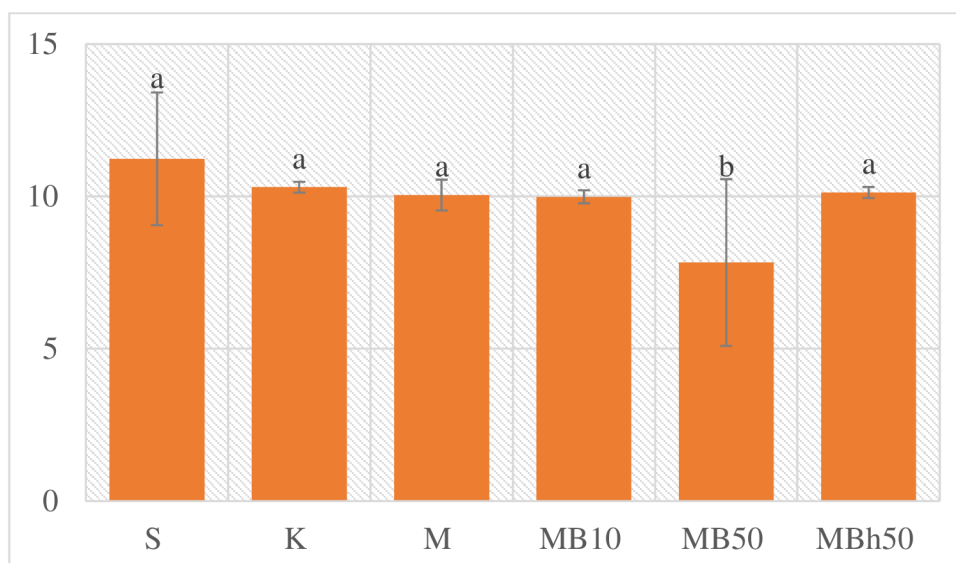
Graf 3. Procentuální množství celkového obsahu uhlíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).



Graf 4. Procentuální množství celkového obsahu dusíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).



Graf 5. Procentuální množství celkového obsahu síry v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).



Graf 6. Poměr celkového množství uhlíku a dusíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší ($\alpha = 0,05$).

5.1.5 Stanovení dostupného obsahu C a N

V Tabulce 4 lze porovnat obsahy dostupných dusičnanů, amonného dusíku a rozpustného uhlíku v jednotlivých opatřeních.

Trend růstu dusičnanů je ve srovnání s meteorologickou stanicí (S) i kontrolou (K) stoupající. Nejnižší hodnoty dosahují vzorky odebrané z místa meteorologické stanice (S). Nejvyšší hodnoty byly zjištěny u opatření, kdy byl aplikován chlévský hnůj a středně-teplotní biochar v poměru 50:50 (MB50). Hodnota dusičnanů narůstala i u ostatních opatření. Při srovnání aplikace samotného chlévského hnoje (M) a jeho aplikace v jakékoli kombinaci s biocharem (MB10, MB50 a MBh50) byl nárůst větší u opatření kombinace biocharu a chlévského hnoje. U půdy byl prokázán nárůst dostupného obsahu dusičnanů po společné aplikaci chlévského hnoje a biocharu.

Po aplikaci příslušných opatření do půdy nebyl obsah amonného dusíku výrazně ovlivněn. Nejnižších hodnot dosahovala půda po aplikaci opatření MB10 a MBh50. Mírného nárůstu dosahovala půda po aplikaci opatření M a MB50. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v místě meteorologické stanice (S) oproti kontrole (K).

Rozpustný uhlík měl ve srovnání s kontrolou (K) klesající i narůstající tendence. Pokles je dle naměřených hodnot nejvíce znatelný po aplikaci samotného chlévského hnoje (M) a následně po aplikaci kombinace vysoko-teplotního biocharu a chlévského hnoje v poměru 90:10 (MB10). Oproti tomu došlo i k nárůstu. Největší nárůst byl zaznamenán v místě meteorologické stanice (S). Dále po aplikaci vyšší dávky biocharu a chlévského hnoje u opatření MB50 a MBh50 ve srovnání s kontrolou (K).

Tabulka 4 Obsah dostupného C a N v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

	dusičnany	amonný N	rozpustný C
	[mg/kg]		
S	4,23±0,00	5,06±0,00	103±0,00
K	7,91±2,40	3,23±0,60	65,7±12,5
M	9,19±2,55	3,42±0,70	47,9±6,17
MB10	15,6±4,24	2,52±0,47	60,7±11,4
MB50	15,3±4,17	3,64±0,48	82,9±13,1
MBh50	16,0±4,49	2,50±0,40	75,4±10,8

5.2 Vertikální odběr vzorků – do 100 cm

5.2.1 Stanovení půdní reakce

Hodnota pH se u každého profilu s rostoucí hloubkou zvyšuje viz Tabulka 5. Největší rozdíly lze pozorovat při srovnání hodnot ornice a spodní vrstvy u hodnot vzorků M a MB10. Z čehož vyplývá, že aplikace samotného chlévského hnoje a kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 zvyšuje hodnotu pH ve spodních vrstvách půdy z důvodu postupu biocharu a chlévského hnoje do spodních vrstev. Při vyšším přidavku vysoko-teplotního biocharu MB50 a MBh50 není trend nárůstu již tak výrazný oproti MB10. Ve srovnání s K je trend pH při aplikaci všech příslušných opatření klesající. Při srovnání s S dochází ke zvýšení pH, u opatření M a MB10. U MB50 a MBh50 je trend opět klesající.

Tabulka 5 Hodnoty půdní reakce v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	pH
	[cm]	[-]
S	0-40	5,15±0,02
	42-65	5,73±0,02
	65-85	6,44±0,01
K	0-43	5,17±0,03
	43-87	6,63±0,12
	87-95	7,29±0,03
M	0-50	5,57±0,06
	50-77	6,53±0,01
	77-93	7,20±0,19
MB10	0-28	5,57±0,03
	28-45	6,41±0,05
	45-87	6,89±0,04
MB50	0-30	5,20±0,04
	30-42	5,89±0,03
	42-95	6,05±0,08
MBh50	0-40	5,63±0,00
	41-77	5,60±0,69
	77-85	6,09±0,62
	85-91	6,45±0,00

5.2.2 Stanovení kationtové výměnné kapacity

Výsledky kationtové výměnné kapacity jsou znázorněny v Tabulce 6. Aplikace všech opatření zapříčinila klesající trend KVK s přibývajícím hloubkou oproti kontrole, která je ve 2. vrstvě stoupající. Výsledky ukazují, že nejméně klesla hodnota KVK při aplikaci středně-teplotního biocharu a chlévského hnoje v poměru 50:50 (MBh50) ve srovnání s kontrolou (K) i meteorologickou stanicí (S). Nejvíce klesla KVK při aplikaci vysoko-teplotního biocharu a chlévského hnoje v poměru 90:10 (MB10). Se zvyšující se dávkou vysoko-teplotního biocharu v kombinaci s chlévským hnojem (MB50) byla hodnota KVK dále snižována. KVK byla po aplikaci příslušných opatření nejvyšší v 1. vrstvách, pouze u kontroly je hodnota KVK v 2. vrstvě profilu 43-87 cm mírně zvýšena.

Tabulka 6 Hodnoty kationtové výměnné kapacity v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	KVK
	[cm]	[mmol/kg]
S	0-40	109
	42-65	104
	65-85	81
K	0-43	115
	43-87	126
	87-95	\
M	0-50	81,9
	50-77	69,9
	77-93	31,8
MB10	0-28	150
	28-45	90,1
	45-87	59,7
MB50	0-30	132
	30-42	81,8
	42-95	35,7
MBh50	0-40	159
	41-77	101
	77-85	140
	85-91	\

5.2.3 Stanovení obsahu dostupných živin

5.2.3.1 Makroživiny

V Tabulce 7 lze pozorovat dostupné obsahy prvků K, Mg, P a S stanovených metodou Mehlich III.

Dostupné obsahy draslíku jsou v případě všech opatření i meteorologické stanice (S) oproti kontrole (K) rostoucí. Nejvyšších hodnot nabývá draslík po aplikaci opatření kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50) ve srovnání s kontrolou (K). V případě opatření MBh50 dochází ke snížení obsahu draslíku od 1. do 2. vrstvy a k opětovnému nárůstu ve 3. vrstvě. U ostatních opatření byl pozorován postupný úbytek množství draslíku s přibývajícím hloubkou.

Hořčík v dostupné formě dosahuje stejně jako draslík nejvyšších hodnot v případě aplikace opatření chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50). Dále byl jeho nárůst podpořen přidávkou kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10). S přibývajícím množstvím vysoko-teplotního biocharu lze pozorovat úbytek hořčíku. S aplikací samotného chlévského hnoje (M) lze pozorovat úbytek ve srovnání s kontrolou (K) a u tohoto opatření byly zároveň naměřeny nejmenší hodnoty. Stejně jako u draslíku lze pozorovat snížení obsahu hořčíku od 1. do 2. vrstvy a k opětovnému nárůstu ve 3. vrstvě. U ostatních opatření byl pozorován postupný úbytek množství draslíku s přibývajícím hloubkou.

Množství fosforu bylo v případě všech opatření s přibývajícím hloubkou klesající. Ve srovnání s kontrolou (K) lze pozorovat nejnižší hodnotu u aplikace kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50). Dále došlo ke snížení obsahu fosforu po aplikaci opatření kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10) ve srovnání s kontrolou (K). Avšak s přibývajícím množstvím vysoko-teplotního biocharu (MB50) dochází k mírnému nárůstu množství dostupného fosforu v půdě, který je ve srovnání s kontrolou (K) nevýznamný. Nejvyšší hodnota fosforu byla ve srovnání s kontrolou (K) naměřena po aplikaci samotného chlévského hnoje (M).

Nejvyšší množství dostupné síry bylo naměřeno v místě meteorologické stanice (S). Tento nárůst není ve srovnání s kontrolou (K) zvláště statisticky významný. Nejmenších hodnot dosahovalo množství síry po aplikaci samotného chlévského hnoje (M). Co se týká hodnot síry po aplikaci opatření s biocharem (MB10, MB50, MBh50), lze pozorovat úbytek síry ve srovnání s kontrolou (K). V případě všech opatření bylo množství síry s přibývajícím hloubkou klesající.

Tabulka 7 Dostupné obsahy prvků K, Mg, P a S v půdě v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření stanovené metodou Mehlich III; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	K	Mg	P	S
	[cm]	[mg/kg]			
S	0-40	84,6±7,85	121±9,19	33,0±0,35	17,5±0,92
	42-65	45,2±1,84	102±2,89	4,98±0,06	6,57±0,31
	65-85	45,5±1,34	89,5±0,71	4,25±0,07	3,80±0,14
K	0-43	73,4±2,05	113±2,12	38,9±2,47	17,35±1,20
	43-87	63,8±0,99	109±0,00	2,02±0,11	7,43±0,18
	87-95	\	\	\	\
M	0-50	98,4±10,8	89,0±7,07	52,2±7,64	6,05±0,92
	50-77	46,1±1,34	71,7±2,55	7,42±0,23	4,54±0,03
	77-93	30,1±0,35	33,0±1,41	6,30±0,28	3,10±0,14
MB10	0-28	107±4,31	148±5,66	16,6±0,07	12,1±0,42
	28-45	57,9±9,9	80,3±3,89	6,58±0,03	6,47±0,33
	45-87	46,9±5,23	46,0±1,41	4,75±0,35	3,85±0,07
MB50	0-30	109±2,83	127±2,12	28,8±0,28	14,8±0,00
	30-42	53,6±1,77	75,3±2,40	15,6±0,21	7,19±0,20
	42-95	40,5±0,57	37,6±0,35	5,39±0,30	4,65±0,01
MBh50	0-40	141±4,24	164±2,12	9,81±2,11	13,8±1,13
	41-77	54,7±0,71	92,5±0,99	2,79±0,21	6,54±0,74
	77-85	81,9±0,00	100±0,00	2,34±0,03	4,63±0,00
	85-91	\	\	\	\

5.2.3.2 Mikroživiny

V Tabulce 8 lze pozorovat dostupné obsahy prvků Cu, Fe, Mn, Na a Zn stanovených metodou Mehlich III.

Obsah mědi je nejvyšší v místě meteorologické stanice (S). Dostupnost prvku s přibývajícím hloubkou klesala, vyjma aplikace opatření kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50). Po aplikaci kombinace MBh50 došlo od 1. vrstvy do 2. ke snížení a ve 3. vrstvě bylo pozorováno navýšení množství mědi oproti kontrole (K). Nejnižší hodnotu lze pozorovat po aplikaci samotného chlévského hnoje (M) a následně po aplikaci kombinace MB10 v porovnání s kontrolou (K). Se zvyšujícím se množstvím vysoko-teplotního biocharu (MB50) docházelo opět k navýšení množství dostupné mědi ve srovnání s kontrolou (K).

Nejvyšší dostupný obsah železa byl pozorován v místě meteorologické stanice (S). Ve srovnání s kontrolou (K) byl podobný obsah železa naměřen po aplikaci opatření MB50, kdy došlo i k následnému nárůstu hodnoty ve 2. vrstvě 30-42 cm. Po aplikaci zbylých opatření kombinace MB i samotného chlévského hnoje (M) nedošlo ke zvýšení množství dostupného obsahu železa, ale byl pozorován pokles prvku. Největší pokles byl pozorován po aplikaci samotného chlévského hnoje (M).

U manganu došlo ve srovnání s kontrolou (K) k nárůstu hodnoty po aplikaci MB10 a MBh50. Nejnižších hodnot dosahuje množství dostupného manganu po aplikaci kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) a samotného chlévského hnoje (M) ve srovnání s kontrolou (K). Dále lze dle výsledků pozorovat nárůst hodnoty manganu v případech S, MB10, MB50, MBh50 ve 2. vrstvách profilu. Lze tedy říci, že dochází k vyplavení manganu do těchto vrstev.

Nejvyšší hodnoty dostupného sodíku byly naměřeny ve srovnání s kontrolou (K) v místě meteorologické stanice (S) a po aplikaci MB50 a MBh50. Z těchto hodnot lze říci, že aplikací vyššího množství biocharu došlo ke zvýšení obsahu sodíku ve svrchních vrstvách profilu. Množství dostupného sodíku bylo sníženo po aplikaci samotného chlévského hnoje (M) a opatření MB10. Dále bylo dle výsledků pozorováno zvýšení obsahu sodíku ve spodních vrstvách profilu – u M ve 2. vrstvě 50-77 cm, MB10 ve 2. vrstvě 28-45 cm, MB50 ve 2. vrstvě 30-42 cm, MBh50 ve 3. vrstvě 77-85 cm. Stejně jako u manganu lze říci, že je sodík do těchto vrstev vyplavován.

Nejvyšší dostupnost zinku byla zaznamenána po aplikaci opatření M a MB10 ve srovnání s kontrolou (K). Dále bylo u opatření M pozorováno zvýšení množství zinku ve spodní vrstvě profilu 77-93 cm. Oproti tomu nejnižší hodnoty byly naměřeny po aplikaci MB50 a MBh50. Dle výsledků lze konstatovat, že se zvyšujícím se množstvím biocharu je množství zinku ve svrchní vrstvě profilu snižováno. U MBh50 bylo dále pozorováno zvýšení množství zinku ve 3. vrstvě profilu 77-85 cm.

Tabulka 8 Dostupné obsahy prvků Cu, Fe, Mn, Na a Zn v půdě v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření stanovené metodou Mehlich III; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	Cu	Fe	Mn	Na	Zn
	[cm]	[mg/kg]				
S	0-40	2,94±0,08	293±26,2	140±12,0	30,0±2,40	2,35±0,18
	42-65	0,98±0,03	260±5,66	185±8,49	29,3±0,21	0,76±0,05
	65-85	0,61±0,01	154±1,41	15,5±0,71	10,1±0,07	0,57±0,20
K	0-43	2,28±0,10	246±45,3	149±27,6	22,6±3,61	2,11±0,16
	43-87	0,75±0,00	144±3,54	274±12,0	29,7±0,42	0,85±0,01
	87-95	\	\	\	\	\
M	0-50	1,59±0,23	152±21,9	108±16,3	16,2±0,57	2,72±0,18
	50-77	0,74±0,00	122±10,6	58,8±0,64	22,8±0,14	0,56±0,01
	77-93	0,39±0,01	66,5±2,12	11,5±0,71	14,7±0,28	1,07±0,01
MB10	0-28	2,08±0,10	194±15,56	187±7,07	20,1±0,92	2,79±0,11
	28-45	0,98±0,07	177±4,24	236±5,66	30,3±6,08	0,82±0,00
	45-87	0,73±0,02	123±0,71	49,5±3,54	12,7±4,53	0,84±0,56
MB50	0-30	2,78±0,03	244±3,54	53,0±0,85	30,9±0,35	2,04±0,00
	30-42	1,02±0,03	316±6,36	76,9±2,62	33,2±0,35	0,78±0,01
	42-95	0,95±0,01	123±2,12	5,60±0,09	23,4±0,28	0,65±0,04
MBh50	0-40	2,23±0,16	192±36,1	192±22,6	32,8±5,44	1,64±0,11
	41-77	1,12±0,06	174±3,54	207±2,12	27,8±1,56	0,87±0,10
	77-85	1,24±0,00	141±0,00	33,8±0,00	35,4±0,00	1,01±0,00
	85-91	\	\	\	\	\

5.2.4 Stanovení celkového obsahu C, N, S a C/N

V Tabulkách 9-12 lze pozorovat procentuální množství celkového C, N, S a poměr celkového C/N.

Výsledky celkového obsahu uhlíku ukazují, že ve srovnání s kontrolou (K) došlo v případě všech opatření k postupnému poklesu směrem do spodních vrstev půdy včetně meteorologické stanice (S) a kontroly (K) samotné. V horní vrstvě odebraného profilu došlo v porovnání s kontrolou (K) ke zvýšení množství celkového obsahu v případě aplikace kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10 (MB10). V případě opatření aplikace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) byl sledován trend poklesu od 1. do 2. vrstvy, zvýšení ve 3. vrstvě a opětovný pokles ve 4. vrstvě. Zvýšení ve 3. vrstvě by mohlo naznačit, že do této hloubky je uhlík po aplikaci MBh50 vyplavován.

U půdy bylo po přidání příslušných opatření a místa meteorologické stanice (S) zaznamenáno snížení celkového dusíku u aplikace samotného chlévského hnoje (M) ve srovnání s kontrolou (K). V případě MB10 došlo ve srovnání s kontrolou (K) k mírnému nárůstu. U ostatních opatření nebyla hodnota obsahu celkového dusíku významně odlišná. S přibývajícím hloubkou lze opět pozorovat u většiny opatření postupný pokles obsahu dusíku až na opatření MBh50. V případě opatření aplikace kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) byl opět jako u dostupného uhlíku sledován trend poklesu od 1. do 2. vrstvy, zvýšení ve 3. vrstvě a opětovný pokles ve 4. vrstvě. Zvýšení ve 3. vrstvě by mohlo naznačit, že do této hloubky je dusík po aplikaci MBh50 vyplavován.

Z hlediska procentuálního množství celkové síry se obsahy významně neprojevíly. Veškeré hodnoty celkové síry se pohybovaly na hranici detekce přístroje.

Poměr celkového poměru C/N se od sebe ve všech variantách, kromě aplikace samotného chlévského hnoje (M) neliší. Pouze v případě M dochází k poklesu od 1. do 2. vrstvy a opětovnému nárůstu ve 3. vrstvě. U ostatních opatření včetně kontroly (K) a meteorologické stanice (S) je trend s přibývajícím vrstvami do hloubky postupně klesající.

Tabulka 9 Procentuální množství celkového uhlíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	C
	[cm]	[%]
S	0-40	1,69±0,11
	42-65	0,55±0,01
	65-85	0,14±0,00
K	0-43	1,67±0,22
	43-87	0,40±0,01
	87-95	0,15±0,00
M	0-50	0,83±0,02
	50-77	0,19±0,02
	77-93	0,08±0,01
MB10	0-28	1,99±0,30
	28-45	0,32±0,01
	45-87	0,08±0,01
MB50	0-30	1,58±0,01
	30-42	0,34±0,04
	42-95	0,12±0,01
MBh50	0-40	1,65±0,13
	41-77	0,53±0,01
	77-85	1,16±1,43
	85-91	0,08±0,00

Tabulka 10 Procentuální množství celkového dusíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	N
	[cm]	[%]
S	0-40	0,17±0,01
	42-65	0,05±0,00
	65-85	0,02±0,01
K	0-43	0,16±0,01
	43-87	0,04±0,00
	87-95	0,02±0,00
M	0-50	0,08±0,00
	50-77	0,02±0,00
	77-93	0,01±0,00
MB10	0-28	0,20±0,03
	28-45	0,04±0,00
	45-87	0,02±0,00
MB50	0-30	0,16±0,00
	30-42	0,04±0,01
	42-95	0,02±0,01
MBh50	0-40	0,16±0,00
	41-77	0,06±0,01
	77-85	0,13±0,13
	85-91	0,01±0,00

Tabulka 11 Procentuální množství celkového obsahu síry v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	S
	[cm]	[%]
S	0-40	0,03±0,00
	42-65	0,01±0,00
	65-85	0,01±0,00
K	0-43	0,01±0,00
	43-87	0,00±0,00
	87-95	0,00±0,00
M	0-50	0,01±0,00
	50-77	0,00±0,00
	77-93	0,00±0,00
MB10	0-28	0,03±0,00
	28-45	0,02±0,00
	45-87	0,02±0,00
MB50	0-30	0,01±0,00
	30-42	0,00±0,01
	42-95	0,00±0,01
MBh50	0-40	0,01±0,01
	41-77	0,00±0,00
	77-85	0,02±0,01
	85-91	0,01±0,00

Tabulka 12 Poměr množství celkového uhlíku a dusíku v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	C/N ratio
	[cm]	[-]
S	0-40	10,26±0,10
	42-65	10,57±0,41
	65-85	10,93±3,49
K	0-43	10,6±0,84
	43-87	9,63±0,56
	87-95	8,35±0,76
M	0-50	10,1±0,06
	50-77	8,31±0,07
	77-93	10,0±2,55
MB10	0-28	9,74±0,08
	28-45	8,18±0,31
	45-87	3,79±0,61
MB50	0-30	9,99±0,11
	30-42	9,34±0,48
	42-95	7,66±0,87
MBh50	0-40	10,3±0,50
	41-77	9,72±0,11
	77-85	7,52±3,44
	85-91	5,70±0,11

5.2.5 Stanovení dostupného obsahu C a N

V Tabulce 13 lze pozorovat obsahy dostupných dusičnanů, amonného dusíku a rozpustného uhlíku po aplikaci jednotlivých opatření.

Obsah dostupných dusičnanů je směrem do spodních vrstev půdy téměř vždy, vyjma meteorologické stanice (S) a aplikace samotného chlévského hnoje (M), klesající. U opatření společné aplikace chlévského hnoje a biocharu byl pokles do spodních vrstev vždy postupný a nejvýraznější pokles byl vždy zaznamenán ve spodních vrstvách půdy ve srovnání s obsahem v horní vrstvě ornice. Výsledky ukazují, že nejmenší pokles byl zaznamenán u opatření aplikace kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MB50). Co se týká samotné aplikace chlévského hnoje (M) a místa meteorologické stanice (S), je zde pozorován postupný nárůst dostupného množství dusičnanů ve střední vrstvě půdy. U meteorologické stanice (S) je následně ve spodní vrstvě pozorován prudký pokles.

Obsah dostupného amonného dusíku byl ve srovnání s kontrolou (K) a meteorologickou stanicí (S) v případě všech opatření klesající. Co se týká jednotlivých vrstev ve srovnání s kontrolou, (K) i meteorologickou stanicí (S), tak nejvyšších hodnot ve vrchní vrstvě půdy dosahuje opatření kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MB50). Naopak nejnižší hodnoty byly zaznamenány u opatření aplikace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v poměru 50:50 (MBh50).

Obsah rozpustného uhlíku měl ve srovnání s kontrolou (K) a meteorologickou stanicí (S) v případě všech opatření klesající tendence. Co se týká vlivu jednotlivých opatření na vrchní vrstvy půdy, tak ve srovnání s kontrolou (K) byly zaznamenány narůstající hodnoty u meteorologické stanice (S), kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu, a to jak v poměru 90:10 (MB10), tak v poměru 50:50 (MB50). U vyššího poměru vysoko-teplotního biocharu byl nárůst mírně vyšší. Klesající hodnoty byly ve srovnání s kontrolou (K) zaznamenány u opatření kombinace chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu (MBh50) a nejnižší hodnoty byly naměřeny u opatření aplikace samotného chlévského hnoje (M).

Tabulka 13 Obsah dostupného C a N v jednotlivých variantách odebraných vzorků po aplikaci příslušných opatření; S – stanice, K – kontrola, M – hnůj, MB10 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 90:10, MB50 – hnůj + vysoko-teplotní biochar 50:50, MBh50 – hnůj + středně-teplotní biochar 50:50

profil	hloubka	dusičnany	amonný N	rozpustný C
	[cm]		[mg/kg]	
S	0-40	5,17	5,42	148
	42-65	13,2	1,37	41,1
	65-85	4,02	0,61	22,5
K	0-43	17,7	4,08	112
	43-87	21,3	0,67	29,6
	87-95	\	\	\
M	0-50	6,10	3,94	51,5
	50-77	12,8	0,48	21,9
	77-93	\	\	\
MB10	0-28	12,7	3,81	139
	28-45	12,0	0,63	30,7
	45-87	5,94	0,52	17,0
MB50	0-30	17,4	7,59	148
	30-42	17,8	3,90	56,2
	42-95	11,3	0,84	14,5
MBh50	0-40	21,9	2,19	87,9
	41-77	19,3	0,65	31,4
	77-85	\	\	\
	85-91	\	\	\

6 Diskuze

Cílem této práce bylo zhodnotit účinek aplikace biocharu společně s chlévským hnojem na mobilitu živin v ošetřené půdě a míru vyplavování těchto živin. Vzhledem k tomu, že téma aplikace biocharu do půdy je v posledních letech významně zkoumáno, bylo možné najít k této problematice mnoho zdrojů. Mezi hlavní výhody biocharu, které jsou předmětem rozsáhlého zkoumání, patří jeho silně zásaditý charakter, velký specifický povrch, schopnost zadržovat vodu, zlepšovat půdní agregaci, schopnost zadržovat živiny, jako je dusík, fosfor a draslík, které jsou klíčové pro výživu rostlin apod. Aplikace organických materiálů do půdy, jako je právě biochar, by mohla potenciálně zvýšit úrodnost půdy a produkci plodin tím, že skrze své speciální vlastnosti dokáže minimalizovat vyplavování živin (Adekiya et al. 2020).

Pro účely analýzy vlivu biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy bylo z pozemku ve Zvěřínku odebráno a analyzováno celkem 49 vzorků půdy či půdy v kombinaci s příslušnými opatřeními. Pro účely komplexního posouzení vlivu biocharu na půdní charakteristiky, byly odebrány vzorky jak z ornice do 25 cm hloubky, tak z celého půdního profilu do hloubky 100 cm. Ze vzorků odebraných do 100 cm bylo možné pozorovat změnu půdních vlastností s přibývajícím hloubkou a to, zda jsou půdní charakteristiky ovlivněny pouze v orniční vrstvě nebo jsou aplikací biocharu ovlivněny i spodní vrstvy profilu. V místě každého opatření bylo odebráno do hloubky 25 cm 5 vzorků tedy 30 vzorků. Do hloubky 100 cm byly u každé varianty, vyjma MBh50, odebrány 3 vzorky z půdního profilu. U MBh50 byly odebrány vzorky 4.

Pro analýzu dlouhodobého vlivu biocharu na fyzikálně-chemické charakteristiky půdy byl biochar kombinován s chlévským hnojem. Parametry půdy, samotného biocharu a chlévského hnoje jsou zaznamenány v Tabulce 1 dle Lebrun et al. (2022). Kombinace biocharu a chlévského hnoje byla zvolena z toho důvodu, že samotný biochar z dřevěné štěpky, či obecně z dřevěných materiálů, není primárně využíván jako zdroj živin. Naopak živiny obsažené v hnoji jsou relativně labilní a biochar může napomoci k jejich stabilizaci a zpomalit jejich působení v půdě. Toto tvrzení potvrzují Albuquerque et al. (2013), Kammann et al. (2015) a Xiao et al. (2016). Ti zkoumali vliv aplikace biocharu spolu s hnojem na zvýšení účinnosti využití živin rostlinami a zabránění jejich vyplavování.

Biochar je, jak již bylo zmíněno, vysoce zásaditá látka. Její zásaditost je zapříčiněna obsahem alkalických kovů, alkálií, uhličitánů a organických funkčních skupin z procesu výroby a vstupních surovin. Dle Hossain et al. (2020) se pH biocharu pohybuje v rozmezí 6,52-12,64. Avšak výsledná hodnota pH biocharu je závislá na teplotě pyrolýzy, době setrvání v reaktoru a vstupní surovině (Weber & Quicker 2018). Například Laghari et al. 2016 zkoumali rostlinný biochar vyrobený ze slámy a zjistili, že se jeho pH pohybovalo v rozmezí 7,69-10,26. Další rostlinný biochar zkoumali Hossain et al. (2020). Ten byl vyrobený z rýžové slámy a jeho pH odpovídalo 10,50. Biochar zkoumaný v této diplomové práci byl vyroben z dřevní štěpky a hodnota pH činila 11,12. V provedeném pokusu bylo pH půdy v kontrolním odběru ornice (do 25 m) 5,58 (slabě kyselá) a v kontrolním odběru celého profilu (do 100 cm) 5,17 (slabě kyselá). Po aplikaci směsi biocharu a chlévského hnoje se hodnoty v ornici pohybovaly v rozmezí 5,41-5,76 (Graf 1). Nejvyšší nárůst hodnoty pH byl zaznamenán po aplikaci opatření MB10 (kombinace chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v poměru 90:10) a to o 0,177. Co se týká hodnot celého profilu, lze pozorovat v Tabulce 5 postupný nárůst hodnoty pH

s přibývajícím hloubkou. Pravděpodobně z důvodu postupu biocharu a chlévského hnoje do spodních vrstev půd. Avšak největší nárůst s přibývajícím hloubkou lze pozorovat u samotné kontroly a jednotlivá opatření s biocharem neměla na nárůst pH do hloubky oproti kontrole tak výrazný vliv, a to i přes jeho silně zásaditý charakter. V případě ornice bylo potvrzeno, že biochar má schopnost zvýšit pH půdy. To, že má biochar schopnost zvýšit půdní pH potvrzují Nelissen et al. (2012), kteří aplikovali do písčitohlinité půdy silážní kukuřičný biochar v množství 30 t/ha o hodnotě pH 9,81 a výsledkem bylo zvýšení pH půdy o 5,34. Co se týká společné aplikace biocharu a hnoje do půdy a vlivu na půdní pH, tím se zabývali Adekiya et al. (2020). Ti zjistili, že po společné aplikaci 15t/ha biocharu ze surového dřeva a 15t/ha drůbežního trusu se pH zvýšilo z hodnoty 6,81 na 6,88, tedy o 0,07. Ve srovnání s touto studií dosáhl námi provedený pokus v ornici většího navýšení pH v ornici (do 25 cm).

Hodnota kationtové výměnné kapacity je v rostlinných biocharech vysoká (Liang et al. 2006) z důvodu výskytu karboxylových a hydroxylových skupin v tomto materiálu. Toto tvrzení vychází ze zkoumání půd v Amazonii, kdy bylo zjištěno, že půdy s obsahem biocharu měly až 2x vyšší KVK než půdy bez biocharu. Gaskin et al. (2008); Major et al. (2009); Singh et al. (2010); Kookana et al. (2011), kteří srovnávali rostlinné biochary na bázi listů a rostlin s biochary na bázi dřeva, zjistili, že dřevěné biochary mají nižší hodnotu KVK. Hodnota KVK ornice (do 25 cm) činila v místě kontrolního odběru 123 mmol/kg (Graf 2). Po aplikaci biocharu tato hodnota v případě všech opatření narostla (MB10 – 163,2 mmol/kg; MB50 – 151 mmol/kg; MBh50 – 169 mmol/kg). U vertikálního odběru (do 100 cm) byly hodnoty KVK v 1. vrstvách všech odběrných míst vlivem biocharu navýšeny a s přibývajícím hloubkou hodnota KVK postupně klesala viz Tabulka 6. El-Naggar et al. (2018) zkoumali vliv biocharu vyrobeného z rýžové slámy na písčitohlinitou půdu v aplikační dávce 30t/ha. Hodnota KVK písčitohlinité půdy, která měla původně hodnotu 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se zvýšila na hodnotu 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tato studie potvrzuje, stejně jako námi provedené analýzy, schopnost biocharu zvýšit hodnotu KVK v půdě.

Dostupné živiny v biocharu jsou určovány vstupní surovinou a teplotou výroby (Gul & Whalen 2016). Biochar na bázi dřeva není tak bohatý na živiny, jako například biochary vyrobené z rostlinných zbytků či hnoje.

Co se týká vlivu biocharu na dostupný obsah živin v ornici (do 25 cm) (viz Tabulka 2) tak v případě K a Mg bylo po aplikaci všech opatření s biocharem pozorováno zvýšení množství těchto makroprvků. Zvýšení množství K potvrzují i Rasuli et al. (2022), kteří aplikovali do půdy biochar vyrobený ze slámy (*Triticum aestivum* L.) a kukuřice (*Zea mays* L.) a množství K v půdě se zvýšilo o 566 mg/kg biocharu vyrobeného ze slámy a o 332 mg/kg u biocharu vyrobeného z kukuřice oproti kontrolnímu odběru.

U dostupných makroprvků P a S bylo v případě P pozorováno zvýšení pouze po aplikaci samotného chlévského hnoje, po aplikaci biocharu jeho dostupné množství klesalo. U S se dostupné množství v případě aplikace opatření s biocharem nezměnilo, pouze se snížilo, a to u aplikace samotného chlévského hnoje. V případě aplikace opatření s biocharem nebylo dostupné množství tohoto prvku významně ovlivněno. Velice podobné jevy bylo možné pozorovat u vertikálního odběru (do 100 cm), kdy se opět s přidáním opatření biocharu prvky K a Mg zvyšovaly a obsahy prvků P a S se po aplikaci biocharu snižovaly (Tabulka 7).

Dále byl pozorován obsah mikroprvků v ornici (do 25 cm) (Tabulka 3). Ke zvýšení množství mikroprvků došlo po aplikaci biocharu u Cu, Fe, Mn, Na. Cu byla zvýšena pouze při

aplikaci MB50. Množství dostupného Fe bylo zvýšeno biocharem při aplikaci opatření MB50 a samotného chlévského hnoje. Dostupnost Mn byla zvýšena po aplikaci MB10 a MBh50. Co se týká zvýšení množství Na v půdě, tak bylo jeho množství navýšeno jak aplikací biocharu, tak aplikací samotného chlévského hnoje. Dá se v tomto případě předpokládat, že narůstající množství tohoto prvku bylo podpořeno společnou aplikací s chlévským hnojem. Množství Zn zůstalo po aplikaci biocharu stejné, či mírně kleslo. K navýšení množství Zn došlo pouze při aplikaci samotného chlévského hnoje.

U hodnocení vlivu biocharu na obsah mikroprvků ve vertikálním odběru (do 100 cm) (Tabulka 8) došlo ke zvýšení dostupného obsahu prvků Cu, Mn, Na, Zn v 1. vrstvách. U několika prvků byl pozorován nárůst množství dostupných obsahů prvků ve spodních vrstvách profilu. A to u Cu ve 3. vrstvě po aplikaci MBh50, Fe ve 3. vrstvě po aplikaci MB50, Mn ve 2. vrstvě po aplikaci MB10, MB50 a MBh50, Na ve 2. vrstvě po aplikaci M, MB10, MB50 a ve 3. vrstvě po aplikaci MBh50, Zn ve 3. vrstvě po aplikaci M, MB10 a MBh50. Z tohoto zjištění lze konstatovat, že jsou pozorované prvky vlivem biocharu i samotného chlévského hnoje vyplavovány i do nižších vrstev profilu.

Zvýšení dostupnosti makro a mikroživin pozorovali Albuquerque et al. (2013). Ti zjistili, že biochar z odřezků olivovníku zvýšil množství Mg, Zn, Cu a P. Dále pozorovali snížení K vlivem biocharu z pšeničné slámy. Tuto problematiku dále zkoumali i El-Naggar et al. (2015) a to jak u samotného dřevěného biocharu vyrobeného z *Conocarpus erectus* L., tak u kombinace tohoto biocharu s drůbežím trusem. V případě aplikace samotného dřevěného biocharu zjistili nárůst u prvků P a K a pokles prvků Cu, Fe, Mn a Zn. Po aplikaci kombinace biocharu a drůbežního trusu zjistili nárůst u prvků P, K, Cu a Mn a pokles prvků Fe a Zn.

Při porovnání s našimi výsledky bylo u našeho biocharu a chlévského hnoje také pozorováno zvýšení dostupnosti u K, Cu, Mn, Mg. Navíc bylo pozorováno zvýšení dostupného množství Na. Dále byl oproti studiím zaznamenán růst množství dostupného Fe, množství Zn zůstalo po aplikaci biocharu stejné nebo mírně kleslo. Pokles Zn byl potvrzen i u studie dle Hailegnaw et al. (2020), kteří aplikovali biochar z vrbové štěpky do černozemě, fluvizemě, kambizemě a v případě všech aplikací byl zaznamenán pokles mobilního Zn. Množství dostupného P aplikací biocharu klesalo. Tento výsledek je v rozporu se studií dle DeLuca et al. (2009), kteří tvrdí, že P vyprchává z biocharu při teplotě 700-800 °C. Tudíž by o něj měly být ochuzeny pouze biochary v opatřeních MB10 a MB50, což je v analýzách vyvráceno.

Dusík je uváděn jako mobilní prvek. El-Naggar et al. (2015) se zabývali dostupným dusíkem v půdě po aplikaci biocharu a drůbežního trusu. A dokázali, že vlivem aplikace této kombinace došlo k navýšení množství dusíku v půdě a biochar má tedy schopnost dusík v půdě zadržet. V naší provedeném pokusu bylo v ornici (do 25 cm) dokázáno, že množství dusičnanů nejvíce narostlo po aplikaci všech opatření, kde byl zahrnut biochar (Tabulka 4). Ve vertikálním odběru bylo pozorováno postupné narůstání množství dusičnanů do 2. vrstvy odběru (Tabulka 13). Množství dusičnanů v půdě je tedy pozitivně ovlivněno aplikací chlévského hnoje s biocharem, která zabraňuje jeho vyplavování. Množství amonného dusíku bylo v ornici (Tabulka 4) navýšeno po aplikaci M a MBh50, v případě MB10 a MB50 bylo jeho množství sníženo. Ve vertikálním odběru bylo pozorováno poměrně rychlé klesání množství amonného dusíku v půdě (Tabulka 13). Tudíž ani společná aplikace biocharu a chlévského hnoje příliš nezabraňuje jeho vyplavování.

Biochar je látka bohatá na množství uhlíku a je do půdy dodáván prostřednictvím sekvestrace uhlíku, kdy je tento uhlík později využit rostlinami. Vlivem biocharu na dostupný uhlík se zabývali Wang et al. (2016) a dokázali, že biochar dokáže podpořit růst množství rozpustného uhlíku v půdě. Po porovnání bylo v naší studii tvrzení těchto autorů potvrzeno. U horizontálního odběru do 25 cm (Tabulka 4) došlo k navýšení oproti kontrole u opatření MB50 a MBh50, tedy u opatření, kde bylo zastoupení biocharu vyšší. A u vertikálního odběru do 100 cm byl nárůst rozpustného uhlíku zaznamenán u všech opatření zahrnující biochar (Tabulka 13).

Procentuální množství celkového C, N, S a C/N bylo znázorněno v Grafech 3-6 u ornice (do 25 cm) a v Tabulkách 9-12 u profilu (do 100 cm).

U ornice byl pozorován nárůst C pouze po aplikaci opatření MB50 a MBh50 ve srovnání s kontrolou (K) (Graf 3). Tedy u opatření, kde se nacházelo větší množství biocharu. Ve vertikálním odběru (Tabulka 9) se množství celkového uhlíku po aplikaci biocharu zvýšilo v 1. vrstvě po aplikaci MB10. Nárůst byl zaznamenán i po aplikaci MBh50, ale až ve 3. vrstvě odběru. Je tedy možné, že je uhlík přemísťován vyšším množstvím biocharu i do spodních vrstev profilu a tam následně zadržován.

Pozitivní vliv biocharu na celkový obsah dusíku byl stejně jako u uhlíku zaznamenán po aplikaci opatření MB50 a MBh50 (Graf 4). K výraznému poklesu došlo po aplikaci samotného chlévského hnoje. Tento jev lze přisuzovat absenci sorpčního materiálu v podobě biocharu.

Lze tedy konstatovat, že aplikace směsi chlévského hnoje a biocharu v poměru 50:50 má schopnost zabránit vyplavování dusíku z půdy. Při analýze vertikálního odběru půdy bylo zjištěno, že stejně jako u ornice klesl celkový dusík po aplikaci samotného chlévského hnoje (Tabulka 10). S hloubkou lze v případě všech opatření, vyjma MBh50, pozorovat postupný pokles množství celkového dusíku. U MBh50 bylo pozorováno zvýšení množství dusíku ve 3. vrstvě profilu. Což naznačuje, že je do této vrstvy dusík za pomoci tohoto opatření vyplavován.

Obsah celkové síry v ornici po aplikaci opatření není významný (Graf 5). Množství síry se pohybovalo pod či těsně nad hranicí detekce přístroje. Stejný jev bylo možné pozorovat i u vertikálního odběru (Tabulka 11). Opět se množství síry pohybovalo na hranici meze detekce přístroje. To potvrzuje studii dle DeLuca et al. (2009), kteří zjistili, že biochary na bázi dřeva jsou ochuzeny o síru.

Poměr prvků C/N (Graf 6) byl aplikací biocharu ovlivněn pouze negativně. Ke snížení poměru došlo v případě aplikace MB50. Vertikální odběr ukázal, že poměr C/N se s aplikací opatření s biocharem významně neliší a s hloubkou je trend klesající (Tabulka 12). Aplikací samotného chlévského hnoje došlo k jeho snížení a opětovnému navýšení ve 3. vrstvě. Výsledky naší studie jsou v rozporu s výsledky studie dle DeLuca et al. (2009), kteří tvrdí, že biochary na bázi dřeva mají extrémně vysoký poměr prvků C/N.

Na základě provedených analýz lze tedy konstatovat, že biochar použitý v této studii dokázal zvýšit hodnotu pH v ornici a KVK v ornici i celém profilu. Z pozorovaných prvků došlo po aplikaci biocharu k nárůstu dostupného množství K, Mg, Cu, Fe, Mn v ornici a k nárůstu dostupného Cu, Fe, Mn, Zn, Na v celém půdním profilu. Vlivem biocharu byl dále u vybraných prvků pozorován přesun a zadržení v nižších vrstvách profilu. Dále bylo po aplikaci biocharu prokázáno zvýšení množství dusičnanů v půdě, a to jak v ornici, tak ve vertikálním odběru celého půdního profilu. Množství amonného dusíku bylo v ornici zvýšeno pouze po

aplikaci MBh50, v dalších případech aplikace biocharu bylo pozorováno jeho snížení. S přibývajícím hloubkou bylo pozorováno pouze snížení množství amonného dusíku, a to i po aplikaci opatření s biocharem. Celkový dusík byl po aplikaci opatření s biocharem pozitivně ovlivněn, a to v případě MB50 a MBh50. Ve srovnání s aplikací samotného chlévského hnoje (M) bylo dokázáno, že společná aplikace chlévského hnoje a biocharu zabraňuje vyplavování dusíku z půdy v ornici i v celém půdním profilu.

Aplikace biocharu má pozitivní vliv na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy.

7 Závěr

- Diplomová práce na téma "Dlouhodobý vliv biocharu na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy" se zabývala tím, zda má biochar vyrobený z dřevní štěpky v určitých poměrech a v kombinaci s chlévským hnojem vliv na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy. Cílem bylo zhodnotit účinek aplikace biocharu společně s chlévským hnojem na mobilitu a mobilitu vyplavování v ošetřené půdě. Jednotlivé aplikační varianty byly následovné:
 - **M** – půda ošetřena pouze chlévským hnojem,
 - **MB10** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v objemovém poměru 90:10,
 - **MB50** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a vysoko-teplotního biocharu v objemovém poměru 50:50,
 - **MBh50** – půda ošetřena směsí chlévského hnoje a středně-teplotního biocharu v objemovém poměru 50:50.
- V odebraných vzorcích bylo stanoveno pH, KVK, obsah dostupných živin, obsah celkového C, N, S a C/N a obsah dostupného C a N.
- Byly sledovány obsahy dostupných živin ve srovnání s kontrolou (K):
 - **K** – došlo k navýšení v ornici i profilu po aplikaci M, MB10, MB50 i MBh50,
 - **Mg** – došlo k navýšení v ornici i profilu po aplikaci MB10, MB50 i MBh50, u M došlo ke snížení obsahu ve vertikálu,
 - **P** – po aplikaci biocharu bylo množství v ornici sníženo; v profilu došlo k navýšení pouze po aplikaci M, dostupné množství s hloubkou klesalo,
 - **S** – po aplikaci opatření s biocharem nedošlo v ornici ke změně dostupného množství a po aplikaci chlévského hnoje byl pozorován úbytek; po aplikaci opatření s hloubkou množství S klesá,
 - **Cu** – v ornici bylo množství zvýšeno pouze po aplikaci MB50; množství v profilu s hloubkou klesá vyjma MBh50,
 - **Fe** – množství bylo zvýšeno pouze po aplikaci MB50 a M; množství v profilu klesá vyjma MB50,
 - **Mn** – došlo k navýšení po aplikaci MB10 a MBh50,
 - **Na** – množství dostupného prvku bylo v ornici navýšeno po aplikaci všech opatření M, MB10, MB50, MBh50; s hloubkou se přesouvá a usazuje do hlubších vrstev,
 - **Zn** – k navýšení v ornici došlo pouze po aplikaci M, u MB50 bylo množství stejné s K; v profilu s hloubkou klesá vyjma M a MBh50.
- Bylo zjištěno, že po aplikaci opatření samotného chlévského hnoje (M) klesla hodnota KVK, navýšilo se množství dostupného P, Zn, snížilo se procentuální množství C, N. Hodnota pH s hloubkou narůstala. Po aplikaci MB10 se hodnota pH v ornici zvýšila, významně se snížilo množství dostupného Cu a Fe a zvýšilo se množství Mn. Hodnota pH s hloubkou narůstala. U opatření MB50 bylo zvýšeno dostupné množství Cu, Fe, procentuální množství C, N, dostupný amonný dusík a rozpustný C. Významně bylo sníženo množství Mn a poměr celkového C/N.

Opatření MBh50 zapříčinilo navýšení KVK, dostupnost K, Mg a Na, dostupného množství dusičnanů a snížení množství Zn.

- Kombinace biocharu s hnojem je přínosná. Zejména co se týká vlivu na zamezení vyplavování dusíku z půdy. Po aplikaci samotného chlévského hnoje bylo pozorováno vyplavení, zatímco po společné aplikaci chlévského hnoje a biocharu (ve všech použitých poměrech) bylo zaznamenáno zadržení dusíku v půdě z důvodu přídatku biocharu.
- Výsledkem bylo zjištění, že aplikace biocharu má pozitivní vliv na vybrané fyzikálně-chemické charakteristiky půdy. Zároveň byla potvrzena hypotéza, že společná aplikace biocharu z dřevní štěpky a chlévského hnoje zlepší zásobenost půdy živinami konkrétně K, Mg, Cu, Fe, Mn, Na.

8 Literatura

- Abel S, Peters A, Trinks S, H. Schonsky, M. Facklam, G. Wesselek. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 183–191.
- Adekiya AO, Agbede TM, Ejue WS, Aboyeji CM, Dunsin O, Aremu CO, Owolabi AO, Ajiboye BO, Okunlola OF, Adesola OO. 2020. Biochar, poultry manure and NPK fertilizer: sole and combine application effects on soil properties and ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) performance in a tropical alfisol. *Open Agric.* **5**:30–39.
- Agegnehu G, Nelson PN, Bird MI. 2016. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. *Sci. Total Environ* **569–570**:869–879.
- Al Arni S. 2018. Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel. *Renewable Energy* **124**:197-201.
- Albuquerque JA, Salazar P, Barrón V, Torrent J, del Campillo MC, Gallardo A, Villar R. 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agron. Sustain. Dev* **33(3)**:475–484.
- Allen MR, Frame DJ, Huntingford C, Jones CD, Lowe JA, Meinshausen M, Meinshausen N. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* **458**:1163–1166.
- Arif M, Jan T, Riaz M, Fahad S, Adnan M, Ali K, Rasul F. 2020. Biochar; a remedy for climate change. *Environment, climate, plant and vegetation growth* 151-171.
- Aslam Z, Khalid M, Aon M. 2014. Impact of biochar on soil physical properties. *Scholarly Journal of Agricultural Science* **4(5)**:280-284.
- Azuara M, Kersten SR, Kootstra AMJ. 2013. Recycling phosphorus by fast pyrolysis of pig manure: concentration and extraction of phosphorus combined with formation of value-added pyrolysis products. *Biomass and bioenergy* **49**:171-180.
- Baronti S, Alberti G, Delle Vedove G, Di Gennaro F, Fellet G, Genesio L, Vaccari FP. 2010. The biochar option to improve plant yields: first results from some field and pot experiments in Italy. *Italian Journal of Agronomy* **5(1)**:3-12.
- Batista E, Shultz J, Matos TTS, Fornari MR, Ferreira TM, Szpoganicz B, de Freitas RA, Mangrich AS. 2018. *Sci. Rep.* **8**:10677.
- Biliadis F, Kalderis D, Richardson C, Barbayiannis N, Gasparatos D. 2022. Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of the Total Environment* 159782.

- Bindraban PS, van der Velde M, Ye L, Van den Berg M, Materechera S, Kiba DI, Van Lynden G. 2012. Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **4(5)**:478-488.
- Blanco-Canqui H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* **81(4)**:687-711.
- Břendová K, Tlustoš P, Száková J, Bohuněk M. 2014. Využití biouhli (biocharu) k úpravě půdních vlastností. *Biom.cz*. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-biouhli-biocharu-k-uprave-pudnich-vlastnosti> (accessed January 2023).
- Broecker W S. 2007. Climate change: CO2 arithmetic. *Science* **315**:1371.
- Brown RA, Kercher AK, Nguyen TH, Nagle DC, Ball WP. 2006. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. *Organic Geochemistry* **37(3)**:321-333.
- Budai A, Zimmerman AR, Cowie AL, Webber JBW, Singh BP, Glaser B, Masiello CA, Andersson D, Shields F, Lehmann J, Camps Arbestain M, Williams M, Sohi, Joseph S. 2013. Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability. *International biochar initiative* 1-10.
- Burrell LD, Zehetner F, Rampazzo N, Wimmer B, Soja G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* **282**:96-102.
- Cayuela ML, Van Zwieten L, Singh BP, Jeffery S, Roig A, Sánchez-Monedero MA. 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **191**:5-16.
- CEN ISO/TS 17892-4 2004, 2004. Geotechnical Investigation and Testing – Laboratory Testing of Soil – Part 4: Determination of Particle Size Distribution. Ljubljana, Slovenija 1 pp. 1–26. ISO 17892-4:2016. doi:ISO/TS 17892-4:2004/Cor 1:2006.
- Cha JS, Park SH, Jung SC, Ryu C, Jeon JK, Shin MC, Park YK. 2016. *J. Ind. Eng. Chem.* **40**:1.
- Clough TJ, Condon LM. 2010. Biochar and the nitrogen cycle: introduction. *Journal of environmental quality* **39(4)**:1218-1223.
- Das O, Sarmah AK. 2015. *Sci. Total. Environ.* 512-513:682 (2015).
- Egamberdieva D, Alaylar B, Kistaubayeva A, Wirth S, Bellingrath-Kimura SD. 2022. Biochar for improving soil biological properties and mitigating salt stress in plants on salt-affected soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **53(2)**:140-152.
- El-Naggar A, El-Naggar AH, Shaheen SM, Sarkar B, Chang SX, Tsang DC, Ok YS. 2019. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: a review. *Journal of environmental management* **241**:458-467.

- El-Naggar A, Lee SS, Awad YM, Yang X, Ryu C, Rizwan M, Ok YS. 2018. Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils. *Geoderma* **332**:100-108.
- El-Naggar AH, Usman AR, Al-Omran A, Ok YS, Ahmad M, Al-Wabel MI. 2015. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar. *Chemosphere* **138**:67-73.
- Enders A, Hanley K, Whitman T, Joseph S, Lehmann J. 2012. *Bioresour. Technol.* **114**:644.
- EXCEL. Microsoft Office Excel 2021. Microsoft office Enterprise 2021. USA.
- Gaskin J, Steiner C, Harris K, Das KC, Bibens B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE* **51(6)**:2061-2069.
- Githinji L. 2014. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science* **60(4)**:457-470.
- Glaser B, Lehr VI. 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific reports* **9(1)**:9338.
- Graber ER, Singh B, Hanley K, Lehmann J. 2017. Determination of cation exchange capacity in biochar. *Biochar: A guide to analytical methods* 74-84.
- Gray M, Johnson MG, Dragila MI, Kleber M. 2014. *Biomass Bioenergy* **61**:196.
- Gul S, Whalen J K. 2016. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry* **103**:1-15.
- Hailegnaw NS, Mercl F, Pračke K, Praus L, Száková J, Tlustoš P. 2020. The role of biochar and soil properties in determining the available content of Al, Cu, Zn, Mn, and Cd in soil. *Agronomy* **10(6)**:885.
- Hardie M, Clothier B, Bound S, Oliver G, Close D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* **376**:347-36.
- Hartley W, Riby P, Waterson J. 2016. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability. *Journal of Environmental Management* **181**:770-778.
- Hossain MZ, Bahar MM, Sarkar B, Donne SW, Ok YS, Palansooriya KN, Bolan N. 2020. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar* **2**:379-420.
- International Biochar Initiative (IBI). 2015. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. Available from https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf (accessed February 2023).

- Islam MU, Jiang F, Guo Z, Peng X. 2021. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* **209**:104926.
- ISO 11260. 1994. Standard of soil quality - Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jaszberenyi I, Loch J, Sarkadi J. 1994. Experiences with 0.01M calcium chloride as an extraction reagent for use as a soil testing procedure in Hungary. *Commun. Soil Sci. Plant Analysis* **25**:1771–1777.
- Jindo K, Mizumoto H, Sawada Y, Sanchez-Monedero MA, Sonoki T. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosci* **11**:6613-6621.
- Kammann CI, Schmidt H-P, Messerschmidt N, Linsel S, Steffens D, Müller C, Koyro H-W, Conte P, Joseph S. 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Sci. Rep* **5**:11080.
- Karer J, Wimmer B, Zehetner F, Kloss S, Soja G. 2013. Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agric. Food. Sci.* **22**:390-403.
- Kelly CN, Benjamin J, Calderon FC, Mikha MM, Rutherford DW, Rostad CE. 2017. Incorporation of biochar carbon into stable soil aggregates: the role of clay mineralogy and other soil characteristics. *Pedosphere* **27(4)**:694-704.
- Kloss S, Zehetner F, Dellantonio A, Hamid R, Ottner F, Liedtke V, Schwanninger M, Gerzabek MH, Soja G. 2012. *J. Environ. Qual.* **41**:990.
- Kookana RS, Sarmah AK, Van Zwieten L, Krull E, Singh B. 2011. Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Adv. Agron.* **112**:104-135.
- Laghari M, Naidu R, Xiao B, Hu Z, Mirjat MS, Hu M, Fazal S. 2016. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **96(15)**:4840-4849.
- Lee J W, Kidder M, Evans BR, Paik S, Buchanan AC, Garten CT, Brown RC. 2010. *Environ. Sci. Technol.* **44**:7970.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change* **11**:403-427.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **11**:1-2.

- Lehmann J, Joseph S. 2009. Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, London, Sterling, VA.
- Lehmann J, Joseph S. 2009. Biochar for environmental management: an introduction J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London, pp. 1-9
- Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. 2011. Soil Biol. Biochem. **43**:1812.
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. **5**:381–387.
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill BJOJFJEG, Neves EG. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil science society of America journal* **70(5)**:1719-1730.
- Major J, Steiner C, Downie A, Lehmann J. 2009. Biochar effects on nutrient leaching. In: J Lehmann, S Joseph (eds) Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, London.
- Matthews H D, Caldeira K. 2008. Stabilizing climate requires near-zero emissions. *Geophys. Res. Lett.* **35**:L04705.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 Soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science Plant Analysis* **15**:1409-1416.
- Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, Raper SCB, Frieler K, Knutti R, Frame DJ, Allen MR. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* **458**:1158–1162.
- Mikan CJ, Abrams MD. 1995. Altered forest composition and soil properties of historic charcoal hearths in southeastern Pennsylvania. *Canadian Journal of forest research* **25(5)**:687-696.
- Mukherjee A, Zimmerman AR, Harris W. 2011. *Geoderma* **163**:247.
- Mukherjee A, Zimmerman AR. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma* **193**:122-130.
- Nelissen V, Rütting T, Huygens D, Staelens J, Ruyschaert G, Boeckx P. 2012. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry* **55**:20-27.
- Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das K, Ahmedna M, Rehrh D, Watts DW, Busscher WJ. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* **3(1)**:195–206.

- Peer V, Mikeska M, Kielar J, Němček O. 2019. Pyrolýzní biochar vs. torifikovaný materiál: vliv na půdní vlastnosti.
- Pohořelý M, Sedmihradská A, Trakal L, Jevič P. 2019. Biochar–výroba, vlastnosti, certifikace, použití. *Waste Forum* **3**:197-210.
- Rasuli F, Owliaie H, Najafi-Ghiri M, Adhami E. 2022. Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. *Arid Land Research and Management* **36(1)**:1-26.
- Rondon MA, Lehmann J, Ramírez J, Hurtado M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biol. Fertil. Soils* **43**:699–708.
- Sáňka M, Vácha R, Poláková Š, Fiala P. 2018. Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Ministerstvo životního prostředí, Praha.
- Sha Z, Li Q, Lv T, Misselbrook T, Liu X. 2019. Response of ammonia volatilization to biochar addition: a meta-analysis. *Science of the Total Environment* **655**:1387-1396.
- Singh B, Dolk MM, Shen Q, Camps-Arbestain M. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. *Biochar: A guide to analytical methods* 23.
- Singh B, Singh BP, Cowie AL. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Soil Research* **48(7)**:516-525.
- Solomon S, Plattner G, Knutti R, Friedlingstein P. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS* **106**:1704–1709.
- Spears S. 2018. What is Biochar? REGENERATION INTERNATIONAL. Available from <https://regenerationinternational.org/2018/05/16/what-is-biochar/> (accessed January 2023)
- Spokas KA. 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management* **1(2)**:289.
- StatSoft Inc. 1984–2013 (2022): Statistica, version 12.
- Subedi R, Kammann C, Pelissetti S, Taupe N, Bertora C, Monaco S, Grignani C. 2015. Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? *Eur. J. Soil Sci* **66**:1044–1053.
- Uzoma K C, Inoue M, Andry H, Fujimaki H, Zahoor A, Nishihara E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil use and management* **27(2)**:205-212.
- Verheijen F, 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 functions. *EUR* **24099(162)**:2183-2207.

- Verma M, M'hamdi N, Dkhili Z, Brar SK, Misra K. 2014. Thermochemical Transformation of Agrobiomass into Biochar: Simultaneous Carbon Sequestration and Soil Amendment. *Biotransformation of Waste Biomass into High Value Biochemicals* 51-70.
- Wang C, Lv H, Yang W, Li T, Fang T, Lv G, Wang H. 2017. SVCT-2 determines the sensitivity to ascorbate-induced cell death in cholangiocarcinoma cell lines and patient derived xenografts. *Cancer Letters* **398**:1-11.
- Wang D, Griffin DE, Parikh SJ, Scow KM. 2016. Impact of biochar amendment on soil water soluble carbon in the context of extreme hydrological events. *Chemosphere* **160**:287-292.
- Wang J, Wang S. 2019. Preparation, modification, and environmental application of biochar: a review. *Journal of Cleaner Production* **227**:1002-1022.
- Weber K, Quicker P. 2018. Properties of biochar. *Fuel* **217**:240-261.
- Weil R, Brady N. 2016. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- Woolf D, Amonette JE, Street-Perrott FA, Lehmann J, Joseph S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications* **1(1)**:56.
- Xiao Q, Zhu L, Zhang H, Li X, Shen Y, Li S. 2016. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth. *Crop Pasture Sci* **67**:495–507.
- Yu OY, Raichle B, Sink S. 2013. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *Int. J. Energy Environ. Eng.* **4**:44.
- Zhang C, Zeng G, Huang D, Lai C, Chen M, Cheng M, Wang R. 2019. Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. *Chemical Engineering Journal* **37**: 902-922.
- Zhang J, You C. 2013. *Energy Fuels* **27**:2643.