

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 7: Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství

Využití produktů pyrolýzy biomasy jako stimulantů růstu rostlin

Markéta Zmátlová
Kraj Vysočina

Stařeč 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 7: Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství

**Využití produktů pyrolýzy biomasy jako stimulantů
růstu rostlin**

**Use of biomass pyrolysis products as plant growth
stimulants**

Autoři: Markéta Zmátlová

Škola: Gymnázium Třebíč, Masarykovo nám. 116/9, 674 01

Kraj: Kraj Vysočina

Vedoucí: Mgr. Kateřina Janatová

Konzultant: doc. RNDr. Vít Gloser, Ph.D.

Stařeč 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracovala samostatně a použila jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

Ve Starči dne 24. února 2025

Markéta Zmátlová

Poděkování

Nejvíce bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Vítu Gloserovi, Ph.D., z Ústavu experimentální biologie rostlin Masarykovy univerzity v Brně, jelikož mě provedl celým výzkumem a poskytl mi mnoho cenných rad, znalostí a zkušeností. Děkuji i za neuvěřitelnou ochotu, a především za všechny čas, který mi věnoval. Také mi poskytl mnoho materiálů, které mi značně usnadnily práci.

Také bych ráda upřímně poděkovala Bc. Magdaléně Hrubé, za její laskavost, rady a pomoc při realizaci této práce.

V neposlední řadě chci poděkovat Ústavu experimentální biologie rostlin Masarykovy univerzity v Brně za poskytnuté prostory, materiál a přístroje, které byly nezbytné pro uskutečnění mé práce.

Anotace

Tato práce se zaměřuje na porovnání dvou typů biocharu vyrobených z čistírenského kalu, který je nebezpečný odpad vyžadující správné nakládání. Využití tohoto biocharu v zemědělství by mohlo pomoci nejen likvidovat tento odpad, ale také přinést výhody pro půdu a zemědělskou produkci. V praktické části byl proveden faktoriální kultivační experiment s destruktivní analýzou. Po dokončení experimentu byly zhodnoceny parametry jako výnos nadzemní biomasy, listová plocha, mykorhizní kolonizace kořenů, pH půdy i biocharu, obsah chlorofylu v listech, rychlost fotosyntézy a provedena chemická analýza biomasy a použitých biocharů. Výsledky ukázaly, že torefikovaný biochar v půdě podpořil větší růst biomasy i větší listovou plochu. Také se ukázalo, že přidání obou typů biocharu do půdy podporuje rozvoj mykorhizní kolonizace.

Klíčová slova

čistírenský kal; biochar; torefakce

Annotation

This research focuses on the comparison of two types of biochar produced from sewage sludge, which is a hazardous waste requiring proper management. The use of this biochar in agriculture could not only help to dispose of this waste but also bring benefits to the soil and agricultural production. In the practical part, a factorial cultivation experiment with destructive analysis was conducted. After the completion of the experiment, parameters such as aboveground biomass yield, leaf area, mycorrhizal colonization of roots, soil and biochar pH, leaf chlorophyll content, photosynthesis rate and chemical analysis of biomass and biochar used were evaluated. The results showed that torrefied biochar resulted in higher biomass yield and larger leaf area. It also showed that the addition of any type of biochar to the soil promoted the development of mycorrhizal colonization.

Keywords

sewage sludge; biochar; torrefaction

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Přehled problematiky	7
2.1	Čistírenský kal	7
2.2	Složení čistírenských kalů	7
2.3	Možnosti nakládání s čistírenskými kaly	8
2.4	Pyrolýza	9
2.4.1	Torefakce a její vliv na složení a vlastnosti biocharu	10
2.5	Využití biocharu v zemědělství	12
2.5.1	Historie.....	12
2.5.2	Účinky aplikace biocharu na půdu.....	12
2.6	Biochar a mykorhizní symbióza	12
2.7	Cíle práce	13
3	Metodika experimentu	14
3.1	Použité materiály	14
3.1.1	Biochar z vysokoteplotní pyrolýzy (K-C)	14
3.1.2	Biochar z mikrovlnné torefakce (T-C).....	14
3.2	Popis experimentu a pokusných variant	14
3.2.1	Podmínky experimentu	15
3.3	Sledované faktory	15
3.3.1	Nadzemní biomasa.....	15
3.3.2	Listová plocha.....	15
3.3.3	Obsah chlorofylu v listech	16
3.3.4	Rychlost fotosyntézy.....	16
3.3.5	pH půdy a jednotlivých biocharů.....	16
3.3.6	Mykorhizní kolonizace kořenů	16
3.3.7	Chemické složení listů	17
3.3.8	Chemické složení biocharů	17
4	Výsledky	18
5	Diskuse.....	23
6	Závěr	26
7	Použitá literatura	27
8	Seznam obrázků a tabulek	29

1 ÚVOD

Zvyšující se počet obyvatel naší planety zvyšuje nároky na produkci potravin. Zemědělská rostlinná výroba bude muset v budoucnu častěji reagovat na kombinace stresů, včetně biotických a abiotických. K nim patří například, sucho, napadení patogeny, kontaminace půdy a vody těžkými kovy nebo vysoká salinita. Může také docházet o ochuzení půdy o důležité živiny. Tato situace vyžaduje větší pozornost k vlastnostem půdy a doplňování živin do půdy pro zajištění její dlouhodobé úrodnosti. (Agarwal, et al., 2022)

Kromě klasických hnojiv lze půdu přihnojovat i biocharem. Biochar je látka získaná z různých složek pyrolýzou, tedy procesem termické přeměny s omezeným přísunem kyslíku. Biochar pozitivně ovlivňuje vlastnosti půdy, mikroorganismy a zemědělskou produkci. Také snižuje pravděpodobnost znečištění a degradace životního prostředí. Biochar se běžně vyrábí pyrolýzou dřevní štěpky. (Yadav, et al., 2023)

Biochar lze ale vyrobit z různých dalších vstupních materiálů, jako jsou jiná rostlinná biomasa, zbytky jídla a další odpady biologického původu nebo kal z čistíren odpadních vod. Dřevní štěpka je vedlejším produktem dřevozpracujícího průmyslu, nejedná se tedy přímo o odpad. Zbytky jídla jsou sice odpad, ale množství, které vzniká, jsme schopni regulovat. V případě čistírenského kalu se ale jedná o nebezpečný odpad, který je složité skladovat a není jednoduché ho dále využít. Vznikající množství takového odpadu rovněž nejsme schopni regulovat, dokonce ho bude zcela jistě s narůstající lidskou populací přibývat.

V této práci jsem se proto zaměřila na možnosti využití biocharu vyrobeného pyrolýzou čistírenského kalu. Jak již bylo zmíněno, čistírenský kal je odpadní produkt čistíren odpadních vod. Tento odpad je nebezpečný, protože obsahuje například těžké kovy (např. Cd, Hg), mikrobiologické patogeny (*Escherichia coli*, *salmonela*), organické kontaminanty (PAU, PCB a OCP) (Tlustoš, et al., 2021). Nakládání s čistírenskými kaly je tedy přísně regulováno (Havelka, 2019). Zpracování kalu metodou pyrolýzy či torefakce tudíž přináší nejen efektivní způsob, jak se zbavit nebezpečného odpadu, ale také, jak ho využít pro efektivnější zemědělství.

2 PŘEHLED PROBLEMATIKY

2.1 Čistírenský kal

Čistírenský kal představuje biologicky aktivní směs složenou z vody, organických látek (zahrnujících lidské odpady, zbytky potravin apod.), mrtvých i živých mikroorganismů (včetně patogenních) a různých anorganických a organických toxických kontaminantů, jako jsou například těžké kovy nebo polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). Čistírenský kal vzniká jako odpadní produkt činnosti čistíren odpadních vod. (Kacprzak, et al., 2017)

Čistírny odpadních vod, známé též pod zkratkou ČOV, jsou zařízení, do kterých jsou odváděny komunální nebo průmyslové odpadní vody a ve kterých jsou tyto vody čištěny. Často se nachází v blízkosti měst nebo obcí. Také se budují v blízkosti zemědělských či průmyslových podniků, kde slouží k čištění odpadních vod z průmyslové a ze zemědělské výroby. Čistírny odpadních vod obecně fungují na principu napodobování přirozených čistících procesů v přírodních vodách, kde se nerozpuštěné složky zachytávají na překážkách, na kterých se dále biologicky rozkládají. Nerozpuštěné složky se postupně usazují a rozkládají se ve vrstvách usazenin bez přístupu kyslíku. (Švehla, et al., 2004)

Existuje více typů čistíren odpadních vod, liší se mechanismem čištění znečištěné vody. Nejběžnější je způsob mechanicko-biologický. Mechanicko-biologická čistírna čistí vody ve třech základních stupních. První stupeň je mechanický, někdy se mu také říká ochranná část čistírny. Zde postupně dochází k zachytávání hrubých nerozpuštěných nečistot. Je zde několik zařízení (lapák štěrku, česle), která postupně zachycují nečistoty od těch nejobjemnějších až po ty nejmenší. Posledním krokem mechanického čištění jsou usazovací nádrže, kde se od vody těžší pevné částice oddělují gravitační silou. Následuje biologický stupeň. Odpadní voda z mechanické části postupuje dále do aktivační nádrže s aktivovaným kalem. To je směs mikroorganismů, které svým metabolismem čistí odpadní vodu. Zejména to jsou různé druhy bakterií, ale také houby, plísně, kvasinky, prvoci, vířníci nebo hlístice. Pro optimální průběh je nutné směs promíchávat, aby došlo k jejímu provzdušnění. Mikroorganismy během procesu čištění štěpí složité organické látky (bílkoviny, škroby) na jednodušší organické látky (cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny). Dále je sedimentací oddělen aktivovaný kal od vyčištěné vody. Část kalu jde zpět do aktivační nádrže a druhá část se dále zpracovává, aby bylo možné ji dále využít například právě v zemědělství. Poslední krok čištění vody se nazývá terciální čištění. Vody se v tomto procesu dočistí. Odstraňují se z ní především dusík a fosfor, které ve vodách napomáhají množení sinic. V této fázi dochází také k odstranění škodlivých organismů. Je důležité zmínit, že kvalita samotného kalu je také úzce spjata s kvalitou vody přiváděné do čistírny. Optimálním řešením by proto bylo minimalizovat obsah rizikových látek již v přiváděné odpadní vodě. (Švehla, et al., 2004)

2.2 Složení čistírenských kalů

Čistírenský kal obsahuje řadu prvků, které mohou hrát klíčovou roli při jeho recyklaci. Nejzastoupenější z nich jsou dusík, fosfor, draslík a síra. Tlustoš et al. (2021) uvádí, že kaly

v sušině obsahují průměrně 4,7 % N; 2,7 % P a 0,4 % K. To znamená, že průměrné obsahy dusíku a fosforu v čistírenských kalech jsou násobně vyšší než jejich obsahy v chlévském hnoji. Při průměrném množství fosforu v kalu a povolené aplikační dávce by byl přísun fosforu do půdy 27 kg na ha a rok. Toto množství by bez problémů dokázalo pokrýt potřebu většiny u nás pěstovaných rostlin, ale z hlediska vyrovnané výživy rostlin je množství draslíku nedostatečné. (Tlustoš, et al., 2021)

Ze zkoumaných vzorků na mikrobiologické parametry překračovala také téměř polovina vyhláškou stanovené limitní hodnoty čtyř hodnocených patogenů. Tyto sledované patogeny představuje bakterie *Escherichia Coli*, enterokoky, termotolerantní koliformní bakterie a salmonela. Lepší situace než v případě mikrobiologických parametrů je v případě rizikových prvků. Monitorováno bylo v kalu množství arsenu, kadmia, chromu, mědi, rtuti, niklu, olova a zinku. Nejvíce nevyhovujících vzorků bylo v případě mědi (12 %), nejméně naopak v případě olova a zinku (2 %). Prvky byly v kalech velice nerovnoměrně rozloženy. Dokazují to velmi rozdílné hodnoty prezentovaných mediánů a průměrů u všech sledovaných obsahů rizikových prvků kromě kadmia a rtuti. Například u chromu většina analyzovaných vzorků nepřesáhla obsah 90 mg/kg suš., v jednom případě byla ale nalezena koncentrace dokonce až 1211 mg/kg suš. Také se u čistírenských kalů sleduje obsah organických kontaminantů. Do této skupiny spadají polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), polychlorované bifenylly (PCB) a organochlorované pesticidy (OCP). Z těchto látek limitům vyhovělo 95 % vzorků. V kalu byly ale poměrně vysoce obsaženy syntetické parfémové látky (SPL), rezidua léčiv a látek osobní potřeby (PPCPs) a ty v současné době nejsou nijak legislativou omezovány. (Tlustoš, et al., 2021)

Problémem jsou i resistantní mikroorganismy, které se v kalech vyskytují v důsledku výskytu malé koncentrace antibiotik a desinfekčních prostředků. Celosvětově přibývá závažných bakteriálních onemocnění, na které antibiotika nepůsobí. Takové bakterie mohou být nebezpečné v následném vstupu do potravního řetězce. (Matějů, et al., 2018)

2.3 Možnosti nakládání s čistírenskými kaly

Jak již bylo zmíněno v úvodu, nakládání s čistírenskými kaly je přísně regulováno. Nakládání s čistírenskými kaly je legislativně upravováno novelizovaným zákonem o odpadech (č. 185/2001 Sb.) a prováděcí vyhláškou o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě (č. 437/2016 Sb.). (Ministerstvo životního prostředí)

Možnosti nakládání s kaly jsou následující: kompostování, přímá aplikace na půdu, nebo termické zpracování (spalování, pyrolýza). (Havelka, 2019)

Kompostování je řízený biologický rozklad pevné organické hmoty, který probíhá za aerobních podmínek. Během tohoto procesu se biologicky rozložitelný odpad působením bakterií, hub a dalších mikroorganismů postupně přeměňuje na půdní složky, zejména humus. U čistírenských kalů může kompostování přispět nejen k jejich hygienizaci, ale také k rozkladu nežádoucích organických látek a snížení zápachu. Při kompostování také dochází k mineralizaci organických sloučenin, které řídí dostupnost kationtů rostlinám, což má

za následek snížení dostupnosti těžkých kovů. Kompostováním by bylo také možné výrazně snížit množství vybraných skupin reziduí. Kompostování má ale přísná mikrobiologická kritéria. Je proto klíčové, jestli kompostárna budou kaly přijímat, či nikoliv. (Rozkošný & Hudcová, 2024; Havelka, 2019)

Další možnost využití kalů je přímá aplikace na půdu. Kal z čistíren odpadních vod je velmi cenný zdroj živin, který má významné protierozní a hnojivé vlastnosti. Kal může ale obsahovat řadu nebezpečných látek. Je proto důležité, aby byla aplikace na půdu bezpečná a nehrozilo ohrožení životního prostředí a zdraví lidí. Na půdu lze aplikovat dle zákona o odpadech pouze upravený kal. Jedná se o kal, který prošel biologickou, chemickou nebo tepelnou úpravou, dlouhodobým skladováním či jiným vhodným procesem, který výrazně snižuje obsah patogenních organismů, a tím i zdravotní rizika spojená s jeho aplikací na půdu. (Havelka, 2019; Matějů, et al., 2018)

Kal lze před aplikací na půdu upravit například vápněním. Vápěním lze rychle dosáhnout snížení mikrobiologické kontaminace, avšak vápění také snižuje hnojivou hodnotu čistírenského kalu. Při procesu vápnění totiž uniká amoniak, čímž v kalu výrazně klesá množství využitelného dusíku. Fosfor se vápněním váže do formy těžce využitelného apatitu. (Matějů, et al., 2018)

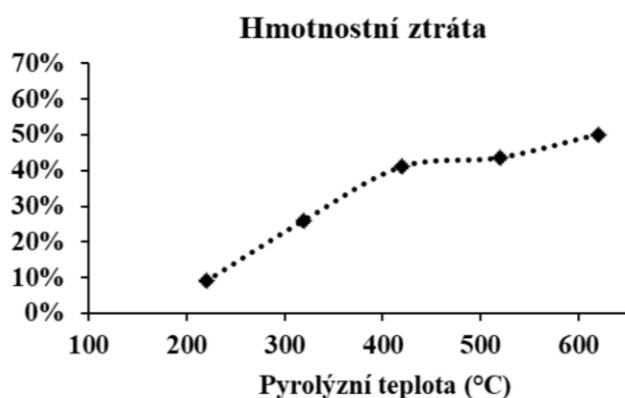
Kal z čistíren odpadních vod je také možné termicky zpracovávat například pyrolýzou.

2.4 Pyrolýza

Pyrolýza je proces, při kterém dochází k tepelnému rozkladu materiálu bez přístupu kyslíku. Nejčastěji probíhá za teplot mezi 300–1000 °C. Pyrolýza se dle rychlosti nárůstu teploty dělí na tři základní skupiny, a to na pomalou (0,1–1 °C/min), rychlou (10–200 °C/min) a bleskovou (>1000 °C/s). Výchozí organická hmota je přeměněna na tři složky. První z nich je nekondenzovatelná plynná část (pyrolyzní plyn), další je kondenzovatelná kapalná (pyrolyzní olej) a poslední je část pevná (biochar). Vstupní látkou může být dřevo, již zmiňovaný čistírenský kal, ale také zbytky jídla, plasty nebo jiné odpadní látky. K procesu je třeba dodat energii, jelikož se jedná o proces endotermní. Tuto energii lze získat spalováním pyrolyzního plynu nebo oleje. Proces pyrolýzy je tedy v určité míře energeticky soběstačný. Složení a množství vznikajícího biocharu je ovlivněno složením původního materiálu určeného k pyrolýze, teplotou, délkou trvání a rychlostí samotného procesu pyrolýzy. Transformace uhlíkatých složek biocharu je přitom nejvíce závislá na teplotě, při které pyrolýza probíhá. V důsledku působení vysokých teplot dochází ke sterilizaci a organické látky obsažené v kalu procházejí termochemickými transformacemi, takže dochází k jejich degradaci a vyšší chemické stabilitě. (Tlustoš, et al., 2021; Kos, 2016)

2.4.1 Torefakce a její vliv na složení a vlastnosti biocharu

Pyrolýza, jež probíhá nejčastěji v teplotním rozmezí 300–350 °C, je označována jako torefakce. Tlustoš, et al. (2021) sledovali změny v materiálech závislé na změnách teplot pyrolýzy. Sledovanými parametry byla hmotnostní ztráta, změny pH, obsah popelovin, obsah a přístupnost živin. Rozmezí teplot při experimentu bylo 220–620 °C. Nižšími pyrolyzními teplotami lze dosáhnout menší hmotnostní ztráty pevného zbytku (obrázek 1).

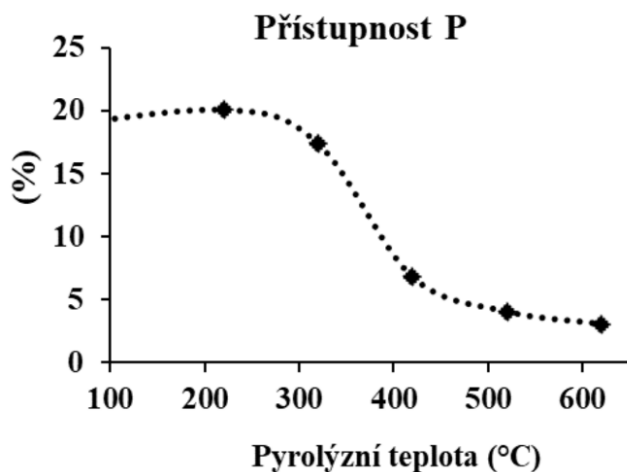


Obrázek 1: Hmotnostní ztráta vzorku kalu v závislosti na teplotě torefakce/pyrolýzy (převzato z Tlustoš et al. (2021)).

Avšak vztah teploty a hmotnostní ztráty není lineární. Při teplotě 220 °C byla hmotnostní ztráta pouze cca 13 %, ale při teplotě 620 °C byl hmotnostní úbytek asi 50 %. Do teploty 400 °C je hmotnostní úbytek skoro lineární a při teplotách vyšších než 400 °C už se výrazně nemění. Celkový obsah dusíku v biocharu začíná klesat mezi teplotami 200 a 320 °C. Pravděpodobně je to volatilizací¹ zejména amoniaku. Při teplotách vyšších než 320 °C celkový obsah dusíku klesá výrazněji. (Tlustoš, et al., 2021)

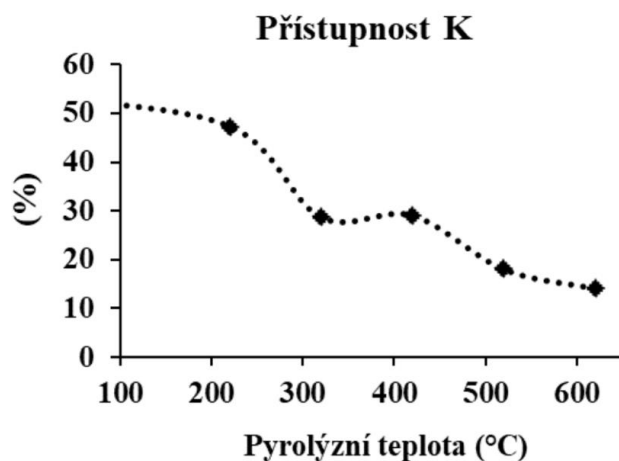
U čistírenských kalů je často vyzdvihován jejich vysoký obsah fosforu, který je pro rostliny důležitý, a často je ho v půdě nedostatek. Evropská unie ho považuje dokonce za kritickou surovinu (Havelka, 2019). V sušeném kalu byl obsah fosforu 3,2 % a při pyrolýze probíhající při nejvyšší teplotě vzrostl až na 6 %. To odpovídá hmotnostní ztrátě pevného zbytku. Zajímavý je graf relativního podílu přístupného fosforu (obrázek 2).

¹ Proces tékání látek z povrchu či vrchní vrstvy půdy. (Balík, et al., 2012)



Obrázek 2: Podíl přístupného P z celkového obsahu ve vzorku kalu v závislosti na teplotě pyrolýzy (převzato z Tlustoš et al. (2021)).

Na něm vidíme, že se relativní podíl přístupného fosforu při teplotách 220 a 320 °C pohyboval okolo 20 % jeho celkového obsahu. Při teplotě už ale přístupnost výrazně klesla až na 6,8 %. Při vyšších teplotách dále klesala až na konečných 3,1 % při teplotě 620 °C. Podobný trend můžeme pozorovat i u podílu přístupného draslíku (obrázek 3). Fosfor a draslík během torefakce či pyrolýzy nevolatilizují, ale s rostoucí teplotou se jejich koncentrace v biocharu úměrně zvyšuje. Zvýšená teplota zároveň způsobuje přeměny sloučenin těchto prvků, čímž se snižuje jejich rozpustnost a tedy i dostupnost pro rostliny.



Obrázek 3: Podíl přístupného K z celkového obsahu ve vzorku kalu v závislosti na teplotě pyrolýzy (převzato z Tlustoš et al. (2021)).

2.5 Využití biocharu v zemědělství

2.5.1 Historie

Biochar se v západním zemědělství využívá již přes 150 let, avšak jeho historie sahá až do starověku. První důkazy o aplikaci biocharu do půdy pocházejí právě z této doby, kdy se starověké civilizace snažily jeho přidáním zlepšit úrodnost půdy. První uhlíkem obohacené půdy, označované jako „terra preta“ byly objeveny v Brazílii, ale později také v Německu, Austrálii nebo v Subsaharské Africe. Biochar vzniká i přirozeně, například při požárech. (Schmidt, et al., 2021)

2.5.2 Účinky aplikace biocharu na půdu

Aplikaci biocharu na půdu se zlepšuje její struktura, což vede ke zlepšení jejích fyziologických, chemických a také biologických vlastností. Kromě toho lze aplikací biocharu docílit odstranění těžkých kovů prostřednictvím adsorpce. Také po aplikaci biocharu dochází ke zrychlení rozkladu organických polutantů, které zahrnují polychlorované bifenyl, halogenderiváty uhlovodíků, chlorbenzen, p-nitrofenol, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), diethylftalát a 2-chlorbifenyly. (Yadav, et al., 2023)

Biochar je rovněž schopen dlouhodobě ukládat uhlík v půdě a to především díky dvěma hlavním vlastnostem. Zaprvé, biochar je stabilní a odolný vůči chemickým i biologickým cestám rozkladu v půdě. A zadruhé, biochar obsahuje více uhlíku v porovnání s biomasou. Poskytuje sorbční plochu a vazebná místa pro živiny, a také plochu pro rozvoj mikroorganismů zlepšujících vlastnosti půdy a růst rostlin. (Yadav, et al., 2023)

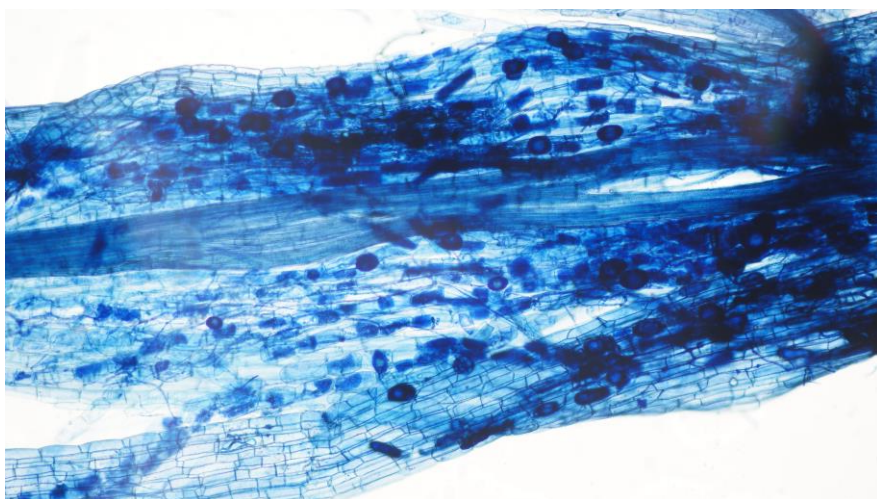
2.6 Biochar a mykorhizní symbióza

Dostupnost živin pro rostliny ovlivňuje také druhové složení a aktivita mikrobů žijících v půdě.

Většina suchozemských rostlin využívá zejména nějakou formu symbiózy s houbami – mykorhizu (obrázek 4). Princip mykorhizní symbiózy spočívá v tom, že rostlina poskytuje část uhlíkatých látek vytvořených denně při fotosyntéze (až 20 %) symbiotické houbě. Houba na oplátku zlepšuje například dostupnost minerálních látek, zejména dusíku a fosforu, pro rostlinu prostřednictvím zvětšení sorbční plochy kořenů i aktivními procesy rozkladu látek v půdě (Gryndler, et al., 2004). Další výhody, které mykorhiza rostlině přináší, jsou například zvýšená odolnost vůči půdním škůdcům, chorobám i vůči suchu, tolerance vůči těžkým kovům a lepší struktura půdy. Současné hojně používané zemědělské postupy, jako jsou používání hnojiv a pesticidů, obdělávání půdy nebo pěstování monokultur, mykorhizním houbám škodí. V důsledku toho jsou agroekosystémy o tyto houby v dnešní době často ochuzeny. (Gosling, et al., 2006)

Biochar by mohl být cestou ke zlepšení zhoršující se kvality půd. Může totiž tyto žádoucí biologické procesy významně podpořit. Biochar pomáhá zejména vytvořit příznivé podmínky pro mikrobiální kolonizaci – jeho pórovitost napomáhá zvětšením povrchu pro rozvoj mycelia

hub nebo sorpci vody. Tyto procesy pak následně vedou ke zlepšení dostupnosti a využití živin rostlinami. (Yadav, et al., 2023) Jak významně ale na tyto procesy působí biochar vyrobený z různých materiálů, to zatím není známo.



Obrázek 4: Mykorhizní kolonizace v kořeni kukuřice seté, zvětšeno 20x.

2.7 Cíle práce

Aplikace biocharu z odpadních kalů do půdy je nejen šetrný způsob likvidace problematického odpadu, ale může být také ekonomicky výhodným způsobem podpory růstu rostlin jako částečná náhrada průmyslových hnojiv.

Cílem mé práce bylo tedy zjistit, jestli může aplikace biocharu vyrobeného pyrolýzou čistírenských kalů do běžné zemědělské půdy v reálně použitelných dávkách na růst rostlin stimulační efekt, podobný efektům popsáných při použití biocharu ze dřeva. Zkoumala jsem také, jestli se může lišit účinek biocharu získaného různou technologií zpracování (za různých teplot) na rostliny. Cíl vychází z hypotézy, že pokud je čistírenský kal zpracováván při nižší teplotě, živiny se z něj následně uvolňují rychleji a jsou tedy pro rostliny dostupnější. Takto vyrobený biochar může stimulovat růst rostlin více než biochar vyrobený za vysoké teploty.

Mým cílem bylo také zjistit, jestli ovlivňuje biochar z čistírenských kalů rozvoj symbiotických mikroorganismů – mykorhizních hub.

3 METODIKA EXPERIMENTU

3.1 Použité materiály

3.1.1 Biochar z vysokoteplotní pyrolýzy (K-C)

Výzkum jsem prováděla se dvěma druhy biocharu. První byl biochar zpracovávaný metodou vysokoteplotní pyrolýzy (600 °C) technologií německé společnosti PYREG. Od září 2020 je technologie využívána čistírnou odpadních vod v Trutnově-Bohuslavicích. Výsledný karbochar, jak produkt trutnovská čistírna nazývá, byl v březnu 2022 certifikován jako pomocná půdní látka a v červenci téhož roku přestal být krajským úřadem Královéhradeckého kraje jako první taková látka v České republice řazen na seznam odpadů. (Vincourová, 2022)

3.1.2 Biochar z mikrovlnné torefakce (T-C)

Druhý byl biochar, který byl připraven na zařízení vyvíjeném v centru AdMaS brněnského VUT. Od prvního biocharu se liší hlavně tím, že je vyráběn metodou mikrovlnné torefakce, tedy pyrolýzy, která probíhá při nižších teplotách (300–400 °C). Tlustoš et al. (2021) uvádí, že nižší pyrolyzní teplotou lze docílit lepší přístupnosti živin (zejména fosforu a draslíku) obsažených v biocharu. Proto by stimulační účinek aplikace torefikovaného kalu na růst rostlin mohl být potenciálně větší než v případě aplikace biocharu pyrolyzovaného.

3.2 Popis experimentu a pokusných variant

Efekt, který má přidání biocharu na růst rostlin, byl zkoumán pomocí faktoriálního kultivačního experimentu s destruktivní analýzou. Pokusné varianty se lišily přidavkem NPK hnojiva (nehnojené a hnojené), typem biocharu (pyrolyzovaný, torefikovaný) a množstvím přidaného biocharu (2 t/ha, 6 t/ha). Celkem tedy bylo 10 variant (tabulka 1). Každá varianta zahrnovala 10 rostlin, u variant 1 a 2 bylo rostlin 20. Celkem bylo tedy pěstováno 120 rostlin.

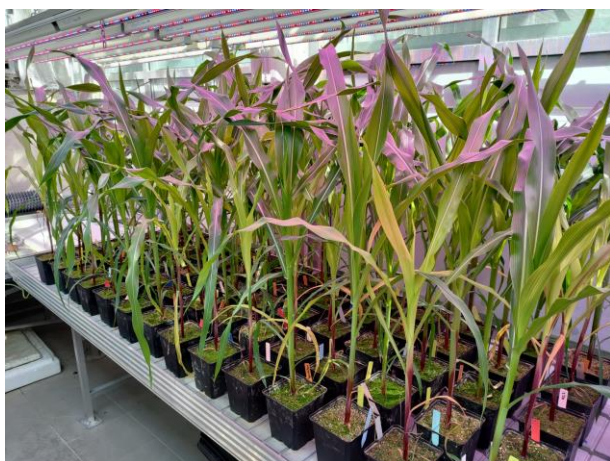
Tabulka 1: Přehled pokusných variant (dávka hnojiva = 70 kg N/ha půdy, T-C = torefikovaný biochar; K-C = pyrolyzovaný biochar/karbochar).

ČÍSLO VARIANTY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Typ biocharu	×	×	T-C	T-C	K-C	K-C	T-C	T-C	K-C	K-C
Dávka biocharu (t/ha)	×	×	2	6	2	6	2	6	2	6
Hnojení	×	✓	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓

Experiment probíhal po dobu šesti týdnů, od 19. srpna do 2. října 2024. Jako pěstební substrát byla použita živinově chudší hlinito-písčítá zemědělská půda typu kambizem, protože umožňuje lepší sledování vlivu výživy na růst rostlin. Do této půdy byly podle rozpisu variant homogenně přimísleny zkoumané složky. Po naplnění různých variant upravené půdy do květináčů o objemu 1,5 litru byly zasazeny sazenice kukuřice seté deset dnů po naklíčení.

3.2.1 Podmínky experimentu

Rostliny byly pěstovány v klimatizovaném skleníku s přidavným osvětlením, které svítilo 14 hodin denně. Průměrná teplota v průběhu experimentu byla 22 °C ve dne a 16 °C v noci. Kvůli omezení vlivu umístění rostliny ve skleníku byly experimentální varianty uspořádány ještě do 10 bloků, přičemž rozmístění rostlin v rámci jednoho bloku bylo plně náhodné (obrázek 5).



Obrázek 5: Kukuřice seté pěstované ve skleníku, vyfoceno 20. září 2024.

Rostliny byly zalévány dvakrát až třikrát týdně destilovanou vodou do plné saturace půdy. Běžně byl objem zálivky 100 ml, pokud bylo potřeba, zálivka byla zvýšena, ale vždy stejně pro všechny varianty.

3.3 Sledované faktory

3.3.1 Nadzemní biomasa

Pro zjištění biomasy nadzemní části rostliny byla použita destruktivní analýza. Každou rostlinu jsme rozdělili na zelené listy, suché nezelené listy a stonek. Jelikož je analýza kořenů pracná, časově náročná a pouze velmi orientační, kořeny jsme se pro tuto analýzu nezabývali. Části jsme posléze sušili v sušárně. Jakmile byly vzorky usušené, vážili jsme je pomocí analytických vah RADWAG typ AS 220/X. Data byla zpracována softwarem Statistica.

3.3.2 Listová plocha

U každé varianty jsme třikrát měřili listovou plochu pomocí skeneru a programu pro analýzu obrazu ImageJ. U ostatních rostlin jsme listovou plochu dopočítávali pomocí poměru hmotnosti usušených listů k listové ploše listů naskenovaných rostlin.

3.3.3 Obsah chlorofylu v listech

Měření obsahu chlorofylu v listech rostlin bylo provedeno ručním optickým přístrojem chlorofylmetr SPAD 502 Plus (Konica-Minolta, Japonsko). Byla provedena dvě měření na každém listu použitého pro měření rychlosti fotosyntézy a jejich průměr použitý pro přepočet průměrného množství chlorofylu. Přepočet relativního signálu přístroje na obsah chlorofylu v mg na gram biomasy byl proveden na základě kalibrace po extrakci vybraných vzorků acetonem a spektrofotometrickém stanovení chlorofylu.

3.3.4 Rychlost fotosyntézy

Rychlost fotosyntézy byla sledována automatickým gazometrickým systémem Ciras 3 (PP Systems, Amesbury, USA) pracujícího na principu sledování příjmu CO_2 listem rostliny. Maximální rychlost fotosyntézy byla měřena za teploty $25\text{ }^\circ\text{C}$, ozáření $1500\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ a koncentrace CO_2 420 ppm. Měření bylo provedeno vždy na nejmladším plně vyvinutém listu na rostlině u pěti rostlin z každé experimentální varianty dva dny před ukončením experimentu.

3.3.5 pH půdy a jednotlivých biocharů

pH půdy jsme měřili aktivní a výměnnou reakcí půdy. Nejprve jsme navážili 1 g půdy a vzorek jsme rozmělnili ve třecí misce a následně jsme ho smísili s 25 ml destilované vody, to šlo o aktivní reakci půdy, nebo s 25 ml 1M roztoku chloridu draselného (KCl), to šlo o reakci výměnnou. Takto připravené směsi jsme umístili do třepačky Heathrow Scientific 120460. Po promíchání jsme vzorky přefiltrovali přes filtrační aparaturu a následně změřili pH pomocí pH metru ORION, model 290 A, s použitím pH elektrody Theta '90 typu HC 173. Každé měření jsme provedli ve třech opakováních.

pH biocharů jsme měřili totožně, avšak nezahrnuli jsme variantu s chloridem draselným. Každé měření jsme v tomto případě opakovali pouze dvakrát.

3.3.6 Mykorhizní kolonizace kořenů

Procentuální mykorhizní kolonizace byla zjištěna pomocí mikroskopických pozorování. Tato metoda je velmi orientační, subjektivní a časově náročná. Segmenty odebraných kořenů byly nejprve fixovány několik dnů v 70% etanolu. Potom byly propláchnuty destilovanou vodou a ponechány 3 dny v 2,5% KOH na projasnění při laboratorní teplotě. Potom byly opět propláchnuty destilovanou vodou a okyselené 1% HCl. Po okyselení byla přidán roztok 0,05% trypanové modři v laktoglycerolu (Brundrett et al. 1984). Na takto obarvených kořenech byla zjištěna procentuální kolonizace mykorhizními houbami pod stereomikroskopem Leica S8 APO při zvětšení 20x. Pozorovali jsme 5 opakování u každé varianty a z výsledných dat jsme vypočítali aritmetický průměr mykorhizní kolonizace pro danou variantu.

3.3.7 Chemické složení listů

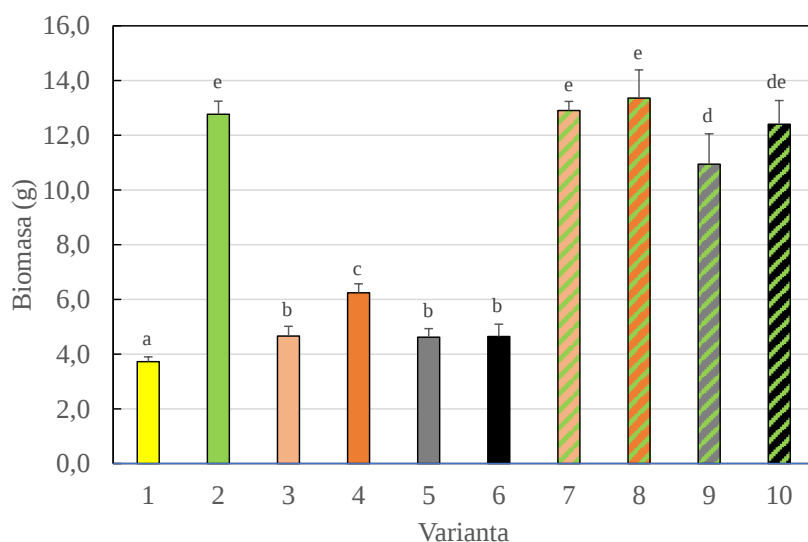
Sušina listů byla namleta na odstředivém mlýnu Retsch ZM 100 a mineralizována. Směs na mineralizaci obsahovala 200 mg biomasy, 5 ml koncentrované kyseliny dusičné (HNO_3) a 2x 1 ml H_2O_2 (1 ml byl přidán po každém cyklu ohřevu). Čirý mineralizát byl doplněn destilovanou vodou na 25 ml. Mineralizace byla provedena mikrovlnným mineralizačním systémem Berghof typ MWS-2. Následně byla pracovníky Ústavu chemie MUNI provedena kvantitativní analýza obsahu P, K, Mg, Fe, S, Ca metodou ICP-MS.

3.3.8 Chemické složení biocharů

Chemická analýza obou biocharů (torefikovaného i pyrolyzovaného) probíhala podobně jako analýza biomasy, ale směs na mineralizaci se skládala pouze z 200 mg daného biocharu, 10x 1 ml H_2O_2 a následně byla doplněna na 25 ml destilovanou vodou.

4 VÝSLEDKY

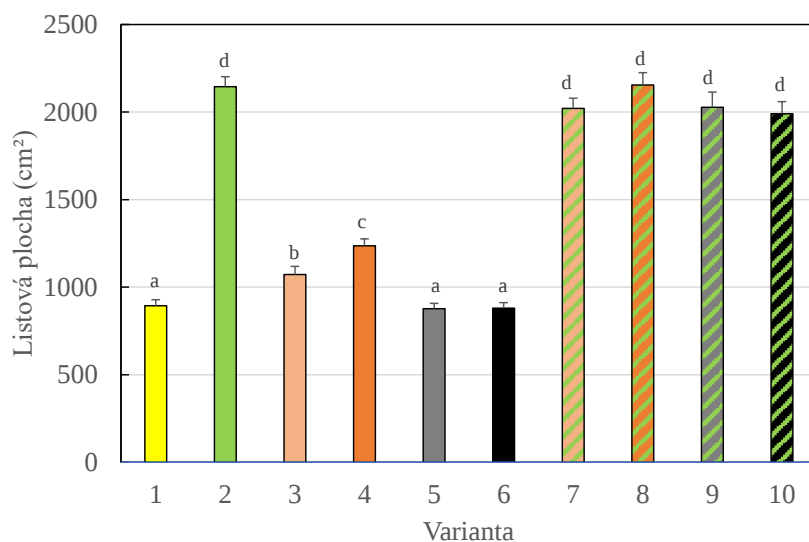
Tato kapitola prezentuje výsledky experimentu, jenž byl zaměřen na porovnání růstu a výživy rostlin s přidáním dvou různých typů biocharu. Sledovány byly následující parametry: nadzemní biomasa, listová plocha, pH půdy i biocharů, mykorhizní kolonizace kořenů rostlin, chemické složení listů, biocharů, obsah chlorofylu v listech a rychlost fotosyntézy.



Obrázek 6: Hmotnost biomasy nadzemní části. Sloupce značí průměrné hodnoty, chybové úsečky střední chyby průměrů. (n= 9-20). Různá písmena nad sloupci indikují průkazně rozdílné hodnoty.

Při porovnání hmotnosti nadzemní biomasy rostlin (obrázek 6) lze pozorovat, že varianta 4, která neobsahovala hnojivo, ale byla obohacena větší dávkou (6 t/ha) torefikovaného biocharu, vykazovala průkazně vyšší výnos biomasy, než varianta 1, jež neobsahovala ani NPK hnojivo, ani biochar. To znamená, že torefikovaný biochar stimuluje růst biomasy více než biochar pyrolyzovaný, jelikož při porovnání varianty 4 s variantou 6 (varianty se stejnou dávkou přidávaného biocharu lišící se pouze jeho typem) pozorujeme opět statisticky průkazné rozdíly.

Na grafu listové plochy (obrázek 7) pozorujeme průkazné rozdíly mezi nehnojenými variantami s přidáním torefikovaným biocharem a pyrolyzovaným biocharem (varianty 3, 4 a 5, 6). Varianty s přidáním torefikovaným biocharem, zvláště varianta 4, měly větší listovou plochu než varianty obohacené o biochar pyrolyzovaný. Mezi variantami 2 (s přidáním hnojivem) a variantami 7, 8, 9, 10 žádný průkazný rozdíl nebyl.



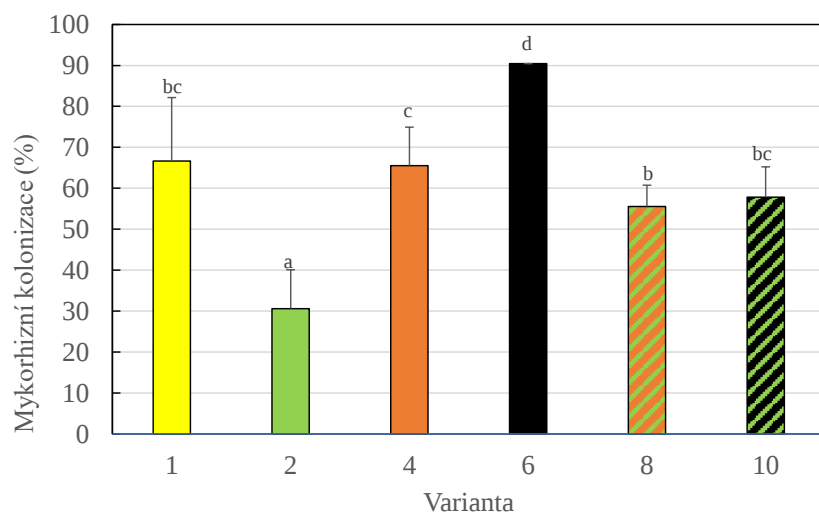
Obrázek 7: Listová plocha jedné rostliny na konci experimentu. Sloupce značí průměrné hodnoty, chybové úsečky střední chyby průměru. (n= 9-20). Různá písmena nad sloupcei indikují průkazně rozdílné hodnoty.

Podíváme-li se na tabulku hodnot pH výluhů půdy (tabulka 2), uvidíme, že hodnoty pH závisely na typu reakce. Pokud šlo o aktivní reakci půdy, pH se pohybovalo kolem 6,3, zatímco u reakce výměnné se pH pohybovalo kolem 5,2. To odpovídá běžné půdě. U výluhů biocharů můžeme pozorovat, že výluh torefikovaného biocharu byl kyselější než výluh biocharu pyrolyzovaného.

Tabulka 2: Průměrné hodnoty pH výluhů půdy a biocharů

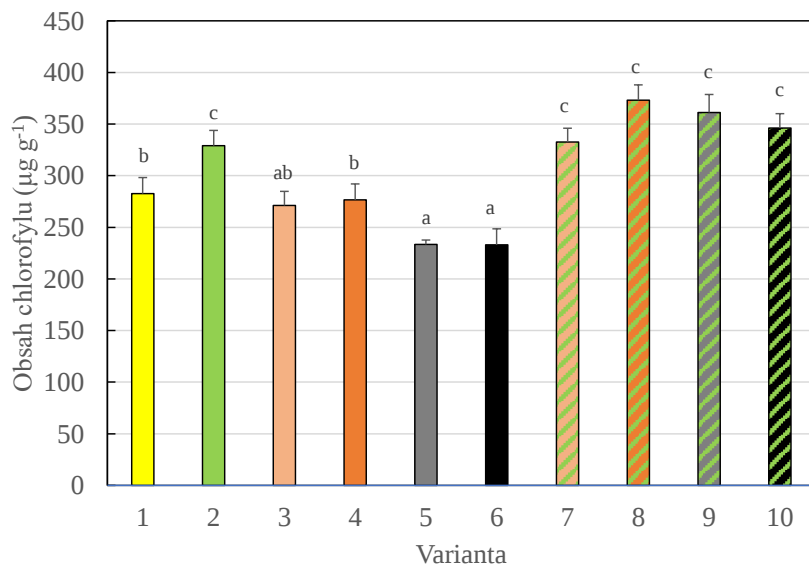
Vzorek	Půda ve vodě	Půda v KCl	K-C ve vodě	T-C ve vodě
pH	6,3	5,2	7,7	6,8

Na grafu procentuální mykorhizní kolonizace kořenů (obrázek 8) vidíme, že nejméně byla mykorhiza rozvinutá u varianty 2, tudíž u varianty pouze s přidáním hnojivem. Mykorhizní kolonizace tedy byla přidáním hnojiva potlačena. Naopak tomu bylo u variant s přidáním biocharu. Negativní efekt hnojiva na kolonizaci byl přidáním biocharu potlačen. Mykorhizní kolonizaci podpořil přidání biochar nezávisle na jeho typu. Nejlépe to lze pozorovat u varianty 10, jelikož u ní došlo v porovnání s variantou se stejným množstvím hnojiva bez biocharu (varianta 2) k průkaznému rozšíření mykorhizní kolonizace.



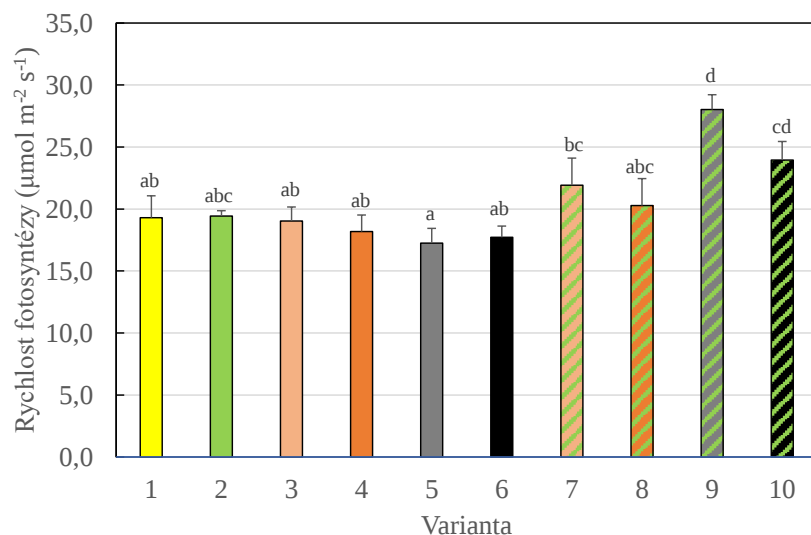
Obrázek 8: Procentuální mykorhizní kolonizace kořenů. Průměrné hodnoty, chybové úsečky střední chyby průměrů (n= 4).

Na grafu obsahu chlorofylu v listech rostlin (obrázek 9) vidíme, že torefikovaný biochar měl na obsah chlorofylu lepší vliv než pyrolyzovaný biochar (varianta 4).



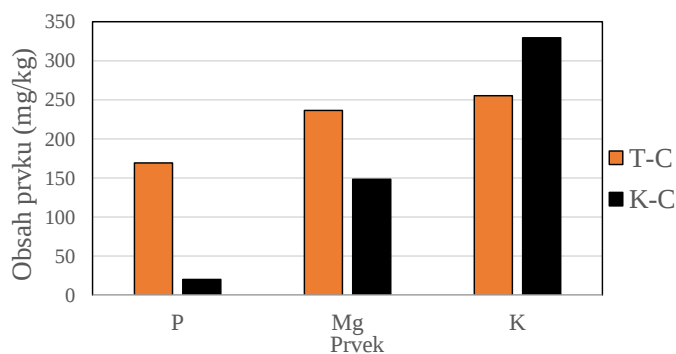
Obrázek 9: Obsah chlorofylu v listech. Průměrné hodnoty, chybové úsečky střední chyby průměrů (n= 10).

Graf rychlosti fotosyntézy (obrázek 10) ukazuje, že mezi rychlostmi fotosyntézy jednotlivých variant bez NPK hnojiva průkazné rozdíly nebyly, avšak s přidáním NPK hnojivem pyrolyzovaný biochar napomáhal k vyšší rychlosti fotosyntézy (varianta 9).



Obrázek 10: Rychlost fotosyntézy. Průměrné hodnoty, chybové úsečky střední chyby průměrů (n= 5).

Chemická analýza vodních výluhů biocharů ukázala, že z biocharu torefikovaného se vodou uvolní prokazatelně více živin. Zaměříme se na fosfor, hořčík a draslík. Podíváme-li se na obsah těchto tří prvků, které se uvolnily do vodního výluhu (obrázek 11), vidíme, že se z torefikovaného biocharu uvolnilo mnohonásobně více fosforu.



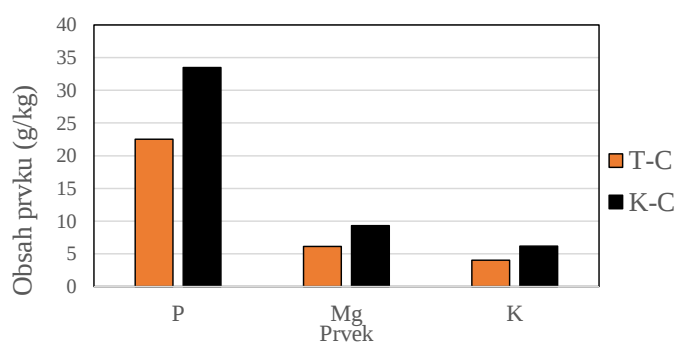
Obrázek 11: Porovnání obsahu P, Mg, K ve vodním výluhu biocharů

Podobně to bylo i s uvolněným hořčíkem, avšak rozdíl nebyl až tak výrazný jako u fosforu. V případě draslíku vidíme, že se ho více uvolnilo průměrně z pyrolyzovaného biocharu, ale dvě provedené opakování se od sebe značně lišily (tabulka 3).

Tabulka 3: Hodnoty vodního výluhu K

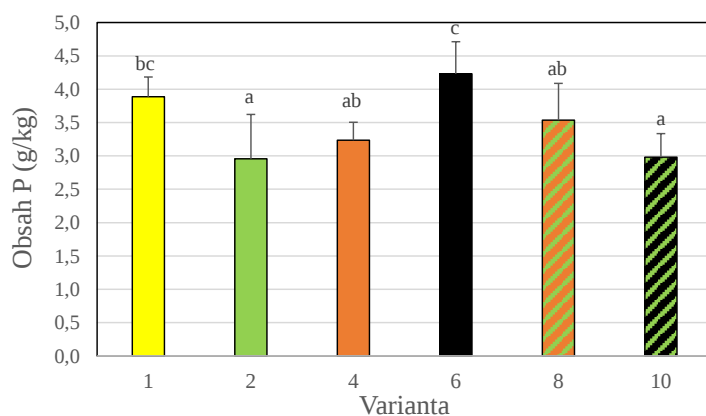
K (mg/kg)	T-C	K-C
1	275,6	501,1
2	234,8	157,6
průměr	255,2	329,35

Naopak chemická analýza mineralizovaných biocharů ukázala, že v torefikovaném biocharu je celkový obsah živin výrazně nižší než v biocharu pyrolyzovaném (obrázek 12). Tato metoda ukazuje, kolik živin je celkově v biocharu bez ohledu na jejich uvolnitelnost.



Obrázek 12: Porovnání obsahu P, Mg, K ve dvou typech biocharů

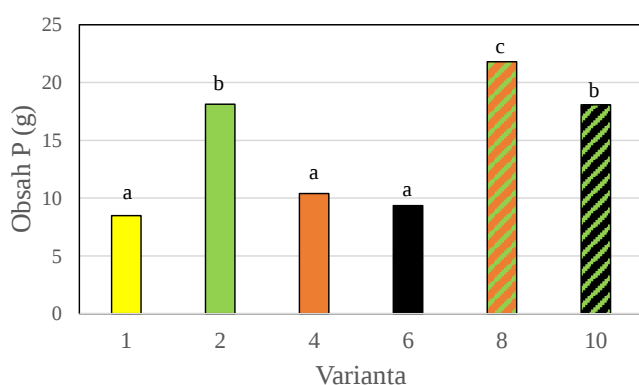
Z grafu obsahu jednotlivých prvků v mineralizované biomase (obrázek 13) není zcela patrné, kolik kterého prvku rostlina skutečně přijala. Z grafu je zřejmé, že nehnojená varianta (varianta 1) měla fosforu na jednotku biomasy průkazně více než varianta hnojená (varianta 2). Nejvíce fosforu v biomase měla varianta 6. Podobně to bylo i s prvky K a Mg.



Obrázek 13: Obsah fosforu (P) v biomase rostlin. Analyzovány byly jen rostliny vybraných variant. Průměrné hodnoty a střední chyby průměru (n=4).

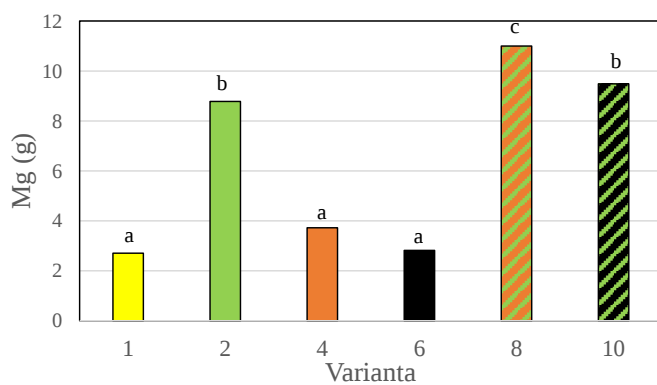
Avšak je nutné brát v potaz, že se tento graf ukazuje obsah daného prvku na kg biomasy, ale není z něj zjevné, jakou hmotnost daného prvku rostlina opravdu přijala. Proto byly tyto údaje přepočítány na celkovou hmotnost suché nadzemní biomasy jednotlivých rostlin.

Pokud se podíváme na tento graf pro fosfor (obrázek 14), vidíme, že mezi variantami 1, 4 a 6 žádný prokazatelný rozdíl nebyl, ale varianta 8 (hnojená s torefikovaným biocharem) přijala prokazatelně více fosforu než varianta 2 (hnojená bez biocharu) i než varianta 10 (hnojená s pyrolyzovaným biocharem).



Obrázek 14: Celkové průměrné množství P obsažené v biomase jednotlivé rostliny vybraných variant.

Na grafu pro hořčík pozorujeme velmi podobný trend jako u fosforu (obrázek 15). Opět zde sledujeme, že nejvíce hořčíku je ve variantě s torefikovaným biocharem. Velmi obdobně tak je tomu i u draslíku.



Obrázek 15: Celkové průměrné množství Mg násobený obsažené v biomase jednotlivé rostliny vybraných variant.

5 DISKUSE

Při sledování vlivu typu biocharu na růst biomasy bylo zjištěno, se typy má biochar vyrobený pyrolýzou čistírenského kalu podobné stimulační vlastnosti jako biochar ze dřeva. Yadav, et al. (2023) ve své studii popisují, že biochar ze dřeva má pozitivní vliv na výnos plodin. Také uvádí, že biochar v půdě podporuje mikrobiální aktivitu. Oba výsledky se potvrdily i s biocharem z čistírenských kalů. Typy biocharů se ale ve stimulačním účinku na rostliny liší. Torefikovaný biochar stimuluje růst biomasy rostliny lépe než biochar pyrolyzovaný. Listy rostlin variant s torefikovaným biocharem měly větší listovou plochu, a to jak u variant bez přidaného hnojiva, tak i u variant s hnojivem. Tento výsledek byl pravděpodobně zapříčiněn lepší dostupností živin (zvláště fosforu) v biocharu, který byl zpracováván metodou torefakce, jak je popsáno dále

Podobný experiment ve své metodice popisují Tlustoš et al. (2021). Zabývali se vegetačním nádobovým experimentem se dvěma různými typy půd – kambizem (pH = 5,3) a fluvizem (pH = 7,0). Experiment prováděli s hlávkovým salátem a do půdy aplikovali biochar zpracovaný při teplotách 220 °C, 320 °C, 420 °C, 520 °C a 620 °C. Na kambizemi aplikace biocharu zpracovaného při jakékoliv teplotě pozitivně ovlivnila výnos plodin, avšak největší výnos byl zaznamenán u biocharu zpracovaném při teplotě 220 °C.

Větší uvolnitelnost živin byla v našem pokusu následně potvrzena výluhem z torefikovaného kalu, kde se projevil zvýšený zejména obsah fosforu a hořčíku. Tím byla podpořena hypotéza, že rozdílná teplota pyrolýzy má vliv na dostupnost živin ve výsledném produktu. Tato metoda totiž ukázala, kolik živin se z biocharu uvolní vodou, tedy například při běžném zalévání či při dešti. Větší dostupnost P byla pravděpodobnou příčinou větší stimulace růstu rostlin ve variantě 4 (s přídatkem T-C) ve srovnání s půdou bez přídatků nebo s přídatkem K-C. Tento závěr podporuje i zjištěné celkové mírně zvýšené celkové množství P na jednu rostlinu.

Chemickou analýzou po mineralizaci bylo také zjištěno, kolik živin se celkově v biocharu nachází bez ohledu na jejich dostupnost. Z výsledků vyplývá, že v pyrolyzovaném biocharu se nacházelo živin více. Tyto živiny ale zřejmě nejsou jednoduše dostupné, a tudíž nebyly rostlinami efektivně využitelné.

Rozdílné hodnoty výluhů z biocharů ukazují, že biochar torefikovaný je kyselejší než biochar pyrolyzovaný. Tento parametr je poměrně závislý na vlastnostech vstupního materiálu, ale pokud by se ukázalo, že biochar zpracovaný metodou torefakce může mít pH nižší než kal z vysokoteplotní pyrolýzy, bylo by jeho využití vhodné na více typů půd, například i na alkalické půdy.

Pokud srovnáme výsledky mykorrhizní kolonizace, zjistíme, že oba typy biocharů měly na rozvoj mykorrhizní kolonizace pozitivní vliv. Přidáním hnojiva do půdy snížilo rozšíření mykorrhizní kolonizace, avšak tento efekt byl přídatkem jakéhokoliv biocharu mírně potlačen a mykorrhizní kolonizace byla větší. Varianta 2 také ukazuje, že pokud rostlina měla živin dostatek, nepotřebovala mykorrhizní kolonizaci rozvíjet. Symbióza je pro ni v tomto případě neefektivní. Rozvinutá mykorrhizní kolonizace je pro rostlinu prospěšná také z jiných důvodů, než je pouze zlepšení dostupnosti živin. Mykorrhizní kolonizace rostlinu například také chrání

před účinky sucha, zasolení, nebo patogeny (Begum, et al., 2019). To, že je přídavek jakéhokoliv biocharu mykorhizní kolonizaci rozvíjel i s přidaným hnojivem, je pozoruhodné a mohlo by to rostlině přinést i benefity, které se v tomto experimentu neprojevily, protože se projevují až v pozdějším stádiu růstu rostliny. Limitujícím faktorem tohoto experimentu je však relativně krátká doba pěstování rostlin (6 týdnů). Nevíme tedy, jak by se vliv mykorhizní kolonizace mohl projevit v pozdějších stádiích růstu a vývoje rostlin. Mykorhizní kolonizace může mít například vliv na zvýšení výnosu některých plodin, jak uvádí ve své studii Begum, et al. (2019).

Další navazující výzkum by se mohl zaměřit na dlouhodobější pěstování rostlin, aby bylo možné lépe porozovat vliv zlepšené mykorhizní kolonizace vlivem biocharu na růst a výnos plodin. Krátkodobé experimenty jako byl tento mohou odhalit počáteční přínos mykorhizní kolonizace, avšak její skutečný přínos se může projevit až v dlouhodobějším časovém horizontu. Bylo by možné pozorovat i reakce rostlin na extrémní podmínky jako je například sucho, zvýšená teplota či zasolení.

Navazující výzkum v budoucnosti se bude také zaměřovat na úpravu technologie zpracování čistírenských kalů. Výsledný produkt je totiž velmi závislý na vlastnostech vstupního materiálu. Navíc je třeba sledovat, zda snížení teploty zpracování neovlivní jen dostupnost živin ale také obsah nežádoucích složek, třeba reziduí organických polutantů. Porovnání různě zpracovaných produktů torefakce v rozmanitých typech půd by pak umožnilo získat přesnější charakteristiku stimulačního efektu na růst rostlina a připravit doporučení pro použití těchto zpracovaných odpadů v zemědělské praxi.

Okomentoval(a): [VG1]: Zkuste najít nějakou publikaci, které toto tvrzení podpoří a citovat ji.

6 ZÁVĚR

Ve své práci jsem se zaměřila na srovnání dvou typů biocharu vyrobeného pyrolýzou čistírenského kalu. Porovnávala jsem, jaké rozdíly budou pozorovány u rostlin s přidavkem torefikovaného biocharu, tedy biocharu zpracovaného při teplotě 300–400 °C, a rostlin s přidavkem biocharu společnosti PYREG, připraveného vysokoteplotní pyrolýzou při teplotě 600 °C. Mým hlavním cílem a motivem práce bylo porovnat tyto dva typy biocharu a zjistit, jak se liší jejich působení na růst rostlin a jaké mechanismy za případnými rozdíly stojí.

Faktoriální kultivační experiment ukázal, že biochar, který byl vyroben metodou mikrovlnné torefakce stimuloval výnos biomasy více než biochar vyrobený vysokoteplotní pyrolýzou. To bylo způsobeno lepší dostupností živin v torefikovaném biocharu, zjištěnou v chemické analýze vodního výluhu obou biocharů. Zajímavým zjištěním bylo, že přítomností jakéhokoli typu biocharu byl potlačen negativní účinek, který má běžné průmyslové hnojivo na rozvoj mykorhizní kolonizace. Mykorhizní kolonizace byla tedy ve variantách s přidáním dávky biocharu rozvinutá průkazně více než u varianty pouze s NPK hnojivem. To je výsledek, který by bylo rozhodně vhodné dále studovat, jelikož mykorhizní houby jsou rostlině velmi prospěšné a běžně používaná hnojiva jim spíše škodí. Navíc v přítomnosti torefikovaného biocharu rostliny přijaly více P a Mg než v ostatních variantách, což ukazuje příznivý efekt biocharu na využití živin z přidávaného hnojiva.

Výsledky této práce naznačují, že torefikovaný biochar by mohl být levnějším a udržitelným doplňkem k běžným hnojivům. Jeho využití totiž přináší hned několik výhod. Zaprvé, čistírenský kal je odpad, kterého bude s narůstající populací přibývat. Díky této skutečnosti je jeho cena velmi příznivá. Zadruhé, jelikož je jedna z hlavních složek biocharu uhlík, jedná se o efektivní cestu, jak ho dlouhodobě ukládat do půdy. To by mohlo pomoci zmírnit změnu klimatu. Za třetí, biochar zlepšuje vlastnosti půdy a rozvíjí u rostlin mykorhizní kolonizaci, která rostlině nejen pomáhá přijímat živiny, ale také ji chrání před vnějšími vlivy. Pravděpodobně také zlepšuje využití minerálních hnojiv rostlinami.

Výsledky této práce tedy naznačují, že využití biocharu z čistírenských kalů může být nadějnou cestou k udržitelnějšímu zemědělství. Budoucí studie by se měly zaměřit na dlouhodobý vliv biocharu na půdy různých typů a optimalizaci jeho výroby pro maximální účinek v půdě.

7 POUŽITÁ LITERATURA

AGARWAL, Himani; KASHYAP, Vikrant Hari; MISHRA, Arti; BORDOLOI, Smita; SINGH, Prashant Kumar et al. Biochar-based fertilizers and their applications in plant growth promotion and protection. *3 Biotech*. 2022, vol. 12, no. 6. ISSN 2190-5738.

BALÍK, Jiří; ČERNÝ, Jindřich a PAVLÍKOVÁ, Daniela. *Systém dusíkaté výživy CULTAN u travních a jetelotravních porostů: certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. ISBN 978-80-213-2330-8.

BEGUM, Naheeda; QIN, Cheng; AHANGER, Muhammad Abass; RAZA, Sajjad; KHAN, Muhammad Ishfaq et al. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2019, vol. 10.

BRUNDRETT, Mark. C.; PICHE, Y. a PETERS, R. L. A new method for observing the morphology of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Canadian Journal of Botany*. 1984, vol. 62, no. 10, s. 2128–2134.

GOSLING, P.; HODGE, A.; GOODLASS, G. a BENDING, G.D. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006, vol. 113, no. 1–4, p. 17–35. ISSN 0167-8809.

GRYNDLER, Milan; BALÁŽ, Milan; HRŠELOVÁ, Hana; JANSÁ, Jan a VOSÁTKA, Miroslav. *Mykorhizní symbióza. O soužití hub s kořeny rostlin*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1240-0.

HAVELKA, Petr. *Změny v nakládání s kaly z čistíren odpadních vod*. Online. EnviGroup.cz. 2019. Dostupné z: <https://www.envigroup.cz/zmeny-v-nakladani-s-kaly-z-cistiren-odpadnich-vod.html>. [cit. 2025-01-30].

KACPRZAK, Małgorzata; NECZAJ, Ewa; FIJAŁKOWSKI, Krzysztof; GROBELAK, Anna; GROSSER, Anna et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*. 2017, vol. 156, s. 39–46. ISSN 0013-9351.

KOS, Miroslav. *Použití pyrolýzy k produkci hnojiva z čistírenských kalů*. Online. 2016. Dostupné z: http://www.cpga.cz/files/prednasky/1603_Kos_Pyrolyza_hnojiva_fulltext.pdf. [cit. 2025-02-18].

MATĚJŮ, Ladislava; BOŠTÍKOVÁ, Zdislava a ZIMOVÁ, Magdalena. Rizika a výhody při využití čistírenských kalů na zemědělské půdě. *Odpadové fórum*. 2018, roč. 19, č. 3, s. 26–27. ISSN 1212-7779.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Kaly z čistíren odpadních vod*. Online. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/kaly_cistiren_odpadnich_vod. [cit. 2025-02-18].

ROZKOŠNÝ, Miloš a HUDCOVÁ, Hana. Přínosy a rizika využití kalů malých ČOV po zpracování kompostováním k produkci vybraných druhů zeleniny. Online. 2024. Dostupné také z: <https://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2024/02/6623-VTEI-1-2024-Prinosy-a-rizika-vyuziti-kalu-1.pdf>. [cit. 2025-01-30].

SCHMIDT, Hans-Peter; KAMMANN, Claudia; HAGEMANN, Nikolas; LEIFELD, Jens; BUCHELI, Thomas D. et al. Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*. 2021, vol. 13, s. 1708–1730. ISSN 1757-1707.

ŠVEHLA, Pavel; TLUSTOŠ, Pavel a BALÍK, Jiří. *Odpadní vody*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Česká zemědělská univerzita, katedra agrochemie a výživy rostlin, 2007. ISBN 978-80-213-1716-1.

TLUSTOŠ, Pavel; KOŠNÁŘ, Zdeněk a ERTL, Zdeněk. *Zpracování čistírenských kalů metodou torefakce a pyrolýzy pro jejich bezpečné použití v zemědělství: certifikovaná metodika. Certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2021. ISBN 978-80-213-3159-4.

YADAV, Shubh Pravat Singh; BHANDARI, Sujana; BHATTA, Dibya; POUDEL, Anju; BHATTARAI, Susmita et al. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023, vol. 11. ISSN 2666-1543.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Hmotnostní ztráta vzorku kalu v závislosti na teplotě torefakce/pyrolýzy	10
Obrázek 2: Podíl přístupného P z celkového obsahu ve vzorku kalu v závislosti na teplotě pyrolýzy	11
Obrázek 3: Podíl přístupného K z celkového obsahu ve vzorku kalu v závislosti na teplotě pyrolýzy	11
Obrázek 4: Mykorhizní kolonizace v kořeni kukuřice seté.	13
Obrázek 5: Kukuřice seté pěstované ve skleníku	15
Obrázek 6: Hmotnost biomasy nadzemní části.....	18
Obrázek 7: Listová plocha	19
Obrázek 8: Procentuální mykorhizní kolonizace kořenů.....	20
Obrázek 9: Obsah chlorofylu v listech	20
Obrázek 10: Rychlost fotosyntézy	21
Obrázek 11: Porovnání obsahu P, Mg, K ve vodním výluhu biocharů	21
Obrázek 12: Porovnání obsahu P, Mg, K ve dvou typech biocharů	22
Obrázek 13: Obsah fosforu (P) v biomase rostlin.....	22
Obrázek 14: Celkové průměrné množství P obsažené v biomase jednotlivé rostliny vybraných variant.	23
Obrázek 15: Celkové průměrné množství Mg násobený obsažené v biomase jednotlivé rostliny vybraných variant.	23
Tabulka 1: Přehled pokusných variant.....	14
Tabulka 2: Průměrné hodnoty pH výluhů půdy a biocharů.....	19
Tabulka 3: Hodnoty vodního výluhu K	22