

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv aplikace biocharu do zahradnického substrátu na
výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*) a obsah
přístupných živin v substrátu**

Diplomová práce

Bc. Kateřina Šulcová

Zahradnictví

doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv aplikace biocharu do zahradnického substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*) a obsah přístupných živin v substrátu" 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 neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 22.4.2024

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracovávání této diplomové práce, za cenné rady, neskonalou trpělivost a ochotu, a hlavně za čas, který mi věnoval při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat všem pracovníkům univerzity, kteří mi pomohli pokus uskutečnit a své rodině, která mě po dobu studia podporovala.

Vliv aplikace biocharu do zahradnického substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*) a obsah přístupných živin v substrátu

Souhrn

Biochar je v současné době intenzivně studovaným materiálem zejména z hlediska sekvestrace uhlíku. Důležitý je ale i jeho vliv na půdní vlastnosti, kde jsou výsledky současných studií značně nejednotné. Je pravděpodobné, že biochar může sloužit jako sorbent živin zajišťující jejich postupné uvolňování. Tomuto procesu mohou napomoci mykorrhizní houby (AMF) nebo bakterie.

Cílem této práce bylo vyhodnotit vliv aplikace biocharu do substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*), obsah přístupných živin v substrátu a odběr živin ze substrátů. Dalším cílem bylo posoudit vliv bakterií a arbuskulárně-mykorrhizních hub na příjem živin cuketou a její výnos.

Za tímto účelem byly založeny nádobové pokusy s cuketami s aplikací dřevního biocharu a biocharu z čistírenských kalů. Dále byl testován i vliv dodaných AMF (*Rhizoctonus irregularis*) a konsorcia bakterií (*Rhodococcus zopfii*, *Caenibius tardaogens*, *Nocardioides simplex* a *Altererythrobacter estronivorus*). Byly založeny následující varianty: 1) kontrola, 2) biochar z kalů, 3) biochar ze dřeva, 4) bakterie, 5) biochar z kalů + bakterie, 6) biochar ze dřeva + bakterie, 7) AMF, 8) biochar z kalů + AMF, 9) biochar ze dřeva + AMF. Nádobky byly realizovány v pěti opakováních. Po sklizni cuket byly provedeny analýzy na obsah okamžitě přístupných vybraných živin a dalších prvků v substrátu. Dále byl hodnocen i odběr těchto živin plody cukety.

Ačkoliv výsledky často nejsou statisticky průkazné, lze vyvodit zřejmé tendence vlivu aplikace biocharu, AMF i konsorcia bakterií. Nejvyšší obsahy přístupných prvků v substrátu se téměř vždy vyskytovaly u kontrolní varianty. Následovaly zpravidla varianty s oběma typy biocharů bez aplikovaných AMF nebo bakterií. Je tak velmi pravděpodobné, že aplikace biocharu znamenala omezení dostupnosti živin. Toto omezení dostupnosti ještě umocnil přídavek AMF a bakterií. Jedinou výjimku tvořila varianta 8 (biochar z kalů a AMF) kde byly zaznamenány vyšší obsahy Fe a P v substrátu na úrovni aplikace obou typů samotných biocharů.

Výsledky substrátů byly potvrzeny rozbory plodů cuket, kde byly odběry prakticky všech sledovaných živin (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn a B) nejvyšší u kontrolní varianty. Výjimku tvořila pouze síra a nikl, kde však hodnoty u kontroly byly druhé nejvyšší. Rovněž výnos plodů cuket představoval nejvyšší hodnoty u kontrolní varianty.

Je pravděpodobné, že aplikace biocharu, AMF i bakterií vedla k inhibici dostupných živin v substrátu s negativním dopadem na výnosy cukety i odběr sledovaných živin.

Klíčová slova: Cuketa; Pěstební substráty; Biouhel; Přístupné živiny; Odběr živin

Influence of the biochar application into the horticultural substrate on the yield of zucchini (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*) and the content of bioavailable nutrients in the substrate

Summary

Biochar is currently being intensively studied, particularly in terms of carbon sequestration. However, its impact on soil properties is also important, where the results of current studies are quite inconsistent. It is likely that biochar can act as a nutrient sorbent, ensuring their gradual release. This process may be enhanced by mycorrhizal fungi (AMF) or bacteria.

The aim of this study was to evaluate the effect of biochar application to the substrate on the yield of zucchini (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*), the content of bioavailable nutrients in the substrate, and the nutrient uptake from the substrates. Another goal was to assess the influence of bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on nutrient uptake by zucchini and its yield.

For this purpose, pot experiments with zucchini were set up, applying wood biochar and biochar from sewage sludge. The influence of added AMF (*Rhizoctonus irregularis*) and a consortium of bacteria (*Rhodococcus zopfii*, *Caenibius tardoagens*, *Nocardioides simplex*, and *Altererythrobacter estronivorus*) was also tested. The following variants were established: 1) control, 2) sludge biochar, 3) wood biochar, 4) bacteria, 5) sludge biochar + bacteria, 6) wood biochar + bacteria, 7) AMF, 8) sludge biochar + AMF, 9) wood biochar + AMF. The pots were conducted in five replicates. After harvesting the zucchini, analyses were conducted on the content of selected immediately available nutrients and other elements in the substrate. Additionally, the uptake of these nutrients by the zucchini fruits was evaluated.

Although the results are often not statistically significant, apparent trends can be discerned regarding the effects of biochar, AMF, and the bacterial consortium. The highest contents of accessible elements in the substrate were almost always found in the control variant, typically followed by variants with both types of biochar without applied AMF or bacteria. It is very likely that the application of biochar limited nutrient availability. This limitation was further exacerbated by the addition of AMF and bacteria. The only exception was variant 8 (sludge biochar and AMF), where higher contents of Fe and P were recorded in the substrate at the level of application of both types of biochar alone.

The results of the substrates were confirmed by the analyses of zucchini fruits, where the uptake of almost all monitored nutrients (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, and B) was highest in the control variant. The only exceptions were sulfur and nickel, where, however, the values in the control were the second highest. Likewise, the yield of zucchini fruits was highest in the control variant.

It is obvious that the application of biochar, AMF, and bacteria led to the inhibition of available nutrients in the substrate with a negative impact on zucchini yields and the uptake of monitored nutrients.

Keywords: Zucchini; Growing substrates; Biochar; Bioavailable nutrients; Nutrients uptake

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Biochar	10
3.1.1	Historie biocharu	10
3.1.2	Certifikace biocharu	11
3.1.2.1	Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ)	11
3.1.2.2	European Biochar Certificate (EBC)	11
3.1.2.3	International Biochar Initiative (IBI)	11
3.1.2.4	V4 Biochar Platform	12
3.1.3	Suroviny	12
3.1.4	Výroba	13
3.2	Vlastnosti biocharu	16
3.2.1	Vodní kapacita biocharu	17
3.2.2	Stabilita a aromaticita biocharu	17
3.2.3	pH biocharu	17
3.2.4	Zadržování živin	18
3.2.5	Elektrická vodivost biocharu	18
3.2.6	Obsah uhlíku	18
3.2.7	Aktivace a modifikace biocharu	19
3.3	Využití biocharu	19
3.4	Vliv biocharu na půdu	20
3.4.1	Vliv na chemické vlastnosti půdy	21
3.4.2	Vliv na fyzikální vlastnosti půdy	23
3.4.3	Vliv na biologické vlastnosti půdy	24
3.4.3.1	Arbuskulárně mykorhizní houby (AMF)	24
3.4.3.2	Bakterie	25
3.5	Vliv biocharu na rostliny	26
3.6	Cuketa (<i>Cucurbita pepo</i> var. <i>giromontina</i>)	27
4	Metodika	28
4.1	Stanovení přístupných živin v půdě metodou CaCl_2	29
4.2	Analýzy plodů cuket	29
4.3	Statistické hodnocení výsledků	29
5	Výsledky	30
5.1	Obsah živin v substrátu	30
5.1.1	Makroprvky	30

5.1.2	Mikroprvky	31
5.1.3	Ostatní prvky	33
5.2	Odběr živin plody cukety	34
5.2.1	Makroprvky	34
5.2.2	Mikroprvky	35
5.3	Regresní a korelační analýza	37
5.4	Výnos sušiny	41
6	Diskuze	42
7	Závěr	45
8	Literatura	46

1 Úvod

Biochar je vysoce porézní uhlíkový materiál vytvořený spalováním biomasy za vysoké teploty a za anaerobních podmínek v procesu zvaném pyrolýza.

Může se vyrábět z různých druhů biomasy a organických materiálů, mezi které patří dřevní biomasa (štěpka, piliny, dřevěný odpad z lesního hospodářství či dřevařského průmyslu), rostlinné zbytky (sláma, seno, tráva, kávová sedlina, slupky z ořechů), zemědělské a kuchyňské odpady (kukuřičné klasy, slupky slunečnice, kompostovatelný materiál), ale také odpadní kaly či živočišný odpad (hnůj). Díky variabilitě možných vstupních surovin může biochar hrát užitečnou roli pro likvidaci organického odpadu, a přispět tak životnímu prostředí.

Biochar získává stále větší pozornost jakožto možný prostředek ke zlepšení půdních vlastností, jako například zvýšení úrovně organické hmoty v půdě, zlepšování půdní struktury, vliv na půdní reakci, poskytnutí vhodných podmínek pro rozvoj mikrobiální aktivity v půdě, zvýšení retence vody a živin v půdě a jako prostředek pro zachycení uhlíku z atmosféry a jeho ukládání do půdy, což je další způsob, jak biochar pomáhá životnímu prostředí.

Jeho aplikace do půdy přináší mnoho dalších potenciálních výhod, včetně jeho schopnosti vázat živiny v půdě a pomalu je uvolňovat, může tím zlepšit jejich dostupnost pro rostliny a zároveň snížit riziko ztrát. Svými vlastnostmi, které upravují charakter půdy a její úrodnost, nepřímo ovlivňuje i produkci rostlin.

Arbuskulárně mykorhizní houby (AMF) hrají klíčovou roli v ekosystémech půdy díky své schopnosti navazovat symbiotický vztah s kořeny většiny rostlin. Tento symbiotický vztah umožňuje houbám absorbovat vodu a živiny z půdy a přenášet je do kořenů rostlin, zatímco rostliny poskytují houbám organické sloučeniny z fotosyntézy. Stejně tak jsou pro půdu důležité bakterie, které hrají klíčovou roli v mnoha půdních procesech. Jejich vliv na půdu je mnohostranný a zahrnuje rozklad organických látek, fixaci dusíku, rozklad toxinů, uvolňování živin, a mnoho dalších funkcí. Bakterie mohou také pomáhat při tvorbě půdní struktury a stabilizovat pH půdy.

Cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*) jsou rychle rostoucí rostliny z čeledi tykvovitých, které produkují hojné množství plodů během krátké doby. To umožňuje provádět rychlé experimenty s biocharem a sledovat jeho vliv na růst rostlin a kvalitu plodů. Jsou také citlivé na změny v půdních podmínkách, včetně změn v půdní struktuře, pH a dostupnosti živin. Rostoucí cukety jsou relativně snadné na sledování a analýzu, protože mají rychlý růst a výrazné fáze růstu od semene po sklizeň. Díky těmto faktorům jsou cukety často používány jako modelová rostlina pro studium vlivu biocharu na půdu, a jako rostliny v rámci vědeckých výzkumů a experimentů.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotézy:

Aplikace biocharu podpoří sorpci živin v substrátu, což může vést a) k horší dostupnosti živin, b) k pozvolnému uvolňování a dlouhodobější dostupnosti živin.

Bakterie nebo arbuskulárně-mycorrhizní houby umožní rostlinám cukety lépe přijímat živiny, a tím podpoří i vyšší výnos.

Cíle:

Cílem této práce bylo vyhodnotit vliv aplikace biocharu do substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*), obsah přístupných živin v substrátu a odběr živin ze substrátů.

Dalším cílem bylo posoudit vliv bakterií a arbuskulárně-mycorrhizních hub na příjem živin cuketou a její výnos.

3 Literární rešerše

3.1 Biochar

Biochar neboli biouhel je výsledkem pyrolýzy organických materiálů za nepřítomnosti kyslíku a při vysoké teplotě (Adekiya et al. 2019). Jedná se o vysoce porézní, stabilní materiál bohatý na uhlík, který připomíná dřevěné uhlí (Jahromi et al. 2019). Svými vlastnostmi může pozitivně ovlivnit kvalitu půdy a zmírnit nepříznivé změny klimatu (Pohořelý et al. 2019). Thies & Rillig (2009) uvádějí, že biochar po přidání do půdy zvyšuje obsahy dostupných živin a zabraňuje jejich vyplavování, stimuluje aktivitu zemědělsky důležitých půdních mikroorganismů, působí jako účinný jímač uhlíku po několik set let, podporuje sekvestraci atmosférického CO₂ do půdy, potlačuje emise dalších skleníkových plynů a zmírňuje škodlivé účinky agrochemikálií. Dle Eastman (2011) může úprava půdy biocharem zlepšit retenci živin, výnos plodin a další chemické i fyzikální vlastnosti půdy. Doprovodné změny ve výnosu plodin a vedlejší přínosy související se zlepšenou kvalitou půdy zahrnují také změny v biologii půdy, sorpci znečišťujících látek a stabilizaci půdy.

3.1.1 Historie biocharu

Ačkoli je technologie biocharu považována za novější strategii pro sekvestraci uhlíku, materiál biocharu se datuje k objevu Terra Preta de Índio („černá země indiánů“) z povodí Amazonky na počátku 20. století (Xiong et al. 2022). Úrodné půdy Terra Preta byly vytvořeny starověkými indiánskými komunitami v brazilské amazonské oblasti před 2000 lety přidáváním zuhelnatělé biomasy přímo do půdy (Rajapaksha et al. 2016). Terénní studie poskytly důkazy, že Terra Preta byla vytvořena pomocí technik slash-and-char (Lehmann & Joseph 2009). Přesněji řečeno, slash-and-char odkazuje na zemědělskou techniku, která se obvykle skládá z následujících tří kroků: 1) řezání nadzemní biomasy (obvykle lesů), což je také známé jako čištění půdy, 2) sušení nasekané biomasy a její přeměna na biochar přímo na místě v jednoduchých hliněných hrůbcích či jámách, 3) přimíchání vyrobeného biocharu do půdy, která se následně používá pro pěstování plodin (Niu et al. 2015).

Při objevu Terra Preta bylo zjištěno, že jsou tyto půdy výrazně úrodnější, ve srovnání s ostatními půdami v Amazonii (Xiong et al. 2022). Spears (2018) tvrdí, že rostliny pěstované v půdě Terra Preta rostou rychleji a jsou bohatší na živiny, narozdíl od rostlin pěstovaných v sousedních půdách. Vyznačují se vysokým obsahem uhlíku, až 150 g C/kg půdy, ve srovnání s okolními půdami (20–30 g C/kg půdy) (Glaser et al. 2002). Marris (2006) uvádí, že půdy Terra Preta obsahovaly až 9 % uhlíku, ve srovnání s 0,5 % pro půdu z míst v okolí. Některé výzkumy ukázaly, že půdy Terra Preta obsahovaly až 70krát více pyrogenního uhlíku (uhlí) než okolní půdy (Glaser et al. 2001; 2002). Zvýšený obsah uhlíku se v půdách Terra Preta stále nachází, dokonce i stovky let poté, co byly půdy opuštěny, což dokazuje přetrvávání organické hmoty v těchto tmavých půdách. Perzistence uhlíku, úrodnost půdy a udržitelnost biocharu přilákaly pozornost výzkumu (Rajapaksha et al. 2016). Organická hmota v Terra Preta prokázala strukturní podobnost s biocharem, což vedlo vědce k vysvětlení vysokého obsahu uhlíku a úrodnosti (Glaser et al. 2002). Tyto půdy obsahují nejen vyšší koncentrace živin, jako je dusík, fosfor, draslík a vápník, ale také větší množství stabilní půdní organické hmoty (Glaser et al.

2001). Kim et al. (2007) ve své studii o bakteriální diverzitě v půdách Terra Preta zjistili, že bakteriální druhová bohatost je přibližně o 25 % vyšší pro Terra Preta než v lesní půdě.

Protože téměř každá forma přírodního organického materiálu může být přeměněna na biochar, věnuje se nyní značný výzkum duplikaci tvorby Terra Preta vytvářením biocharu prostřednictvím různých procesů ohřevu rostlinných zbytků v nepřítomnosti kyslíku (Kumarathilaka et al. 2016).

3.1.2 Certifikace biocharu

Mnoho národních i mezinárodních institucí sleduje kvalitu biocharu využívaného jako půdní aditivum. V České republice registruje biochar Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ). Certifikát lze po splnění podmínek získat i od jiných organizací. Na našem území jde například o European Biochar Certificate (EBC) a International Biochar Initiative (IBI). Tyto certifikáty bývají dobrovolné a obtížnější na splnění požadavků, protože kontrolují více oblastí než národní legislativy. Cílem těchto institucí je zajistit bezpečný produkt pro životní prostředí a vytvořit uniformní a spolehlivý znak pro spotřebitele (Pohořelý et al. 2019; V4 Biochar Platform 2019).

3.1.2.1 Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZÚZ)

ÚKZÚZ se v dnešní době zaměřuje na obsah toxických látek a těžkých kovů, ale nijak nezaručuje, že vyrobený biochar bude opravdu zlepšovat kvalitu půdy. Kontroluje tedy pouze nezávadnost biocharu, nikoli jeho kvalitu. Certifikace je však platná v celé EU (Pohořelý et al. 2019; V4 Biochar Platform 2019).

3.1.2.2 European Biochar Certificate (EBC)

EBC, evropská iniciativa, přináší kontrolní mechanismus založený na nejnovějším výzkumu a osvědčených postupech. Její pravidla jsou pravidelně každým rokem aktualizována a slouží jako základ pro legislativní opatření. Tento certifikát je zaměřen na podporu a zajištění udržitelné produkce biocharu. Platforma byla vyvinuta, aby pomohla uživatelům a výrobcům biocharu předcházet nebo alespoň snižovat jakékoli nebezpečí pro zdraví a životní prostředí při výrobě a používání biocharu.

V současné době je EBC dobrovolným průmyslovým standardem v Evropě. Ve Švýcarsku je však povinný pro veškerý biochar prodávaný pro použití v zemědělství (European Biochar Certificate, 2012).

3.1.2.3 International Biochar Initiative (IBI)

International Biochar Initiative je jediná organizace, která se snaží uplatnit celosvětově (Pohořelý et al. 2019). IBI poskytuje platformu pro podporu spolupráce zainteresovaných stran, vytváření osvědčených průmyslových postupů a nastavování ekologických a etických standardů na podporu systémů biocharu, které jsou bezpečné a ekonomicky životaschopné (International Biochar Initiative 2006).

Strategie International Biochar Initiative:

- Podpora v mezinárodní spolupráci vědy, průmyslu, zemědělství, vládních i nevládních organizací, za účelem propagace a demonstrace použití biocharu,
- snaha o vývoj a zavedení kontroly kvality biocharu,
- spolupráce s průmyslem, za účelem objevování ekonomicky efektivního využití biocharů a systémů výroby biocharu,
- podpora výzkumu a šíření informací,
- poskytování zřetelných, důvěryhodných a nezaujatých informací o všech aspektech biocharu, spolu s vytvořením globální informační a komunikační platformy,
- vytváření takových standardů, které přimějí veřejnost k důvěře v organizace, které se zabývají produkcí biocharu, a že biochar vyvinutý těmito organizacemi je bezpečný a vhodný pro doporučené použití (International Biochar Initiative 2006).

3.1.2.4 V4 Biochar Platform

Platforma V4 Biochar, která vznikla v rámci České zemědělské univerzity v Praze, má za cíl spojit různé výzkumy v oblasti biocharu do dvou hlavních sekcí - jedna zaměřená na využití biocharu v zemědělství a druhá na jeho využití v průmyslu. Platforma umožňuje spolupráci mezi subjekty zapojenými v celém procesu využití biocharu, zahrnujícím výrobu, charakterizaci, aplikaci a hodnocení jeho účinnosti. Jejimi členy jsou především země Visegrádské čtyřky (Česká republika, Maďarsko, Polsko a Slovensko), a má následující specifické cíle:

- Urychlení procesu cesty biocharu do půdy,
- zajištění komplexního přístupu k řešení vědeckých otázek týkajících se biocharu prostřednictvím propojení týmů napříč zapojenými zeměmi,
- spojení vědeckého potenciálu pro zvýšení konkurenceschopnosti a dosažení cennějších výsledků základního i aplikovaného výzkumu,
- pořádání seminářů, konferencí a workshopů, za účelem propojení vědeckých pracovišť a ostatních subjektů mezi sebou, ale i se zahraničními partnery,
- zapojení do mezinárodní platformy International Biochar Initiative (IBI),
- vytvoření prostředků komunikace s veřejností,
- založení platformy pro propagaci produktů, nápadů a technologií souvisejících s biocharem (V4 Biochar Platform 2019).

Od roku 2022 jsou V4 Biochar Platform členy výše zmíněných International Biochar Initiative (IBI) a partnery European Biochar Certificate (EBC) (V4 Biochar Platform 2019).

3.1.3 Suroviny

Biomasa je obecný pojem, který zahrnuje organickou hmotu v živých organismech a jejich zbytky pocházející z rostoucích rostlin (včetně řas) a zvířecího hnoje, kde lze hnůj považovat za zpracovanou formu rostlinných materiálů (Vassilev et al. 2010). Energie z biomasy, zkráceně bioenergie, se ukládá v rostlinných a živočišných odpadních materiálech. Specifické příklady zahrnují dřevo z přírodních lesů, zbytky zemědělských plodin, průmyslové

odpady, jako jsou kaly a papírové odpady, a živočišný odpad (hnůj) (Demirbas 2001). Kal, který se vytváří během procesu úpravy odpadních vod, je tuhý odpad, který je třeba zpracovat a zlikvidovat. Bohatý obsah uhlíku a živin, jako je amoniak, z kalů také tvoří slibnou surovinu pro výrobu biocharu (Sepehri & Sarrafzadeh 2018).

Biomasa používaná k pyrolýze může být tedy lignocelulózová (rostlinná), složená převážně z celulózy, hemicelulózy a ligninu, nebo nelignocelulózová (na bázi živin a kalů) sestávající převážně z proteinů, lipidů a sacharidů s menším podílem celulózy, hemicelulózy a ligninu (Li a Jiang, 2017).

Různé suroviny mají různé podíly ve složení prvků, a tím pádem vykazují různé vlastnosti, stejně jako biochar získaný z různých surovin bude mít odlišné atributy (Vaughn et al. 2013; Suliman et al. 2016; Amin & Eissa 2017; Spears 2018). Vaughn et al. (2013) uvádí, že například biochar získaný ze slámy vykazoval vyšší obsah draslíku (961 mg/kg) a pH (9,5), než biochar vyrobený ze dřeva (349 mg/kg, pH 8,0). Další příklad uvedli i Xiong et al. (2022), kdy biochary získané z hnoje mají podle jejich studie tendenci obsahovat méně uhlíku, kyslíku a vodíku než biochary získané z lignocelulózy. Při používání kontaminovaných surovin, hrozí nebezpečí, že se do půdy zanesou toxiny, drasticky se zvýší pH půdy a/nebo se pro rostliny zkomplikuje možnost absorpce minerálů. Nejběžnějšími kontaminanty jsou těžké kovy – včetně kadmia, mědi, chrómu, olova, zinku, rtuti, niklu a arsenu – a polycyklické aromatické uhlovodíky (Spears 2018). Proto se dochází k závěru, že typy vstupních surovin mají významný vliv na fyzikálně-chemické vlastnosti biocharu (Shi et al. 2018).

3.1.4 Výroba

Biochar lze vyrábět v několika měřítkách, od velkých průmyslových zařízení po malé farmy a dokonce i domácnosti, takže je vhodný pro širokou škálu socioekonomických situací (Lehmann et al. 2015). Výroba biocharu může probíhat buď nízkonákladově v menším měřítku pomocí modifikovaných kamen nebo pecí, nebo ve větším měřítku za použití pyrolýzních zařízení a vyššího objemu surovin, což je nákladnější, ale umožňuje sériovou velkoprodukcí (Spears 2018). Vyrábí se pomocí specifického procesu zvaného pyrolýza, který snižuje kontaminaci a bezpečně ukládá uhlík. Ve srovnání s konvenčními metodami přípravy uhlíkových materiálů, jako je grafen, je příprava biocharu pyrolýzou snadná a levná, což přispívá k udržitelnosti životního prostředí (Wang & Wang 2019). Během pyrolýzy se organické materiály, jako jsou dřevěné štěpky, listí nebo odumřelé rostliny, spalují v nádobě s velmi malým množstvím kyslíku. Peer et al. (2019) popisuje pyrolýzu jako termochemickou konverzi paliva, probíhající bez přístupu oxidačního média. Tímto procesem se organický materiál přeměňuje na biochar, stabilní formu uhlíku, která nemůže snadno uniknout do atmosféry (Spears 2018). Během procesu pyrolýzy se tvoří pevné, kapalné a plynné produkty (Obrázek 1).

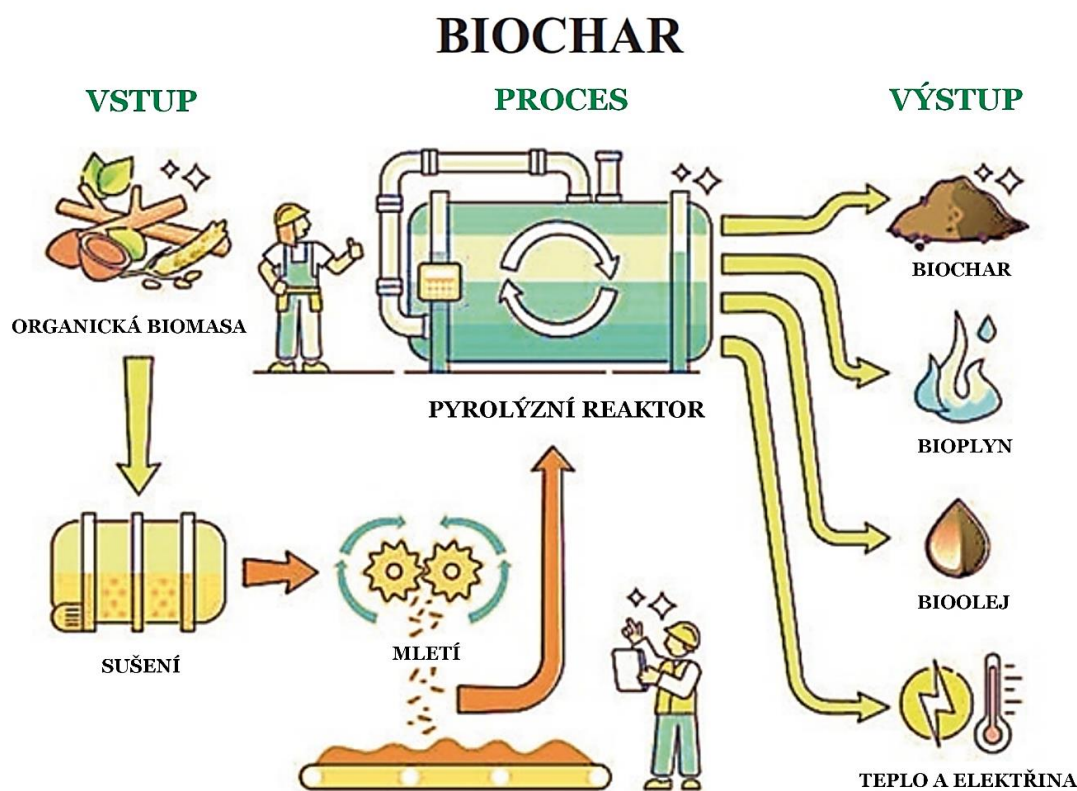
Pyrolýzu lze rozdělit na pomalou pyrolýzu a rychlou pyrolýzu, v závislosti na rychlosti ohřevu, době zdržení (Qian et al. 2015), teplotě, typu reaktoru (Rajapaksha et al. 2016) a na složení paliva (Peer et al. 2019):

1. **Pomalá pyrolýza**, známá také jako konvenční karbonizace, produkuje biochar jako hlavní produkt v pevné fázi, zatímco produkuje malé množství

syngasu (syntézního plynu) a také kondenzovaného bio-oleje v plynné a kapalné fázi. Tento proces obvykle vyžaduje relativně nízkou rychlost ohřevu (5-7 °C/min) s dlouhou dobou zdržení (> 1 h) (Liu et al. 2015, Qian et al. 2015). Typickou charakteristikou pomalé pyrolýzy je, že se surovina umístí do reaktoru na začátku pyrolýzy a zahřívá se postupně s reaktorem, doba zdržení se pohybuje od půl hodiny do několika hodin (Wang & Wang 2019).

2. **Rychlá pyrolýza** při rychlosti ohřevu vyšší než 200 °C/min a době setrvání do 10 vteřin má naopak tendenci podporovat vznik bio-oleje (Qian et al. 2015). U rychlé pyrolýzy se surovina přidává do reaktoru poté, co teplota dosáhne požadované hodnoty, a doba zdržení obvykle trvá několik sekund (Wang & Wang 2019). Ve srovnání s pomalou pyrolýzou má rychlá pyrolýza obvykle nižší výtěžky biocharu (Bridgwater 2012).

Energii nebo teplo vzniklé během pyrolýzy lze zachytit a využít jako formu čisté energie (Spears 2018), stejně jako vedlejší produkty (Obrázek 1), spolu s termochemickým procesem výroby biocharu, tj. bio-olej a syntézní plyn (syngas), mohou být díky přítomnosti fenolu a fenolových derivátů ve vysokém obsahu využity jako topné oleje pro výrobu elektřiny a jako platformové chemikálie (Quan et al. 2010). Bio-olej je tmavě hnědá, volně tekoucí organická kapalina obsahující vysoce okysličené sloučeniny. Pyrolýzní kapaliny vznikají rychlou a současnou depolymerizací a fragmentací celulózy, hemicelulózy a ligninu s rychlým nárůstem teploty (Mohan et al. 2006). Syngas je obecně považován za směs plynného vodíku, oxidu uhelnatého, metanu, oxidu uhličitého a vody a několika těkavých organických sloučenin s nízkou molekulovou hmotností (Ren et al. 2014).



Obrázek 1 - Schéma průmyslového procesu výroby biocharu z přeměny surovin na konečné produkty (Majumder et al. 2023)

Biochar neboli biouhel lze produkovat i jako vedlejší produkt různých procesů (Rajapaksha et al. 2016). Podobně jako u procesu pyrolýzy se během procesu zplyňování tvoří pevné, kapalné a plynné produkty. Výtěžky biocharu při procesu zplyňování jsou však obvykle nižší než výtěžky při procesu pyrolýzy, protože cílovými produkty při tomto procesu jsou plynné produkty (Wang & Wang 2019).

Jako další možnost pro výrobu biocharu jakožto vedlejšího produktu je proces hydrotermální karbonizace. Zatímco pro procesy pyrolýzy a zplyňování je obvykle zapotřebí suchý proces, pro hydrotermální karbonizaci je nutno surovinu smíchat s vodou v reaktoru. Následně se teplota a tlak zvýší (Funke & Ziegler 2010). Funke & Ziegler (2010) ve svém výzkumu také uvádí, že biochar vyrobený hydrotermální karbonizací za teploty pod 250 °C měl vyšší obsah uhlíku než biochary vyrobené při procesech pyrolýzy či zplyňování.

Dle Rajapaksha et al. (2016) by se, vzhledem k úsporám energie a ekonomické životaschopnosti, měla upřednostňovat výroba biocharu jako vedlejšího produktu při výrobě bio-oleje a syngasu, nikoliv jako primárního produktu.

Dle Pohořelého et al. (2019) lze biochar rozdělit do 3 skupin, podle teploty, která byla použita při procesu pyrolýzy:

1. **Nízko-teplotní biochar** - biochar vyráběný při nízkých teplotách do 400 °C se vyznačuje menší stabilitou v půdě, nízkým povrchem, vysokou kationtovou výměnnou kapacitou (KVK), nižším pH, vyšším výtěžkem a silnou hydrofobicitou. Tato hydrofobicita je způsobena vysokým obsahem funkčních skupin. Póry bývají zaneseny primárními dehty, které se při těchto nižších teplotách ještě nezměnily na terciární a kvartérní dehty. Tyto dehty tvoří tzv. dostupný uhlík pro mikroorganismy, a tím tak mohou přispívat k podpoře mikrobiálního růstu a biologické aktivity v půdě.
2. **Středně-teplotní biochar** - neposkytuje zásadní výhody ani nízkoteplotního biocharu (snadná výroba, vysoká vazebná kapacita dusíku a dostupný uhlíčan pro bakterie), ani vysokoteplotního biocharu (dlouhodobá stabilita, rozsáhlý povrch pro zadržení vody).
3. **Vysoko-teplotní biochar** – vyrábí se při teplotách nad 600 °C. Má dlouhodobou stabilitu v půdě, vyšší pH a nižší hydrofobicitu. Obsahuje méně funkčních skupin na svém povrchu. Vyšší teplota pyrolýzy zvyšuje podíl aromatického uhlíku, vykazuje vyšší specifický povrch a vytváří na biocharu mikropóry, proto vykazuje zlepšenou adsorpční kapacitu než biochar vyrobený za nízké teploty (Chen et al. 2008; Wang & Wang 2019; Matsagar & Wu 2022). Výtěžky biocharu však s rostoucí teplotou klesají (Xu et al. 2015; Pohořelý et al. 2019).

Peer et al. (2019) ve své práci dále uvádí, že proces pyrolýzy lze rozdělit na několik fází:

1. V úvodní fázi, při teplotách do 120 °C, dochází především k sušení materiálu.
2. Druhá fáze, která probíhá při teplotách 120 až 500 °C, zahrnuje suchou destilaci. To má za následek štěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických

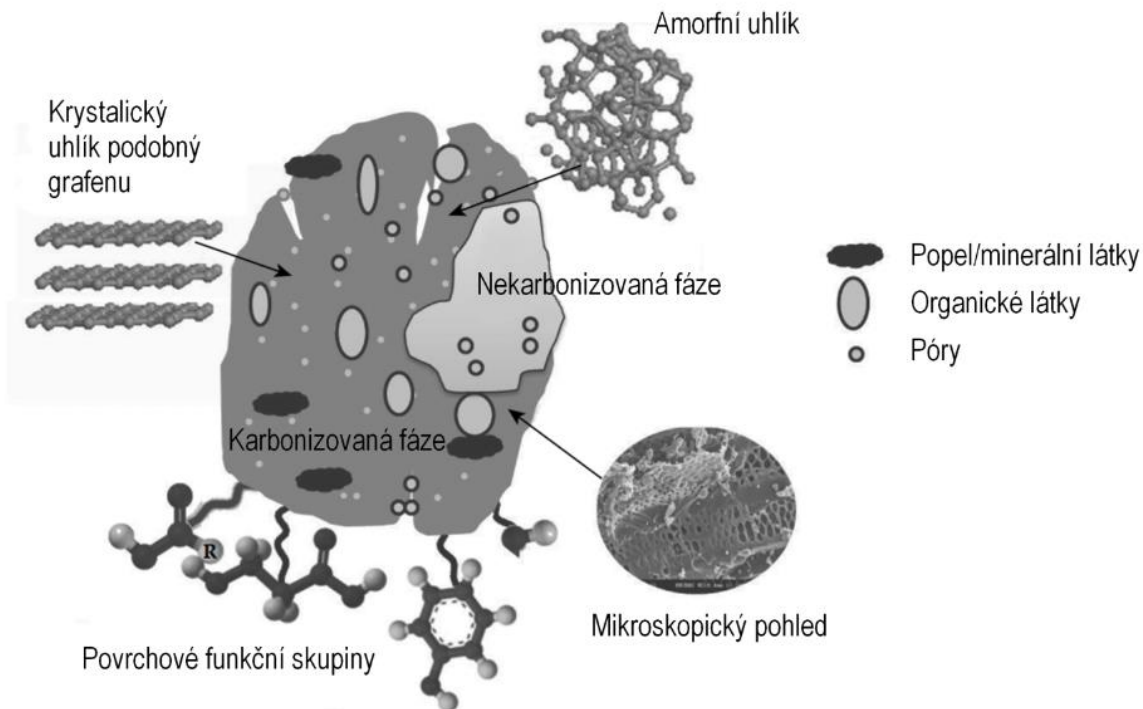
látek a transformaci makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík.

3. Třetí fáze probíhá při teplotách 500 °C až 1200 °C. Tato fáze zahrnuje další rozklad produktů suché destilace a formování plynu.

3.2 Vlastnosti biocharu

Chemické složení biocharů závisí na typu suroviny a podmínkách pyrolýzy; ne všechny biochary jsou tedy stejné a je obtížné definovat jejich přesné chemické složení (Rajapaksha et al. 2016). Organická část biocharu má vysoký obsah uhlíku a anorganická část obsahuje hlavně minerální látky, jako je Ca, Mg, K a anorganické uhličitany (uhličitanové ionty), v závislosti na typu suroviny. Při teplotě pyrolýzy používané pro výrobu biocharu nedochází k výrazné tvorbě grafitu a aromatické kruhy v biocharu nejsou uspořádány do dokonale stohovitých a vyrovnaných listů, jako je tomu u grafitu. Při výrobě biocharu se tvoří více nepravidelné uspořádání uhlíku, které obsahuje O a H (Lehmann & Joseph 2009). Zhu et al. (2005) popisují stavbu biocharu jako „krátké svazky polycyklických aromatických listů organizované vysoce neuspořádaným způsobem tak, aby tvořily špatně propojenou mikroporézní síť“.

Jak lze vidět na obrázku 2, obecně platí, že biochary nejsou plně karbonizované a vykazují karbonizovanou a nekarbonizovanou fázi (Ayodele et al. 2009). Složitě a heterogenní chemické a fyzikální složení biocharů, poskytuje vynikající platformu pro odstraňování kontaminantů, zadržování živin a podobně (Rajapaksha et al. 2016). Povrch biocharu je potažen nebo spojen funkčními skupinami oxidů kovů, jílových minerálů, uhlikatých materiálů, organických sloučenin a mikroorganismů (Xue et al. 2022).



2 - Schéma biocharu a jeho obsahu (Rajapaksha et al. 2016)

3.2.1 Vodní kapacita biocharu

Schopnost biocharu zadržovat vodu se dá měřit více způsoby. Při přímém měření se biochar jednoduše namočí na předem stanovenou dobu do vody, a následně se zváží, kolik vody bylo biocharem absorbováno (Weil & Brady 2017).

Vodní kapacita se často stanovuje spíše nepřímou, a to měřením objemu pórů a specifického povrchu. Celkový objem pórů, porozita a specifický povrch biocharu pozitivně ovlivňují jeho schopnost absorbovat vodu. Hydrofobicita, která je často ovlivněna alifatickými skupinami na povrchu biocharu rovněž hraje roli při určování jeho schopnosti zadržovat vodu (Zhang & You 2013). Specifickým povrchem se rozumí plocha na gram vzorku, biochar má obecně velký povrch (ve srovnání s půdou) v rozmezí 150 – 1200 m²/g (Pohořelý et al. 2019). Existuje pozitivní korelace mezi specifickým povrchem a teplotou pyrolýzy (Keiluweit et al. 2010).

3.2.2 Stabilita a aromaticita biocharu

Stabilita biocharu je podstatná při jeho aplikaci do půdy z několika důvodů. Zaprvé, stabilita určuje, jak dlouho uhlík obsažený v biocharu zůstane sekvestrovaný v půdě. Zadruhé, stabilita nám umožňuje odhadnout, jak dlouho bude biochar přínosem pro kvalitu půdy, rostlin a vody (Lehmann & Joseph 2015; Pohořelý et al. 2019).

Pro interpretaci chemických dat k předpovídání chemické struktury biocharů se používají elementární poměry H:C a O:C. Poměr H:C se využívá k měření stupně aromaticity (Krull et al. 2009) a poměr O:C lze použít k predikci stability biocharu v půdě (Spokas 2010).

Pyrolýza vede k významnému snížení atomových poměrů H:C a O:C (Peer et al. 2019). Vysoké teploty pyrolýzy vedou ke zvýšené demethylaci a dekarboxylaci biomasy, což znamená, že ve výsledném biocharu je nižší poměr H:C (demethylace) a O:C (dekarboxylace). Tyto změny naznačují, že biochar obsahuje materiály s vyšší odolností vůči rozkladu a déletrvajícími formami uhlíku (Lehmann & Joseph 2009; Mukome & Parikh 2016).

3.2.3 pH biocharu

Většina biocharů je alkalických s pH > 7. Jejich použití často zvyšuje pH kyselých půd a ovlivňuje mobilitu kationtů v půdě (Lehmann & Joseph 2009). Hodnota pH biocharu se mírně zvyšuje s teplotou pyrolýzy, což je způsobeno souvisejícím zvýšením obsahu popela. pH biocharu je také více ovlivněno typem suroviny než teplotou pyrolýzy (Mukome & Parikh 2016).

Zásaditost biocharu vyplývá z přítomnosti solí, jako jsou uhličitany a chloridy draslíku a vápníku, v popelu vedle funkčních skupin bohatých na kyslík (Singh et al. 2017).

Dle Mukome & Parikh (2016) se za stejné teploty zpracování může alkalita biocharů lišit v závislosti na vstupním materiálu, např. nedřevěné suroviny (hnůj, kukuřičné zbytky a řasy) mají obecně vyšší pH než dřevěné suroviny.

3.2.4 Zadržování živin

Biochar má skvělou schopnost zadržovat živiny. Tato schopnost je určena charakteristikami, jako je kationtová výměnná kapacita (KVK) a aniontová výměnná kapacita (AVK). Zjednodušeně řečeno se jedná o výskyt záporně (či kladně) nabitých míst na povrchu biocharu, která fungují jako příjemci a zároveň i zdroj kationtů (či aniontů) (Pohořelý et al. 2019). KVK udává množství vyměnitelných kationtů (např. Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ a Na^+) a je důležitým měřítkem kvality půdy a produktivity (Vaněk et al. 2012).

Zvýšením pH výluhu biocharu lze posílit jeho kationtovou i aniontovou výměnnou kapacitu. Při zvýšení teploty pyrolýzy, což zároveň zvyšuje pH, se zvýší podíl popelovin ve srovnání s látkami těkavými (Lee et al. 2010; Pohořelý et al. 2019). Lee et al. (2016) ve svém pokusu také zjistili, že hodnoty KVK dobře korelují s poměry atomů kyslíku k atomům uhlíku (poměry O:C) v materiálech biocharu. To znamená, že čím vyšší je O:C, tím vyšší je hodnota KVK. Vyšší poměr O:C v biocharovém materiálu může indikovat přítomnost více hydroxylových, karboxylátových a karbonylových skupin, které by mohly přispět k vyšší hodnotě KVK pro biocharový produkt.

Vaněk et al. (2012) uvádí, že se v našich podmínkách neklade velký důraz na aniontovou výměnnou kapacitu, v porovnání s KVK, pokud se však nejedná o půdy s vysokým obsahem Fe a/nebo Al, nebo také ve vysoce kyselých půdách, kde mohou vznikat koloidní micely s kladným nábojem.

3.2.5 Elektrická vodivost biocharu

Množství rozpustných solí v roztoku biocharu je důležité, protože vysoká míra aplikace biocharu do půdy může nepříznivě ovlivnit rostliny citlivé na sůl (Šimek et al. 2019). Elektrická vodivost se dá vysvětlit jako množství a povaha solí rozpuštěných v roztoku a je nejpoužívanějším testem zasolenosti půdy. Vychází z principu, že roztoky s vyšší koncentrací solí mají větší schopnost vést elektrický proud (Singh et al. 2017). Ukázalo se, že elektrická vodivost biocharu více koreluje s typem suroviny než s teplotou pyrolýzy, jelikož úzce souvisí s vysokým množstvím rozpustných solí v popelu obsaženém biocharem (Mukome & Parikh 2016).

3.2.6 Obsah uhlíku

Jednou z nejdůležitějších vlastností biocharu je jeho relativně vysoký obsah organického uhlíku (C), který se primárně ukládá v odolných kondenzovaných aromatických jádrech s některými reaktivními funkčními skupinami (Xu et al. 2015). Obsah C v biocharu se může pohybovat v širokém rozmezí (36–94 %, v závislosti na surovině), přičemž se obsah C zvyšuje s vyšší teplotou pyrolýzy (Keiluweit et al. 2010; Peer et al. 2019). Výzkum ukázal, že pro biochary pyrolýzované nižší teplotou je obsah C 60–95 % pro suroviny, jako je dřevo, a 50–70 % pro suroviny, jako jsou např. skořápky ořechů (Mukome & Parikh 2016).

Důležitý parametr je také poměr C:N, jelikož se používá k predikci mineralizace a uvolňování N v půdách. C:N pro biochar může být i velmi vysoký, v rozmezí od 8 (řasy, kukuřičné stonky) do téměř 1500 (měkké dřevo), což naznačuje, že mnoho biocharů povede ke zvýšené imobilizaci N v půdách (Keiluweit et al. 2010).

3.2.7 Aktivace a modifikace biocharu

Pro modulaci vlastností biocharu pro environmentální účely bylo přijato mnoho metod k modifikaci biocharu. Mezi běžné metody patří chemická modifikace a fyzikální modifikace. Chemická modifikace je nejpoužívanější metodou (Ahmed et al. 2016; Wang & Wang 2019). Výsledky ukazují, že chemické úpravy zvyšují hydrofilitu biocharu, zatímco tepelné zpracování způsobuje opačný efekt (Li et al. 2014). Modifikace biocharu může být procesem před nebo po pyrolýze (Xue et al. 2022). Fyzikální úprava zahrnuje především následující způsoby:

- **Aktivace párou** - běžně se používá k zavedení porézní struktury a funkčních skupin obsahujících kyslík (např. karboxylové, karbonylové, etherové a fenolické hydroxylové skupiny) na povrch biocharu, čímž se zvyšuje hydrofilita biocharu (Ahmed et al. 2016),
- **Aktivace dalšími plyny** - je často používaný přístup fyzikální aktivace, kde bylo pro aktivaci biocharu použito oxidační činidlo ve spojení s teplotou nad 700 °C. Biochar byl vystaven oxidačním činidlům, např. ozónu, CO₂ nebo vzduchu, a v důsledku toho se neprístupné póry rozšiřují a otevírají (Verma et al. 2023),
- **Tepelná aktivace** – poskytuje biocharu více základních povrchových funkčních skupin, které se používají k sorpci uhlovodíků (Li et al. 2014). Tento způsob probíhá 1-2 hodiny za teplot v rozmezí 600-1500 °C (Verma et al. 2023),
- **Mletí na kulovém mlýnu** (Rajapaksha et al. 2016),
- **Plazmová aktivace** - v této technice se vysokoenergetické elektrony uvolněné plazmatem používají k pronikání a rozbití chemických vazeb na povrchu v krátké době několika minut až 30 minut (Verma et al. 2023).

Chemické aktivace biocharů lze dosáhnout pomocí kyselých roztoků nebo hydroxidů, kdy se biochar typicky míchá s aktivačními činidly (Wang & Wang 2019):

- **Modifikace kyselinou** - účelem této modifikace je odstranění nečistot, jako jsou kovy, a zavedení kyselých funkčních skupin na povrch biocharu. Mezi běžné kyseliny patří kyselina chlorovodíková, sírová, dusičná, fosforečná, šťavelová a citrónová (Rajapaksha et al. 2016),
- **Alkalická modifikace** - vytváří kladné povrchové náboje, které pomáhají při adsorpci záporně nabitých látek. Provádí se namáčením biocharu v různých základních koncentracích od pokojové teploty do 100 °C. Doba namáčení a míchání je 6–24 hodin. Po promytí a vysušení se modifikovaný biochar pyrolyzuje při teplotě 300-700 °C po dobu 1-2 hodin (Ahmed et al. 2016).

3.3 Využití biocharu

Nedávný výzkum naznačuje, že má biochar potenciál být použit jako půdní kondicionér a jako doplněk kontejnerového substrátu v zemědělství a zahradnictví a může zlepšit několik fyzikálních, chemických a biologických vlastností půdy a substrátu (Jahromi et al. 2019).

Primárním cílem použití biocharu je jeho přímé použití v zemědělské půdě (Pohořelý et al. 2019). Má schopnost vázat živiny a vodu, čímž podporuje optimální podmínky pro růst rostlin a zvyšuje úrodnost půdy. Díky svému dlouhodobému působení a příznivým vlivům na

životní prostředí představuje aplikace biocharu trvale udržitelný způsob zlepšení půdních vlastností (Spears 2018).

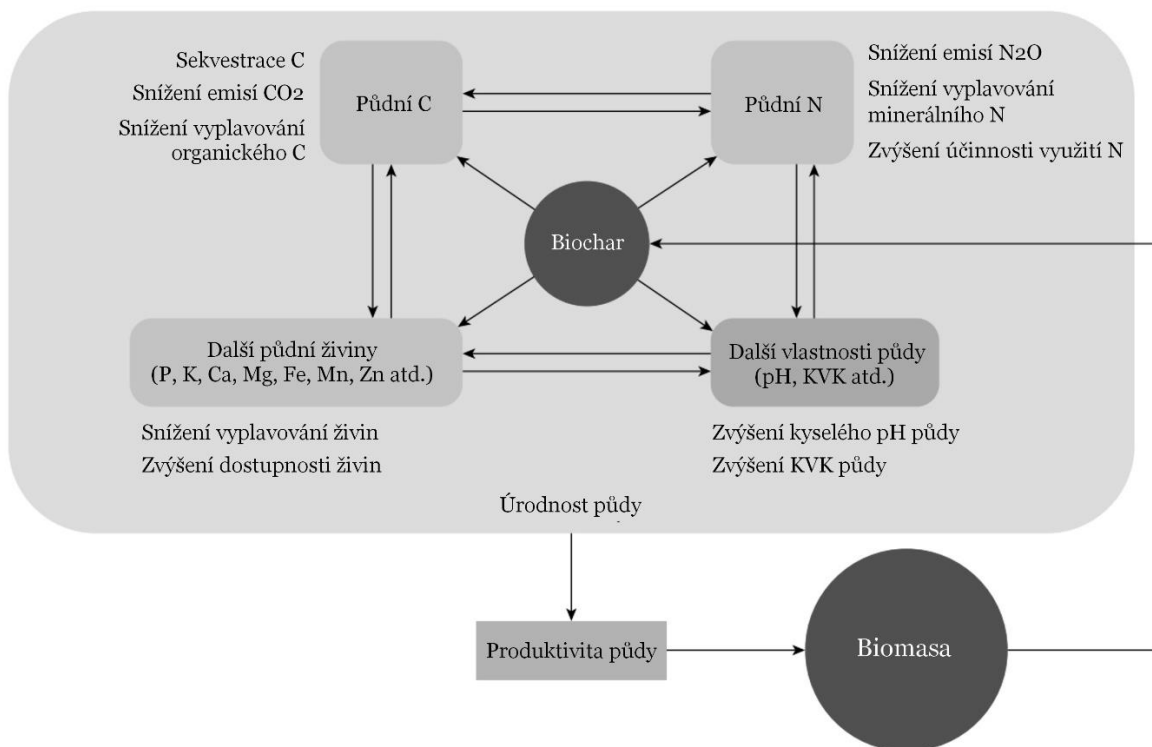
Mimo přímého použití biocharu do zemědělské půdy, jsou tu další možnosti, jak biochar uplatnit v zemědělství:

- **Aditivum pro výrobu kompostu** – urychluje proces kompostování podporou mikrobiální aktivity, pomáhá snižovat ztráty čpavku, objemovou hustotu a zápach. Zabraňuje ztrátě živin a upravuje pH kompostu (Spears 2018; V4 Biochar Platform 2019),
- **Biochar pro zvířata** – kvalitní biochar se může podávat jako krmivo pro zvířata, ať už samostatně, jako součást krmných směsí či jako doplněk napájecí vody. Zvyšuje příjem potravy, hmotnost zvířat, účinnost krmiv, produkci a kvalitu živočišných produktů, posiluje imunitní systém zvířat a tím pomáhá předcházet nemocem. Kromě krmiva lze biochar využít i jako podestýlku pro živočišné chovy (Pohořelý et al. 2019),
- **Čištění vod** – díky svému povrchu je biochar slibný prostředek pro odstraňování kontaminantů z kyselých půdních vod, městských šedých vod či potencionálních zdrojů pitné vody (V4 Biochar Platform 2019),
- **V městském prostředí** – biochar může podpořit efektivní využití vody i ve městech, a to např. v zelených střeších, vertikálních a komunitních zahradách, parcích, v zoologických i botanických zahradách, na sportovních hřištích či v kořenových čističkách odpadních vod (V4 Biochar Platform 2019).

3.4 Vliv biocharu na půdu

V půdě probíhá řada procesů jak fyzikálních, chemických, tak i biologických, které ovlivňují úrodnost půdy, a tím mají přímý i nepřímý vliv na výživu rostlin. Při řešení problematiky úpravy půdy a výživy rostlin je tedy nutné k nejvýznamnějším půdním vlastnostem přihlížet (Vaněk et al. 2012). Dobrá úrodnost půdy je spojena s dostatečnou dostupností živin a příznivými podmínkami prostředí, na které má aplikace biocharu vliv (Obrázek 3). Pokud jde o využití biocharu pro zlepšení půdy, je hned několik důvodů, proč ho aplikovat (Spears 2018):

- posílení struktury půdy,
- zvýšení retence vody a formování agregátů,
- snížení kyselé reakce (pH),
- redukce emisí skleníkových plynů,
- zlepšení poréznosti,
- omezení ztrát dusíku vyplavováním,
- zlepšení elektrické vodivosti,
- zlepšení mikrobiální aktivity (Spears 2018),
- zvýšení efektivity využití biogenních prvků z hnojiv tím, že je zachycuje a postupně uvolňuje (Pohořelý et al. 2019).



Obrázek 3 - Role aplikace biocharu při zlepšování úrodnosti půdy (Cai & Chang 2016)

3.4.1 Vliv na chemické vlastnosti půdy

Aplikace biocharu do půdy má, jak již bylo zmíněno, vliv na chemické vlastnosti, jako například pH půdy, kapacita výměny kationtů (KVK) a obsah organického uhlíku či jiných živin (Van Zwieten et al. 2010.)

V průběhu let byly realizovány pokusy zaměřující se na vliv biocharu vyrobeného z různých materiálů na fyzikální vlastnosti půdy, a jejich výsledky byly následovné:

- Biochar získaný z lignocelulózní biomasy, např. rýžové slupky, kakaová skořápka, dřevěné třísky - zvýšení pH, zvýšení kationtů (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), zvýšení kationtové výměnné kapacity, zvýšení obsahu C v půdě. (Abel et al. 2013),
- Biochar získaný z živočišného odpadu, např. drůbeží hnůj - Zvýšení obsahu kationtů (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), zvýšení KVK, zvýšení obsahu C, N a P, zvýšení biologické dostupnosti C a N (Gul et al. 2015),
- Biochar získaný z rostlinné biomasy, např. eukalyptový zelený odpad, odpad z prořezávání olivovníků - zvýšení pH, zvýšení kationtů (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), zvýšení KVK, zvýšení obsahu C a N v půdě (Van Zwieten et al. 2009),
- V důsledku úprav biocharu se pH půdy zvýšilo zejména v kyselých půdách, přičemž větší zvýšení bylo pozorováno v písčitých a hlinitých půdách, v porovnání s půdami jílovitými (Major et al. 2010).

Podle Nelissen et al. (2012), začlenění biocharu do půdy zlepšuje imobilizaci NH_4^+ , což následně snižuje nitrifikaci, což zase snižuje vyplavování H^+ z půdy. Kromě toho výzkum ukázal, že začlenění biocharu zvýšilo organický uhlík a snížilo požadavky na dusíkatá hnojiva (Glaser et al. 2002), to je způsobeno vysokými úrovněmi uhlíku v biocharu, který se může obtížně rozkládat, takže může trvale vázat uhlík.

Biochar byl shledán účinným při adsorpci rozpuštěných rozpustných živin, jako je amonium, dusičnany, fosfát a další iontové rozpuštěné látky. Bylo také zjištěno, že biochar zlepšuje biologickou N fixaci (Majumder et al. 2023).

Vliv biocharu na pH půdy

Biochar ovlivňuje pH půdy několika způsoby. Prvním způsobem je jeho alkalická povaha, vyznačuje se vysokými hodnotami pH mezi 6,5 a 12,6. Může tak zvýšit pH půdy, zejména pokud je půda kyselá nebo neutrální. To je způsobeno přítomností alkalických látek a alkálií v biocharu, které pocházejí ze vstupní suroviny při výrobě biocharu a během procesu pyrolýzy se nevypařují (Hossain et al. 2020). Druhým způsobem, jakým biochar ovlivňuje pH půdy, je jeho schopnost pohlcovat a udržovat vodu a živiny. Tímto způsobem může biochar pomáhat udržovat rovnováhu vlhkosti a výživy v půdě, což může mít za následek stabilizaci pH. V zemědělských aplikacích se biochar často používá k vápnění kyselých půd nebo ke stabilizaci pH na neutrální úrovni, což může vést ke zlepšení podmínek pro růst rostlin a mikroorganismů v půdě (Majumder et al. 2023).

Vliv biocharu na kationtovou výměnnou kapacitu půdy

Kationtová výměna je klíčovým procesem v půdní chemii, který má zásadní vliv na retenci vody v půdě a její úrodnost. Tento proces zajišťuje zadržení živinových kationtů v půdě, což brání jejich vymývání. Díky tomu jsou živiny přístupné pro půdní mikroorganismy a rostliny, což podporuje zdravý růst a vývoj vegetace (Hossain et al. 2020). Biochar může zvýšit celkovou KVK půdy díky své schopnosti vázat a udržovat kladně nabité ionty, jako jsou vápník (Ca^{2+}), hořčík (Mg^{2+}), draslík (K^+), a další. Tím se zlepšuje retence živin v půdě a snižuje se riziko jejich ztráty (Van Zwieten et al. 2009). Biochar má také pozitivní vliv na strukturu půdy, což může dále zvýšit její KVK. Jeho pórovitá struktura a schopnost zadržovat vlhkost mohou podpořit tvorbu agregátů a zlepšit propustnost půdy, což přispívá ke zvýšení KVK (Pohořelý et al. 2019).

Vliv biocharu na těžké kovy

Těžké kovy s vysokou toxicitou, dlouhodobou perzistencí v prostředí, karcinogenními vlastnostmi a rizikem bioakumulace jsou i ve velmi nízkých koncentracích považovány za velmi nebezpečné znečišťující látky životního prostředí (Akca & Sonmez 2023).

Existuje velké množství publikací o přítomnosti těžkých kovů, jako je kadmium, chrom, olovo a rtuť, v rostlinách. Mezi faktory vedoucí ke zvýšeným koncentracím těžkých kovů v půdě a v rostlinách patří: 1) vysoké geogenní koncentrace v půdě, 2) kontaminace půdy antropogenní činností (např. přehnojování, nečistoty v hnojivech, používání odpadních vod z komunálních odpadů, zavlažování, používání pesticidů na bázi kovů, sedimentace těžebního materiálu, atmosférická depozice, 3) vysoký přenos z půdy do rostlin, 4) přímá kontaminace rostlin půdou, vzduchem a prachem (Marschner 2012).

Využití biocharu při sanaci půd pomocí adsorpce těžkých kovů je stále častější díky širokému specifickému povrchu biocharu, porézni povrchové struktuře a vysokému obsahu

funkčních skupin (Akca & Sonmez 2023). Celkově lze tvrdit, že přirozené vlastnosti biocharu, jako je hojnost vazebných míst na povrchu (hydroxylové, karboxylové a fenolové hydroxylové skupiny), porézní struktura, vysoká kationtová výměnná kapacita a vysoká specifická plocha povrchu, z něj činí užitečný a účinný adsorpční materiál pro účely remediace těžkých kovů. Biochar ovlivňuje těžké kovy v půdě jak přímo jejich adsorpcí, tak i nepřímo změnou půdních vlastností, které mají na mobilitu těžkých kovů v půdě vliv (He et al. 2019).

3.4.2 Vliv na fyzikální vlastnosti půdy

Jak uvádí Eastman (2011), fyzikální vlastnosti mají důležitou roli pro růst rostlin a hospodaření s vodou. V průběhu let byly zjištěny významné účinky biocharu právě na tyto vlastnosti u zemědělských půd (Majumder et al. 2023). Mezi základní fyzikální vlastnosti půdy se řadí textura (zrnitost a zastoupení velikostních frakcí v půdě) a struktura (uspořádání částic v prostoru, jejich shlukování do agregátů, velikost a tvar). Na strukturu navazují další důležité vlastnosti, a to pórovitost, specifická a objemová hmotnost půdy. Velký význam mají také barva a teplota půdy (Šimek & Borůvka 2019).

Biochar má značně porézní strukturu a vyznačuje se nízkou objemovou hmotností. V závislosti na vstupní surovině a výrobních podmínkách se objemová hmotnost biocharu pohybuje od $0,08 \text{ g.cm}^{-3}$ (Abel et al. 2013) do $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$ (Oberlin 2002). Jelikož se objemová hmotnost většiny minerálních půd pohybuje kolem $1,1 - 2 \text{ g.cm}^{-3}$ (Šimek & Borůvka 2019), aplikací biocharu se předpokládá, že dojde ke snížení objemové hustoty půdy (Abel et al. 2013).

Adekiya et al. (2020) ve svém dvouletém výzkumu prokázali pozitivní dopady biocharu na fyzikální vlastnosti půdy. K výzkumu byl použit biochar vyrobený z tvrdého dřeva při teplotě $500 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 12 hodin, který byl aplikován ve čtyřech úrovních po dávkách 0, 10, 20 a 30 t/ha . Úrovně aplikace biocharu byly uspořádány v randomizovaném blokovém designu a třikrát replikovány na blocích o rozloze 20 m^2 . Místo experimentu bylo obnoveno z pětiletého úhoru, kdy půda byla hlinitopísčítá s vysokou objemovou hmotností ($2,65 \text{ g.cm}^{-3}$), kyselým pH a s nízkým obsahem půdních živin. Výsledky ukázaly, že aplikace biocharu v obou letech výrazně snížila objemovou hmotnost (o 46,3 % v prvním roce a 74,7 % ve druhém) a zvýšila pórovitost půdy (o 46,5 % v prvním roce a 65,0 % ve druhém) ve srovnání s kontrolou. Dále se ukázalo, že se významně zvýšil i obsah půdní vlhkosti a rychlost infiltrace.

V průběhu let byly realizovány pokusy zaměřující se na vliv biocharu vyrobeného z různých materiálů na fyzikální vlastnosti půdy, a jejich výsledky byly následovné:

- Biochar získaný z lignocelulózové biomasy, např. rýžové slupky, kakaová skořápka, dřevěné třísky - snížení hustoty, zvětšení povrchu, zvýšení pórovitosti, snížení odporu pronikání do půdy, zvýšení schopnosti zadržovat vodu (Abel et al. 2013; Eastman 2011),
- Biochar získaný z pilin borovice čínské a akátu – zvýšená agregace půdy, zvýšený celkový obsah půdních vodovzdorných agregátů (Liu et al. 2012),
- Biochar získaný z živočišného odpadu, např. drůbeží hnůj - hydraulická vodivost zeminy se zvýšila, stlačitelnost snížila a smyková pevnost zeminy se zvýšila s nárůstem biocharu a se snížením velikosti částic biocharu (Reddy et al. 2015),

- Biochar získaný z rostlinné biomasy, např. sušené listy magnólie, štěpky z jablečného dřeva a posklizňové zbytky z kukuřice - zvětšení plochy a pórovitosti, vyšší kapacita zadržování vody, mírné zvýšení hydraulické vodivosti (Kinney et al. 2012).

3.4.3 Vliv na biologické vlastnosti půdy

Biochar může svými vlastnostmi vytvořit v půdě takové změny, které mohou vést k modifikaci půdní mikrobiální a faunální diverzity a aktivity (Majumder et al. 2023; Spears 2018). Transformace biologických charakteristik půdy způsobené vlivem biocharu závisí na vlastnostech samotného biocharu a na struktuře půdy, včetně faktorů jako je povrchová plocha, pH a porozita, které zajišťují ideální prostředí pro mikroorganismy (Gul et al. 2015). I samotný uhlík podporuje mikrobiální aktivitu (Burnett et al. 2016). S rostoucím množstvím aplikovaného biocharu se může zvýšit maximální počet kultivovatelných kolonií obecných bakterií, bakterií rodu *Bacillus*, kvasinek a hub rodu *Trichoderma* (Javed et al. 2023). Aplikace biocharu může mít i další pozitivní dopady na biologii půdy, jako například:

- Zlepšení biologické fixace N (Rondon et al. 2007),
- Zvýšení kolonizace mykorhizních hub a žížal přítomných v půdě (Van Zwieten et al. 2010),
- Snížení poměru houby/bakterie (Gul et al. 2015),
- Nárůst prospěšných mikrobů a potlačení patogenů (Warnock et al. 2010),
- Nárůst gram pozitivních bakterií a populací hub (Javed et al. 2023).

Půdní mikrobiální komunita je však citlivá na změny životního prostředí, a proto nemusí mít úprava půdy biocharem vždy pozitivní účinky (Javed et al. 2023). Několik výzkumů prokázalo negativní účinky biocharu na určité biologické aspekty půdy, například: snížení mikrobiální hmoty, rozkladu organické hmoty a mikrobiálního společenství kvůli snížené mineralizaci dusíku přidáním biocharu (Van Zwieten et al. 2009); snížení populace bakterií v půdě, zejména *E. coli* (Gurtler et al. 2020); výrazný pokles výskytu populace *Fusarium* spp. (Wang et al. 2020; Nie et al. 2018; Javed et al. 2023).

3.4.3.1 Arbuskulárně mykorhizní houby (AMF)

Arbuskulárně mykorhizní houby (AMF) jsou základní a prospěšnou půdní mikroflórou, představují zásadní spojení mezi minerálními živinami v půdě a v rostlině (Huang et al. 2024). Arbuskulárně mykorhizní houby jsou nezbytnou a nedílnou součástí půdního rostlinného systému, která tvoří symbiotický vztah se suchozemskými rostlinami (Javeed et al. 2023). Dle Huang et al. (2024); Wang et al. (2024); Chen et al. (2017) a Smith & Smith (2012) může přibližně 90 % suchozemských rostlin, včetně kvetoucích rostlin, mechorostů a kapradin, vytvářet symbiotické vztahy s AMF houbami. Gargouri et al. (2021) i Brundrett & Tedersoo (2018) však uvádějí, že schopnost vytvořit s AMF symbiotické asociace má pouze 72 % rostlin.

V ekosystému poskytují mykorhizní houby svým hostitelským rostlinám minerální živiny, a na oplátku získávají fotosynteticky odvozené sacharidy (Javeed et al. 2023). AMF zlepšují dostupnost a příjem živin v kořenech tím, že vytváří širokou síť jemných hyf v živné zóně za rhizosférou (Wang et al. 2024), dodávají rostlině další fosfor, dusík a zinek (Smith & Smith 2012), mohou tedy působit jako přírodní hnojivo (Chen et al. 2017). Houbové hyfy jsou

navíc tenčí než kořeny, a proto pronikají do menších pórů, a získávají z půdy živiny, které jsou pro kořeny rostlin nedostupné (Jiang et al. 2021). Řada výzkumů prokázala, že aplikace AMF mohou významně podpořit toleranci rostlin vůči chorobám a stresu ze sucha, zasolenosti půdy, nutričnímu stresu, a také pomoci s odstraňováním některých těžkých kovů z půdy (Kumar & Saxena 2019; Javeed et al. 2023). AMF mohou také regulovat půdní mikrobiální komunitu a zlepšit odolnost rostlin vůči stresu regulací kořenových procesů, jako je zvýšení sekundárních metabolitů a antioxidační kapacity (Brundrett & Tedersoo 2018). Symbiotický vztah mezi AMF a kořeny rostlin prospívá tvorbě půdní struktury, jako je struktura pórů, rychlost smáčení a stabilita agregátu (Javeed et al. 2023).

Účinnost AMF se zlepšuje při aplikaci biocharu ve všech typech půdních systémů (Javeed et al. 2023). V přítomnosti biocharu arbuskulárně mykorhizní houby zvyšují kolonizaci kořenů a tím zlepšují kořenovou architekturu (Wang et al. 2020). Biochar také funguje jako útočiště pro arbuskulárně mykorhizní houby (Han et al. 2016).

Rhizophagus irregularis

Rhizophagus irregularis, který byl použit v rámci pokusu této práce, (dříve známý jako *Glomus intraradices*) je arbuskulárně mykorhizní houba používaná jako půdní inokulant v zemědělství a zahradnictví. Běžně se také používá ve vědeckých studiích účinků AMF na zlepšení vlastností rostlin a půdy (Kokkoris et al. 2023).

Na starších kořenech hostitelských rostlin bývá rozsáhlé hyfové propojení a intenzivní intraradikální výtrusy. Někdy jsou výtrusy hustě shlukované nebo roztroušené, v závislosti na hostitelském druhu. Bylo zjištěno, že *R. irregularis* kolonizuje nové rostliny prostřednictvím spor, hyf nebo fragmentů kořenů. *Rhizophagus irregularis* se vyskytuje téměř ve všech půdách, zejména v těch, které jsou osídleny běžnými hostitelskými rostlinami, a v lesích a na pastvinách. Většina zemědělských plodin má z inokulace houbou *Rhizophagus irregularis* prospěch (Rejali et al. 2022).

3.4.3.2 Bakterie

Bakterie můžou rostlinám poskytnout živiny, ale také mohou produkovat fytohormony (např. kyselina indol-3-octová, cytokinin, gibberelin, etylen a kyselina abscisová), které napomáhají rychlejšímu růstu a pomáhají rostlinám vyrovnat se se stresem (Ma et al. 2022).

Účinek biocharu na bakterie lze kategorizovat do dvou typů: přímé a nepřímé účinky. Mezi přímé účinky patří například vliv funkčních skupin na povrchu biocharu, které mohou podporovat nebo inhibovat bakteriální růst a aktivitu. K nepřímým účinkům dochází v důsledku změn v půdě, kterou bakterie obývají (Ouyang et al. 2023). Vaněk et al. (2012) uvádějí, že pro většinu užitečných bakterií jsou ideální podmínky pro rozvoj v prostředí, které je neutrální až alkalické. Také uvádějí, že většina těchto bakterií se v půdách s pH pod 5 nevyskytuje vůbec, nebo jen patrně, a jejich aktivita je nízká. Interakce mezi biocharem a bakteriemi mohou poskytnout řadu výhod, jako je podpora růstu rostlin, podpora mobilizace těžkých kovů, zlepšení fytoextrakce, stejně jako imobilizace nebo detoxikace těžkých kovů ke zmírnění stresu rostlin (Ouyang et al. 2023).

V rámci pokusu této práce byly použity následující bakterie: *Rhodococcus zopfii*, *Caenibius tardaogens*, *Nocardioides simplex*, *Altererythrobacter estronivorus*.

3.5 Vliv biocharu na rostliny

Vliv biocharu na rostliny je hlavně nepřímý, a to jeho schopností zlepšovat úrodnost půdy. Major et al. (2010) ve svém výzkumu uvedli, že příjem živin rostlinami byl zvýšen v půdě upravené biocharem, tím byl zvýšen i výnos rostlin. Některé studie naznačují, že aplikace biocharu může zvýšit odolnost rostlin vůči stresovým podmínkám, jako je sucho nebo choroby, částečně díky jeho schopnosti zlepšit půdní prostředí. Výsledky aplikace biocharu se mohou lišit v závislosti na druhu rostlin, druhu půdy, typu biocharu a jiných faktorech. Nicméně celkově lze říci, že biochar má potenciál přispět k zlepšení půdní kvality a podpořit zdravý růst rostlin.

Biochar má potenciál pro omezování chorob rostlin přenášených půdou (Abid et al. 2023). Zdravá půda může účinně zlepšit zdraví rostlin a produkci, zatímco choroby přenášené půdou významně ovlivňují zdraví půdy i kvalitu produkce (Riaz et al. 2021). Plíseň semenáčků, uvadnutí, hniloba semen a kořenů jsou nejčastějšími chorobami rostlin přenášenými půdou, které jsou vyvolány zejména Kořenomorkou bramborovou (*Rhizoctonia solani*) a půdních patogenů rodu *Pythium*, které způsobují značné ztráty na výnosech například u tykvovitých, lilkovitých či u kukuřice (Jaiswal et al. 2019).

Zemědělci se obvykle pro boj s patogeny spoléhají na použití určitých chemických látek a fungicidů. Tyto chemické látky a fungicidy však mohou poškodit jak rostliny, tak prospěšné mikroorganismy, proto je třeba najít nechemické, alternativní přístupy ke snížení výskytu chorob přenášených půdou. Jednou z rozvíjejících se metod, která má potenciál pro likvidaci patogenů způsobujících půdní choroby, je přidávání biocharu do půdy (Jaiswal et al. 2019; Abid et al. 2023).

V několika výzkumech bylo zjištěno, že ošetření rostlin biocharem snížilo výskyt půdních chorob vyvoláním indukované systémové rezistence vůči houbovým fytopatogenům, včetně *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* u rajčat, *R. solani* u okurek (Jaiswal et al. 2019). Bylo ověřeno, že biochar je velmi potlačující vůči půdním (*R. solani* a druhy *Phytophthora* a *Fusarium*) i vzdušným patogenům (padlí a *B. cinerea*). Aplikace biocharu tedy zmírnila škodlivé účinky půdní reakce úpravou půdní mikrobioty a odhalila potenciální schopnost potlačit půdní choroby rostlin (Wang et al. 2020).

Potlačení půdních patogenů díky aplikaci biocharu závisí na několika mechanismech, a to například: 1) rozpouštění živin a jejich distribuce k rostlinám pro zlepšení růstu a odolávání patogenním mikroorganismům, 2) zlepšení obranného systému půdních mikrobů proti fytopatogenům prostřednictvím zvýšení produkce antibiotik a parazitismu, 3) přítomnost organických sloučenin v biocharu vede k šíření odolných společenstev prospěšných mikrobů (Abid et al. 2023).

3.6 Cuketa (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*)

Cuketa (*Cucurbita pepo* var. *giromontiina*) je varieta jednoleté plodové zeleniny druhu *Cucurbita pepo*, který je známý jako tykev obecná, z čeledi *Cucurbitaceae*. Jedná se o rychle rostoucí rostliny, které produkují hojné množství plodů během krátké doby. Snadno se pěstují v tropickém, subtropickém, teplém a mírném podnebí. V chladnějším podnebí mohou být úspěšně pěstovány, pokud je v rané sezóně zajištěna ochrana před nízkými teplotami. Pěstují se v domácích zahradách a na polích, v extenzivních a intenzivních podmínkách, a jsou vyráběny konvenčně i ekologicky (Paris 2017).

Růst plodů u většiny druhů z čeledi *Cucurbitaceae* závisí na úspěšném opylení, stejně tak velikost a hmotnost plodů často závisí na úspěšném oplodnění, ke kterému došlo v semeníku (Montero-Pau et al. 2017). V poslední době je za potenciálně cenný způsob pěstování cuket považováno pěstování pomocí partenokarpie. Partenokarpie umožňuje pokračující růst semeníků, dokonce i bez oplodnění. Tento způsob se uplatňuje v polních podmínkách, kde není dostatek opylovačů, a hlavně při produkci ve sklenících za úplné nepřítomnosti hmyzích opylovačů (Grumet & Colle 2017).

Cuketa se dá také pěstovat na hydroponických systémech. Colla & Saccardo (2003) uvádějí, že kultivační systémy bez půdy jsou vhodné pro produkci zahradnických produktů s krátkým růstovým cyklem a vysokou hustotou rostlin, zvyšují jejich ranost a umožňují prodloužení vegetačního období.

Kromě rychlého růstu a produkce velkého množství plodů během krátkého období, se cukety vyznačují citlivostí na změny v půdních podmínkách, včetně změn v půdní struktuře, pH a dostupnosti živin. Rostoucí cukety jsou relativně snadné na sledování a analýzu, právě díky jejich rychlému růstu a výrazným fázím růstu od semene po sklizeň. Díky všem těmto faktorům jsou cukety často používány jako modelová rostlina pro řadu vědeckých výzkumů a experimentů (Amin & Eissa 2017).

4 Metodika

Pro nádobový pokus byla využita půda ze stanoviště Humpolec. Jedná se o hlinitopísčitou půdu se středním obsahem živin a mírně kyselým pH. Do 1,5 litrových nádob bylo naváženo 1,3 kg půdy. Celkem bylo založeno 9 testovaných variant, každá v pěti opakováních. Pokus probíhal od konce dubna do poloviny srpna roku 2023. Přehled variant je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1 - Schéma pokusu s cuketami

Číslo	Kontrola/biochar	0/bakterie/AMF
1	Kontrola	0
2	Biochar z kalů	0
3	Dřevní biochar	0
4	Kontrola	Bakterie
5	Biochar z kalů	Bakterie
6	Dřevní biochar	Bakterie
7	Kontrola	AMF
8	Biochar z kalů	AMF
9	Dřevní biochar	AMF

V případě aplikace biocharu z kalů bylo v 1,3 kg půdy rovnoměrně rozmícháno 6,8 g jemně namletého materiálu. Dřevní biochar byl aplikován stejným způsobem, avšak v menším množství, a to 2,26 g biocharu/1,3 kg půdy. Bakterie a AMF houby byly aplikovány spolu se setím.

V případě bakterií se jednalo o směs *Rhodococcus zopfii*, *Caenibius tardaugens*, *Nocardioides simplex* a *Altererythrobacter estronivorus*. Každý kmen byl inkubován zvlášť po dobu 24 hod. v horizontálním inkubátoru s mícháním o rychlosti 180 otáček za minutu. Nárůst biomasy byl měřen optickým fotometrem při vlnové délce při 600 nm. Po 24 hodinách dosáhly všechny kmeny při měření při vlnové délce 600 nm hodnoty absorbance 1 a vyšší, což je považováno za dobrý růst bakterií. Hodnota absorbance 1 byla zvolena jako výchozí pro aplikační dávku 1 ml roztoku s bakteriemi. Celkově byla dávka jednotlivých bakterií zvolena tak, aby aplikační dávka odpovídala hodnotě 2,5. To znamená, že pokud byla při vlnové délce 600 nm naměřena absorbance 2,5, byl aplikován 1 ml inokula. V případě, že byla naměřena absorbance 1, bylo aplikováno 2,5 ml roztoku apod. Všechny kmeny bakterií byly rozmíchány do půdy v době setí.

Jako AMF byl použit *Rhizophagus irregularis*, kmen DAOM197198, kde byl v inokulu tvořeném křemelinou obsažen 1 milion spor na 100 mg inokula. Právě dávka 100 mg inokula byla aplikována do výsevního důlku spolu s každým semenem cukety. K variantám neošetřených AMF houbou bylo aplikováno 100 mg samotné křemeliny.

Do každé nádoby byla vyseta 4 semena cukety. Rostliny byly po vzejití vyjednoceny na 2 na nádobu. V některých případech (cca z jedné pětiny) nevzešly v nádobách žádné rostliny, nebo pouze jedna. V tomto případě byl stav ponechán do konce pokusu a rostliny nebyly

dosévány. Pokus byl každé 2 týdny randomizován. Zalévání probíhalo dle hmotnosti nádob na 60 % vodní kapacity.

4.1 Stanovení přístupných živin v půdě metodou CaCl₂

Ke stanovení rychle dostupných makroprvků (kromě Ca) v půdě byl využit výluh v 0,01 mol/l CaCl₂, který je někdy uváděn jako přesnější z hlediska vypovídací schopnosti o obsahu živin v půdním roztoku. Půda byla odebrána z nádob po sklizni pokusů, následně homogenizována, usušena a proseta přes síto 2 mm. Pro samotnou analýzu využita mírně modifikovaná metoda dle Houba et al. (1990). Extrakce proběhla v poměru 1:10 (3 g půdy, 30 ml vyluhovacího roztoku). Po dvou hodinách třepání byly vzorky odstředěny 5 min. při 9000 g a následně ještě zfiltrány pro odstranění neodstředěných nečistot. Pro měření přístupných živin (kromě N a Ca) byl využit optický emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

4.2 Analýzy plodů cuket

Plody cukety byly usušeny prostřednictvím lyofilizace a jemně namlety (<1 mm). Bylo naváženo přibližně 0,4 g namletého materiálu se zaznamenáním skutečné hmotnosti na 3 desetinná místa. Ten byl převeden do roztoku rozkladem na mokré cestě s pomocí mikrovlnné digesce v prostředí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku. Získaný digestát byl poté kvantitativně převeden do roztoku (finální objem 50 ml) a analyzován ICP-OES pro změření celkových obsahů makro-, mikroprvků a dalších prvků kromě K a rovněž pomocí atomového absorpčního spektrometru (AAS) pro získání hodnoty celkového obsahu K.

4.3 Statistické hodnocení výsledků

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky vypočtené v programu Microsoft Excel (EXCEL, Microsoft 365) a pokročilé statistické vyhodnocení (A-NOVA) bylo realizováno prostřednictvím programu Statistica 12 (STATSOFT, Inc., 2017). Statistická průkaznost rozdílů mezi variantami byla hodnocena prostřednictvím Tukey testu při hladině významnosti $p < 0,05$.

5 Výsledky

Bylo hodnoceno 9 variant substrátů s různými kombinacemi přísad biocharu a doplňkových komponentů (biostimulantů). V tabulce 2 jsou uvedeny zkratky jednotlivých variant.

Tabulka 2 - Varianty použitých substrátů a jejich označení

Číslo	Zkratka	Varianta	Biostimulant
1	K-0	Kontrola	Nulová
2	K+BK-0	Kontrola + biochar z kalů	Nulová
3	K+BD-0	Kontrola + dřevní biochar	Nulová
4	K-b	Kontrola	Bakterie
5	K+BK-b	Kontrola + biochar z kalů	Bakterie
6	K+BD-b	Kontrola + dřevní biochar	Bakterie
7	K-amf	Kontrola	AMF Houby
8	K+BK-amf	Kontrola + biochar z kalů	AMF Houby
9	K+BD-amf	Kontrola + dřevní biochar	AMF Houby

V této kapitole jsou uvedeny obsahy živin a dalších prvků ve všech variantách pěstebního substrátu a jejich odběr rostlinami. Obsahy prvků v substrátech jsou uváděny v mg/kg sušiny. Odběr prvků rostlinami je pak uváděn v mg na nádobu. Dále jsou uvedeny výnosy sušiny plodů cukety, které jsou uváděny v gramech (g).

5.1 Obsah živin v substrátu

5.1.1 Makroprvky

V tabulce 3 jsou statisticky vyhodnoceny obsahy vybraných makroprvků v substrátech.

Fosfor

Obsah fosforu byl u variant K-b, K+BK-b, K+BD-b, K-amf a K+BD-amf pod hranicí detekce přístroje ICP-OES, což způsobilo statisticky průkazně nižší hodnoty ve srovnání téměř se všemi ostatními variantami. Pouze varianty K+BD-0 a K+BK-amf vykazovaly srovnatelné hodnoty (0,156 a 0,239 mg/kg). Tyto dvě varianty byly zároveň statisticky podobné variantě K+BK-0. Varianta K-0 vykazovala průkazně nejvyšší hodnoty (1,22 mg/kg) a zároveň byla statisticky podobná variantě K+BK-0 (0,683 mg/kg). Z výsledků je pravděpodobné, že aplikace hub i bakterií spíše omezila dostupnost P.

Draslík

Rovněž u draslíku byly zaznamenány průkazné rozdíly mezi variantami. Obsah draslíku v půdě se pohyboval mezi hodnotami 9,70 a 19,0 mg/kg. U varianty K+BK-0 byly zjištěny průkazně vyšší hodnoty než u variant K+BD-b a K+BK-amf. Zbylé varianty si byly statisticky podobné jednak navzájem a jednak i s výše zmíněnými třemi variantami.

Hořčík

Podobné tendence lze pozorovat i u hořčíku, kde statisticky průkazně vyšší hodnoty dosáhla opět varianta K+BK-0 (218 mg/kg), tentokrát ve srovnání s oběma biochary v kombinaci s amf (137 mg/kg pro K+BD-amf a 162 mg/kg pro K+BK-amf). Ostatní varianty jsou opět podobné vzájemně i třem výše uvedeným.

Síra

Posledním sledovaným makroprvkem byla síra. Její obsah v půdě se pohyboval mezi hodnotami 48,5 a 151 mg/kg. Zde i přes výrazně vyšší hodnoty u variant K-0 (151 mg/kg) a K+BK-0 (121 mg/kg), nebyl pozorován průkazný rozdíl mezi variantami. To bylo způsobeno variabilitou jednotlivých opakování.

Vápník

Z důvodu použití roztoku chloridu vápenatého (0,01 mol/l CaCl₂) při výluhu, nebyl obsah vápníku v substrátu měřen.

Tabulka 3 - Obsahy makroprvků (P, K, Ca, Mg, S) v substrátu s různými přísadkami biocharu a biostimulantů

Varianta		P	K	Ca	Mg	S
Číslo	Zkratka	mg/kg	mg/kg	neměřeno	mg/kg	mg/kg
1	K-0	1,22 ^c	14,0 ^{ab}	-	202 ^{ab}	151 ^a
2	K+BK-0	0,683 ^{bc}	19,0 ^b	-	218 ^b	121 ^a
3	K+BD-0	0,156 ^{ab}	12,3 ^{ab}	-	164 ^{ab}	77,2 ^a
4	K-b	0,000 ^a	11,2 ^{ab}	-	166 ^{ab}	77,8 ^a
5	K+BK-b	0,000 ^a	12,5 ^{ab}	-	170 ^{ab}	52,7 ^a
6	K+BD-b	0,000 ^a	9,70 ^a	-	165 ^{ab}	82,5 ^a
7	K-amf	0,000 ^a	12,2 ^{ab}	-	166 ^{ab}	86,5 ^a
8	K+BK-amf	0,239 ^{ab}	10,3 ^a	-	162 ^a	90,5 ^a
9	K+BD-amf	0,000 ^a	11,2 ^{ab}	-	137 ^a	48,5 ^a

Varianty označené alespoň jedním společným písmenkem jsou si statisticky podobné (Tukey test, $p < 0,05$)

5.1.2 Mikroprvky

V tabulce 4 jsou statisticky vyhodnoceny obsahy vybraných mikroprvků v substrátech.

Železo

Obsah přístupného železa v substrátu se pohyboval mezi hodnotami 1,56 a 7,08 mg/kg. Nejvyšší hodnota byla naměřena u varianty K-0. Tato varianta byla statisticky podobná zbylým variantám bez biostimulantů (K+BK-0 a K+BD-0) a také variantě K+BK-amf. Oproti ostatním

variantám dosahovala varianta K-0 významně vyšších hodnot. S přidavkem biostimulantů se hodnoty snižovaly až k nejnižší hodnotě, která byla naměřena u varianty K+BK-b (1,56 mg/kg).

Měď

Obsah mědi byl téměř u všech variant pod hranicemi detekce přístroje ICP-OES. Pouze u variant K+BK-0 a K-b byly naměřeny hodnoty nad hranicí detekce, a to 0,012 mg/kg a 0,010 mg/kg v tomto pořadí. Všechny varianty si byly statisticky podobné.

Zinek

Obsah přístupného zinku v substrátu se pohyboval mezi hodnotami 0,066 a 0,244 mg/kg. Vyšší hodnoty se vyskytly u variant substrátu s biocharem z čistírenských kalů (0,244 mg/kg pro K+BK-0; 0,178 mg/kg pro K+BK-amf; 0,157 mg/kg pro K+BK-b), avšak pouze hodnota u varianty K+BK-0 byla vyhodnocena jako významně vyšší, oproti variantám s dřevním biocharem a kontrolním variantám s biostimulanty. Varianty K+BK-amf, K+BK-b a K-0 byly statisticky podobné všem zkoumaným variantám.

Mangan

Obsah přístupného manganu v substrátu se pohyboval mezi hodnotami 1,44 a 7,39 mg/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u variant bez biocharu s přidavkem biostimulantů (7,39 mg/kg pro K-amf a 6,27 mg/kg pro K-b). Naopak nejnižší hodnoty se projeví u variant K+BD-amf (1,44 mg/kg) a K+BK-b (1,66 mg/kg). I přes poměrně vysoké hodnoty u variant K-amf a K-b neexistují mezi variantami statisticky průkazné rozdíly. Je to způsobeno přítomností extrémní hodnoty v jednom z opakování zmíněných variant, která zvýšila průměr těchto variant.

Bór

Obsah bóru byl u všech variant s bakteriemi a AMF houbami pod hranicemi detekce přístroje ICP-OES, což mohlo být zapříčiněno právě přidavkem zmíněných biostimulantů. Hodnoty nad hranicí detekce se vyskytly tedy pouze u variant bez přidaných stimulantů. Nejvyšší hodnota, která se projevila u varianty K-0 (0,055 mg/kg), byla statisticky podobná s variantou K+BK-0 (0,023 mg/kg), ale významně vyšší v porovnání se všemi ostatními variantami.

Molybden

Obsah molybdenu v substrátu byl u všech variant pod hranicemi detekce přístroje ICP-OES.

Tabulka 4 - Obsahy mikroprvků (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo) v substrátu s různými přísadkami biocharu a biostimulantů

Varianta		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Mo
Číslo	Zkratka	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	K-0	7,08 ^b	0,000 ^a	0,135 ^{ab}	3,96 ^a	0,055 ^b	0,000 ^a
2	K+BK-0	5,29 ^{ab}	0,012 ^a	0,244 ^b	3,30 ^a	0,023 ^{ab}	0,000 ^a
3	K+BD-0	3,38 ^{ab}	0,000 ^a	0,085 ^a	2,17 ^a	0,010 ^a	0,000 ^a
4	K-b	1,90 ^a	0,010 ^a	0,077 ^a	6,27 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
5	K+BK-b	1,56 ^a	0,000 ^a	0,157 ^{ab}	1,66 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
6	K+BD-b	2,36 ^a	0,000 ^a	0,088 ^a	1,93 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
7	K-amf	2,55 ^a	0,000 ^a	0,080 ^a	7,39 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
8	K+BK-amf	3,03 ^{ab}	0,000 ^a	0,178 ^{ab}	2,71 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
9	K+BD-amf	1,63 ^a	0,000 ^a	0,066 ^a	1,44 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a

Varianty označené alespoň jedním společným písmenkem jsou si statisticky podobné (Tukey test, $p < 0,05$)

5.1.3 Ostatní prvky

V tabulce 5 jsou statisticky vyhodnoceny obsahy ostatních vybraných prvků v substrátech.

Sodík

Obsah přístupného sodíku v substrátu se pohyboval mezi hodnotami 87,1 a 145 mg/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u variant K-0 a K+BK-0 (145 a 144 mg/kg). Naopak nejnižší hodnota byla naměřena u varianty K+BD-amf (87,1 mg/kg). Statisticky jsou si hodnoty všech variant podobné.

Hliník

Obsah hliníku v substrátu se pohyboval mezi hodnotami 1,98 a 3,71 mg/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u kontrolní varianty K-0 a u varianty K+BK-0. Nejnižší hodnota byla naměřena u varianty K+BK-b. Statisticky mezi hodnotami všech variant neexistuje významný rozdíl.

Nikl

Obsah přístupného niklu byl u variant K+BK-b a K+BD-amf pod hranicemi detekce přístroje ICP-OES. Nejvyšší naměřená hodnota 0,118 mg/kg se vyskytla u varianty K+BK-0, která byla statisticky významně vyšší oproti variantě K+BK-b. Varianta K+BD-amf, jejíž hodnoty byly také pod hranicí detekce přístroje ICP-OES, byla kvůli nižšímu počtu opakování vyhodnocena jako statisticky podobná všem variantám. Ostatní varianty jsou podobné vzájemně i všem výše uvedeným.

Arsen, kadmium, chrom, olovo

Obsahy As, Cd, Cr a Pb se pohybovaly pod hranicí detekce přístroje ICP-OES.

Tabulka 5 - Obsahy ostatních prvků (Na, Al, Ni, As, Cd, Cr, Pb) v substrátu s různými přísadkami biocharu a biostimulantů

Varianta		Na	Al	Ni	As	Cd	Cr	Pb
Číslo	Zkratka	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	K-0	145 ^a	3,71 ^a	0,116 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
2	K+BK-0	144 ^a	3,20 ^a	0,118 ^b	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
3	K+BD-0	104 ^a	2,65 ^a	0,037 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
4	K-b	109 ^a	2,57 ^a	0,036 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
5	K+BK-b	113 ^a	1,98 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
6	K+BD-b	113 ^a	2,76 ^a	0,026 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
7	K-amf	110 ^a	3,05 ^a	0,062 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
8	K+BK-amf	108 ^a	2,73 ^a	0,063 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a
9	K+BD-amf	87,1 ^a	2,03 ^a	0,000 ^{ab}	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a	0,000 ^a

Varianty označené alespoň jedním společným písmenkem jsou si statisticky podobné (Tukey test, $p < 0,05$)

5.2 Odběr živin plody cukety

5.2.1 Makroprvky

V tabulce 6 jsou statisticky vyhodnoceny odběry vybraných makroprvků plody cuket.

Fosfor

Odběr fosforu plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 19,0 a 66,2 mg na nádobu. Nejvyšší hodnota odběru byla naměřena u kontrolní varianty K-0, která byla výrazně vyšší než odběr živin u varianty K+BD-amf. Ostatní varianty jsou statisticky podobné vzájemně i oběma výše zmíněným variantám.

Draslík

Odběr draslíku plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 142 a 422 mg na nádobu. Ačkoliv mezi variantami nebyl průkazný rozdíl, dají se pozorovat určité tendence. Nejvyšší hodnota odběru byla naměřena u kontrolní varianty K-0 (422 mg). Nejnížší hodnoty se však projeví u variant substrátů s dřevním biocharu K+BD-amf (142 mg), K+BD-0 (205 mg) a K+BD-b (224 mg).

Vápník

Stejně jako u předchozích prvků byla i u vápníku nejvyšší hodnota odběru naměřena u kontrolní varianty K-0 (66,2 mg). Nejnížší hodnoty byly naměřeny u variant substrátů

s dřevním biocharem v kombinaci s biostimulanty K+BD-b (20,2 mg) a K+BD-amf (18,8 mg). Všechny varianty byly však vyhodnoceny jako statisticky podobné.

Hořčík

Odběr hořčíku plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 13,2 a 49,5 mg na nádobu. Stejně jako u draslíku a vápníku se nepodařilo rozdíly mezi variantami prokázat, ovšem nejnižší hodnoty se opět projeví u variant substrátů s dřevním biocharem K+BD-amf (13,2 mg), K+BD-b (18,8 mg) a K+BD-0 (24,0 mg). Nejvyšší hodnota byla taktéž naměřena u kontrolní varianty K-0.

Síra

Odběr síry plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 7,27 a 17,7 mg na nádobu. Nejvyšší hodnoty odběru se vyskytovaly u varianty s K+BK-amf (17,7 mg) a u kontrolní varianty K-0 (17,4 mg). Nejnižší hodnoty byly opět naměřeny u variant substrátů s dřevním biocharem K+BD-amf (7,27 mg), K+BD-0 (8,85 mg) a K+BD-b (9,50 mg). Rozdíly mezi variantami byly stejně jako u předchozích prvků neprůkazné.

Tabulka 6 - Odběr makroprvků (P, K, Ca, Mg, S) plody cukety v závislosti na variantě pěstebního substrátu

Varianta		P	K	Ca	Mg	S
Číslo	Zkratka	mg	mg	mg	mg	mg
1	K-0	66,2 ^b	422 ^a	66,2 ^a	49,5 ^a	17,4 ^a
2	K+BK-0	42,3 ^{ab}	255 ^a	46,4 ^a	30,0 ^a	10,9 ^a
3	K+BD-0	32,3 ^{ab}	205 ^a	31,3 ^a	24,0 ^a	8,85 ^a
4	K-b	41,5 ^{ab}	345 ^a	28,8 ^a	26,5 ^a	12,1 ^a
5	K+BK-b	47,3 ^{ab}	312 ^a	42,9 ^a	31,4 ^a	13,4 ^a
6	K+BD-b	31,0 ^{ab}	224 ^a	20,2 ^a	18,8 ^a	9,50 ^a
7	K-amf	40,2 ^{ab}	289 ^a	46,4 ^a	30,9 ^a	13,9 ^a
8	K+BK-amf	50,4 ^{ab}	355 ^a	53,2 ^a	40,1 ^a	17,7 ^a
9	K+BD-amf	19,0 ^a	142 ^a	18,8 ^a	13,2 ^a	7,27 ^a

Varianty označené alespoň jedním společným písmenkem jsou si statisticky podobné (Tukey test, $p < 0,05$)

5.2.2 Mikroprvky

V tabulce 7 jsou statisticky vyhodnoceny odběry vybraných makroprvků plody cuket.

Železo

Odběr železa plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 0,10 a 1,18 mg na nádobu. I přesto, že jsou rozdíly mezi variantami neprůkazné, dají se pozorovat určité tendence. Nejvyšší hodnota odběru byla opět naměřena u kontrolní varianty K-0. Hodnoty postupně klesaly přes varianty s bakteriemi, AMF houbami (v tomto pořadí) až po varianty s biocharem bez biostimulantů, u kterých byly naměřené hodnoty nejnižší.

Měď

Odběr mědi plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 0,026 a 0,083 mg na nádobu (Tabulka 6). Nejvyšší hodnota byla stejně jako v předchozích případech naměřena u varianty K-0 (0,083 mg). Stejně tak nejnižší hodnoty byly opětovně prokázány u variant substrátů s dřevním biocharem K+BD-amf (0,026 mg), K+BD-0 (0,032 mg) a K+BD-b (0,037 mg). Hodnota varianty K+BD-amf houbami byla významně nižší oproti kontrolní variantě. Ostatní varianty byly podobné vzájemně i výše zmíněným variantám.

Zinek

Odběr zinku plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 0,12 a 0,43 mg na nádobu. Stejně jako u mědi se nejvyšší naměřená hodnota (0,43 mg) projevila u kontrolní varianty K-0, a byla významně vyšší než hodnota u varianty K+BD-amf (0,12 mg). Obecně byly nejnižší hodnoty znovu naměřeny u variant s dřevním biocharem. Zbylé varianty byly opět podobné jak sobě navzájem, tak i předchozím uvedeným variantám.

Mangan

Odběr manganu plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 0,23 a 0,88 mg na nádobu. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u kontroly K-0 (0,88 mg) a u varianty K-amf (0,81 mg). Naopak nejnižší hodnoty se projevily u variant s dřevním biocharem obohaceným o biostimulanty K+BD-amf (0,22 mg) a K+BD-b (0,29 mg). Statisticky byly však všechny varianty vyhodnoceny jako podobné.

Bór

Odběr bóru plody cukety se pohyboval mezi hodnotami 0,036 a 0,156 mg na nádobu. Nejvyšší hodnota byla opět naměřena u kontrolní varianty K-0 (0,156 mg). Tato hodnota byla významně vyšší oproti variantám obsahujícím dřevní biochar a biostimulanty K+BD-amf (0,036 mg) a K+BD-b (0,046 mg), stejně jako oproti variantě K+BK-b (0,055 mg).

Nikl

U odběru niklu plody cukety se neprokázal rozdíl mezi variantami. V tomto případě byly u některých variant naměřeny stejné hodnoty. Nejvyšší hodnota 0,016 mg byla naměřena u varianty K+BK-amf. Hodnota 0,015 mg se vyskytla u variant K-0, K+BD-0 a K-amf. U variant s přidáními bakteriemi (K-b, K+BK-b, K+BD-b) byla naměřena hodnota 0,012 a nejnižší hodnoty se projevily u variant K+BK-0 (0,007 mg) a K+BD-amf (0,005 mg).

Tabulka 7 - Odběr mikroprvků (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Ni) plody cukety v závislosti na variantě pěstebního substrátu

Varianta		Fe	Cu	Zn	Mn	B	Ni
Číslo	Zkratka	mg	mg	mg	mg	mg	mg
1	K-0	1,18 ^a	0,083 ^b	0,43 ^b	0,88 ^a	0,156 ^b	0,015 ^a
2	K+BK-0	0,10 ^a	0,042 ^{ab}	0,30 ^{ab}	0,45 ^a	0,084 ^{ab}	0,007 ^a
3	K+BD-0	0,14 ^a	0,032 ^{ab}	0,19 ^{ab}	0,46 ^a	0,072 ^{ab}	0,015 ^a
4	K-b	0,53 ^a	0,053 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,44 ^a	0,057 ^{ab}	0,012 ^a
5	K+BK-b	0,59 ^a	0,055 ^{ab}	0,32 ^{ab}	0,49 ^a	0,055 ^a	0,012 ^a
6	K+BD-b	0,66 ^a	0,037 ^{ab}	0,20 ^{ab}	0,29 ^a	0,046 ^a	0,012 ^a
7	K-amf	0,36 ^a	0,061 ^{ab}	0,28 ^{ab}	0,81 ^a	0,091 ^{ab}	0,015 ^a
8	K+BK-amf	0,20 ^a	0,080 ^{ab}	0,41 ^{ab}	0,59 ^a	0,111 ^{ab}	0,016 ^a
9	K+BD-amf	0,24 ^a	0,026 ^a	0,12 ^a	0,23 ^a	0,036 ^a	0,005 ^a

Varianty označené alespoň jedním společným písmenkem jsou si statisticky podobné (Tukey test, $p < 0,05$)

5.3 Regresní a korelační analýza

Tato kapitola se zaměřuje na závislost mezi sledovanými parametry. V tabulce 8 jsou uvedeny korelační a regresní vztahy mezi odběrem dané živiny plody cukety a jejím obsahem v půdě. Vyšších hodnot bylo dosaženo pouze u manganu a zinku. U manganu korelační koeficient dosahoval hodnoty 0,537 a u zinku 0,448. Nejvyšších hodnot (Mn 0,289; Zn 0,201) zde dosahoval i regresní koeficient, avšak hodnota naznačuje vztah mezi odběrem prvků a jejich obsahem v půdě jen částečně. Změna jednoho parametru se zde dá vysvětlit změnou toho druhého jen z 29 % u manganu a 20 % u zinku.

Tabulka 8 - závislost odběru živin na obsahu živin v substrátu

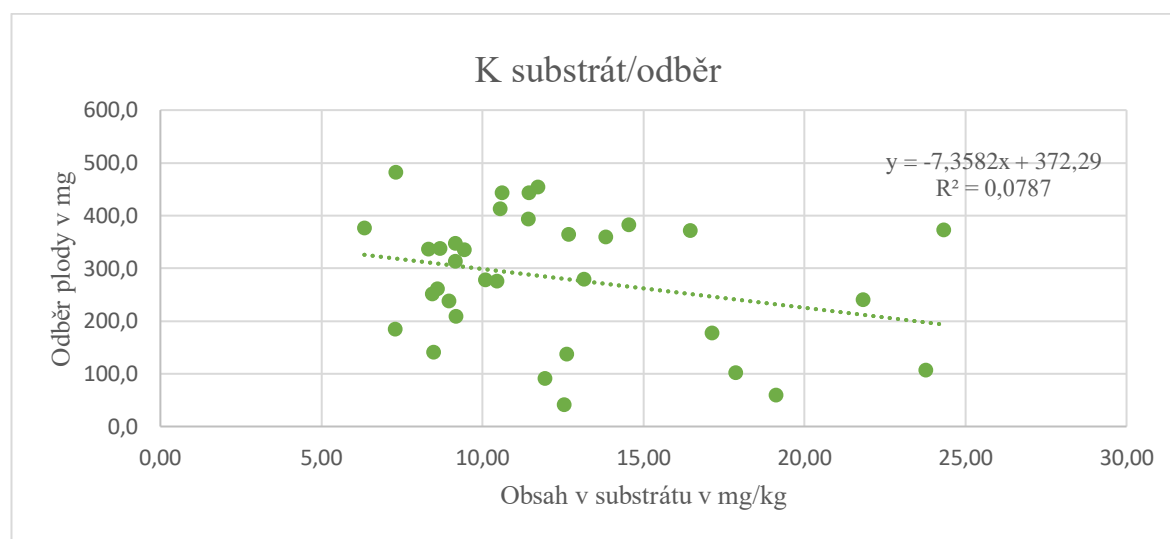
Zkoumaný prvek	a	b	R ²	r
P substrát/odběr	11,65	37,9	0,099	0,314
K substrát/odběr	-7,358	372,3	0,079	-0,281
Mg substrát/odběr	0,022	25,2	0,002	0,047
S substrát/odběr	0,007	11,6	0,003	0,056
Fe substrát/odběr	0,036	0,35	0,039	0,196
Cu substrát/odběr	-0,326	0,05	0,029	-0,171
Zn substrát/odběr	0,749	0,2	0,201	0,448
Mn substrát/odběr	0,169	0,123	0,289	0,537
B substrát/odběr	0,589	0,07	0,071	0,266
Ni substrát/odběr	0,008	0,01	0,007	0,084

* a, b - parametry lineární regrese ($y=ax+b$)

Tam, kde bylo dosaženo nenulových hodnot sledovaných obsahů prvků v půdě byly pro větší přehlednost vytvořeny regresní grafy. Týká se to draslíku (Graf 1), hořčíku (Graf 2), síry

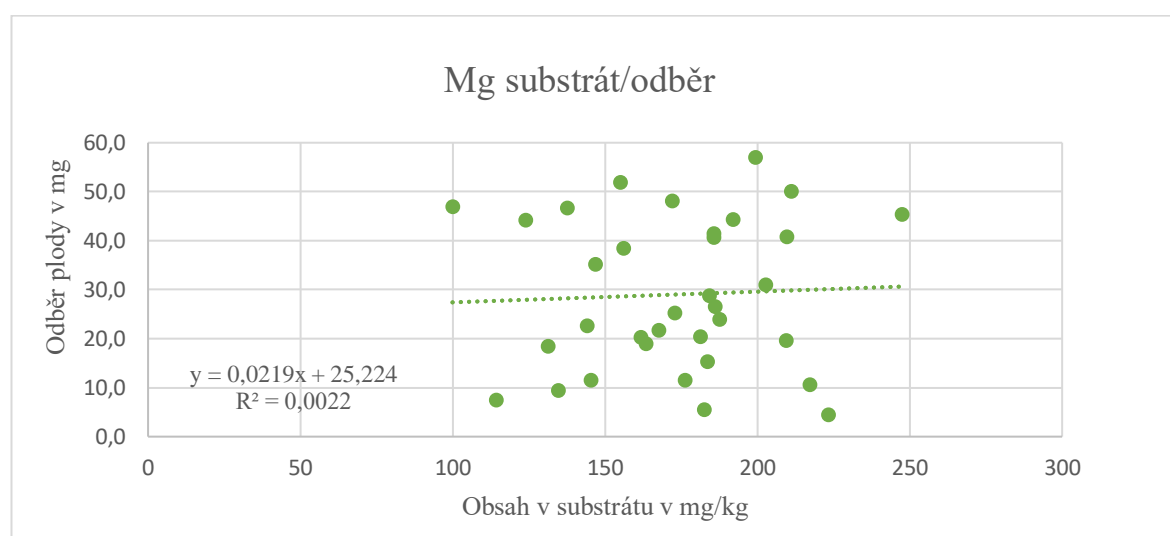
(Graf 3), železa (Graf 4), zinku (Graf 5) a manganu (Graf 6). Ze všech grafů je zřejmé, že vztah mezi odběrem živin plody a jejich obsahem v půdě je prakticky neprůkazný. Dá se to vysvětlit několika způsoby: 1) rostliny využívaly k získávání živin z půdy jiné mechanismy než použité extrakční činidlo, 2) rostliny cuket byly heterogenní a každá odebrala jiné množství živin, 3) v půdě byl přebytek některých živin a rostliny tak odebraly jen nepatrný podíl z extrahovaných.

Graf 1 zobrazuje vztah draslíku obsaženého v substrátu a draslíku odebraného plody cuket. Regresní koeficient (R^2) dosáhl hodnoty 0,079, z čehož vyplývá, že jsou na sobě sledované parametry závislé pouze z 7,9 %. Korelační koeficient tohoto vztahu nese hodnotu $r = -0,281$ (Tabulka 8), tato hodnota je neprůkazná.



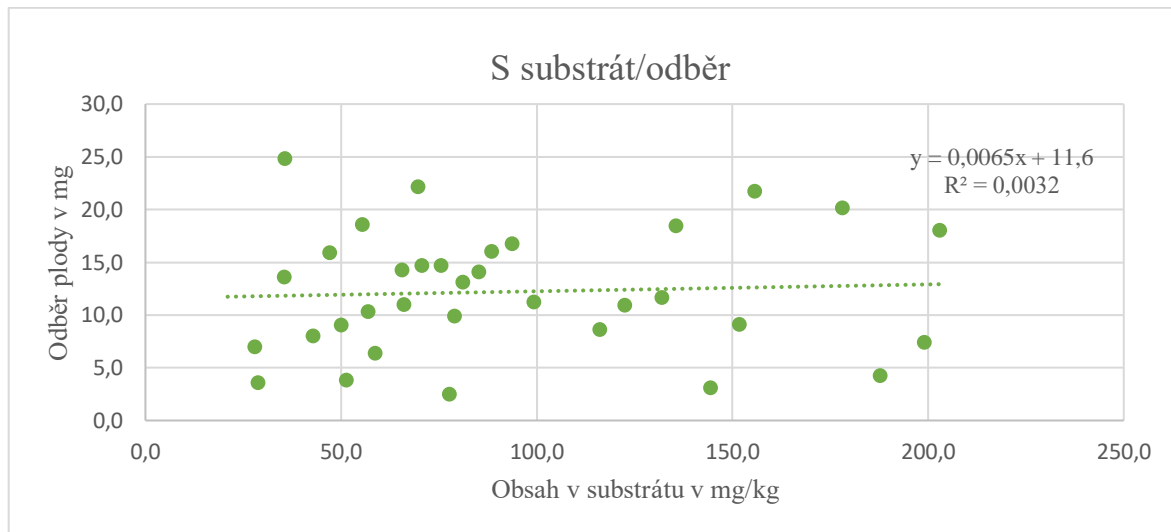
Graf 1 - Regresní vztah mezi odběrem draslíku plody cuket a jeho obsahem v půdě

Vztah hořčíku obsaženého v substrátu a hořčíku odebraného plody cuket je znázorněn grafem 2. Regresní koeficient (R^2) v tomto případě dosáhl hodnoty 0,002 a korelační koeficient (r) hodnoty 0,047 (Tabulka 8).



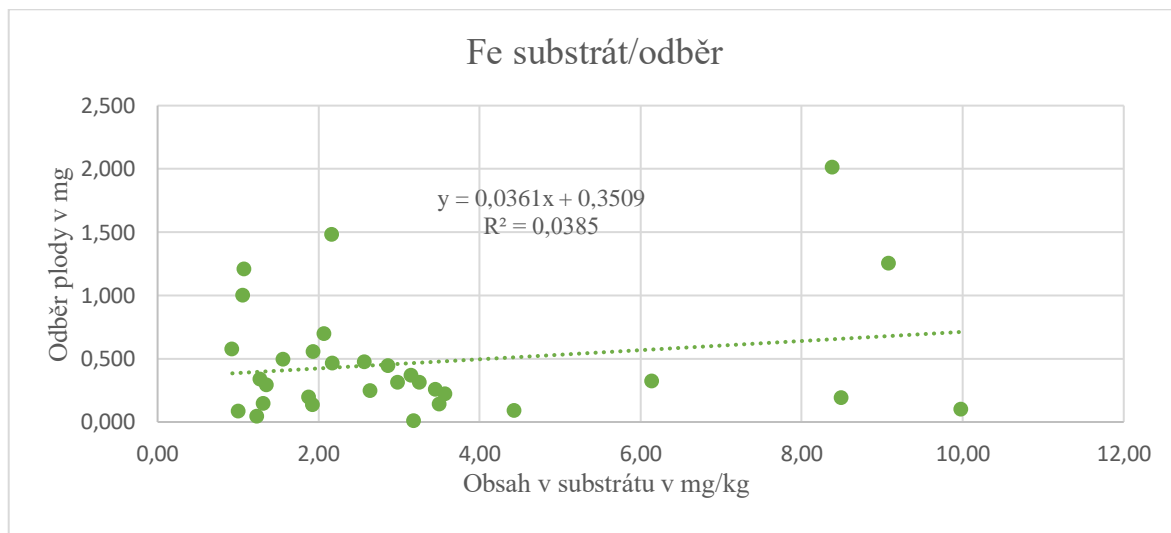
Graf 2 - Regresní vztah mezi odběrem hořčíku plody cuket a jeho obsahem v půdě

Výsledky regresní a korelační analýzy u vztahu síry obsažené v substrátu a síry odebrané plody sledovaných rostlin byly opět neprůkazné (Graf 3). Regresní koeficient (R^2) byl vypočten na hodnotu 0,003 a korelační koeficient (r) na hodnotu 0,056 (Tabulka 8).



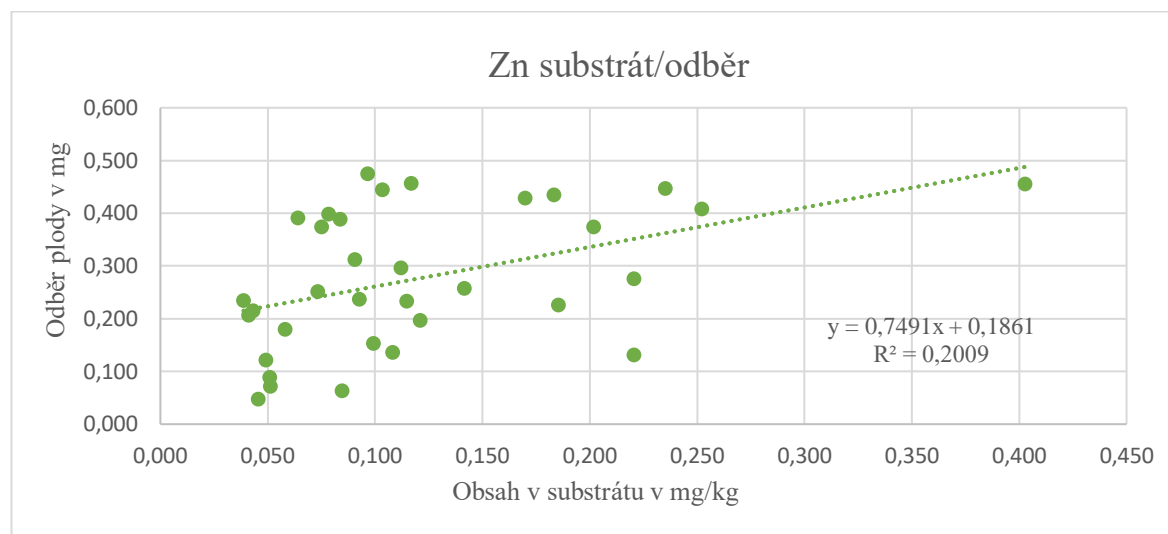
Graf 3 - Regresní vztah mezi odběrem síry plody cuket a jejím obsahem v půdě

Graf 4 znázorňuje vztah mezi železem obsaženým v substrátu a železem odebraným plody cuket. Regresní koeficient (R^2) byl regresní analýzou vypočítán na 0,039, z čehož vyplývá, že jsou na sobě sledované parametry závislé pouze z 3,9 %. Korelační koeficient (r) tohoto vztahu nese hodnotu 0,196 (Tabulka 8), tato hodnota je stejně jako u ostatních prvků neprůkazná.



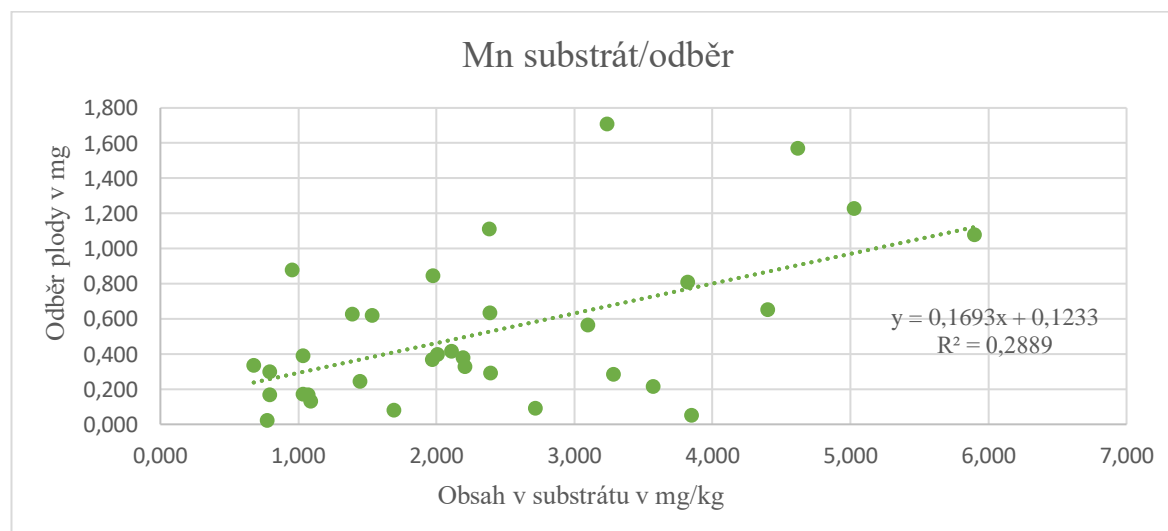
Graf 4 - Regresní vztah mezi odběrem železa plody cuket a jeho obsahem v půdě

Jak již bylo uvedeno, a jak lze také vyčíst z grafu 5, u zinku byly dosaženy druhé nejvyšší hodnoty jak korelačního (0,448), tak regresního (0,201) koeficientu. I tak lze závislost odběru zinku na jeho obsahu v půdě vysvětlit pouze s 20% spolehlivostí (Tabulka 8).



Graf 5 - Regresní vztah mezi odběrem zinku plody cuket a jeho obsahem v půdě

Regresní analýza vztahu obsahu manganu v substrátu a manganu odebraného plody cuket je znázorněna grafem 6. Pro vyšší přesnost této analýzy byla u manganu z dat vyřazena extrémní hodnota. Díky této úpravě můžeme vidět, že regresní koeficient pro Mn dosáhl nejvyšší hodnoty z analyzovaných prvků, a to 0,289. Korelační analýza také vykazuje nejvyšší korelační koeficient $r=0,537$ (Tabulka 8). I přes vyšší hodnoty, v porovnání s analýzami ostatních prvků, lze závislost odběru manganu na jeho obsahu v půdě vysvětlit pouze s 29% jistotou.



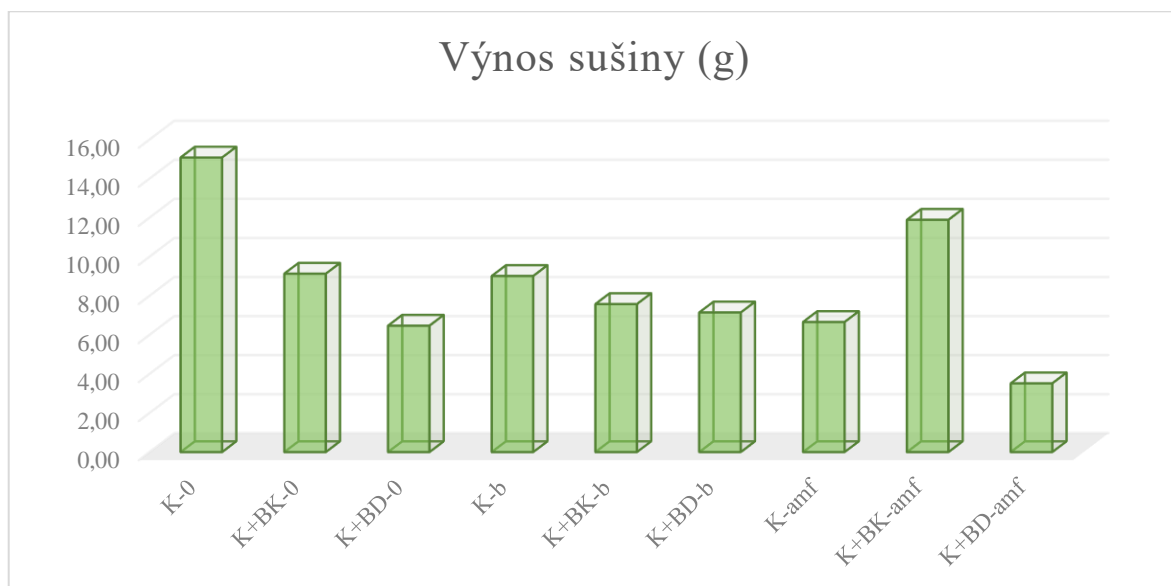
Graf 6 - Regresní vztah mezi odběrem manganu plody cuket a jeho obsahem v půdě

5.4 Výnos sušiny

V tabulce 9 jsou uvedeny průměrné výnosy sušiny plodů cuket, které se pohybovaly mezi hodnotami 3,52 g a 15,08 g na nádobu. Rozdíly mezi variantami jsou neprůkazné, nejvyšší výnos sušiny se však projevil u kontrolní varianty K-0 (15,08 g). Naopak nejnižší výnos sušiny byl naměřen u varianty K+BD-amf (3,52 g). I přes to, že si byly všechny varianty statisticky podobné, lze tvrdit, že výnosy byly vyšší u variant s biocharem z kalů, a to v porovnání s variantami s biocharem vyrobeným z dřevní hmoty. S cílem poskytnout přehlednou vizualizaci dat výnosů byl vytvořen graf 7.

Tabulka 9 - Výnos plodů cuket v závislosti na variantě pěstebního substrátu

Varianta		Výnos sušiny
Číslo	Zkratka	g
1	K-0	15,08 ^a
2	K+BK-0	9,13 ^a
3	K+BD-0	6,47 ^a
4	K-b	9,01 ^a
5	K+BK-b	7,58 ^a
6	K+BD-b	7,15 ^a
7	K-amf	6,66 ^a
8	K+BK-amf	11,89 ^a
9	K+BD-amf	3,52 ^a



Graf 7 - Výnos plodů cukety (g) v závislosti na variantě pěstebního substrátu

6 Diskuze

Cílem této práce bylo vyhodnotit vliv aplikace biocharu do substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*), obsah přístupných živin v substrátu a odběr živin ze substrátů. Dalším cílem bylo posoudit vliv bakterií a arbuskulárně-mykorhizních hub na příjem živin cuketou a její výnos.

Na začátku práce byly stanoveny dvě hypotézy, 1) aplikace biocharu podpoří sorpci živin v substrátu, což může vést a) k horší dostupnosti živin, b) k pozvolnému uvolňování a dlouhodobější dostupnosti živin. 2) Bakterie nebo arbuskulárně-mykorhizní houby umožní rostlinám cukety lépe přijímat živiny, a tím podpoří i vyšší výnos.

Nejvyšší hodnoty u všech sledovaných parametrů se téměř vždy vyskytovaly u kontrolní varianty. Následovaly zpravidla varianty s oběma typy biocharů bez aplikovaných AMF nebo bakterií. Je tak velmi pravděpodobné, že aplikace biocharu znamenala omezení dostupnosti živin. Toto omezení dostupnosti ještě umocnil přídavek AMF a bakterií. Je pravděpodobné, že aplikace biocharu, AMF i bakterií vedla k inhibici dostupných živin v substrátu s negativním dopadem na výnosy cukety i odběr sledovaných živin.

Existují údaje, které uvádějí snížení výnosu cuket ve srovnání s kontrolními variantami v jednoletém pokusu (Gaskin et al. 2010), což ukázaly i výsledky našeho pokusu, kde byl výnos cuket nejvyšší u kontrolní varianty, a ubýval s přidáním biocharu i AMF a bakterií. Naproti tomu Gartler et al. (2013) však zjistili, že ošetření biocharem nevede k významným změnám v biomase řady zeleninových plodin s nadzemním produktem, včetně a cukety, zatímco významně ovlivňuje kořenovou zeleninu.

Experimentální aplikace biocharu u plodin čeledi *Cucurbitaceae* v různých typech půd však ve většině případů vykazuje zvýšení výnosů. V některých studiích vědci zjistili, že aplikace biocharu zvyšuje výnos cukety ve srovnání s kontrolní variantou (Van Zwieten et al. 2009; Yordanova et al. 2019; Petrova & Yordanova 2020; Amin & Eissa 2017), avšak výsledky našeho experimentu tuto teorii nepotvrdily.

Yordanova et al. (2019) ve svém experimentu použili dva meliorační prostředky - biochar a hnůj, ze kterých vytvořili 6 různých variant: kontrolní, kontrolní s hnojem, kontrolní s biocharem a kombinované varianty hnoje s různými přídávky biocharu (250; 500; 750 kg/ha). Přetrvávala zde tendence, že varianty zahrnující hnůj byly lepší než varianty bez hnoje. Bylo však zjištěno, že i varianta s individuálním použitím biocharu vykazuje také vyšší výnos než kontrolní varianta. Nejefektivnější však byla varianta s hnojem a nejvyšší dávkou biocharu.

Podobně na tom byl i výzkum od Farid et al. (2022), kteří aplikovali biochar z rýžové slámy a cukrové třtiny spolu s kompostem ze stejných surovin. Jejich výsledky ukázaly, že vyšší pozitivní účinky na růst rostlin měla kombinace biocharu s kompostem, oproti samostatně aplikovaným komponentům. Z výsledků těchto výzkumů je patrné, že aplikace hnojiv spolu s biocharem významně zlepšuje vliv biocharu na výnosy cuket tím, že dodávají živiny, které biochar sám o sobě neobsahuje. Tuto teorii potvrdili i Tolba et al. (2021), kteří v experimentu používali kombinace biocharu s kompostem, a zároveň doplnili všechny varianty (včetně kontrolní) o NPK v minerální formě. Zjistili, že vliv organických a anorganických hnojiv na sušinu plodů byl vysoký, a že varianty s aplikovaným kompostem zaznamenaly nejvyšší

významný nárůst výnosu. Všechny výše zmíněné experimenty byly prováděny na písčitých půdách s nízkým obsahem živin.

Dalo by se tedy tvrdit, že výsledky výnosů cuket našeho pokusu se mohly lišit ze dvou důvodů: 1) Experiment byl prováděn pouze s biocharem a AMF či bakteriemi, bez přidaných živin prostřednictvím hnojiv, která by v kombinaci s biocharem znamenala pozvolné uvolňování živin po celou dobu pokusu, a tak by zajistily i vyšší výnosy; 2) experiment byl prováděn na hlinitopísčité půdě se středním obsahem živin, zatímco výše zmíněné pokusy se zaměřovaly na půdy písčité s nízkými obsahy živin. Spokas et al. (2012) i Van Zwieten et al. (2010) došli k závěru, že zvýšení výnosů plodin je uváděno především u degradovaných nebo zvětralých půd, zatímco negativní nebo neutrální účinky biocharu na výnosy se mohou vyskytnout u úrodných půd. K podobnému závěru došli i Ippolito et al. (2012), kteří poukazují na to, že vzhledem k jejich nízké retenční schopnosti pro živiny nebo vodu by bylo mnohem výhodnější používat biochar v degradovaných a písčitých půdách než v půdách s vysokou přirozenou úrodností. Stejně tak Farid et al. (2022) ověřili, že kompostovaný biochar byl při zlepšování produktivity plodin účinnější než biochar samotný. Tato zjištění by mohla vysvětlovat i negativní dopady biocharu na výnos cuket v našem experimentu.

Na stejné bázi jako již zmíněné pokusy Yordanova et al. (2019) se prováděly výzkumy i na jiné aspekty než na výnos plodin, a to jak na obsah využitelných živin (Petrova et al. 2020), tak i vliv na mikrobiální aktivitu (Malcheva et al. 2020). Pokud se zaměříme na obsah živin ve sledovaných variantách pokusu Petrova et al. (2020), bylo zjištěno, že nejnižší hodnoty přístupných makroprvků byly zaznamenány u kontrolní varianty bez přídavek, ale i u varianty pouze s biocharem. Kombinované zavedení biocharu a hnoje mělo však pozitivní vliv na obsah makroprvků v substrátu s tím, že se obsah živin zvyšoval se zvyšující se dávkou biocharu. Stejně výsledky uvedli Petrova et al. (2022), kteří závěrem uvedli, že přírůstek pyrolyzovaných rostlinných zbytků v kombinaci s organickými hnojivy lze využít jako půdní zlepšovač a prostředek k využití rostlinných zbytků v zemědělství.

Jedním z cílů této práce bylo posoudit vliv bakterií a arbuskulárně-mykorhizních hub na příjem živin cuketou a její výnos, kdy hypotéza byla taková, že bakterie nebo arbuskulárně-mykorhizní houby umožní rostlinám cukety lépe přijímat živiny, a tím podpoří i vyšší výnos. Tato hypotéza se bohužel nepotvrdila, naopak by se dalo z výsledků našeho experimentu odvodit, že přírůstek těchto biostimulantů působil na příjem živin rostlinami, i jejich následný výnos spíše negativně.

Liao et al. (2016) ve svém výzkumu zjistili, že hnojení biocharem zvyšuje půdní mikrobiální biomasu, a množství grampozitivních a gramnegativních bakterií i aktinomycet. Gao et al. (2017) uvádí, že použití biocharu z rýžové slámy může zlepšit stav živin v půdě, a tím ovlivnit strukturu mikrobiálního společenstva, kde složení půdních bakterií tvoří především proteobakterie, aktinomycety a acidobakterie. Tito autoři však zjistili, že se zvyšujícím se množstvím aplikovaného biocharu se zvyšuje počet proteobakterií a acidobakterií, zatímco počet aktinomycet se snižuje. Toto zjištění by mohlo částečně vysvětlit negativní vliv či neaktivitu bakterií v našem pokusu. Je možné, že aplikace biocharu spolu s bakteriemi omezila jejich výskyt, a tím i jejich vliv na odběr živin rostlinami cuket.

Malcheva et al. (2020) se ve svém výzkumu zaměřovali na vliv aplikace biocharu a hnoje na mikrobiální aktivitu v půdě při pěstování cuket. Cílem tohoto výzkumu bylo prozkoumat vliv biocharu z dřevní štěpky, a chlévského hnoje, samostatně a v kombinaci na mikrobiologickou aktivitu půd. Nejnižší stupeň mikrobiální populace byl stanoven v kontrolní neošetřované půdě. Biogenita půd s aplikovaným hnojem a biocharem byla ve srovnání s kontrolní půdou zvýšena více než 8x. Přidávání živin do půdy zjevně zlepšovalo podmínky pro rozvoj a množení půdních mikroorganismů. Stejný výzkum ukázal, že nejvyšší dávka biocharu (750 kg/ha) v kombinaci s hnojem brzdila rozvoj některých mikroorganismů. Varianty obsahující kombinaci hnoje a biocharu však zvýšily aktivitu některých mikroorganismů, oproti vzorkům používajícím buď samotný hnůj nebo biochar. Bylo také zjištěno, že hnojení zvyšovalo rozvoj bakterií, které absorbovaly vzdušný dusík - jejich množství se zvýšilo až 3x oproti kontrolní variantě. Malcheva et al. (2020) došli k závěru, že aplikace biocharu jako půdního zlepšovače po překročení určitého množství vede ke zpomalení vývoje mikroorganismů.

Na základě těchto výsledků by se dalo konstatovat, že pokud by se k biocharu v našem výzkumu dodalo i organické hnojivo (hnůj či kompost), měly by přidané bakterie a houby lepší podmínky pro svou aktivitu a mohly tak podpořit příjem živin rostlinami. Je tu tedy pravděpodobnost, že aplikace pouze biocharu (bez hnojiva) přidaným bakteriím a houbám neposkytl ideální prostředí pro aktivitu pozitivně ovlivňující pěstované rostliny.

7 Závěr

Cílem této práce bylo vyhodnotit vliv aplikace biocharu do substrátu na výnos cukety (*Cucurbita pepo* var. *giromontina*), obsah přístupných živin v substrátu a odběr živin ze substrátů. Dalším cílem bylo posoudit vliv bakterií a arbuskulárně-mykorhizních hub na příjem živin cuketou a její výnos. Ačkoliv výsledky často nejsou statisticky průkazné, lze vyvodit zřejmé tendence vlivu aplikace biocharu, AMF i konsorcia bakterií.

- Nejvyšší obsahy přístupných prvků v substrátu se téměř vždy vyskytovaly u kontrolní varianty. Následovaly zpravidla varianty s oběma typy biocharů bez aplikovaných AMF nebo bakterií. Je tak velmi pravděpodobné, že aplikace biocharu znamenala omezení dostupnosti živin. Toto omezení dostupnosti ještě umocnil přidavek AMF a bakterií. Jedinou výjimku tvořila varianta biochar z kalů + AMF kde byly zaznamenány vyšší obsahy Fe a P v substrátu na úrovni aplikace obou typů samotných biocharů.
- Výsledky substrátů byly potvrzeny rozbory plodů cuket, kde byly odběry prakticky všech sledovaných živin (P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn a B) nejvyšší u kontrolní varianty. Výjimku tvořila pouze síra a nikl, kde však hodnoty u kontroly byly druhé nejvyšší.
- Rovněž výnos plodů cuket představoval nejvyšší hodnoty u kontrolní varianty.
- Korelační ani regresní analýza nepotvrdila vztah mezi obsahem přístupných živin v substrátu a odběrem těchto prvků plody cuket. Nejtěsnější byly vztahy v případě manganu ($r = 0,537$) a zinku ($r = 0,448$). Doplnující regresní analýza však vyhodnotila vztahy u těchto prvků jako málo významné.

Je pravděpodobné, že aplikace biocharu, AMF i bakterií vedla k inhibici dostupných živin v substrátu s negativním dopadem na výnosy cukety i odběr sledovaných živin. Pro budoucí pokusy tak bude třeba zvolit jiné kombinace, případně jiné dávky aplikovaných přípravků s ohledem na eliminaci rizika nadměrné sorpce živin ze substrátu.

8 Literatura

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, Volumes **202-203**:183-191.
- Abid, F., Naz, R., Asif, T. (2023). Biochar for Crop Protection from Soil Borne Diseases. Pages 231-246 In: In: Fahad, S., Danish, S., Datta, R., Saud, S., Lichtfouse, E. (Eds.). *Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate*. Springer Cham.
- Adekiya, A.O., Agbede , T.M., Aboyeji, C.M., Dunsin , O., Simeon, V.T. (2019). Effects of biochar and poultry manure on soil characteristics and the yield of radish. *Scientia Horticulturae*, Volume **243**: 457-463.
- Adekiya, A.O., Agbede, T.M., Olayanju, A., Ejue, W.S., Adekanye, T.A., Adenusi, T.T., Ayeni, J.F. (2020). Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol. *Hindawi, The Scientific World Journal*, Volume **2020**.
- Ahmed, M.B., Zhou, J.L., Ngo, H.H., Guo, W., Chen, M., (2016). Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater. *Bioresource Technology*, Volume **214**:836-851.
- Akca, M.O., Sonmez, O. (2023). Role of Biochar in the Adsorption of Heavy Metals. Pages 293-307 In: Fahad, S., Danish, S., Datta, R., Saud, S., Lichtfouse, E. (Eds.). *Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate*. Springer Cham.
- Amin, A.E.A.Z., Eissa, M.A. (2017). Biochar effects on nitrogen and phosphorus use efficiencies of zucchini plants grown in a calcareous sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, Volume **17**:912-921.
- Ayodele, A., Oguntunde, P., Joseph, A., Dias, M.d.S., Jr. (2009). Numerical analysis of the impact of charcoal production on soil hydrological behavior, runoff response and erosion susceptibility. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Volume **33**:137–145.
- Bridgwater, A.V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, Volume **38**:68-94.
- Brundrett, M.C., Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist Foundation*, Volume **220**:1108-1115.
- Burnett, S.E., Mattson, N.S., Williams, K.A. (2016). Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. *Scientia Horticulturae*, Volume **208**:111-119.
- Cai, Y., Chang, S.X. (2016). Biochar Effects on Soil Fertility and Nutrient Cycling. Pages 246-271 In: Ok, Y.S., Uchimiya, S.M., Chang, S.X., Bolan, N. (Eds.). *Biochar: Production, Characterization, and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group.

- Colla, G., Saccardo, F. (2003). Application of systematic variation method for optimizing mineral nutrition of soilless-grown zucchini squash. *Journal of Plant Nutrition*, Volume 26:1859-1872.
- Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*. Volume 42:1357–1378.
- Eastman, C.M. (2011). Soil physical characteristics of an Aeris Ochraqalf amended with biochar. Doctoral dissertation, The Ohio State University.
- European Biochar Certificat. (2012). Available from <https://www.european-biochar.org/en> (accessed December 2023).
- Farid, I.M., Siam, H.S., Abbas, M.H.H., Mohamed, I., Mahmoud, S.A. et al. (2022). Co-composted biochar derived from rice straw and sugarcane bagasse improved soil properties, carbon balance, and zucchini growth in a sandy soil: A trial for enhancing the health of low fertile arid soils. *Chemosphere*, Volume 292:133389.
- Funke, A., Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Volume 4:160-177.
- Gao, L., Wang, R., Shen, G., Zhang, J., Meng, G., Zhang, J. (2017). Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, Volume 17:884-896.
- Gargouri, M., Bates, P.D., Declerck, S. (2021). Combinatorial reprogramming of lipid metabolism in plants: a way towards mass-production of bio-fortified arbuscular mycorrhizal fungi inoculants. *Microbial Biotechnology*, Volume 14:31-34.
- Gartler, J., Robinson, B., Burton, K., Clucas, L. (2013). Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Science of the Total Environment*, Volume 465:308-313.
- Gaskin, J.W., Speir, R.A., Harris, K., Das, K.C., Lee, R.D., Morris, L.A., Fisher, D.S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, Volume 102:623-633.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. (2001). The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Die Naturwissenschaften*. Volume 88:37-41.
- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biol Fertil Soils*, Volume 35:219–230.
- Grumet, R., Colle, M. (2017). Genomic Analysis of Cucurbit Fruit Growth. Pages 321-344 In: Grumet, R., Katzir, N., Garcia-Mas, J. (Eds.). *Genetics and Genomics of Cucurbitaceae*. Springer International Publishing AG.
- Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 206:46–59.

- Gurtler, J.B., Mullen, C.A., Boateng, A.A., Mašek, O., Camp, M.J. (2020). Biocidal activity of fast pyrolysis biochar against *Escherichia coli* O157:H7 in soil varies based on production temperature or age of biochar. *Journal of Food Protection*, Volume **83**:1020–1029.
- Han, Y., Douds, J., David, D., Boateng, A.A. (2016). Effect of biochar soil-amendments on *Allium porrum* growth and arbuscular mycorrhizal fungus colonization. *Journal of Plant Nutrition*, Volume **39**:1654–1662.
- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P.C., Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, Volume **252**:846–855.
- Hossain, M.Z., Bahar, M.M., Sarkar, B., Donne, S.W., Ok, Y.S., Palansooriya, K.N., Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar* **2**:379-420.
- Houba, V.J.G., Novozamsky, I., Lexmond, T.M., van der Lee, J.J. (1990). Applicability of 0.01 M CaCl₂ as a single extraction solution for the assessment of the nutrient status of soils and other diagnostic purposes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Volume **21**:2281-2290.
- Huang, T., Xie, K., Zhang, Z., Zhang, Q., Li, Y., Lin, S., Zhou, J., Chen, J., Li, X. (2024). The colonization of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* affects the diversity and network structure of root endophytic bacteria in maize. *Scientia Horticulturae*, Volume **326**:112774.
- Chen, B., Zhou, D., Zhu, L. (2008). Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental Science & Technology*, Volume **42**:5137-5143.
- Chen, S.C., Zhao, H.J., Zou, C.C., Li, Y.S., Chen, Y.F., Wang, Z.G., Jiang, Y., Liu, A.R., Zhao, P.Y., Wang, M.M., Ahammed, G.J. (2017). Combined inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. *Frontiers in Microbiology*, Volume **8**:2516.
- International Biochar Initiative. (2006). Available from <https://biochar-international.org/> (accessed December 2023).
- Ippolito, J.A., Laird, D.A., Busscher, W.J. (2012). Environmental benefits of biochar. *Journal of environmental quality*, Volume **41**:967-972.
- Jahromi, N.B., Fulcher, A., Walker, F. (2019). What Is Biochar and How Different Biochars Can Improve Your Crops. University of Tennessee Institute of Agriculture, Department of Biosystems Engineering and Soil Science.
- Jaiswal, A.K., Graber, E.R., Elad, Y., Frenkel, O. (2019). Biochar as a management tool for soilborne diseases affecting early stage nursery seedling production. *Crop Protection*, Volume **120**:34–42.
- Javed, M.A., Khan, M.N., Ali, B., Wahab, S., Din, I.U., Razak, S.A. (2023). Positive and Negative Impacts of Biochar on Microbial Diversity. Pages 311-330 In: Fahad, S.,

- Danish, S., Datta, R., Saud, S., Lichtfouse, E. (Eds.). Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate. Springer Cham.
- Javeed, H.M.R., Ali, M., Zamir, M.S.I., Qamar, R., Kanwal, S. et al. (2023). Biochar and Arbuscular Mycorrhizae Fungi to Improve Soil Organic Matter and Fertility. Pages 331-354 In: In: Fahad, S., Danish, S., Datta, R., Saud, S., Lichtfouse, E. (Eds.). Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate. Springer Cham.
- Jiang, F., Zhang, L., Zhou, J., George, T.S., Feng, G. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytologist* Foundation, Volume **230**:304–315.
- Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G., Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, Volume **44**:1247–1253.
- Kim, J.-S., Sparovek, G., Longo, R.M., De Melo, W.J., Crowley, D. (2007). Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume **39**:684–690.
- Kinney, T.J., Masiello, C.A., Dugan, B., Hockaday, W.C., Dean, M.R., Zygourakis, K. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass Bioenergy*, Volume **41**:34–43.
- Kokkoris, V., Banchini, C., Paré, L., Stefani, F. et al. (2023). *Rhizophagus irregularis*, the model fungus in arbuscular mycorrhiza research, forms dimorphic spores. *The New Phytologist*.
- Krull, E.S., Baldock, J.A., Skjemstad, J.O., Smernik, R.J. (2009). Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. Pages 53- In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London, UK.
- Kumar, S., Saxena, S. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) from Heavy Metal-Contaminated Soils: Molecular Approach and Application in Phytoremediation. Pages 489-500 In: Giri, B., Prasad, R., Wu, Q.S., Varma, A. (Eds.) *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. *Soil Biology*, vol 55. Springer, Cham.
- Kumarathilaka, P., Mayakaduwa, S., Herath, I., Vithanage, M. (2016). Biochar: State of the Art. Pages 17-42 In: Ok, Y.S., Uchimiya, S.M., Chang, S.X., Bolan, N. (Eds.). *Biochar: Production, Characterization, and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Lee, J.W., Hawkins, B., Kidder, M.K., Evans, B.R., Buchanan, A.C., Day, D. (2016). Characterization of biochars produced from peanut hulls and pine wood with different pyrolysis conditions. *Bioresources and Bioprocessing*, Volume **3**:1-10.
- Lee, J.W., Kidder, M., Evans, B.R., Paik, S., Buchanan, A.C., Garten, C.T., Brown, R.C. (2010). Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment. *Environmental Science & Technology*, Volume **44**:7970-4.

- Lehmann, J., Joseph, S. (2009). Biochar Systems. Pages 147-168 Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London, UK.
- Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (2nd ed.). Routledge.
- Li, D.-C., Jiang, H. (2017). The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: a review on characterizations and mechanism elucidation. Bioresource Technology, Volume **246**:57-68.
- Li, Y., Shao, J., Wang, X., Deng, Y., Yang, H., Chen, H. (2014). Characterization of modified biochars derived from bamboo pyrolysis and their utilization for target component (furfural) adsorption. Energy & Fuels, Volume **28**:5119– 5127.
- Liao, N., Li, Q., Zhang, W., Zhou, G., Ma, L., Min, W., Ye, J., Hou, Z. (2016). Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil. European Journal of Soil Biology, Volume **72**:27-34.
- Liu, W.J., Jiang, H., Yu, H.Q. (2015). Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. Chemical Reviews, Volume **115**:12251-12285.
- Liu, X.H., Han, F.P., Zhang, X.C., et al. (2012). Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: results from incubation experiments. Int J Agric Biol, Volume **14**:975–979
- Ma, Y., Freitas, H., Dias, M.C. (2022). Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. Frontiers in Plant Science, Volume **13**:1024243.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., Goodale, C. (2010). Fate of soil applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biology, Volume **16**:1366-1379.
- Majumder, D., Saha, S. Mukherjee, B., Das, S., Rahman, F. H., Hossain, A. (2023). Biochar Application for Improving the Yield and Quality of Crops Under Climate Change. Pages 3-55 In: Fahad, S., Danish, S., Datta, R., Saud, S., Lichtfouse, E. (Eds.). Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate. Springer Cham.
- Malcheva, B., Petrova, V., Yordanova, M., Naskova, P., Plamenov, D. (2020). Influence of biochar and manure fertilization on the microbiological activity of agricultural soil. Scientific Papers. Series B, Horticulture, Volume **64**:191-198.
- Marris, E. (2006). Black is the new green. Nature, Volume **442**:624–626.
- Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, Elsevier.
- Matsagar, B.M., Wu, K.C.-W. (2022). Agricultural waste-derived biochar for environmental management. Pages 3-13 In: Tsang, D.C.W., Ok, Y.S. (Eds.) Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals. Academic Press, Elsevier.

- Mohan, D., Pittman, C.U., Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, Volume **20**:848–889.
- Montero-Pau, J., Esteras, C., Blanca, J., Ziarsolo, P., Cañizares, J., Picó, B. (2017). Genetics and Genomics of Cucurbita spp. Pages 211-227 In: Grumet, R., Katzir, N., Garcia-Mas, J. (Eds.). *Genetics and Genomics of Cucurbitaceae*. Springer International Publishing AG.
- Mukome, F.N.D., Parikh, S.J. (2016). Chemical, Physical, and Surface Characterization of Biochar. Pages 68-96 In: Ok, Y.S., Uchimiya, S.M., Chang, S.X., Bolan, N. (Eds.). *Biochar: Production, Characterization, and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- 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*, Volume **55**:20–27.
- Nie, C., Yang, X., Niazi, N.K., Xu, X., Wen, Y., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Xu, S., Wang, H. (2018). Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: a field study. *Chemosphere*, Volume **200**:274–282.
- Niu, L., Jia, P., Li, S., Kuang, J., He, X., Zhou, W., Liao, B., Shu, W., Li, J. (2015). Slash-and-char: An ancient agricultural technique holds new promise for management of soils contaminated by Cd, Pb and Zn. *Environmental Pollution*, Volume **205**:333-339,
- Oberlin, A. (2002). Pyrocarbons. *Carbon*, Volume **40**:7–24.
- Ouyang, P., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., Luo, Y., Ma, Y. (2023). Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils. *Biochar*, Volume **5**:63.
- Paris, H.S. (2017). Genetic Resources of Pumpkins and Squash, Cucurbita spp. Pages 111-154 In: Grumet, R., Katzir, N., Garcia-Mas, J. (Eds.). *Genetics and Genomics of Cucurbitaceae*. Springer International Publishing AG.
- Peer, V., Mikeska, M., Kielar, J., Němček, O. (2019). Pyrolýzní biochar vs. torifikovaný materiál: vliv na půdní vlastnosti. *Energie z biomasy XIX : sborník příspěvků z konference 17.–19.9.2019, Lednice, Česká republika*.
- Petrova, V., Yordanova, M. (2020). The influence of biocarbon on the availability of soil nutrients during zucchini cultivation. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, Volume **63**:119-124.
- Petrova, V., Yordanova, M., Nikolova, T. (2022). Evaluation of biochar application on soil nutrients. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, Volume **65**:128-134.
- Pohořelý, M., Sedmihradská, A., Trakal, L., Jevič, P. (2019). Biochar – výroba, vlastnosti, certifikace, použití. *Waste Forum*, Volume **3**:197-210
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., Huhnke, R. (2015). Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume **42**:1055-1064.

- Quan, C., Li, A., Gao, N. (2010). Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume **89**:102-106.
- Rajapaksha, A.U., Mohan, D., Igalavithana, A.D., Lee, S.S., Ok, Y.S. (2016). Definitions and Fundamentals of Biochar. Pages 4-16 In: Ok, Y.S., Uchimiya, S.M., Chang, S.X., Bolan, N. (Eds.). *Biochar: Production, Characterization, and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Reddy, K.R., Yaghoubi, P., Yukselen-Aksoy, Y. (2015). Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil. *Waste Management & Research*. Volume **33**:524-532.
- Rejali, F., Dolatabad, H.K., Safari, M., Mahjenabadi, V.A.J. (2022). The Potential Effects of Fungicides on Association of *Rhizophagus irregularis* with Maize and Wheat. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Volume **65**.
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Chen, S., Wu, J. (2014). Hydrocarbon and hydrogen-rich syngas production by biomass catalytic pyrolysis and bio-oil upgrading over biochar catalysts. *RSC Advances*, Volume **4**:10731–10737.
- Riaz, R., Khan, A., Khan, W.J., Jabeen, Z., Yasmin, H., Naz, R., Nosheen, A., Hassan, M.N. (2021). Vegetable associated *Bacillus* spp. suppress the pea (*Pisum sativum* L.) root rot caused by *Fusarium solani*. *Biological Control*, Volume **158**:104610.
- Rondon, M.A., Lehmann, J., Ramírez, J., Hurtado, M. (2007). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, Volume **43**:699–708.
- Sepehri, A., Sarrafzadeh, M.-H. (2018). Effect of nitrifiers community on fouling mitigation and nitrification efficiency in a membrane bioreactor, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume **128**:10-18.
- Shi, R.Y., Hong, Z.N., Li, J.Y., Jiang, J., Kamran, M.A., Xu, R.K., Qian, W. (2018). Peanut straw biochar increases the resistance of two Ultisols derived from different parent materials to acidification: a mechanism study. *Journal of Environmental Management*, Volume **210**:171-179.
- Singh, B., Dolk, M.M., Shen, Q., Camps-Arbestain, M. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. Pages 23-38 In: Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. (Eds.). *Biochar: a guide to analytical methods*. Balwant Singh, CRC Press Taylor & Francis Group.
- Smith, S.E., Smith, F.A. (2012). Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*, Volume **104**:1-13.
- Spears, S. (2018). What is Biochar? REGENERATION INTERNATIONAL. Available from <https://regenerationinternational.org/2018/05/16/what-is-biochar/> (accessed March 2024).
- Spokas, K.A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, Volume **1**:289–303.

- Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., Boateng, A.A., Lima, I.M., Lamb, M.C., McAloon, A.J., Nichols, K.A., Lentz, R.D. (2012). Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of environmental quality*, Volume **41**:973-989.
- Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A.M., Dallmeyer, I., Garcia-Perez, M. (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, Volume **84**:37-48.
- Šimek, M., Borůvka, L. (2019). Fyzikální vlastnosti půd. Pages 326-342 In: Šimek, M. (Ed.). *Živá půda: Ekologie, využívání a degradace půdy*. Academia. Praha.
- Šimek, M., Borůvka, L., Elhottová, D., Houška, J., Konvalina, P., et al. (2019). Využití a degradace půdy. Pages 649-768 In: Šimek, M. (Ed.). *Živá půda: Ekologie, využívání a degradace půdy*. Academia. Praha.
- Thies, J.E., Rillig, M.C., (2009). Characteristics of biochar: biological properties. Pages 85–106 In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management*. Earthscan, UK.
- Tolba, M., Farid, I.M., Siam, H.S., Abbas, M.H.H. et al. (2021). Integrated Management of K-Additives to Improve the Productivity of Zucchini Plants Grown on a Poor Fertile Sandy Soil. *Egyptian Journal of Soil Science*, Volume **61**:255-365.
- V4 Biochar Platform. (2019). Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. Available from <https://v4biochar.czu.cz/cs> (accessed December 2023).
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Petty, S., Rust, J., Chan, K.Y. (2010). A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil. *Australian Journal of Soil Research*, Volume **48**:569–576.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A. (2009). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, Volume **327**:235–246.
- Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J. (2012). *Výživa zahradních rostlin*. Academia. Praha.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, Volume **89**:913–933.
- Vaughn, S.F., Kenar, J.A., Thompson, A.R., Peterson, S.C. (2013). Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates. *Industrial Crops and Products*, Volume **51**:437-443.
- Verma, R., Dutta, S., Kumar, A., Dabodiya, T.S., Kumar, N., et al. (2023). Biochar-Based Nanocomposite Materials: Types, Characteristics, Physical Activation, and Diverse Application Scenarios. Pages 3-18 In: Mishra, D., Singh, R., Khare, P. (Eds.). *Biochar-Based Nanocomposites for Contaminant Management: Synthesis, Contaminants Removal, and Environmental Sustainability*. *Advances in Science, Technology & Innovation*, Springer Nature, Switzerland.

- Wang, B.Y., Xiao, Q.C., Geng, X.W., Lin, K.Q., Li, Z.S., Li, Y.Y., Li, X.Y. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi alter rhizosphere bacterial diversity, network stability and function of lettuce in barren soil. *Scientia Horticulturae*, Volume **323**:112533.
- Wang, J., Wang, S. (2019). Preparation, modification, and environmental application of biochar: a review. *Journal of Cleaner Production*, Volume **227**:1002-1022.
- Wang, W., Wang, Z., Yang, K., Wang, P., Wang, H., Guo, L., Zhu, S., Zhu, Y., He, X. (2020). Biochar application alleviated negative plant-soil feedback by modifying soil microbiome. *Frontiers in Microbiology*, Volume **11**:1-16.
- Warnock, D.D., Mummey, D.L., McBride, B., Major, J., Lehmann, J., Rillig, M.C. (2010). Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: results from growth-chamber and field experiments. *Applied Soil Ecology*, Volume **46**:450–456.
- Weil, R.R., Brady, N.C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. 15th edition. Pearson Education, USA.
- Xiong, X., He, M., Dutta, S., Tsang, D.C.W. (2022). Biochar and sustainable development goals. Pages 15-22 In: Tsang, D.C.W., Ok, Y.S. (Eds.) *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*. Academic Press, Elsevier.
- Xu, G., Yang, X., Spinosa, L. (2015). Development of sludge-based adsorbents: preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *Journal of Environmental Management*, Volume **151**:221-232.
- Xue, Q., Xie, S., Zhang, T. (2022). Biochar production and modification for environmental improvement. Pages 181-191 In: Tsang, D.C.W., Ok, Y.S. (Eds.) *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals*. Academic Press, Elsevier.
- Yordanova, M., Petrova, V., Nikolova, T. (2019). The effect of biochar on the growth and yield of zucchini (*Cucurbita pepo*, var. *Giraumontioa Filov*). *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, Volume **64**:267-272.
- Zhang, J., You, C. (2013). Water Holding Capacity and Absorption Properties of Wood Chars. *Energy & Fuels*, Volume **27**:2643–2648.
- Zhu, D.Q., Kwon, S., Pignatello, J.J. (2005). Adsorption of single-ring organic compounds to wood charcoals prepared under different thermochemical conditions. *Environmental Science and Technology*, Volume **39**:3990–3998.