

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Vliv bioaugmentace na dostupnost živin v půdě obohacené
vysokoteplotním biocharem**

Diplomová práce

Bc. Kateřina Chalupová

Obor studia: Rozvoj venkovského prostoru

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiřina Száková, CSc.

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

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Vliv bioaugmentace na dostupnost živin v půdě obohacené vysokoteplotním biocharem" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 23. dubna 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Ing. Jiřině Szákové, CSc. za odbornou pomoc, trpělivost, cenné rady a vedení při zpracování mé diplomové práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Jiřímu Boučkovi za jeho pomoc v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině za její podporu v rámci celého studia.

Vliv bioaugmentace na dostupnost živin v půdě obohacené vysokoteplotním biocharem

Souhrn

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) patří mezi významné plodiny se širokým spektrem využití. Zajištění vhodných podmínek pro její růst a vývoj je tedy velmi důležité, zejména v půdách s nízkou úrodností a nízkou schopností zadržovat vodu. V diplomové práci byl sledován v modelovém nádobovém pokusu vliv aplikace biocharu na růstové parametry a příjem živin rostlinami kukuřice. Pro zvýšení dostupnosti živin rostlinám byla aplikace biocharu dále kombinována s aplikací vermikompostu a s inokulací pomocí arbuskulární mykorrhizní houby (*Glomus intraradices*).

Biochar neboli biouhel je zuhelnatělá biomasa, která je bohatá na uhlík. Zlepšuje fyzikálně-chemické vlastnosti půdy, a má pozitivní vliv na sorpci vody v půdě. Jeho využití nám nabízí jiný způsob řešení nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a jejich případnou recyklací. Vermikompostování je forma kompostování, při které se na zpracování organického odpadu po proběhnutí tepelné fáze používají žížaly. Vermikompostování je vhodné i do malých zahrad, dokonce i do bytů. Vermikompost podobně jako kompost neobsahuje žádné toxiny, zato množství živin, enzymů, a dokonce i látek preventivně působících proti chorobám rostlin. Z vermikompostu dokážou rostliny využít až 90 % výživných látek, zatímco z kompostu jen polovinu.

Pro pokus byla vybrána odrůda Activiti CS, jelikož je na území ČR často využívána, a také pro její náročnost na vodní zálivku. Rostliny byly pěstovány v částečně řízených skleníkových podmínkách v nádobách o velikosti 12x12x17 cm (objem 3 l). Pokus zahrnoval devět variant, a to – kontrola nehojená K (půda z lokality Zvěřinec s nízkým obsahem organických látek a živin, písčitého charakteru), dále pak varianty s biocharem (B) v dávce 2 % hm. a 5 % hm.: B2 %, B2 % + inokulum, B5 %, B5 % + inokulum, 10 % vermikompost + B5 %, 10 % vermikompost + B2 % + inokulum a 10 % vermikompost. Byl stanoven obsah přístupných živin v půdě pomocí extrakčního činidla Mehlich III a celkový obsah živin v biomase kukuřice metodou optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

Z výsledků je patrné, že vysoká aplikace biocharu s kombinací vermikompostu (10 % vermikompostu + 5 % biocharu, nemá tak pozitivní účinky jako ve variantě 10 % vermikompostu v kombinaci s 2 % biocharu; tato varianta měla nejvíce pozitivní vliv na příjem živin rostlinami. Rostliny jsou lépe vzrostlé, dosahovaly vysokých výnosů a obsah prvků v různých částech rostliny byl také vysoký. S vyšším obsahem biocharu (5 %) docházelo spíše k sorpci prvků a ke zhoršenému příjmu prvků ve všech částech rostliny kukuřice.

Klíčová slova: biochar, bioaugmentace, vermikompost, příjem živin, živiny v biomase, transpirace

The effect of bioaugmentation on the nutrient availability in soil amended by high-temperature biochar

Summary

Maize (*Zea mays* L.) belongs among the important crops with a wide range of use. Ensuring suitable conditions for its growth and development is therefore very important, especially in soils with low fertility and low water holding capacity. The influence of biochar application on growth parameters and nutrient uptake by maize plants was monitored in a container experiment in this diploma thesis. To increase the availability of nutrients to plants, the application of biochar was further combined with the application of vermicompost and inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*).

Biochar is charred biomass that is rich in carbon. It improves the physicochemical behaviour of the soil and has a positive effect on the sorption of water into the soil. Using them offers us a way of solving the management of biodegradable waste and their eventual recycling.

Vermicomposting is a form of composting during which earthworms are used to process organic waste after passing a thermal phase. Vermicomposting is also suitable for small gardens, even apartments. As well as compost, vermicompost does not contain any toxins, but moreover many nutrients, enzymes and even substances that prevent plant diseases. Plants can use up to 90% of nutrients from vermicompost, while from compost only half of it.

The variety Activiti CS was chosen for the experiment, as it is widespread in the Czech Republic and also because of its difficulty for watering. The plants were grown in partially controlled greenhouse conditions, in containers measuring 12x12x17 cm (volume 3l). The scheme of the experiment includes nine variants: unfertilized control (Zvěříněk – soil with low content of organic substances and living sandy character), variants B2%, B2% + inoculum, B5%, B5% + inoculum, 10% vermicompost + B5%, 10% vermicompost + B2% and 10% vermicompost. The content of available nutrients in the soil was determined using the Mehlich III extractant and the total nutrient content in the maize biomass by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES).

The results show that the high application of biochar with a combination of the vermicompost in the variant 10% vermicompost + 5% biochar does not have as positive effects as in the variant 10% vermicompost in combination with 2% biochar; this variant had the most positive effect on nutrient uptake by plants. The plants are better grown, achieved high yields and the content of elements in different parts of the plant was also high. There was more sorption of elements and worse intake of elements in all parts of maize plant with a higher content of biochar (5%).

Keywords: biochar, bioaugmentace, vermicopost, nutrient uptake, nutrients in biomass, transpiration

Obsah

1. Úvod.....	2
2. Vědecká hypotéza a cíle práce.....	3
3. Přehled literatury	4
3.1. Kukuřice a její hospodářský význam	4
3.2. Degradace půdy	6
3.2.1. Sucho	8
3.2.2. Sucho jako faktor vyvolávající stres	9
3.3. Alternativní bio aditiva	9
3.3.1. Biochar	9
3.3.2. Vermikompost	10
4. Materiál a metody.....	12
4.1. Vstupní materiály	13
4.2. Schema pokusu.....	14
4.3. Analýzy	16
4.3.1. Mehlich III.....	16
4.3.2. Obsahy prvků v rostlinách.....	16
4.3.3. Metoda stanovení celkového N v rostlinné biomase.....	17
4.4. Statistická analýza dat.....	18
5. Výsledky	19
5.1. Obsahy dostupných živin v půdě stanovených metodou Mehlich III	19
5.1.1. Vápník	19
5.1.2. Draslík	20
5.1.3. Hořčík.....	20
5.1.4. Fosfor.....	20
5.1.5. Síra.....	22
5.2. Výnos biomasy kukuřice	23
5.3. Obsahy prvků v biomase kukuřice	25
5.3.1. Vápník	25
5.3.2. Draslík	25
5.3.3. Hořčík.....	28
5.3.4. Fosfor.....	28
5.3.5. Síra.....	31
5.3.6. Dusík	31
6. Diskuze.....	34
7. Závěr.....	37
8. Literatura	38

1. Úvod

Lidstvo je stále více závislé na přírodních zdrojích, které umožňují jeho rostoucí hospodářskou aktivitu (Tisdell 1993). Bohužel také platí to, že tyto zdroje využíváme mnohem více, než v minulosti a budoucím generacím tak zanecháváme výrazně chudší planetu. Zatímco půda by existovala i bez lidí, člověk je na ni úzce vázán a život bez ní je pro nás nemyslitelný. Základní vlastností půdy je úrodnost, tedy schopnost poskytnout rostlinám optimální podmínky pro růst a vývoj s cílem dosáhnout požadovaného výnosu, kvality a nezávadnosti produkce (Roy et al. 2006). Vzhledem ke skutečnosti, že šlechtění rostlin na odolnost či toleranci ke stresorům je velmi časově náročné a pěstitelé nemají často k dispozici vhodné genotypy, využívají se v zemědělství bio – aditiva, která obohacují půdu o organickou hmotu jako je například biochar a vermikompost. Ve většině případů se jedná o využití přírodních odpadních látek, které nezatěžují životní prostředí, a proto je možné uvedená antistresová opatření využít v zemědělství i v lesnictví. Mění se klima s přibýváním tzv. suchých epizod potvrzuje v současné době již řada přesvědčivých vědeckých teorií. Tyto změny jsou patrné i v regionu střední Evropy. S rostoucí teplotou se zvyšuje výpar a spotřeba vody rostlinami.

Biochar je materiál s vysokým obsahem uhlíku, který vzniká pyrolýzou dřevní biomasy. V dostupné literatuře se ale výsledky velmi rozcházejí a není jednoznačné, jaké vlastnosti biochar s půdou může mít. V zemědělství je často aplikován ke zlepšení vlastní a úrodnosti půdy (Novak et al. 2009). V některých studiích se ukazuje pozitivní vliv biocharu na pórovitost půdy a její strukturu. Biochar vyrobený z rostlinných zbytků je vhodný spíše ke zlepšování půdních vlastností, naopak u biocharu vyrobeného z materiálů bohatých na živiny, předpokládáme spíše využití jako alternativního hnojiva. Vysoká sorpční schopnost biocharu může mít dokonce za následek snížení koncentrací dostupných živin v půdě. Proto se často kombinuje aplikace biocharu s dalšími zdroji živin, kdy takovým zdrojem může být například vermikompost. Jiný přístup představují opatření, která zvýší dostupnost živin přítomných v půdě či biocharu. Takovým opatřením může být například bioaugmentace půdy vhodnými mikroorganismy, například mykorrhizními houbami.

2. Vědecká hypotéza a cíle práce

Biochar je možno charakterizovat jako pevný pyrogenní uhlík produkovaný termálním rozkladem biomasy za velmi omezeného nebo žádného přístupu kyslíku, který se používá jako doplněk půdy za účelem zvýšení úrodnosti a sekvestrace atmosférického uhlíku. Bylo také zjištěno, že biochar nejen že zvyšuje množství obsahu uhlíku v půdě, ale dokonce zamezuje vyplavování živin a chrání půdu před škodlivými polutanty. Klíčové pro chování biocharu v půdě jsou následující parametry:

- vstupní materiál a jeho vlastnosti,
- teplota pyrolýzy a doba zdržení materiálu při této teplotě,
- vlastnosti půdy, do které je biochar aplikován.

Biochar zlepšuje fyzikálně – chemické vlastnosti půdy, zvyšuje retenci vody v půdě, ale jeho vliv na růst a vývoj rostlin je nejednoznačný. Ukazuje se, že přídavek biocharu bez doplňkového hnojení není často schopen zajistit výnos nadzemní biomasy rostlin srovnatelný s variantami, kdy bylo aplikováno hnojivo. Vhodným postupem pro zvýšení dostupnosti živin v půdě po aplikaci biocharu může být i stimulace půdního mikrobiomu s využitím bioaugmentace půdy.

Hypotéza:

Vhodná metoda bioaugmentace povede ke zvýšení výnosových parametrů plodin v půdě ošetřené vysokoteplotním biocharem.

Cílem této práce je porovnat účinnost bioaugmentace půdy ošetřené biocharem aplikací vermikompostu, komerčně dostupného inokula na růst a příjem živin rostlinami kukuřice.

3. Přehled literatury

3.1. Kukuřice a její hospodářský význam

Kukuřice setá (*Zea mays L.*) je původní plodinou tropické a subtropické oblasti Jižní a Střední Ameriky, která byla známa dávným americkým indiánským kmenům již více než 4000 let před naším letopočtem. Její původ, vnik a vývoj nebyl dosud objasněn. Bylo však vypracováno několik hypotéz, které tuto otázku řeší. Kukuřice pravděpodobně vznikla křížením plané, dávno vyhynulé kukuřice s planě rostoucími formami jejích nejbližších příbuzných, jako jsou např. jednoleté teosinty (*Euchlaena perennis Hitchc.*) nebo několik druhů rodu *Tripsacum* (Hruška 1962). Kukuřice, jak ji známe nyní, ve volné přírodě neexistovala, protože pro pevné uložení zrna v palici a jejich krytí obalovými listeny se nemůže sama rozmnožovat (Špaldon 1982). Do Evropy a ostatních světadílů se kukuřice dostala po objevení Ameriky. Kukuřice je rozšířena jak na severní polokouli, tak na polokouli jižní, v tropických oblastech s věčným létem i v chladnějších polohách mírného pásma s krátkým létem, v oblastech s nadbytkem vláhy i v oblastech, kde není možno pěstovat kulturní rostliny bez závlahy.

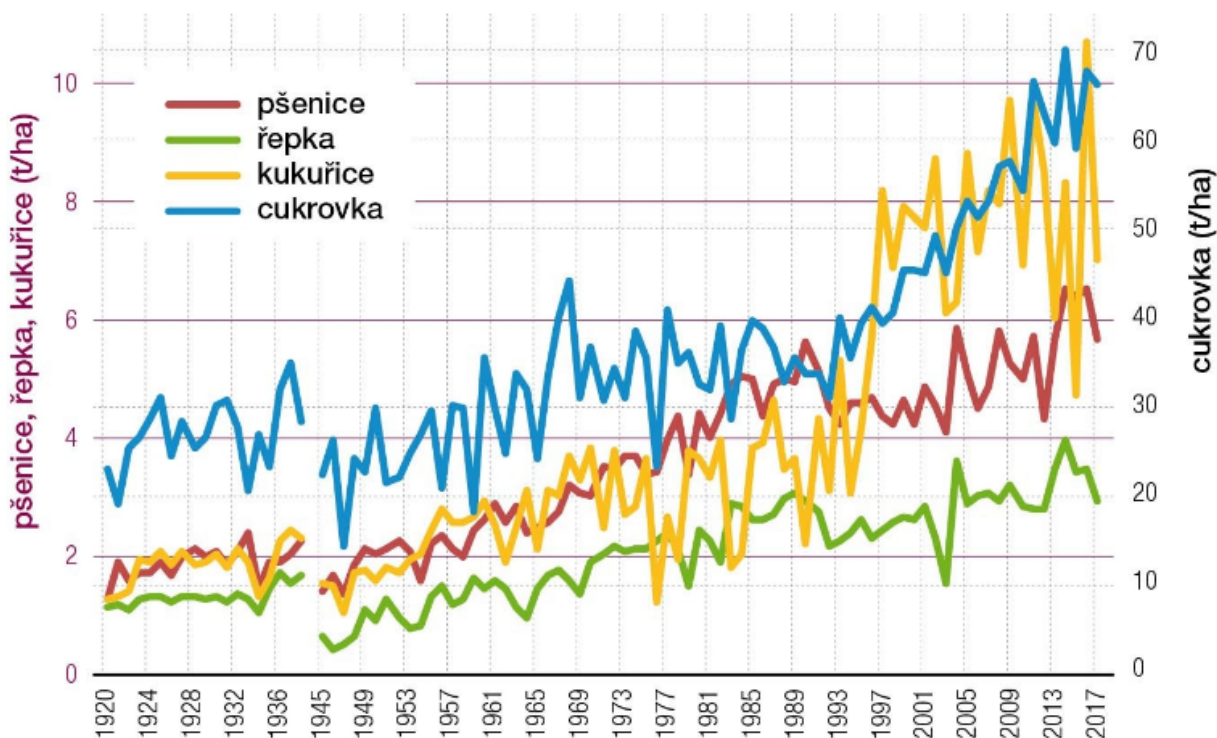
Kukuřice setá je rostlina jednoletá, jednodomá, různopohlavní a cizosprašná. Patří do třídy jednoděložných Monocotyledonae, řádu lipnicotvaré Poales, čeledi lipnicovitých Poaceae a podčeledi kukuřicovitých Zeeoideae (Novák et al. 2008). Kukuřice má svazčitý kořenový systém (Valíček et al. 2012). Podle původu se kořeny kukuřice řadí k primární nebo sekundární kořenové soustavě. Primární kořenovou soustavu tvoří embryonální kořeny, které se zakládají už v zárodku. Sekundární kořenová soustava je tvořena kořeny adventivními, které vznikají v přeslenech okolo bazálních uzlů. Stéblo v našich podmínkách dosahuje obvykle výšky 1,10 - 2,50 m a silné je 20-70 mm. Počet nadzemních článků je geneticky založen a u jednotlivých hybridů se liší. U nás pěstované hybridy mají obvykle mezi 14–20 články (Špaldon et al. 1982). Listy jsou dlouze kopinaté a pásovité. Vyrůstají po jednom na každém kolénku, a to střídavě ve dvou protilehlých řadách (Hruška 1962). Počet listů je dán geneticky. Moderní intenzivní hybridy kukuřice se vyznačují nejčastěji erektofilním postavením listů, díky němuž lépe využívají dopadající sluneční záření než hybridy s postavením listů planofilním.

Květy jsou různopohlavné, jednodomé. Samčí květy jsou uspořádány v terminální volnou latu složenou z hustých lichoklasů. Samičí květenství zvané palice vyrůstá z úžlabí listu a je těsně obaleno mnoha listeny (Valíček et al. 2012). Tyto obaly chrání palici před nepříznivými povětrnostními vlivy a živočišnými škůdci (Hruška 1962). Lata začíná kvést od středu a uvolňování pylu trvá 4-5 dní. Počátek kvetení palice je za normálních podmínek proti kvetení laty opožděn o 1-5 dnů.

Z energetických plodin má kukuřice při výrobě bioplynu největší význam. Jako C4 rostlina má kukuřice oproti ostatním u nás původním rostlinným druhům nejvyšší výnosový potenciál (Amon et al. 2006). Pro pěstování kukuřice na výrobu bioplynu nejsou v zemědělských podnicích překážky, které by neumožňovaly navýšení ploch pro pěstování kukuřice. K uskladnění silážované hmoty lze použít existující silážní žlaby. Amon et al. (2006) uvádí, že produkce bioplynu z kukuřičné biomasy nejvíce závisí na obsahu bílkovin, tuku, celulózy, hemicelulózy a škrobu. Podle Amona et al. (2007) se kvalita kukuřice k výrobě bioplynu utváří především na poli, ale vedle stanovištních podmínek určují obsah substancí vhodných k

fermentaci (proteiny, lipidy, sacharidy) zejména pěstební opatření jako výběr hybridu, způsob pěstování a vývojová fáze rostlin v době sklizně. Výnos metanu závisí na způsobu sklizně kukuřice. V současné době je velmi intenzivně diskutována otázka, jak má vypadat kukuřice vhodná k výrobě bioplynu (Amon et al. 2006). Podle Polákové (2018) jsou vhodné hybridy s vysokým výnosem suché hmoty 18–25 t/ha, odolné vůči poléhání, odolné vůči chladu, houbovým chorobám a tolerantní k suchu. S využitím kukuřice jako energetické plodiny úzce souvisí vývoj osevních ploch kukuřice.

V grafu č.1 je uveden vývoj osevních ploch v období od roku 1993 do roku 2003 v pětiletých cyklech a dále vývoj osevních ploch kukuřice za roky 2008, 2009 a 2010. U kukuřice pěstované na zrno se výměra osevní plochy v rozmezí let 1993–2003 zvýšila o 53 209 ha, v rozmezí let 1993–2010 bylo zaznamenáno zvýšení o 71 059 ha (ČSÚ 2018). Zvýšení osevní plochy je zapříčiněno tím, že díky šlechtitelské práci se kukuřice pěstuje i v oblastech pro ni nepříliš typických (vyšší nadmořské výšky) a tím, že kukuřice je plodina širokého využití (Zimolka 2008). Podle situační a výhledové zprávy (2010) je vyšší vývoj osevních ploch způsoben tím, že část ploch kukuřice určených pro sklizeň na siláž je zemědělci ponechána na zrno. U kukuřice pěstované na siláž byl od roku 1993 do roku 2010 zaznamenán pokles osevních ploch o 122 002 ha, to je o téměř 60 %. Pokles osevních ploch kukuřice na siláž je způsoben poklesem stavů hovězího dobytka.



Graf. č. 1 Průměrné hektarové výnosy pšenice, kukuřice, řepky (levá osa) a cukrové řepy (pravá osa) v letech 1920–2018 (Převzato z ČSÚ 2018).

3.2. Degradace půdy

Bohužel v dnešní době patří mezi nejzávažnější problémy světa degradace půd. Půda má v rámci ekosystému velmi důležitou roli (Haygarth & Ritz 2009). Předpoklad života na Zemi je existence půdy (Blanco & Lal 2008). Degradace je sice pomalý proces, ale její důsledky mohou vést ke zničení mimoprodukční funkce půd (Ministerstvo zemědělství 2015). Vlivem dlouhodobého intenzivního zemědělství jsou půdní vztahy narušeny, což ovlivňuje fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy. Pokud dojde v zemědělství a případném hospodaření ke změnám, půdy na to reagují velmi pomalu, ať jsou změny pozitivní nebo negativní (Nortcliff 2002). Při zacházení s půdou nesmí být člověk krátkozraký a měl by přemýšlet, že i další generace budou na této půdě hospodařit. Při dalším degradování půdy, již nebude možné dosáhnout požadované produkce. Degradace je velký problém v celosvětovém měřítku, urychluje ji naše lidská činnost a jelikož je půda koncový zdroj, nemůže docházet k jejímu obnovení během našeho života.

Degradace půdy probíhá buď s činností člověka nebo přirozeně. Na přirozenou degradaci působí nejrůznější faktory prostředí na půdy a jejich další vývoj. Můžeme sem zařadit změny půdní textury i struktury a přesuny koloidů v půdním profilu. Činností člověka můžeme degradaci zeslabit či zesílit (Šimek 2004). Mezi procesy, které přispívají k degradaci půd patří zhutňování a utužování půd, eroze, zasolování, kontaminace, desertifikace a další.

Degradaci půd můžeme dělit na:

- kvantitativní – zábor půdy tzv. soil sealing
- kvalitativní – eroze, okyselování půd, meliorace.

Jako výhodným se jeví pěstování energetických plodin na devastovaných půdách. Ať už z důvodů jejich předúpravy, či využití leckdy kontaminovaných pozemků nevhodných pro pěstování potravinářských zemědělských potravin s rizikem následné kontaminace potravinářských produktů (Bentsen & Møller 2017). Většinou se jedná o půdy, které byly využívány k nezemědělským účelům, a jsou charakteristické svými následujícími nepříznivými faktory pro neudržení vegetace, jakými jsou:

- nedostatek živin – nízký obsah N, P, K nebo mikroprvků,
- fyzikální vlastnosti – kamenité nebo písčité půdy špatně zadržují vláhu, mají malou iontově výměnnou kapacitu,
- chemické vlastnosti – pH prostředí těchto půd může být od alkalického až po kyselé,
- nedostatek či absence organické hmoty,
- biologické vlastnosti – půdní biologická aktivita je obecně velmi nízká.

Mnohé současné studie naznačují nutnost integrovaného přístupu rekultivací za účelem zvýšení produkčních vlastností těchto půd. Jednou z nich může být aplikace kalu a odpadních vod. Jejich využívání vede k místní recyklaci hodnotných živin, ke snižování poptávky pěstovaných rostlin po minerálních hnojivech a čerstvé vodě a k růstu výnosu biomasy. Navzdory těmto pozitivním aspektům mohou být v kalu koncentrovány potenciální škodliviny,

jako jsou patogenní látky či těžké kovy a jejich použití může vést ke kontaminaci půd a podzemních vod. Proto by se měly před aplikací provádět terénní průzkumy zaměřené na zjištění hladiny podzemní vody včetně jejího sezónního kolísání, současné kvality, současného a budoucího potenciálního užití a významu, a směru toku podzemní vody (Usman et al. 2012). Například Juwarkar et al. (2007) ukázali na jednoznačné zlepšení půdních vlastností po důlní činnosti při současné aplikaci kalů z ČOV, biohnojiva a mykorhizních hub spolu s vhodnými druhy rostlin. Výsledky ukázaly, že přídavek kalu zlepšuje fyzikálně-chemické parametry půdy. Díky inokulaci biohnojiva se objevily žádoucí mikrobiální skupiny, které byli předtím nepřítomny. Inokulace biohnojiva a aplikace kalu snížily toxicitu těžkých kovů jako chromu, zinku, mědi, železa, niklu a kadmia (Juwarkar et al. 2008).

Jedním z nejdůležitějších parametrů energetických plodin je jejich schopnost růstu v odlišných životních podmínkách. Některé energetické plodiny nejsou o nic víc náročné na stanovištní podmínky než běžně pěstované zemědělské plodiny jako například kukuřice, naopak jiné mohou mít až extrémní stanovištní nároky, pro poskytování vysokých výnosů. Mezi žádoucí vlastnosti energetických plodin patří rychlý růst, efektivní využívání živin a vody, vysoká hustota, robustnost, schopnost využívat co nejefektivněji dusík a u víceletých plodin dobrá schopnost regenerace po sklizni (John et al. 2011). I po výběru vhodného stanoviště je třeba dodržovat vhodné oseední postupy. Obecně platí, že pro co možná nejvyšší výnosy by zakládání energetických plodin mělo probíhat na nezaplevelených a živinami dobře zásobených půdách. Ve srovnání s pěstováním tradičních plodin mohou víceleté energetické plodiny zvyšovat obsah organického podílu v půdách a tím měnit chemické vlastnosti půd (Liebman & Davis 2000).

Výnosy jsou též ovlivněny dobou sklizně energetických plodin. Při výběru doby sklizně je nutné vědět, na jaké účely bude sklizená fytomasa využita. Obecně platí, že při podzimní sklizni jsou výnosy nejvyšší a takto sklizená biomasa se hodí např. pro výrobu bioplynu. Kvůli většímu obsahu vody v tkáních je však nevhodná pro přímé spalování (Smil 2011). Ze sortimentu energetických rostlin na území ČR právě převažuje kukuřice. Závlaha je náročná nejenom ekonomicky, ale také technicky, nezanedbatelnou roli hraje také nedostatek vhodné závlahové vody, proto se hledají další možné alternativy, které by limitovaly její nedostatek jako je např. využití šedé vody (Day et al. 2014). Maximální výnosový potenciál zemědělských plodin lze dosáhnout pouze za předpokladu optimálního působení všech zúčastněných faktorů. V našich povětrnostních podmínkách, kde se střídá oceánské klima s kontinentálním, tato ideální situace téměř nenastává, ale naopak dochází k náhlým změnám a výkyvům do extrémních poloh, tudíž rostliny trpí více méně stresem, což klade vyšší nároky na rychlost adaptace rostlin na měnící se podmínky, stejně jako na široké adaptační rozpětí jednotlivých genotypů odrůd pěstovaných druhů obilovin (Argus et al. 2008).

V poslední době jsou extrémnější projevy počasí mnohem častější, zejména z důvodu změny klimatu. V roce 2018 zažívala střední a severní Evropa neobvyklou vlnu veder, velmi dlouhé období s tropickými dny ve střední Evropě a s letními dny v severní Evropě. Zemědělské sucho je důsledek interakce mezi klimatem a půdním prostředím. Půda dokáže v sobě pojmout obrovské množství vody a její význam v koloběhu vody je s nástupem klimatických extrémů stále rostoucí (Mirza 2003). Zemědělská půda zadrží více vody než většinou chudší půdy lesní, které sice nejsou schopny vodu zadržet dlouhodoběji, dokážou jí však rychle propouštět do hlubších vrstev a přispívají tak k doplňování podzemních vod. Zemědělská krajina doznala

během staletí podstatných změn, kdy především uplynulá desetiletí změnila její ráz, a výrazně ovlivnila schopnost plnit produkční i mimoprodukční funkce (Kizos & Koulouri 2006).

V současnosti se nejen u nás zkoušejí nové metody, které mohou vést ke zlepšení vlastností degradovaných půd, tak aby v budoucnu dosáhly trvale udržitelných produkčních vlastností. Různé postupy, jak toho dosáhnout se liší podle původu devastovaných půd, jejich stupně a druhu kontaminace, rozloze, dalšímu využití, ceně a názorem různých expertů zabývajících se touto problematikou. K předúpravě devastovaných půd se též používají komposty, vermikomposty či biochar. Stabilní organické látky v půdách jsou totiž nezbytné pro vytvoření půdních životních podmínek, pozitivně ovlivňují žádoucí vlastnosti jako agregační schopnosti půd, jejich poréznost, kapacita zadržovat vodu, živiny a příznivou teplotní regulaci (Markou et al. 2018). Předpokládá se, že aplikací vermikompostu a biocharu zlepšíme kvalitu půdy a výnos rostlin. Málo je však známo o jejich dlouhodobém dopadu na výnos plodin a životní prostředí ve střední Evropě (Schmidt et al. 2015). V diplomové práci jsme zkoumali vliv organických doplňků (vermikompost) a bicharu (aplikovaných samostatně nebo s vermikompostem) na výnos rostlin a úrodnost půdy.

Zlepšený výnos plodin je zjevně jedním z cílů udržitelného zemědělství, ale prioritami jsou také další efekty, jako jsou mimo jiné dopady pěstitelských postupů. Neudržitelné zemědělské postupy, jako je nevhodné používání agrochemikálií, nadměrné a hluboké zpracování půdy, zkracování doby ladem. Za těchto okolností vedou zemědělské postupy ke snížení obsahu půdní organické hmoty (POM) a biologické rozmanitosti půdy a degradaci fyzikálních vlastností půdy a širšího prostředí (Kibblewhite et al. 2008, Lal 2008, Papathanasiou et al. 2012).

Vyčerpání POM je jedním z hlavních faktorů způsobujících degradaci ekosystémových služeb a ztrátu odolnosti ekosystémů (Bronick & Lal 2005, Lal 2005, Feller et al. 2012). Četné studie tedy naznačují, že úprava organických půd je alternativou k udržení ekonomicky životaschopné produkce plodin s minimálním znečištěním životního prostředí. Bylo skutečně prokázáno, že organické hnojení zlepšuje obsah POM, mikrobiální biomasu a aktivitu, potlačuje choroby rostlin, zejména ty, které jsou způsobeny půdními patogeny, a zlepšuje odolnost půdy proti erozi (Thiele-Bruhn et al. 2012). Zásadním omezením organických úprav je však jejich menší dopad na výnos rostlin než u chemických hnojiv (Seufert 2012). Seufert (2012) zjistil, že většina studií o ekologických změnách byla provedena v rozvinutých zemích, kde je výkon v průměru o 20 % nižší než u konvenčního zemědělství, a tento rozdíl dosahuje v rozvojových zemích 43 %. Z toho důvodu je zapotřebí dalšího výzkumu, zejména v rozvojových zemích, aby došlo ke zlepšení našich znalostí o potenciálu organických změn a zlepšila se jejich účinnost.

3.2.1. Sucho

Je hlavním omezením celosvětové zemědělské produkce (Gobin 2012). Nedostatek vody také způsobuje ztráty v zavlažovaných prostředích z důvodu omezení správy a špatné údržby infrastruktury. K deficitu vody dochází, když rychlost transpirace překročí absorpci vody a je spojena se slaností a vysokými teplotami (Pereira et al. 2002). Jak se u cukrové řepy vyvíjí deficit vody, klesá potencionální a relativní obsah vody v listové vodě a klesá rychlost růstu listů a kořenů skladování (Shipley & Meziane 2002). Nízké stomatální chování znamená také menší absorpci CO₂ pro produkci sušiny. Tradiční strategie šlechtění jsou omezeny genetickou

složitostí tolerance vůči suchu, nízkou genetickou variabilitou složek výnosu za stresových podmínek, nedostatkem efektivních technik výběru (Ahmed et al. 2016, Adhikiri et al. 2018), variabilitou prostředí a silným prostředím genotypu 6. interakce (Navas-Lopez 2019). Marker-assisted selection (MAS) specifických vlastností, které souvisejí se suchem.

3.2.2. Sucho jako faktor vyvolávající stres

Pojem sucho označuje období chudé srážkami, během něhož se obsahy vody v půdě sniží natolik, že rostliny trpí jejím nedostatkem. Vztah mezi ročním úhrnem srážek a ročním výparem je jen humidního či aridního charakteru podnebí některé oblasti. Pro rostliny rostoucí v dané oblasti je však především důležité, zda mají dostatek vody v době, kdy ji nejvíce potřebují v průběhu vegetačního období. Výnosotvorné prvky jsou v polních podmínkách formované společným působením vnitřních a vnějších faktorů, které lze ovlivnit vhodným agrotechnickým opatřením. Mezi velmi důležité činitele vnějšího prostředí rostlin patří vody, která v konečném důsledku významnou mírou spolurozhoduje o výši výnosu. Stres nedostatkem vody ovlivňuje základní životní funkce rostliny, může poškozovat jednotlivé orgány a v krajním případě vést až k úhynu rostliny (Larcher 1995). Krátkodobé a středně silné vodní stesy působící na porost nemusí mít dopad na sklizňové parametry. Pokud vodní stres neporuší celistvost vodivých drah v rostlině a voda je jediným limitujícím faktorem, rostlina může reagovat změnami distribuce nebo redistribuce vody v orgánech, a to postupným osmotickým přizpůsobením těchto orgánů. Akumulace asimilátů bude převládat v těch místech, která mají regulační aktivitu, respektive v těch, která jsou stresem méně poškozena (Svobodová & Misa 2004).

3.3. Alternativní bio aditiva

3.3.1. Biochar

Biochar neboli biouhel je nově budovaný vědecký termín. Podle definice, kterou ustanovili Kimetu & Lehmann (2010) se jedná o „produkt s vysokým obsahem uhlíku vznikající rozkladem biomasy jako je např. dřevo, hnůj nebo listí. Vzniká, jestliže je biomasa zahřívána v uzavřeném prostoru s nízkým obsahem nebo zcela bez přístupu vzduchu“. Shackley et al. (2012) pak definovali biochar více popisně jako „porézní uhlíkatou pevnou látku produkovanou termochemickou přeměnou organických materiálů v atmosféře bez přístupu kyslíku, která má fyzikálně-chemické vlastnosti vhodné pro bezpečné a dlouhodobé ukládání uhlíku v životním prostředí“. Verheijen et al. (2010) také definovali biochar následovně: „biomasa, která byla pyrolyzována v prostředí s nulovým nebo nízkým obsahem kyslíku. Přidávání zuhelnatělé biomasy byla zaznamenána již od počátku lidstva. Zpočátku se do půdy dostával materiál přirozeně, a to formou lesních požárů. Existují důkazy o spálené biomase, již z Amazonie, kde její obyvatelé pálili větší množství dřeva na svých ohništích. Po spálení dřeva v ohništi vznikal biochar, tedy popel a uhlí. Tyto zbytky byly poté obyvateli dále používány např. přidáním k výkalům. Takto vytvořená směs byla dále využívána jako hnojivo polí. Z tohoto využívání je vidět, že tento proces trvá několik staletí (Schmidt 2010).

Tento produkt je pak aplikován na půdu na konkrétním místě, které umožňuje trvalou sekvestraci C a současně dojde ke zlepšení produkčních funkcí půdy. Konečným cílem pak je

zamezit krátkodobým a dlouhodobým škodlivým účinkům na okolní životní prostředí, které mohou ohrožovat zdraví lidí a zvířat“. Mezinárodní iniciativa pro biochar (IBI) standardizovala svou definici jako „pevný materiál získaný termochemickou přeměnou biomasy v prostředí s omezeným přístupem kyslíku“ (IBI 2012). Všechny tyto definice přímo nebo nepřímo souvisejí s podmínkou produkce biopaliva a jeho aplikací v půdě. Uhlí je zdrojem spálené organické hmoty pro výrobu paliva a energie, zatímco biochar lze použít pro sekvestraci uhlíku a správu životního prostředí.

Z uvedených definic tedy vyplývá, že biochar je pyrogenní černé uhlí, které přitahuje zvýšenou pozornost v politických i akademických sférách (Verheijen et al. 2009). Řada studií naznačila, že aplikace biocharu do půdy by mohla účinně sekvestrovat uhlík a také zmírnit globální oteplování. Pokud se biochar aplikuje na půdu, může také představovat další potenciální výhody, včetně zvýšené úrodnosti půdy a produktivity plodin, zvýšení obsahu půdních živin a zadržování vody a snížení emisí jiných skleníkových plynů z půd (Lehmann et al. 2006, Verheijen et al. 2009).

Kromě aplikací pro sekvestraci uhlíku a zlepšování půdních vlastností, také další studie rovněž naznačily, že biochar má velký potenciál pro používání nízkonákladového adsorbentu, který na sebe navazuje chemické sloučeniny včetně některých nejběžnějších látek znečišťující životním prostředím. Bylo prokázáno, že biochary vyrobené z různých zdrojů měly silnou sorpční schopnost pro různé typy pesticidů a dalších organických kontaminantů (Chen & Chen 2009). Bylo prokázáno, že sorpční schopnost biocharu v některých případech překračuje schopnost přirozené půdní organické hmoty faktorem 10–100 (Cornelissen et al. 2005).

Začlenění biocharu do půdy zlepšilo retenci živin, jako je dusík a oddělený uhlík (Lehmann et al. 2003, Barrow 2012, Cheng et al. 2012, Borchard et al. 2012, Clough & Condron 2010, Clough et al. 2013, Farrell et al. 2014). Jeho příznivý účinek na růst rostlin byl prokázán také v mnoha studiích (Steiner et al. 2007, Steiner et al. 2008, Vaccari et al. 2011), zejména na chudých tropických půdách (Zhao et al. 2013).

Mezi klíčové parametry, které řídí vlastnosti biocharu, patří teplota pyrolýzy, doba zdržení pyrolyzovaného materiálu na cílové teplotě pyrolýzy, rychlost přenosu tepla a typ suroviny. Účinnost biocharu při nakládání s kontaminanty závisí na jeho povrchu, distribuci velikosti pórů a kapacitě iontoměničů. Prostorová struktura a molekulární složení biocharu jsou rozhodujícími parametry pro praktické použití v půdě a vodě (Ahmad et al. 2014). Relativně vysoké teploty pyrolýzy obecně produkují biochary, které jsou účinné při sorpci organických kontaminantů zvyšováním povrchové plochy, mikroporéznosti a hydrofobicity; zatímco biochary získané při nízkých teplotách jsou vhodnější pro odstraňování anorganických / polárních organických kontaminantů funkčními skupinami obsahujícími kyslík, elektrostatickou přitažlivost a srážení (Mohan et al. 2014). Přestože téměř veškerá biomasa může být přeměněna na biochar pomocí termální pyrolýzy. Z posouzení životního cyklu systémů pyrolýzy a biocharu vyplývá, že je mnohem ekologičtější a finančně životaschopné vyrábět biochar z odpadní biomasy (Roberts 2010) v našem případě kůrovcové dříví.

3.3.2. Vermikompost

Vermikompostování je biologický a ekologický proces. Interakce mezi žížalami a mikroorganismy vedou k biooxidaci a stabilizaci organických odpadů (Dominguez et al. 2004).

Uvádí se, že vermikompost stimuluje mikrobiální růst a aktivitu půdy a následnou mineralizaci živin v půdě. Zvyšuje úrodnost a kvalitu půdy a obsahuje látky podporující růst rostlin např. vitamíny, hormony, enzymy (Gutierrez-Miceli et al. 2007, Pramanik et al. 2009, Zaller 2007, Levinsh 2011, Papathanasiou et al. 2012, Zhang et al. 2013). Důležitý může být z hlediska aplikace vermikompost s relativně vysokým obsahem nejrůznějších mikroorganismů.

Vermikompostování je definováno jako metoda mezofilní aerobní fermentace organických materiálů, která využívá potenciálu některých druhů žížal transformujících organickou hmotu na kvalitní hnojivo s relativně vysokým obsahem huminových látek. Jedná se o nákladově efektivní a rychlou techniku pro účinné zpracování statkových hnojiv (Garg et al. 2006). Činnost žížal nejen zrychluje rozklad organické hmoty (Atiyeh et al. 2002, Lv et al. 2013), ale také zpřístupňuje živiny pro rostlinu (Tripathi & Bhardwaj 2004, Garg et al. 2006). Vermikompostování statkových hnojiv je šetrné k životnímu prostředí a poskytuje alternativu minerálního hnojení v zemědělství (Atiyeh et al. 2002).

Ve stabilizovaném vermikompostu je možno docílit až desetkrát většího počtu mikroorganismů ve srovnání s běžným kompostem (Carrasquero-Durán & Flores 2006). K tomuto účelu jsou především využívány žížaly rodu *Eisenia fetida* kalifornský červený hybrid. Žížaly ve svém trávicím traktu zpracovávají organický materiál, asi 40 % organických látek žížaly využívají a zbytek tvoří natrávené a stmelené části, které vylučují do prostředí a jsou základem kompostu. Pro žížaly je nutné zajistit vhodné podmínky. Kromě dostatku organického materiálu vyžadují teplotu okolo 20 °C, vlhkost 80 %, pH v rozsahu 6-8 a dostatek vzduchu v „krmivu“ (tab. 1). Jako potrava slouží žížalám organický materiál (nejlépe předfermentovaný) s poměrem C:N kolem 20:1. Vytvořené hnojivo je velmi aktivní, ovšem náklady jsou vysoké. S ohledem na možnost kontaminace nežádoucími organickými polutanty a těžkými kovy je nutné vyvarovat se přidávání různých odpadů do kompostů bez znalosti jejich původu a složení. Velká část odpadů, zvláště z různých skládek, může být značně znečištěna a způsobit průnik nežádoucích látek do půdního prostředí a následně do potravního řetězce.

Interakce rostlin s těmito půdními mikroorganismy a jejich metabolity jsou známé jako významné determinanty pro růst rostlin (Neumann 2016). V této souvislosti se v posledních letech stále častěji diskutuje problematika tzv. bioefektorů, tedy biologických preparátů podporujících výše zmíněné interakce za účelem zvýšení produkce a kvality pěstovaných rostlin při snížené spotřebě minerálních hnojiv. Bioefektory jsou tvořeny definovanými řetězci hub *Trichodermy*, *Penicillium* a *Sebacinales*, bakteriemi rodu *Bacillus* a *Pseudomonades* u kterých byl přesně charakterizován potenciál pro rozvoj kořenů stejně jako potenciál usnadňující uvolňování živin ze stabilních matric. Dále do této skupiny patří výluhy z mořských řas, suchozemských rostlin, z kompostů a vermikompostů, stejně jako separované aktivní látky z těchto materiálů.

Pro příjem živin plodinami jsou mimořádně důležité procesy probíhající v rhizosféře. Rhizosféra je velice konkurenčním prostředím, v němž se hojně vyskytují mikroorganismy. Bakterie žijící v blízkosti kořenů rostlin se obecně nazývají rhizobakterie (Kloepper et al. 1980). V mnoha případech je růst rostlin podpůrnou činností bakterií, spojenou s jejich schopností potlačovat půdní rostlinné patogeny (bakterie a mikroskopické houby), vyskytující se v konkurenčních společenstvech. Doornbos et al. (2012) popisují v tomto kontextu různé mechanismy působení. Jsou vyráběny anti-mikrobiální („antibiotika“), antivirové a nematocidní sloučeniny, jsou pro stimulaci rostliny indukované systémové rezistence (ISR).

Faktor	Hodnota
Poměr C:N	25 : 1 až 30 : 1
Počáteční velikost částic	10–20 mm (větší částice zpomalují proces)
Obsah vody	80 % - 85 % (mezí hodnoty 60 % - 90 %)
Kyslík	Žížaly vyžadují aerobní podmínky
Teplota	15 °C–25 °C (mezí hodnoty 4 °C–30 °C)
pH	≥5 a 9≤
Obsah amoniaku	≤0,5mg. g ⁻¹
Velikost vermikompostéru	Libovolná délka a šířka, výška 50 cm (vyšší hodnoty zpomalují nebo dokonce zastavují proces)
Velikost reaktoru	Délka 40 m; šířka 2,4 m; hloubka 1 m. Odpady by se měly dávkovat v tenkých vrstvách silných 5–10 cm.
Lidské patogeny	Jsou zabity po 70 dnech vermikompostování
Čas rozkladu	Od 4 do 12 měsíců, ve spojitých systémech reaktorů do 30–60 dní

Tabulka č. 1 *Faktory ovlivňující vermikompostování (Převzato z: Vermiculture technology).*

Příznivý vliv na složení hostitelských rostlin mají mikrobiomy, které by mohly přispět k jejich potlačujícímu efektu (Erlacher et al. 2014). Růst rostlin podporují rhizobakterie, zvyšují toleranci rostlin proti abiotickému stresu, podporují biologickou ochranu proti rostlinným chorobám a hmyzím škůdcům (Dimkpa et al. 2009, Lugtenberg & Kamilova 2009, Pieterse et al. 2014). Několik bakterií, včetně kmenů rodu *Pseudomonas* a *Bacillus*, jsou nyní komerčně využívány jako biologická ochrana a jsou úspěšně používány namísto chemických pesticidů v rostlinné výrobě (Choudhary & Johri 2009). Rhizobakterie mohou stimulovat růst rostlin různými způsoby, např. zlepšují tvorbu a klíčení semen, podporují rozvoj kořenů a tím i příjem minerálních živin, absorpce vody, stejně jako potlačit jejich onemocnění.

V poslední době roste zájem o používání vermikompostu v EU i v České republice k obnovení plodnosti a růstu rostlin v půdách degradovaných erozí (Jouquet et al. 2011, Ngo et al. 2013, Doan et al. 2013), jakož i ke snížení negativního dopadu novely OM na přenos minerálů N a mikrobů do vody (Jouquet et al. 2011, Amossé et al. 2013, Doan et al. 2014). Nedávné studie také ukázaly, že biochar lze použít společně s vermikompostem ke zvýšení stability vermikompostu a snížení rozpustnosti organické hmoty (Ngo et al. 2013, Doan et al. 2014).

4. Materiál a metody

V rámci diplomové práce byl realizován nádobový experiment ve skleníku s řízenou atmosférou. Automatizovaný skleník má za úkol hlídat teplotu, osvětlení a dostatek vody v půdním substrátu. Byla využita kukuřičí setá (*Zea mays*) odrůda Activiti CS, za účelem sledování jejího růstu včetně sledování příjmu živin po aplikaci biocharu, vermikompostu a inokulace pomocí arbuskulární mykorrhizní houby (*Glomus intraradices*).

Kukuřice setá byla vybrána z následujících důvodů:

- jedná se o rostlinu citlivou na nedostatek vody,
- je náročná na množství kvalitní organické hmoty,
- je to ekonomicky velmi lukrativní plodina – výroba bioplynu a krmivo pro hospodářská zvířata.

4.1. Vstupní materiály

Vstupní materiály byly analyzovány za účelem stanovení základních charakteristik včetně obsahu základních živin (tabulka č. 2). Ze vstupních charakteristik je patrné, že v případě čistého biocharu se v podstatě jedná o organický uhlík (cca 78 % C) se zásaditým pH a obsahem dusíku okolo 2 %. Pro nádobový pokus však bylo také použito hnojivo Microstar® PMX jehož složení je následující (N-10 %; P-40%; Mg-3%; S-11%; B-0,03%; Fe-0,01%; Mn-0,02%; Mo-0,005%; Zn-0,03%). V případě biocharu byly podrobně popsány i jeho fyzikálně-chemické a morfoloické charakteristiky (tabulka č. 3)

	Regozem	Biochar	Vermikompost
Objemová hmotnost [g/cm ³]	1,59	0,21	/
Pórovitost [%]	41,1	/	/
pH [-]	6,1	9,1	8,4
El. vodivost [μS/cm]	23,1	/	2,4
C _{org} [g/kg]	9,33	778	26
N _{celk} [g/kg]	0,54	22,7	2,8
C/N	17,3	34,3	9,2
P _{celk} [g/kg]	0,03	1,15	0,91
K [g/kg]	0,06	9,65	3,12
Ca [g/kg]	0,07	20,4	/
Mg [g/kg]	0,13	2,34	0,57

Tabulka č. 2. Základní charakteristiky biocharu, půdy a vermikompostu (Převzato z: Trakal et al. 2020).

vlastnost, veličina	jednotka	vzorek	EBC standard		ÚKZÚZ
			základní	prémium	
sytná hmotnost	g·dm ⁻³	166	deklarace		-
zdánlivá hustota, ρ_{Hg}	g·cm ⁻³	0,48	-	-	-
skeletální hustota, ρ_{He}	g·cm ⁻³	1,84	-	-	-
porozita, ε	-	0,74	-	-	-
specifický povrch, S_{BET}	m ² /g	444	deklarace, nejlépe > 150		-
specifický povrch mesopórů, S_{meso}	m ² /g	142	-	-	-
specifický celkový objem pórů, V_{tot}	mm ³ _{liq} /g	293	-	-	-
specifický objem mikropórů, V_{micro}	mm ³ _{liq} /g	157	-	-	-
specifický intruzní objem, V_{intr}	cm ³ /g	1,18	-	-	-
pH		11,4	deklarace		-
vlhkost, W	% hm.	1,18	deklarace		-
popel, A ^d	% hm.	9,63	deklarace		-
prchavá hořlavina, V ^d	% hm.	2,71	deklarace		-
spalné teplo, Q _s ^d	MJ.kg ⁻¹	30,0	-	-	-
výhřevnost, Q _i ^d	MJ.kg ⁻¹	29,8	-	-	-
obsah uhlíku, C ^d	% hm.	86,8	≥ 50%		-
obsah organického uhlíku, C _{org} ^d	% hm.	83,8	-	-	-
obsah vodíku, H ^d	% hm.	0,626	-	-	-
obsah dusíku, N ^d	% hm.	0,580	deklarace		-
obsah kyslíku, O ^d	% hm.	2,37	-	-	-
H/C _{org}	-	0,00747	H/C _{org} < 0.7		-
O/C	-	0,0274	O/C < 0.4		-
obsah celkové síry, S1 ^d	% hm.	< 0.1	-	-	-
obsah spalitelné síry, S2 ^d	mg.kg ⁻¹	401	-	-	-
obsah chloru, Cl ^d	mg.kg ⁻¹	867	-	-	-
obsah fluoru, F ^d	mg.kg ⁻¹	11,4	-	-	-
Suma 12 PAH	mg kg ⁻¹	< 0,5	-	-	-
Suma 16 PAH	mg kg ⁻¹	< 0,5	< 12	< 4	< 20

Tabulka č. 3 Charakteristika biocharu (Převzato z: Trakal et al. 2019).

4.2. Schéma pokusu

Pro účely tohoto experimentu byla, použita zemědělská Regozem s nízkou retenční schopností a malým obsahem organické hmoty. Jedná se o půdu často trpící zemědělským suchem. Samotný experiment byl realizován v podmínkách skleníku, kdy 31 květináče byly naplněny připravenými půdními směsmi, kde základní složkou byla vždy Regozem o hmotnosti 15 kg. Jednalo se o směsi s přidávkem vysokoteplotního biocharu na bázi měkkého kůrovcového dřeva ve dvou dávkách. První dávka byla 2 % hm. biocharu a druhá byla 5 % hm. biocharu. K takto připraveným směsím bylo u některých variant přimícháno inokulum arbuskulární mykorrhizní houby *Glomus intraradices* v koncentraci 1000 spor na jeden květináč a zároveň byl k některým přimíchán vermikompost v dávce 10 %. Všechny varianty byly popsány (obrázek č. 1).



Obrázek č. 1 Popisky květináčů.

Schéma pokusu bylo tedy následující: – kontrola „K“, K + inokulum, K + biochar 2 % (B + 2%), K + B2% + inokulum, K + B5%, K + B5% + inokulum, K + 10% vermikompost „vermi“, K + B2% + 10% vermi, K + B5% + 10% vermi + inokulum, kdy každá varianta byla připravena v 5ti opakováních (obrázek č. 2).



Obrázek č. 2 Varianty příprava pěstebních směsí v pěti opakováních.

Dále bylo do každého květináče umístěno 6 semen kukuřice seté, zredukováno po klíčení na 4ks a ke každému semenu bylo přidáno hnojivo Microstar v celkové dávce 400mg na květináč. V rámci nádobového experimentu probíhala pravidelná zálivka 2x týdně s použitím stejného objemu vody. Před koncem experimentu po dobu cca 14 dní byly květináče zalévány pouze na 25 % úrovně zálivky. Po sklizni byly vzorky rostlin rozděleny na kořeny, výhonky a zrna. Kořeny byly po sklizni promyty, aby se odstranila půda, a všechny části rostlin byly sušeny při 60 ° C po dobu 48 hodin a před analýzou homogenizovány.

Analýzy

Nejprve byly analyzovány vstupní materiály, které byly součástí pěstebního substrátu (půda, biochar, vermikompost). Na samotném konci pokusu byly výsledně provedeny standardizované rozborů biomasy. Byl také stanoven obsah přístupných živin v půdě pomocí extrakčního činidla M III a celkový obsah živin v biomase kukuřice metodou optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Agilent720, Agilent Technologies Inc., USA) po předchozím rozkladu vzorků na mokré cestě za zvýšeného tlaku s mikrovlnným ohřevem.

4.2.1. Mehlich III

Extrakční postup Mehlich III je oficiální analytickou metodou používanou v současné době v rámci systému agrochemického zkoušení zemědělských půd pro stanovení obsahu přístupného P, K, Mg a Ca, ale používá se i pro stanovení dostupných podílů dalších prvků, jako například Cu, Fe, Mn, Zn a B, označovaných v problematice výživy rostlin jako mikroživiny. Postup extrakce je následující: Do uzavíratelné PE nádoby o objemu 250 ml se naváží 10 g upraveného vzorku půdy. Zemina se vyluhuje extrakčním roztokem Mehlich III, který obsahuje: 0,2 mol/L CH_3COOH , 0,015 mol/L NH_4F , 0,013 mol/L HNO_3 , 0,25 mol/L NH_4NO_3 a 0,001 mol/L EDTA (Mehlich 1984). Odměrným válcem se přidá 100 ml extrakčního roztoku Mehlich III a po uzavření se extrahuje na horizontální třepačce 10 minut. Po extrakci se suspenze ihned přefiltruje přes filtrační papír (obrázek č.3). Těsně před filtrací se obsah promíchá.



Obrázek č. 3 Filtrace vzorků.

4.2.2. Obsahy prvků v rostlinách

Pro stanovení obsahů živin (kromě dusíku) v rostlině byl materiál nejprve rozložen mikrovlnným rozkladem v přístroji Anton Paar Multiwave pro (Rakousko). Analýza byla provedena vždy za použití rozdrceného 0,2500 g vzorku (listy, obilky, kořeny) naváženého na analytických vahách. K analýze byl použit roztok 30% kyseliny chlorovodíkové a 65% kyseliny dusičné v poměru 1:7.

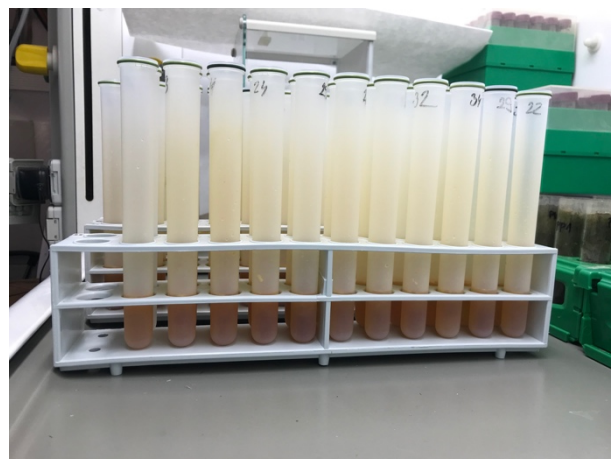
- Navážku nasypeme do teflonových reakčních nádob,
- k vzorkům bylo přidáno v digestoři 5ml roztoku kyselin a protřepáno (obrázek č. 5),
- po 24 hodinách byly k vzorkům přidány ještě 3ml roztoku kyselin a opět byly protřepány,
- teflonové reakční nádoby dobře očistíme a zvenku omyjeme,
- takto připravené reakční nádoby jsme vložili do připravených patron
- patrony jsme vložili do očíslovaného rotoru (obrázek č. 4),
- připravený rotor jsme vložili do přístroje Anton Paar Multiwave pro,
- po proběhlém mikrovlnném rozkladu, jsme vzorky vyndali a nechali vytemperovat,
- povolili jsme ventily na víčkách patron (směrem od sebe),
- vzniklý roztok jsme přelili do zkumavek a doplnili do 10 ml destilovanou vodou,
- 1ml vzniklého vzorku jsme přepipetovali do zkumavek o velikosti 15ml a dolili 10ml kyseliny dusičné 2%,

Takto připravený roztok byl přefiltrován přes 0,45 μm filtr do čisté 10 ml zkumavky a pak byl podroben analytickému stanovení s využitím ICP-OES.

Celkový obsah dusíku v rostlinách byl stanoven s využitím přístroje CHNOS Vario MACRO cube (ElementarAnalysensysteme GmbH, Německo). V tomto přístroji je nejprve 500 mg vzorku spáleno v uzavřeném systému katalytické peci a následně je obsah N stanoven s využitím teplotně vodivostního detektoru Kumar et al. (2014).



Obrázek č. 4 Patrony.



Obrázek č. 5. Teflonová reakční nádoba.

4.2.3. Metoda stanovení celkového N v rostlinné biomase

Byly analyzovány celkové obsahy N v různých částech rostliny kukuřice (kořeny, sláma a obilky) podle metody ASTM D5373. K ověření úplného spálení vzorků byl použit referenční materiál – carbon mesoporous reference materiál. Přístroj byl kalibrován pomocí standardu BBOT* s navážkou 2-3 mg, s použitím kalibrační metody K faktor. Vzorky byly navažovány na ± 2 mg. Výsledky jsou uvedeny v obrázku č 12. Opakovatelnost a průměrné hodnoty spadají

do očekávaných hodnot a indikují tak úplnou oxidaci vzorku a správné nastavení systému. Následně byly analyzovány tři vzorky pro ověření opakovatelnosti. Při stanovení CHNS byly vzorky sazí analyzovány ve dvou sériích. V každé sérii byly vzorky analyzovány dvakrát a statistické výsledky ukazují průměr pěti stanovení. Přístroj byl kalibrován pomocí standardu BBOT* s navážkou 1-2 mg, s použitím kalibrační metoy K faktor. Vzorky byly navažovány na 1-2 mg. Celkový obsah C a N byl stanoven pomocí elementární analytické jednotky Vario MACRO CHNS (CHNS Elementar Analysensysteme GmbH, Německo) podle metody Kumar et al. (2014).

Statistická analýza dat

Dostupné obsahy prvků v půdě byly vyjádřeny v mg/kg sušiny, obsahy prvků v rostlinách v g/kg sušiny a výnos biomasy v g na nádobu. Pro hodnocení významnosti rozdílů mezi pokusnými variantami byla použita jednoduchá analýza rozptylu (ANOVA) s vícenásobným porovnáváním s využitím Tukeyho HSD v softwaru Statistica 12 (StatSoft, Inc. 2013). Byly hodnoceny rozdíly mezi jednotlivými variantami pokusu na úrovni pravděpodobnosti $P < 0,05$.

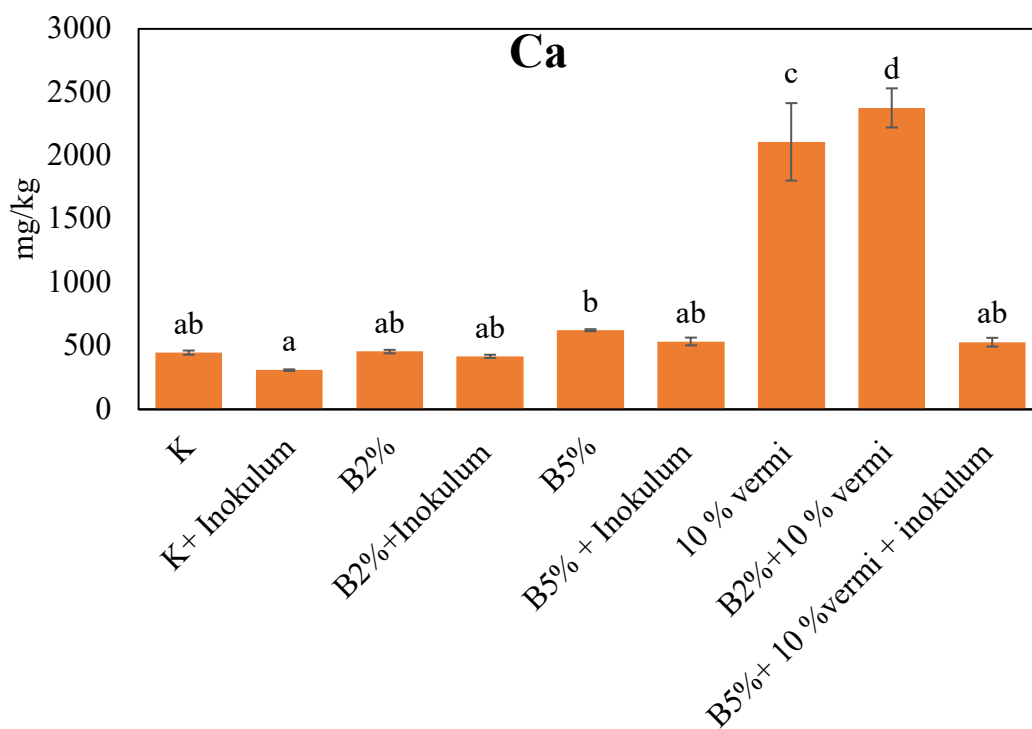
5. Výsledky

Obsahy dostupných živin v půdě stanovených metodou Mehlich III

Na grafech č. 2–6 jsou vyobrazeny dostupné obsahy v půdě jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich III.

5.1.1. Vápník

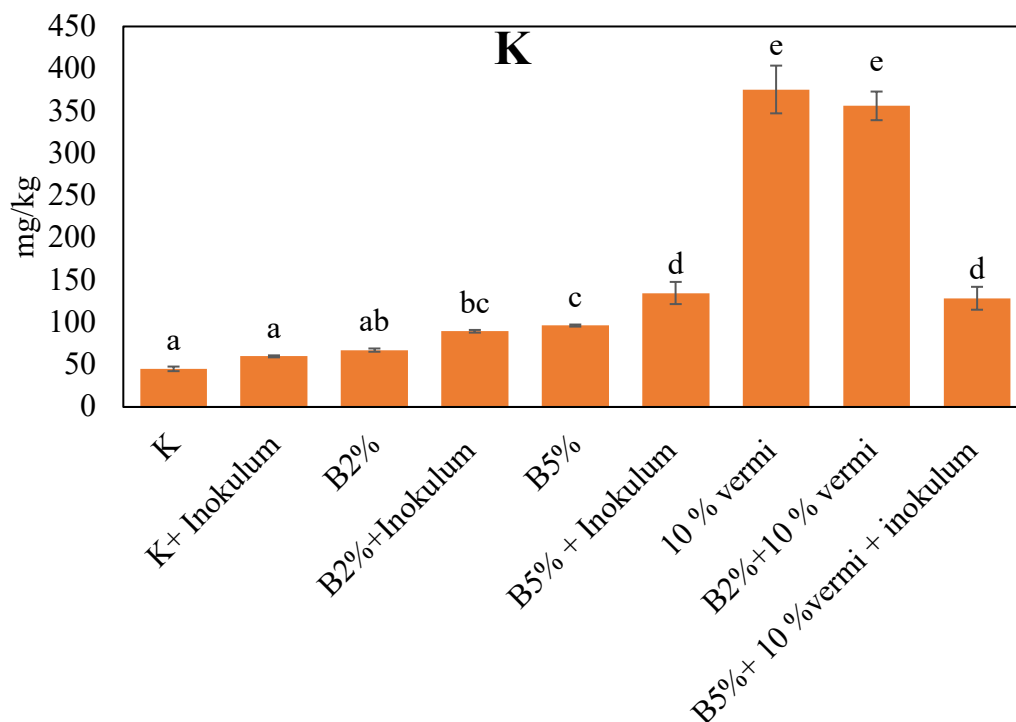
Z grafu číslo 2 je patrné, že obsah Ca byl nejvíce zastoupen u varianty s 2 % biocharu + 10 % vermi. Po přidání Inokula se hodnoty Ca u většiny variant snižují, což je z grafu patrné, např. u B5% a B5%+ Inokulum. I při vysoké koncentraci Ca v biocharu, se jeho obsah prokázal nejvíce u varianty pouze s 2% obsahem biocharu a poté u vermikompostu. Nejmenší zastoupení Ca bylo u varianty K + Inokulum, kde došlo k zneprístupnění obsahu přijatelných živin. U varianty K+Inokulum došlo oproti samotné kontrole ke snížení obsahu Ca a zároveň můžeme říct, že se statisticky liší oproti variantám B5%, 10 % vermi a B2%+10 % vermi.



Graf č. 2 Dostupné obsahy Ca v půdě dle jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

5.1.2. Draslík

V případě vyhodnocení draslíku (graf č. 3) byly nejvyšší vyrianty naměřeny u čistého 10 % vermikompostu, ačkoli nebyl prokázán statistický rozdíl mezi (10 % vermi a 10 vermi % + B2%) s vyšším obsahem v biocharu ve vermikompostu se trend vyluhovatelnosti dostupných živin spíše snižoval. V případě aplikace inokula se vyluhovatelnost vždy zvýšila oproti aplikace bez něj.



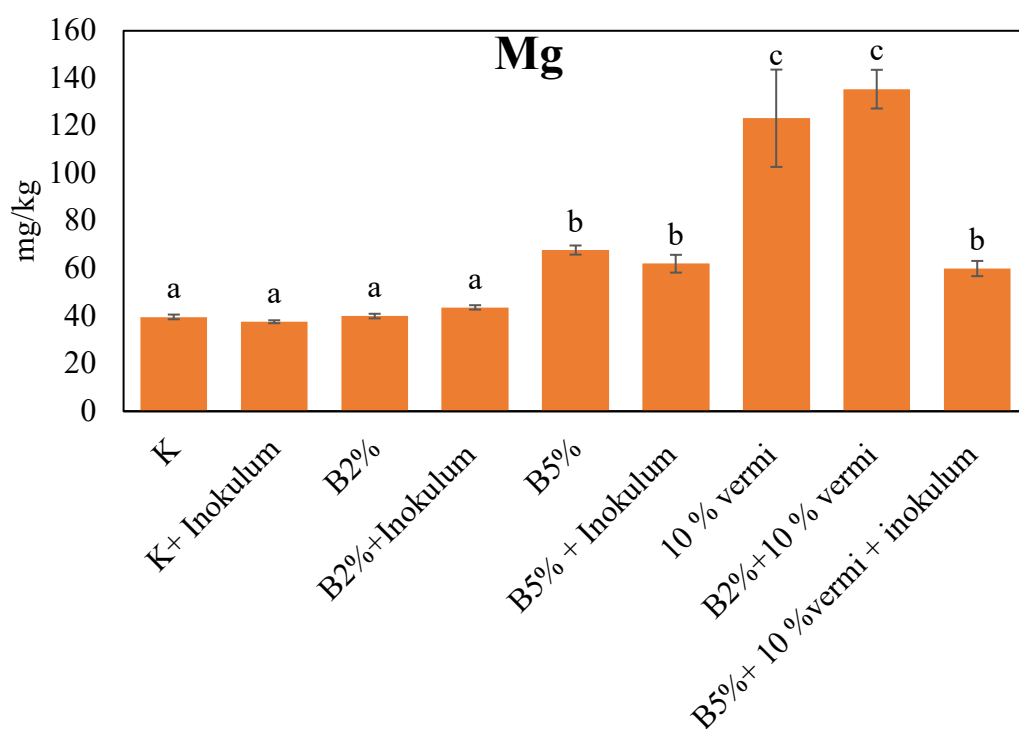
Graf č. 3 Dostupné obsahy K v půdě dle jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

5.1.3. Hořčík

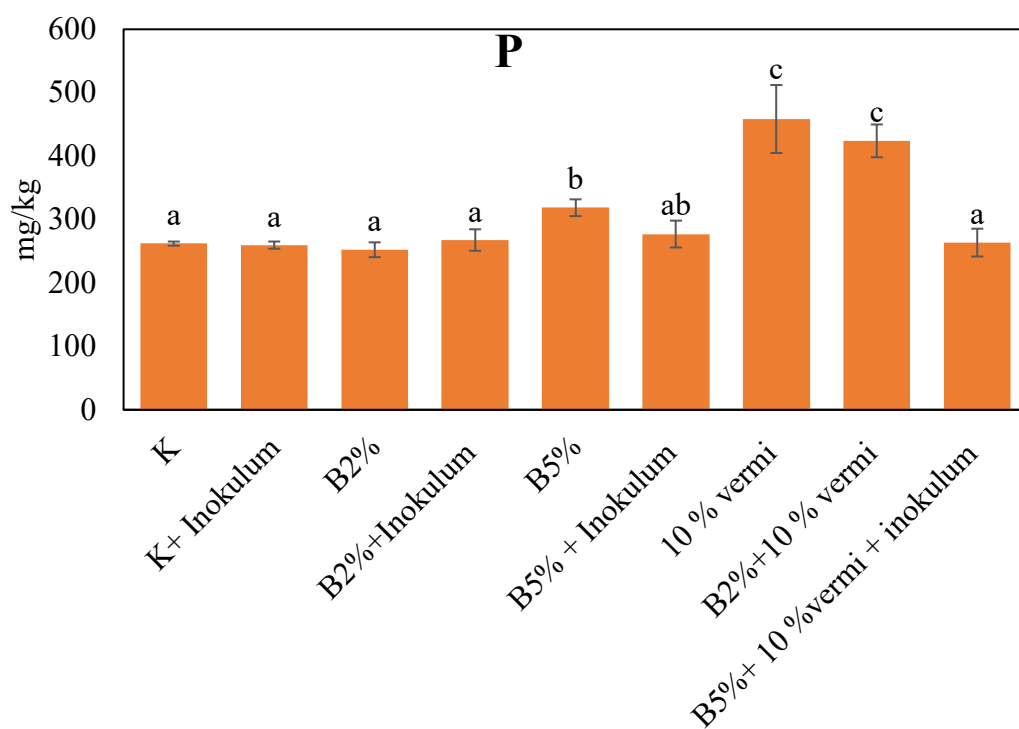
V případě hořčíku byl prohozený trend mezi čistým vermikompostem a jeho kombinací s 2% biocharem, zde byla přijatelnost v půdě průkazně nejvyšší, a naopak přítomnost biocharu, tuto schopnost zvyšovala. V případě, když jsme přidali 5 % biocharu hmotnostně k vermikompostu se přijatelnost až 2 x snížila. V případě aplikace inokula se potvrdila pozitivita jen u varianty B2% + inokula, ve všech ostatních variantách, kde jsme aplikovali inokulum, se hodnoty spíše snížily (graf č. 4).

5.1.4. Fosfor

V případě fosforu, byla opět nejvyšší přístupnost v půdě zaznamenána u aplikace čistého vermikompostu (graf č.5). Se zvyšujícím obsahem biocharu ve vermikompostu, se trend vyluhovatelnosti snižoval. Nebyl zaznamenám statistický rozdíl mezi prvními čtyřmi variantami (10 vermi + B5% + inokulum) v tomto případě můžeme tvrdit, že aplikace inokula neměla pozitivní vliv na extrakci fosforu v půdních substrátech.



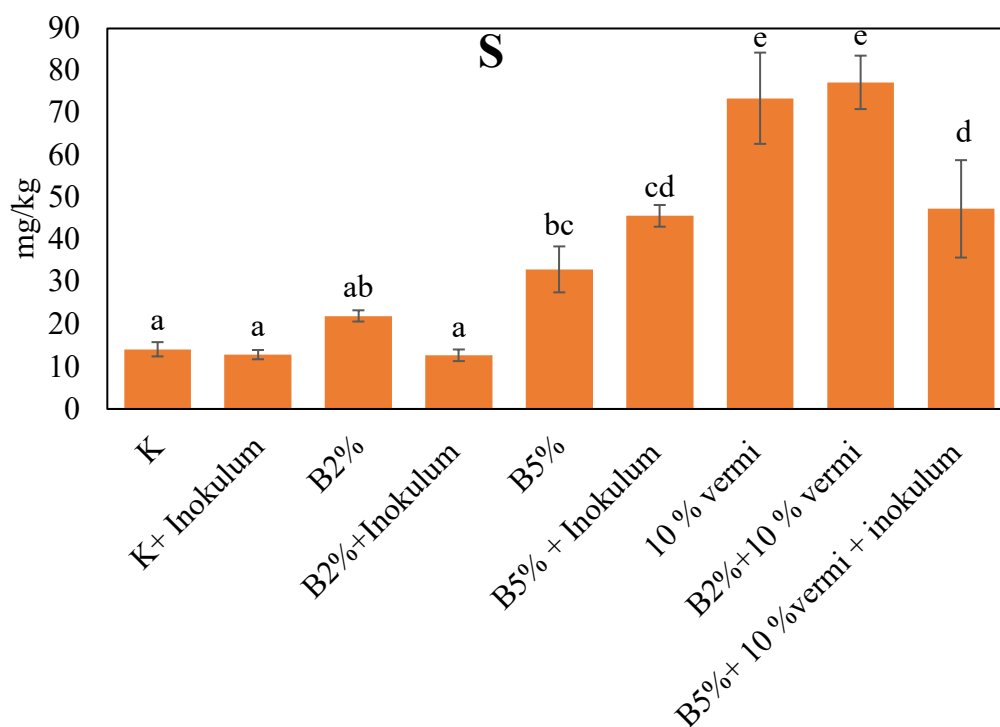
Graf č. 4 Dostupné obsahy Mg v půdě dle jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.



Graf č. 5 Dostupné obsahy P v půdě dle jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

5.1.5. Síra

V případě dostupnosti síry v půdě, byla nejlépe vyhodnocena varianta 10 % vermikompost s B 2 % biocharem. U samotného vermikompostu, jsme nedosáhli tak vysokých hodnot, ačkoli statisticky nebyl významný rozdíl mezi těmito dvěma variantami. Nebyl zaznamenán rozdíl variantou s B5% + inokulum a 10 % vermi+ B5% + inokulum. Z těchto výsledků můžeme tvrdit, že po přidání vermikompostu nemělo v tomto případě vliv na přijatelnou síru v půdě. V případě aplikace inokula se potvrdili pozitivní účinky jen varianty B5% + inokulum v ostatních variantách, neměl přídavek inokula statisticky významný vliv.



Graf č. 6 Dostupné obsahy S v půdě dle jednotlivých variant stanovené metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

Výnos biomasy kukuřice

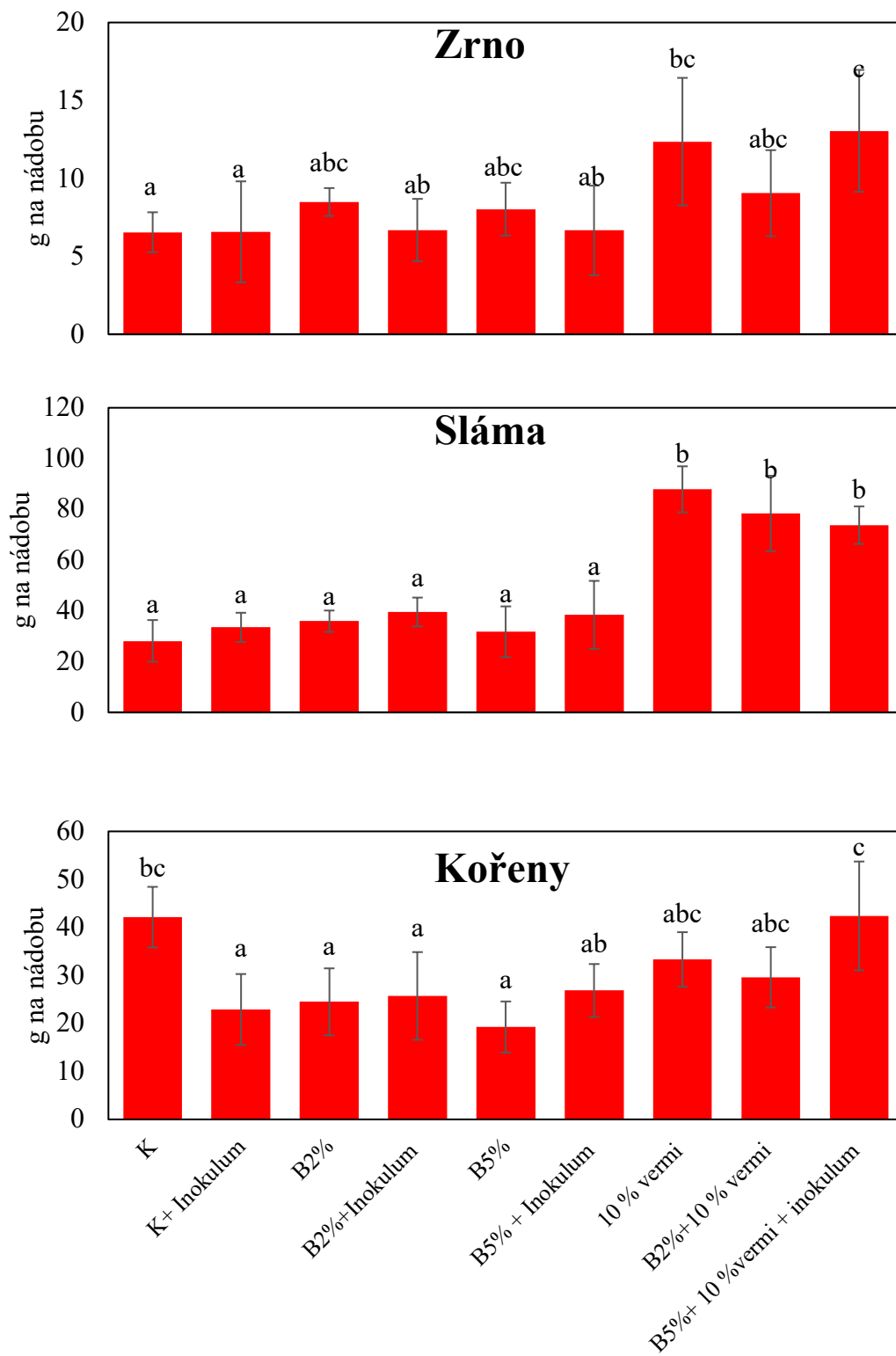


Obrázek č. 6 Foto vybraných průměrných rostlin reprezentujících jednotlivé varianty.

Rozdíly ve výnosu u jednotlivých pokusných variant jsou patrné na Obrázku č. 6. Nejvyšší výnosy zrna byly zaznamenány u variant s 10 % přidavkem vermikompostu a s 10 % přidavkem vermikompostu + B5% a inokulum. V případě aplikace inokula se výnos spíše snižoval. Nebyl prokázán statistický rozdíl mezi oběma dávkami biocharu, tedy B2% a B5% v případě výnosu zrna.

V případě výnosu slámy u kukuřice, nebyl zaznamenán statistický rozdíl u všech variant, kde nebyl aplikován vermikompost. U varianty s 10 % dávkou vermikompostu byl zaznamenán nejvyšší výnos slámy a se zvyšujícím se obsahem biocharu se spíše výnos biomasy snižoval. V případě aplikace inokula nebyl zaznamenán statistický rozdíl, ale hodnoty se lehce zvyšovaly po jeho aplikaci (obrázek č. 7). V případě aplikace pouze vermikompostu, byla hmotnost slámy vyšší oproti aplikaci vermikompostu s 2 % biocharem, jak je patrné i z Obrázku 6.

Nejvyšší hmotnost kořenů byla zaznamenána u kontrolní varianty a pak u varianty (10 % vermikompost+ inokulum). V případě nehnojené kontroly můžeme tento efekt přičíst k tomu, že rostlina dokázala nejméně reagovat na vodní deficit, který byl způsoben a místo toho, aby fotosyntetizovala, začala ukládat své zásobní látky do kořenů. V ostatních případech po aplikaci inokula v kombinaci s biocharem se hmotnost kořenů spíše zvyšovala.



Obrázek č 7. Výnos biomasy kukuřice (g sušiny na nádobu); varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

Obsahy prvků v biomase kukuřice

5.1.6. Vápník

Obsahy vápníku v biomase kukuřice prezentuje obrázek č. 8. V případě obsahu vápníku v zrně se hodnoty zvyšovaly s aplikací biocharu, jelikož samotný biochar obsahuje vysoké koncentrace tohoto prvku (tabulka č. 2). Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány po aplikaci B5% + inokulem a ve variantě 10 % vermikompost + B5% + inokulum, v tomto pořadí nemůže potvrdit, že přidání vermikompostu mezi těmito variantami, mělo pozitivní efekt. Jeliko samotný 10 % vermikompost měl jedny z nejnižších hodnot, ty ale byla zaznamenány u kontrolní (neošetřené varianty). V případě přidání inokula, můžeme potvrdit pozitivní efekt u variant: K+ inokulum, B5% + inokulum. Naopak v případě B2% + inokulem se obsah vápníku snižoval.

Aplikace inokula měla pozitivní vliv na obsah vápníku ve slámě u variant K+inokulum, která měla stejné hodnoty jako 10 % vermikompost, dále pak varianta B2%+ inokulum. V případě vyššího obsahu biocharu, byl efekt inokula spíše potlačen. Ve variantách, kde byl aplikován vermikompost se zvyšujícím obsahem biocharu, projevilo snižujícím trendem v obsahu vápníku.

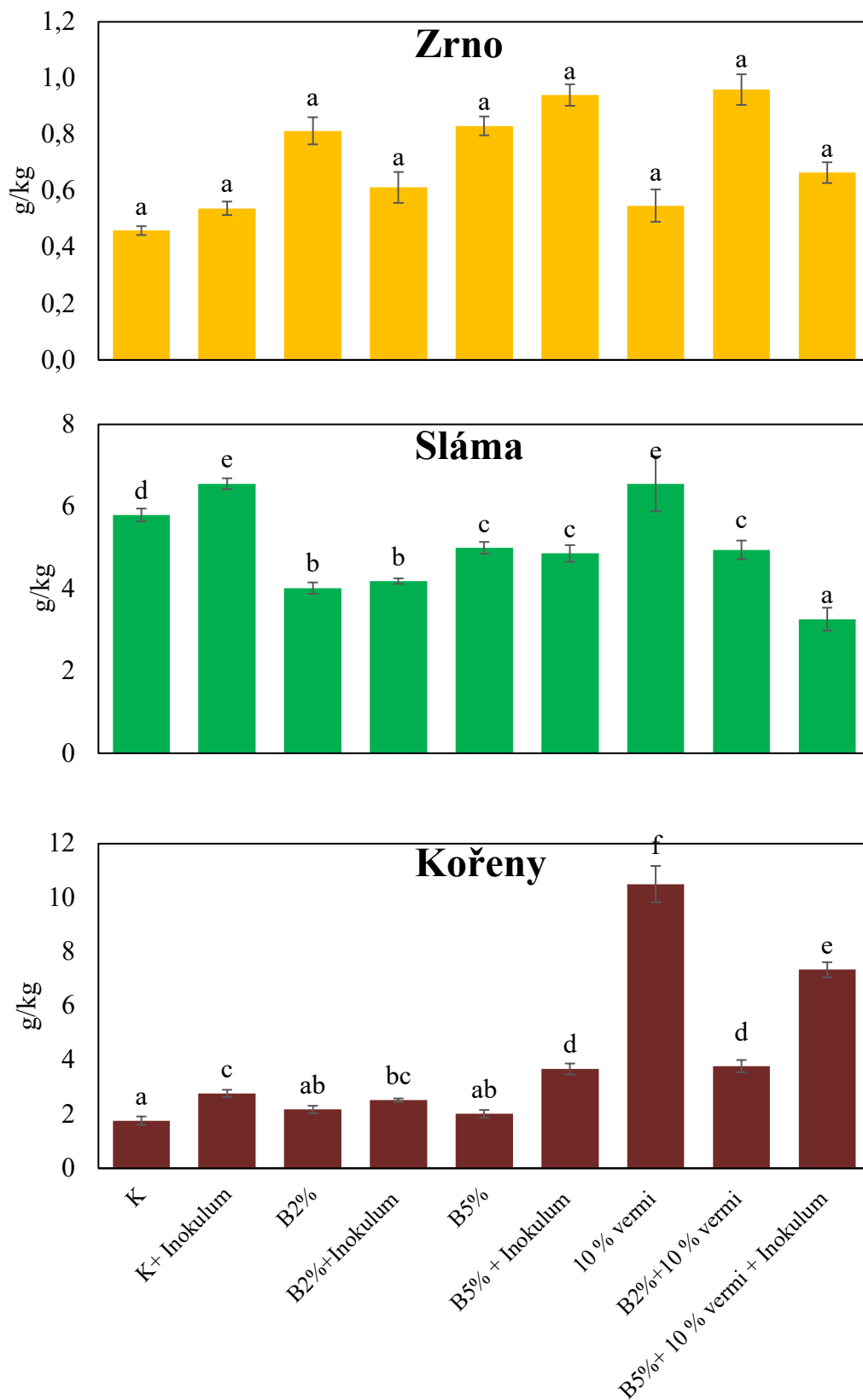
V kořenech byl nejvyšší obsah vápníku byl zaznamenán po aplikaci 10 % vermikompostu, naopak ve variantě 10 % vermikompost a B2% byly hodnoty až 3 x nižší. V tomto případě aplikace inokula s B5% a 10 % vermikompostu, měla pozitivní vliv. Opět se pomocí aplikace inokula zvýšily hodnoty u variant K+ inokulum a B2% + inokulum a v případě B5% byl účinek opačný (obrázek č. 8).

5.1.7. Draslík

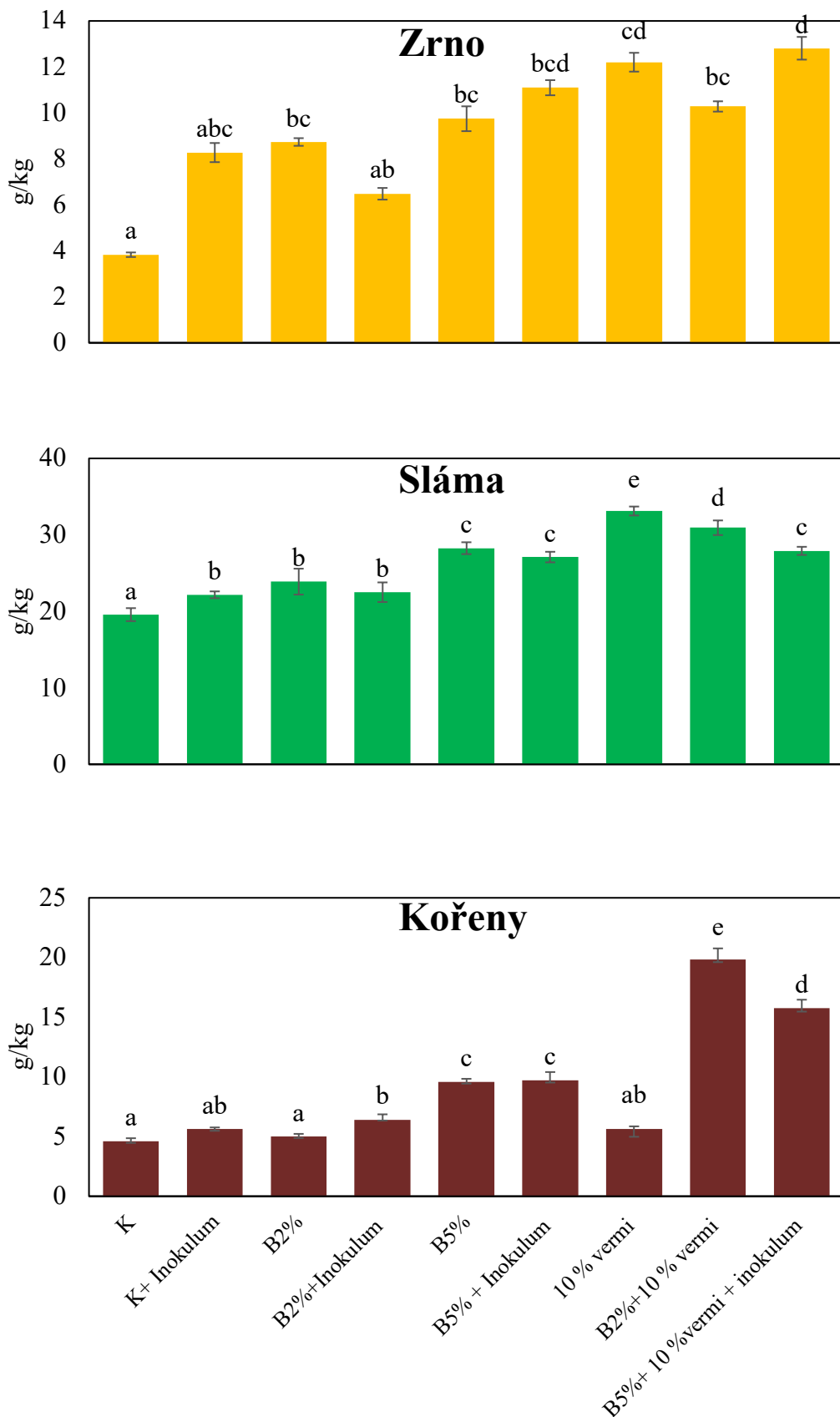
Obsahy draslíku v biomase kukuřice shrnuje obrázek č. 9. Nejnižší obsah draslíku v zrně kukuřice byl naměřen u kontrolní varianty, pak následovala varianta B2% + inokulum. V případě K+ inokula a B5 %+ inokulum měla jeho aplikace pozitivní vliv na obsah draslíku v zrně. Nejvyšší obsah draslíku byl naměřen u varianty s 10 % vermikompostu, to potvrzuje i naše tabulka se vstupními daty (tabulka č. 2) jelikož vermikompost je organické hnojivo bohaté na draslík, v stejném případě je i biochar velice bohatý na obsah draslíku. Proto i nejlépe vyšla varianta 10 % vermikompost+ B5 % biochar + inokulum.

V případě slámy byl nejnižší obsah draslíku opět zaznamenán v kontrolní variantě, aplikace inokulace jeho obsah zvýšila. Ale v kombinaci s biocharem jak v B2% i B5%, byl efekt spíše negativní. Ve variantách s vermikompostem po přidání biocharu se zvýší koncentrací trend snižoval.

V kořenech byl nejvyšší obsah draslíku naměřen ve variantě s dávkou 10 % vermikompostu s B2% 198,39 g/kg s vyšší koncentrací biocharu se jeho obsah spíše snižoval. Nebyl zaznamenán statistický rozdíl mezi 10 % vermikompostem a variantou K+inokulum. V případě neošetřené varianty s inokulem a B2% s inokulem mělo pozitivní vliv na celkový obsah draslíku v kořenech. Mezi B5% a B5% + inokulum nebyl zaznamenán statistický rozdíl.



Obrázek č. 8. Obsah vápníku v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.



Obrázek č. 9 Obsah draslíku v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

5.1.8. Hořčík

Obsahy hořčíku v biomase kukuřice shrnuje obrázek č. 10. Jednoznačně nejnižší obsahy hořčíku v zrně byly naměřeny v kontrolní variantě 8,21 g/kg oproti variantě s 10 % vermikompostu + B5% + inokulum, kde jsme naměřili hodnoty 23,0 g/kg. Mezi variantami s biocharem B2% a B5 % s inokulem nebyl zaznamenán významný rozdíl.

Ve slámě byly nejvyšší hodnoty obsahu hořčíku naměřeny u varianty K+ inokulum a 10 % vermikompost; mezi těmito variantami nebyl naprosto žádný statistický rozdíl. Aplikace inokula měla ve všech případech pozitivní vliv na obsah celkového hořčíku. Mezi kontrolní variantou a 10 % vermikompost + B5% + inokulum nebyl také zaznamenán žádný rozdíl.

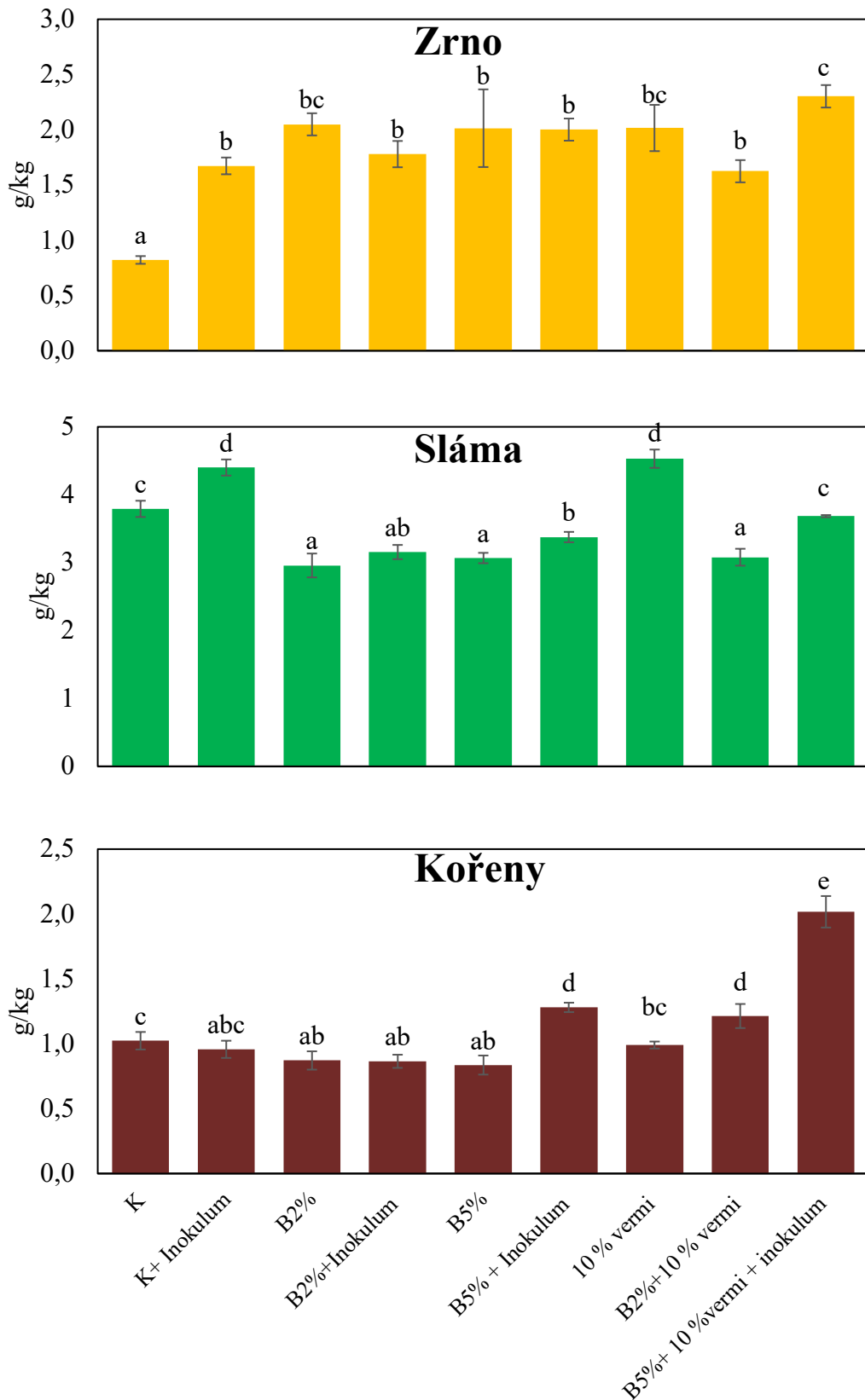
V případě kořenů nebyl zaznamenán statistický vliv jednotlivých opatření u variant B2%, B2% + inokulum a B5 %. Tyto varianty také obsahovaly nejnižší hladiny draslíku. Z hlediska příjmu hořčíku se opět nejlepší variantou jeví kombinace dávky 10 % vermikompostu + B5 % + inokulum.

5.1.9. Fosfor

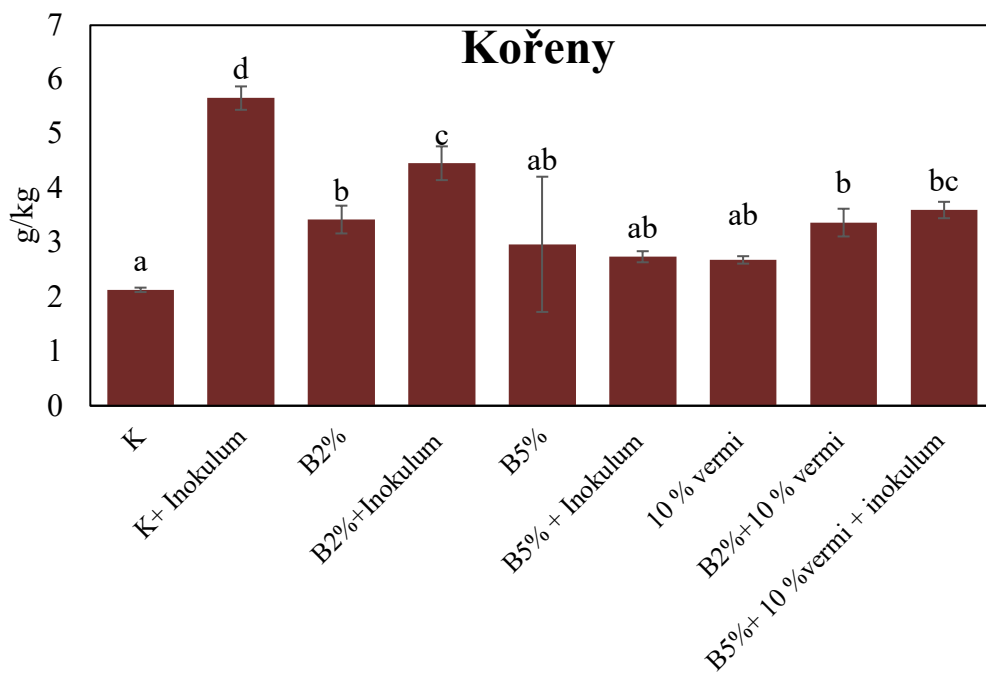
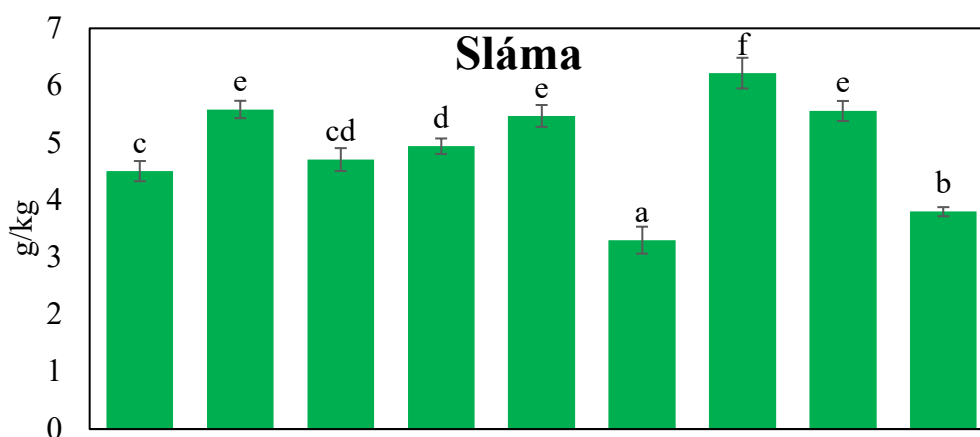
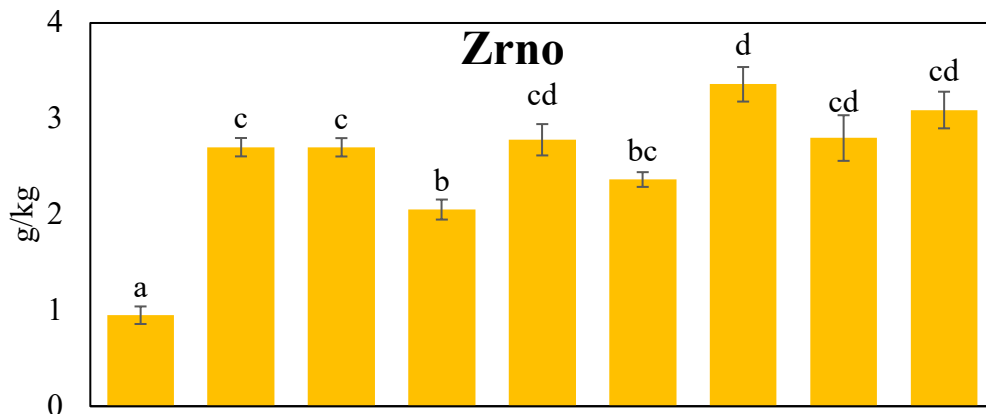
Obsahy fosforu v biomase kukuřice shrnuje obrázek č. 11. Nejvyšší hodnoty obsahu fosforu v zrně byly naměřeny u varianty, kde byl aplikován 10 % vermikompost až 3 x vyšší oproti neošetřené kontrolní variantě. V případě aplikace inokula se pozitivní účinky potvrdily pouze u varianty K+ inokulum, v případě aplikace k biocharu se efekt spíše snižoval. V porovnání varianty B5 % + inokulum a 10% vermikompost + B5% biochar + inokulum se projevil pozitivní efekt přidání vermikompostu.

Varianta s 10 % dávkou vermikompostu měla i v tomto případě nejlepší vliv na celkový obsah fosforu v sušině slámy. Aplikace inokula byla pozitivní ve variantách K+ inokulum a B2 % + inokulum. Se zvyšujícím přídatkem biocharu do substrátu se efekt spíše snižoval. Nebyl zaznamenán statistický rozdíl mezi variantou K+ inokulum, B5 % biochar a 10 % vermikompost + B2 % biochar.

V případě obsahu fosforu v kořenech mělo nejvyšší efekt přidání samotného inokula k zemině, mezi kontrolní variantou a touto variantou byl nejvyšší rozdíl, aplikace inokula zvýšila obsah fosforu až o 250 %. Druhou nejlepší variantou byla aplikace 2 % biocharu s inokulem. Tímto, můžeme potvrdit, že vyšší aplikace biocharu do půdy, už ztrácí účinek na případnou změnu obsahu fosforu v kořenech kukuřice. Nebyl zaznamenán statistický rozdíl mezi B5%, B5% + inokulum a 10 % vermikompostem. Ve variantách, kde byl aplikován vermikompost, jsme naměřili nejlepší výsledky po přidání inokula s kombinací 5% biocharu.



Obrázek č. 10 Obsah hořčičku v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.



Obrázek č. 11 Obsah fosforu v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší

5.1.10. Síra

Obsahy síry v biomase kukuřice shrnuje obrázek č. 12. Nejnižší obsah síry v zrně kukuřice byl zaznamenán v kontrolní nebo neoštržené variantě oproti variantě K+ inokulum, kde jsme naměřili téměř 2 x vyšší hodnoty. Po aplikaci inokula v synergii s biocharu se tento efekt snižoval, nebo nebyl statisticky průkazný. Nebyl zaznamenán žádný pozitivní efekt ve spojení vermikompostu, biocharu a inokula.

V případě slámy byly zaznamenány nejvyšší hodnoty obsahu síry ve variantě s přidáním 10 % vermikompostu s dalším přidáním biocharu do variant, kde byl vermikompost, se obsahy síry významně snižovaly. V případě aplikace inokula se efekt spíše snižoval kromě varianty B5% + inokulum, kde bylo naměřeno nepatrné zvýšení obsahu celkové síry.

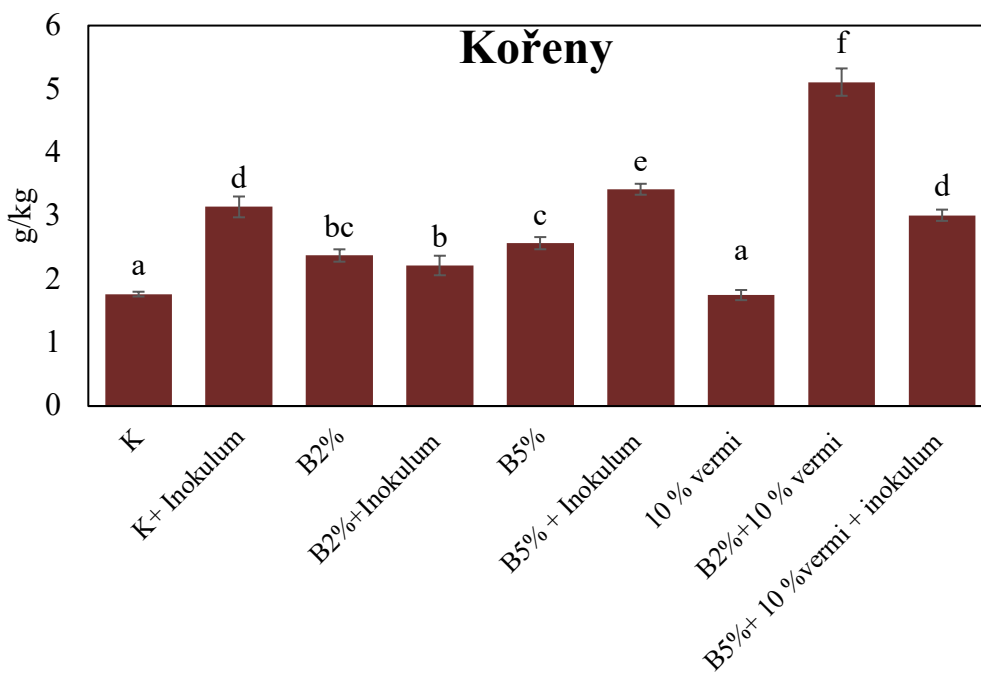
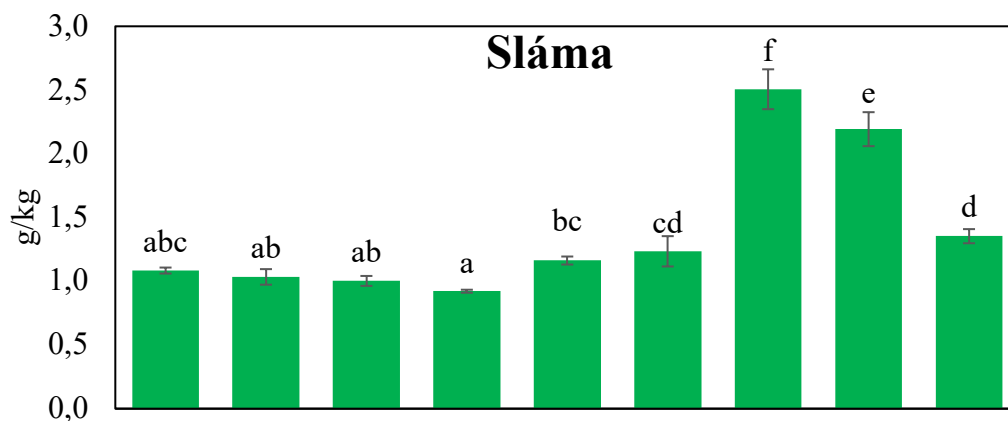
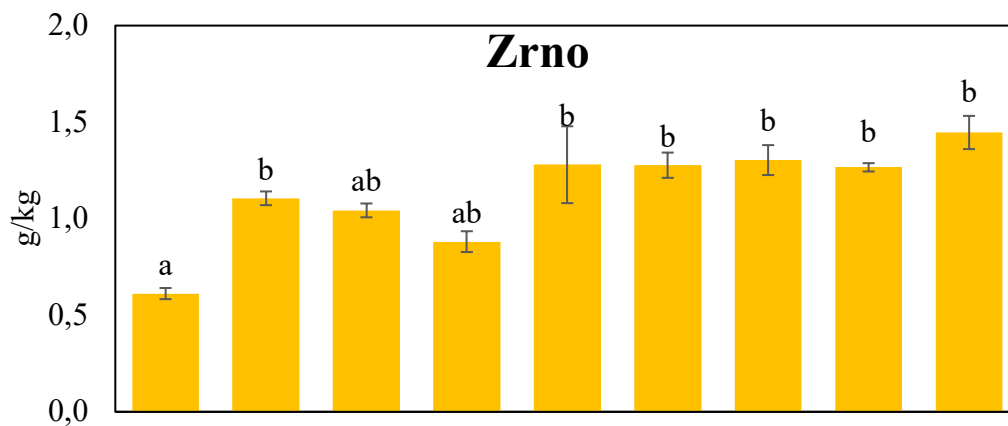
Rozdílný trend byl zaznamenán v případě kořenů, kde byly nejvyšší hodnoty obsahu síry 10 % vermikompostu s přidáním 2 % biocharu, kde byly hodnoty nejvyšší ve srovnání s ostatními variantami. Oproti aplikaci samotnému 10 % vermikompostu, který dosahoval stejných hodnot, jako kontrolní varianta, byly hodnoty až o 300 % vyšší. V případě aplikace inokula byl pozitivní efekt prokázán u variant K+ inokulum a B5% + inokulum, naopak u varianty B2% + inokulum se efekt snižoval. Nebyl prokázán statistický rozdíl mezi variantami K+ inokulum a 10 % vermikompost+ B5%+ inokulum.

5.1.11. Dusík

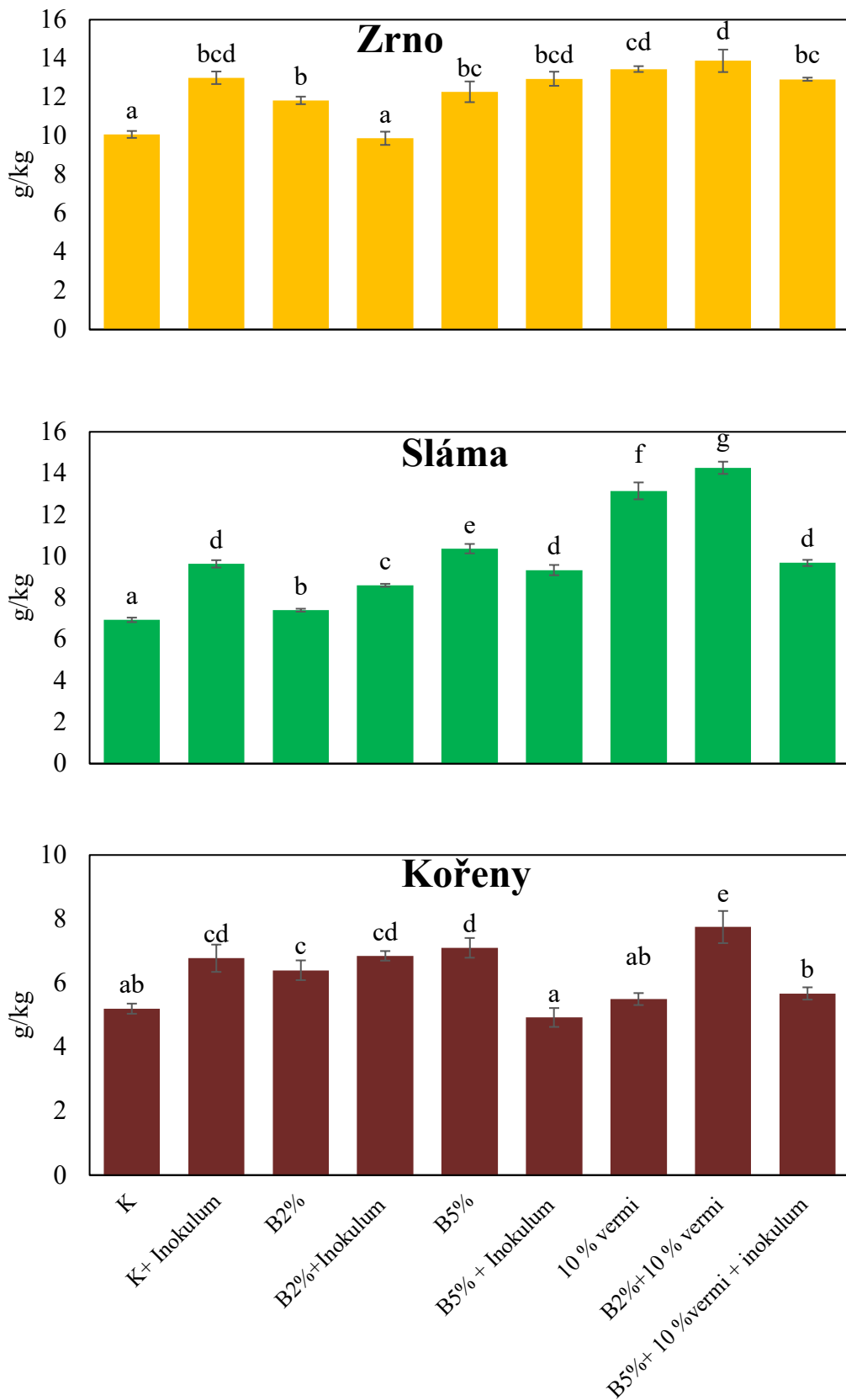
Obsahy dusíku v biomase kukuřice shrnuje obrázek č. 12. V případě obsahu dusíku v zrně kukuřice byly nejnižší hodnoty zaznamenány u kontrolní varianty, kde byly naprosto shodné výsledky s variantou B2%+ inokulum. Nejvyšší obsah byl naopak naměřen u kombinace 10 % vermikompostu + B2 %. Druhou nejlepší variantou byl samotný 10 % vermikompost. Vliv aplikace inokula se opět potvrdila u variant K+inokulum a B5% + inokulum, oproti variantě B2% + inokulum, kde byl efekt aplikace spíše negativní. Z výsledků je patrné, že nejlepší variantou se jeví aplikace 10 % vermikompostu v kombinaci B2 %.

I v případě obsahu dusíku ve slámě byly nejvyšší hodnoty naměřeny po aplikaci 10 % vermikompostu a B2%. Hned v zápětí byl nejlepší variantou vyhodnocen 10 % vermikompost. V případě aplikace inokula se potvrdil pozitivní efekt u variant K+inokulum a B2%+ inokulum. S vyšší aplikací inokula a biocharu se efekt snížil. Nebyl zaznamenán statisticky významný vliv mezi variantou B5% + inokulum a 10 % vermikompostem + B5% + inokulum, z výsledků můžeme tvrdit, že zde aplikace vermikompostu neměla vliv.

V kořenech byly nejvyšší obsahy dusíku naměřeny také u varianty s aplikací 10% vermikompostu + B2%. U kontrolní varianty nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl v porovnání s aplikací 10 % vermikompostu. V případě aplikace inokula byly opět potvrzen pozitivní efekt u variant K+inokulum a B2 % + inokulum, v případě aplikace vyššího obsahu biocharu v kombinaci inokula se efekt opět spíše snižoval, a naopak dosáhl nejnižších hodnot i než u kontrolní varianty. V případě porovnání varianty B5% + inokulum a 10 % vermikompost+ B5% + inokulum, byl významný rozdíl a v tomto případě aplikace vermikompostu měla pozitivní efekt.



Graf č. 12 Obsah síry v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.



Obrázek 12. Obsah dusíku v sušině kukuřice; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně ($\alpha = 0,05$) neliší.

6. Diskuze

Z dosažených výsledků je zřejmý signifikantní efekt přítomného biocharu v dávce 2 % na výslednou produkci biomasy. Přítomnost mykorrhizní symbiózy tento efekt ještě více umocnila (obrázek č. 6). Přítomnost 5 % biocharu naopak inhibovala růst, kdy přítomnost inokula jen nevýznamně zvýšila produkci výsledné biomasy. Přítomnost samotného inokula pak neměla signifikantní vliv na produkci kukuřice. Pokud vezmeme v potaz rozdělení celkové produkce na slámu vs. zrno, tak je zřejmé, že kombinovaná varianta B2% + inokulum vykazuje signifikantně nejvyšší produkci zrna, což má beze sporu svůj významný ekonomický potenciál. K významnému zvýšení produkce biomasy slámy i zrna došlo po aplikaci vermikompostu. Přidání biocharu a vermikompostu do půdy může zvýšit dostupnost půdního anorganického dusíku, který pomáhá rostlině zvýšit její biomasu, pokud jde o výšku rostliny.

I když existuje jen několik dalších srovnatelných studií, některé prokázaly pozitivní dopad na růst kořenů po aplikaci biocharu nebo dřevěného uhlí do půdy (Lehmann & Joseph 2012, Solaiman et al. 2012). To se v našem případě nepotvrdilo, důležitějším faktorem pro zvýšení růstu kořenů byla v našem případě aplikace inokula a vermikompostu, přičemž nejvyšší nárůst biomasy kořenů byl pozorován při společné aplikaci všech tří aditiv.

Kromě toho biochar zlepšuje obsah vody v půdě pro lepší dostupnost živin a současné studie ukávají, že aplikace biocharu může zlepšit půdní podmínky ve srovnání s kontrolou (Nguyen et al. 2017, Chen et al. 2012). Uvádí se, že biochar vyrobený z pilin napomáhá růstu rostlin zlepšením fyzikálně-chemických vlastností půdy, jako je zvýšení retence živin až o 59% a obsah živin v rostlině, což bylo také pozorováno v půdě s úpravou pilin v současné studii, která zlepšila výživu koncentrace v půdě a rostlinách než kontrola (Laghari et al. 2016). Přidání biocharu značně zvyšuje potenciál půdy k podpoře růstu rostlin, jak bylo pozorováno v půdě upravené biocharem, kde byla výška rostlin výrazně vyšší než kontrola zvýšením pórovitosti půdy (De Tender et al. 2016, Mollinedo et al. 2016). Zlepšení výnosu nadzemní biomasy rostlin se v našem případě potvrdilo jen v případě vermikompostu, vliv přídavku biocharu nebyl statisticky průkazný.

Vlastnosti biocharu mohou být ovlivněny podmínkami pyrolýzy, ale i surovinou (Lu et al. 2009). Teplota má vliv i na výsledné množství prvků v biocharu. U těžkých prvků dochází k jejich úbytku se zvyšující se teplotou pyrolýzy, jak je pozorováno například v případě Cd (Domingues et al. 2017). Biochar obecně obsahuje vysoké koncentrace základních živin, tedy N, P a K (Cha et al. 2016). Celkové obsahy živin v biocharu se nerovnajícím množství přímo dostupnému rostlinám (Spokas et al. 2012). Ačkoliv se tedy koncentrace prvků v biocharu s teplotou zvyšuje, neznamená to, že se přístupnost prvků bude také zvětšovat.

Pokud vezmeme v potaz chemický rozbor biomasy rostlin kukuřice, tak varianty na bázi biocharu zvýšily koncentraci N u rostlin kukuřice. U obou kombinovaných variant (tedy biochar + inokulum) je obsah N snížen (oproti variantám pouze s biocharem) a to nejspíše z důvodu příjmu dusíku do samotného mycelia. Varianty s vyšší dávkou biocharu pak vykazovaly vyšší obsahy dusíku. Nejvyšší nárůst obsahu dusíku v nadzemní biomase pak znamenala aplikace vermikompostu. Obecně však platí, že všechny ošetřené varianty vykazují nárůst obsahu dusíku v rostlině oproti kontrolní variantě.

Z hlediska obsahu fosforu v biomase je zřejmé, že všechna opatření vedla ke zvýšení obsahu tohoto prvku v zrnu ve srovnání s kontrolou. Ve slámě ale kombinace inokula a biocharu vedla ke snížení obsahu P v biomase. Co se týká obsahu draslíku, tak zde byl zvýšený obsah pozorován u všech tří variant s aplikací 5% biocharu jak ve srovnání s kontrolou, tak i ve srovnání s aplikací 2 % biocharu. Nejvýznamnější efekt byl opět zaznamenán po aplikaci vermikompostu. Je známo, že přidání biocharu s vermikompostem jako organickou úpravou do zemědělské půdy může zvýšit dostupnost N, P a K v půdě, koloběh živin v půdě a zvýšit produkci plodin (Ramzani et al. 2016). Aplikace biocharu do půdy může výrazně zvýšit nitrifikaci (Li et al. 2019) tím, že po delší dobu drží dusíkaté živiny v půdě blízko kořenové zóny (Kaya et al. 2006). Nejvyššího příjmu N, P a K u pšenice dosáhli Gul et al. (2015) u rostlin ošetřených synergickou aplikací vermikompostu a biocharu při třech úrovních zavlažování ve srovnání s aplikací obou aditiv jednotlivě. To lze připsat vysokému obsahu těchto minerálů v biocharu aplikovaném do půdy (Agegnehu et al. 2017), záleží ale na konkrétním typu použitého biocharu.

Naproti tomu Hashem et al. (2019) uvedli, že po aplikaci biocharu jako půdního aditiva použitého v experimentu významně poklesly hodnoty koncentrace dusíku a fosforu v zelených částech a kořenech rostliny cizrný pěstované pod vodním stresem. Řada autorů se shoduje, že aplikace biocharu bohatého živinami nemusí vést ke zvýšení příjmu prvků testovanými plodinami. Pokles hladin živin v rostlinách kukuřice se zvyšováním dávek biocharu může také souviset s vyšší produkcí sušiny v půdě ošetřené biocharem. Smider & Singh (2014) pozorovali podobné chování koncentrací K, S, Zn, Cu a Fe v kukuřici. Efekt ředění nastává, když je relativní nárůst produkce sušiny větší než příjem živin (Maia et al. 2005). Naproti tomu po aplikaci vermikompostu zaznamenáváme jak zvýšený nárůst biomasy, tak i zvýšený příjem sledovaných živin rostlinami kukuřice.

Gunes et al. (2014) uvádějí, že aplikace biocharu obohaceného fosforem zvýšila koncentrace N, P a K v hlávkovém salátu (*Lactuca sativa* L.). Také Şahin et al. (2016) zkoumali účinek aplikace biocharu obohaceného fosforem do půdy s nízkým obsahem organické hmoty na vývoj rostliny hlávkového salátu a zjistili, že koncentrace dusíku se zvyšuje v rostlině s aplikací biocharu. Nejvyšší hodnota byla získána v koncentraci B2% s aplikací biocharu který byl obohacený hnojem. Tanure et al. (2019) zkoumali dopad aplikace biocharu na růst rostlin kukuřice. Zjistili, že s vyšším procentuální aplikací biocharu se zvýšila koncentrace P u rostlin. Aplikace biocharu v různých dávkách obecně zvyšuje koncentraci K, to je patrné i v našem případě. Také Sönmez & Çiğ (2019) uvedli, že zvyšující se dávky biocharu zvyšovaly koncentraci draslíku v kořenech cukrové řepy. Bagheri et al. (2019) testovali čtyři různé koncentrace biocharu, který byl vyroben z palmových listů, a zjistili, že v rostlinách melounu (*Cucumis melo* L.), se zvýšila koncentrace N, P a K.

V případě vápníku docházelo při aplikaci biocharu (s i bez aplikovaného inokula) ke snížení jeho obsahu v biomase. Naopak v přítomnosti samotného inokula a také vermikompostu byl příjem vápníku do rostlin signifikantně vyšší. Podobná tendence je pozorována i u hořčiku. V případě síry bylo pozorováno signifikantní zvýšení příjmu tohoto prvku u variant ošetřených vermikompostem. Langeroodi et al. (2019) prezentovali odlišně úrovně závlivky (45 %, 60%, 75% a 90%) a čtyři různé dávky biocharu (0, 5, 10 a 20 t biocharu/ha) u rostliny dýně. Zkoumali jejich dopad na příjem živin a fyziologické vlastnosti rostlin. Uvedli, že koncentrace Mg se zvyšuje se zvyšujícími se dávkami biocharu a nejvyšší koncentrace Mg byla stanovena při

dávce 20 tun/ha biocharu při střední úrovni vodního stresu. Poormansour et al. (2019) uvedli, že zvyšující se úrovně biocharu pšeničné slámy aplikováno (0%, 1,25%, 2,5%, 3,75% a 5% hm.) na fazole v různých úrovních zavlažování (100%, 75%, a 50% potřeby vody) zvyšují koncentraci dostupného Ca a Mg v půdě. To v našem případě jednoznačně potvrzeno nebylo.

Podle odhadu může více než 80% rhizosférických bakterií produkovat chemikálie podporující růst a zvyšovat výšku rostlin, což je například potvrzeno u rostlin inokulovaných bakteriemi zvyšujícími rozpustnost fosforu zvýšením délky kořenů a výhonků ve srovnání s kontrolou (Arruda et al. 2013). Kombinace bakterií a biocharu pro růst rostlin byla označena jako slibný přístup. Podobné výsledky jsou sledovány v této studii, kde je kombinace bakterií zvyšujících rozpustnost fosforu a biocharu účinnější pro zvýšení růstu rostlin než jediná aplikace bakterií zvyšujících rozpustnost fosforu nebo biocharu. Přidáním biocharu se podporuje aktivita půdního mikrobiomu, který svými exudáty zvyšuje dostupnost živin pro růst rostlin a produkci biomasy (De Tender et al. 2016, Shanta et al. 2016). Zvýšení výšky rostlin lze přičíst v tomto případě zvýšené dostupnosti živin, jako je N a P.

Vliv arbuskulárních mykorhizních hub (AMF) na dostupnost živin v půdě ošetřené biocharem je znám. Například Nursyamsi & Setyorini (2009) zaznamenali, že aplikace biocharu a očkování AMF významně ovlivnila celkový obsah N, P a K v půdě a zároveň zlepšila rovnováhu rozpustných a adsorbovaných makroživin v půdě. Významný účinek biocharu a jeho interakce s AMF na zvýšení celkové půdy P pravděpodobně souvisí s velkou plochou povrchu biocharu (400-800 m²/g půdy), která vytváří vhodné médium pro rozvoj a aktivitu půdních mikroorganismů. Tato zvýšená aktivita pak vede ke zvýšení dostupnosti půdního P (Fischer & Glaser 2012).

Rovněž Pamun et al. (2013) zaznamenali, že AMF může zvýšit absorpci P v kukuřici na 300 kg P/ha a také zvýšit dostupnost P v půdě. Kuyper et al. (2004) uvedli, že environmentální faktory ovlivňují vývoj kolonizací mykorhizních hub u kořenů rostlin, zejména v různých podmínkách aplikace biocharu u rostlin na mykorhizní růst v přirozeném prostředí. Počet spór AMF po aplikaci biocharu hodnotili například Baon et al. (2008), kteří jako důležitý faktor ovlivňující rozvoj AMF označili teplotu. Teplota výrazně ovlivnila vývoj mykorhizy a následně míru interakce mezi vývojem mykorhizy a příjmem P hostitelskou rostlinou. Druhy AMF identifikované v jejich studii pak byly *Glomus* sp, *Gigaspora*, *Scutellospora* a *Acaulospora*. Tedy podobné složení AMF, které popsali v podobné studii i Haerida & Karmadibrata (2002)

Jiné studie již tak jednoznačné výsledky neposkytují. Major et al. (2010) ukázali, že po aplikaci biocharu se dostupné živiny sorbovaly na biochar a AMF tento stav významně neovlivnila. Nevýznamné zvýšení dostupného podílu P pravděpodobně souviselo s relativně vysokým pH půdy. Zwieten et al. (2010) pak konstatují, že biochar má potenciál pro růst rostlin v kyselých půdách, kde se prvky jako Al stávají limitujícím faktorem růstu rostlin, ale nikoli v půdách zásaditých. V našem případě byla použita půda mírně kyselá (pH 6,1), po aplikaci zásaditého biocharu můžeme očekávat zvýšení hodnoty pH půdy, v závislosti na dávce biocharu. To je, společně se sorpčními vlastnostmi biocharu, pravděpodobně důvodem toho, že významnější změny v příjmu P rostlinami byly zaznamenány po aplikaci nižší dávky biocharu.

7. Závěr

- V práci byl sledován v modelovém nádobovém pokusu vliv aplikace vysokoteplotního biocharu na mobilitu a dostupnost živin v půdě. Zároveň byl sledován a) vliv aplikace biocharu, který je zdrojem dostupných živin a b) vliv arbuskulární mykorrhizy, která může vést k mobilizaci živin v půdě i v biocharu, na dostupnost živin v půdě ošetřené biocharem.
- Přítomnost biocharu v půdě zlepšila její retenční vlastnosti. Biochar také zvýšil přístupnost K, Ca a S, což je do jisté míry zapříčiněno signifikantními obsahy těchto živin v samotném biocharu. Přítomnost inokula v půdě zvýšila přístupnost fosforu. Aplikace 5% biocharu však inhibovala růst kukuřice seté (*Zea mays*), zatímco dávka 2% biocharu naopak významně zvýšila produkci této zemědělské plodiny. Přítomnost inokula v případě 2% aplikace biocharu ještě navýšila produkci (především obilek) proti biocharem ošetřené variantě bez inokulace.
- Chemický rozbor biomasy poukázal na zvýšení obsahu dusíku u všech variant ošetřených přednostně biocharem a zvýšení obsahu fosforu u všech variant ošetřených přednostně inokulem. Přítomnost biocharu v obou dávkách pak měla pozitivní dopad na nativní mykorrhizní symbiózu stejně tak jako na provedenou inokulaci arbuskulární houbou *Glomus intraradices*.
- Z výsledků je patrné, že pokud do vermikopostu přidáme 5 % biochar, snížíme příjem prvků rostlinou. Proto se varianta 10 % vermikopost a 2 % biochar jeví jako nejlepší variantou pro polní aplikaci. S vyšším procentuálním zastoupením biocharu, se spíše prokázal negativní efekt biocharu na mobilitu živin v půdě, kdy pravděpodobně došlo k sorpci dostupných živin na biochar vzhledem k jeho vynikajícím sorpčním vlastnostem.
- Ze všech provedených měření tedy jednoznačně vyplývá, že přítomnost biocharu má pozitivní vliv na rozvoj inokulace arbuskulární mykorrhizou kořenů kukuřice seté. Nejvhodnější variantou pro následnou polní/průmyslovou aplikaci se jeví varianta B2% + Inokulum, a to z důvodů: 1) signifikantního zvýšení retence vody a přístupnosti jednotlivých živin; 2) nejvyšší produkce biomasy (především obilek) a nárůstu obsahu živin (především N a K); a 3) úspěšné kolonizace kořenů kukuřice seté arbuskulární mykorrhizou. Samotný biochar má navíc pozitivní dopad na kolonizaci kořenů nativní mykorrhizou.

8. Literatura

- Adhikari BN, Joshi BP, Shrestha J, Bhatta NR. 2018. Genetic variability, heritability, genetic advance and trait association study for yield and yield components in advanced breeding lines of wheat. *Nepalese Journal of Agricultural Sciences* **17**: 229-238.
- Agegnehu G, Srivastava AK, Bird MI. 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review. *Applied Soil Ecology*, **119**: 156–170.
- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE., Zhang M, Bolan N, Mohan D, Ok YS. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water. *Chemosphere*. **99**: 19-33.
- Ahmed N, Chowdhry MA, Khaliq I, Maekawa M. 2016. The inheritance of yield and yield components of five wheat hybrid populations under drought conditions. *Indonesian Journal of Agricultural Science*. **8**(2): 53-59.
- Amon B, Kryvoruchko V, Amon T, Zechmeister-Boltenstern S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, ecosystems & environment*. **112**(2-3): 153-162.
- Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, Machmüller A, Hopfner-Sixt K, Bodiroza V, Zollitsch W. 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource technology*. **98**(17): 3204-3212.
- Amossé C, Jeuffroy MH, David C. 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. *Field Crops Research*. **145**: 78-87.
- Argus JL, Slafer GA, Royo C, Serret MD. 2008. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Critical Reviews in Plant Science*. **27**(6): 377-412.
- Arruda L, Beneduzi A, Martins A, Lisboa B, Lopes C, Bertolo F, Vargas L K. 2013. Screening of rhizobacteria isolated from maize (*Zea mays* L.) in Rio Grande do Sul State (South Brazil) and analysis of their potential to improve plant growth. *Applied soil ecology*. **63**: 15-22.
- Atiyeh RM, Arancon NQ, Edwards CA, Metzger JD. 2002. The influence of earthworm-processed pig manure on the growth and productivity of marigolds. *Bioresource technology*. **81**(2): 103-108.
- Baghaei B, Skrifvars M. 2020. All-Cellulose Composites: A Review of Recent Studies on Structure, Properties and Applications. *Molecules*. **25**(12): 2836.
- Bagheri S, Hassandokht MR, Mirsoleimani A, Mousavi A. 2019. Effect of palm leaf biochar on melon plants (*Cucumis melo* L.) under drought stress conditions. *Advances in Horticultural Science*. **33**(4): 593–603.
- Baon JB, Smith SE, Alston AM. 2008. Phosphorus uptake and growth of barley as affected by soil temperature and mycorrhizal infection. *Journal of Plant Nutrition* **17**: 479-492.

- Barrow CJ. 2012. Biochar potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography*. **34**: 21-28.
- Bentsen NS, Møller IM (2017). Solar energy conserved in biomass: Sustainable bioenergy use and reduction of land use change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **71**. 954-958.
- Blanco H, Lal R. 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Science Business Media. London.
- Borchard A, Schwappach DL, Barbir A, Bezzola P. 2012. A systematic review of the effectiveness, compliance, and critical factors for implementation of safety checklists in surgery. *Annals of surgery*. **256**(6): 925-933.
- Bronick CJ, Lal R. 2005. Soil structure and management. A review. *Geoderma*. **124**(1-2): 3-22.
- Carrasquero-Durán A, Flores I. 2006. Effect of black tea, garlic and onion on corn oil stability and fatty acid composition under accelerated oxidation. *International journal of food science & technology*. **41**(3). 243-247.
- Clough TJ, Condon LM. 2010. Biochar and the nitrogen cycle introduction. *Journal of environmental quality*. **39**(4): 1218-1223.
- Clough TJ, Condon LM, Kammann C, Müller C. 2013. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*. **3**(2): 275-293.
- Cornelissen G, Gustafsson Ö, Bucheli TD, Jonker MT, Koelmans AA, van Noort PC. 2005. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. *Environmental science & technology*. **39**(18): 6881-6895.
- Český statistický úřad. 2018. Vesmír. Available from https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2019/cislo-4/prehlizena-promena-zemedelstvi.html?fbclid=IwAR20gp4RmmEi3nOYTM2vKqGUKf-XwIPCcvkToKSf_Y-zpjUo6SWqXMBomwM (accessed April 2021).
- Day JW, Moerschbaecher M, Pimentel D, Hall C, Yanez-Arancibia A. 2014. Sustainability and place: How emerging mega-trends of the 21st century will affect humans and nature at the landscape level. *Ecological Engineering*. **65**: 33-48.
- De Tender C, Haegeman A, Vandecasteele B, Clement L, Cremelie P, Dawyndt P, Maes M, Debode J. 2016. Microbiome dynamics of the strawberry rhizosphere in response to infection by biochar and *Botrytis cinerea* bacteria. *Front. Microbiol.*
- Dimkpa CO, Merten D, Svatoš A, Büchel G, Kothe E. 2009. Siderophores mediate reduced and increased uptake of cadmium by *Streptomyces tendae* F4 and sunflower (*Helianthus annuus*) respectively. *Journal of Applied Microbiology*. **107**(5): 1687-1696.
- Doan TT, Bouvier C, Bettarel Y, Bouvier T, Henry-des-Tureaux T, Janeau JL, Jouquet P. 2014. Influence of buffalo manure, compost, vermicompost and biochar amendments on bacterial and viral communities in soil and adjacent aquatic systems. *Applied Soil Ecology*. **73**: 78-86.

- Doan TT, Ngo PT, Rumpel C, Van Nguyen B, Jouquet P. 2013. Interactions between compost, vermicompost and earthworms influence plant growth and yield: A one-year greenhouse experiment. *Scientia Horticulturae*. **160**: 148-154.
- Doan TT, Ngo PT, Rumpel C, Nguyen BV, Jouquet P. 2013. Interactions between compost, vermicompost and earthworms influence plant growth and yield: a one year greenhouse experiment. *Scientia Horticulturae*. **160**: 148–154.
- Domingues RR, Trugilho PF, Silva CA, Melo ICNA, Melo LCA, Magriotis ZM. 2017. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE*. **12**: e0176884.
- Doornbos RF, van Loon LC, Bakker PA. 2012. Impact of root exudates and plant defense signaling on bacterial communities in the rhizosphere. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. **32**(1): 227-243.
- Edwards CA, Dominguez J, Aranconl NQ. 2004. The influence of vermicomposts on plant growth and pest incidence. 18.
- Erlacher A, Cardinale M, Grosch R, Grube M, Berg G. 2014. The impact of the pathogen *Rhizoctonia solani* and its beneficial counterpart *Bacillus amyloliquefaciens* on the indigenous lettuce microbiome. *Frontiers in mikrobiology*. **5**: 175.
- Farrell KE, Callister RJ, Keely S. 2014. Understanding and targeting centrally mediated visceral pain in inflammatory bowel disease. *Frontiers in pharmacology*. **5**: 27.
- Feller C, Blanchart E, Bernoux M, Lal R, Manlay R. 2012. Soil fertility concepts over the past two centuries: the importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries. *Archives of Agronomy and Soil Science*. **58**: S3-S21.
- Fischer D, Glaser B. 2012. Synergisms Between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration “Management of Organic Waste”. Institute of Agricultural and Nutritional Sciences. Soil Biogeochemistry Halle. Germany.
- Garg P, Gupta A, Satya S. 2006. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Bioresource technology*. **97**(3): 391-395.
- Gobin A. 2012. Impact of heat and drought stress on arable crop production in Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **12**(6): 1911-1922.
- Gul S, Whalen JK, Thomas BW, Sachdeva V, Deng HY. 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **206**: 46–59.
- Gunes A, Inal A, Taskin MB, Sahin O, Kaya EC, Atakol A. 2014. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. *Soil Use and Management*. **30** (2): 182–88.
- Gutiérrez-Miceli FA, Santiago-Borraz J, Molina JAM, Nafate CC, Abud-Archila M, Llaven MAO, Dendooven L. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Bioresource Technology*. **98**(15): 2781-2786.

- Haerida I, Kramadibrata K. 2002. Identification of arbuscular mycorrhizal fungi in sweet maize plant rhizosphere of Java. *Floribunda Jurnal.* **2**: 33-37.
- Hashem A, Kumar A, Al-Dbass AM, Alqarawi AA, Al-Arjani AF, Singh G, Farooq M, Abd_Allah EF. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi Journal of Biological Sciences.* **26**(3): 614–24.
- Haygarth PM, Ritz K. 2009. The future of soils and land use in the UK soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy.* **26**: 187–197.
- Hruška K. 1962. An attempt at a phenomenological interpretation of the influence of a polarizing field on piezoelectric resonators. *Czechoslovakij fiziceskij zurnal B.* **12**(5): 338-353.
- Chen B, Chen Z. 2009. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere.* **76**(1): 127-133.
- Cheng X, Yu X, Xing Z, Wan J. 2012. Enhanced photocatalytic activity of nitrogen doped TiO₂ anatase nano-particle under simulated sunlight irradiation. *Energy Procedia.* **16**: 598-605.
- Choudhary DK, Johri BN. 2009. Interactions of *Bacillus* spp. and plants—with special reference to induced systemic resistance (ISR). *Microbiological research.* **164**(5): 493-513.
- International Biochar initiative. 2014. IBI. Available from <https://biochar-international.org> (accessed January 2021).
- Ievinsh G. 2011. Vermicompost treatment differentially affects seed germination, seedling growth and physiological status of vegetable crop species. *Plant growth regulation.* **65**(1): 169-181.
- John RP, Anisha GS, Nampoothiri KM, Pandey A. 2011. Micro and macroalgal biomass a renewable source for bioethanol. *Bioresource technology.* **102**(1): 186-193.
- Jouquet EP, Bloquel E, Doan TT, Ricoy M, Orange D, Rumpel C, Duc TT. 2011. Do compost and vermicompost improve macronutrient retention and plant growth in degraded tropical soils. *Compost science & utilization.* **19**(1): 15-24.
- Juwarkar AA, Nair A, Dubey KV, Singh SK, Devotta S. 2007. Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere.* **68**(10): 1996-2002.
- Juwarkar AA, Yadav SK, Kumar P, Singh SK. 2008. Effect of biosludge and biofertilizer amendment on growth of *Jatropha curcas* in heavy metal contaminated soils. *Environmental monitoring and assessment.* **145**(1): 7-15.
- Kaya C, Tuna L, Higgs D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition.* **29**, 1469–1480.
- Kibblewhite MG, Ritz K, Swift MJ. 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences.* **363**(1492): 685-701.
- Kimetu JM, Lehmann J. 2010. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents. *Soil Research.* **48**(7): 577-585.

- Kizos T, Koulouri M. 2006. Agricultural landscape dynamics in the Mediterranean. Lesvos (Greece) case study using evidence from the last three centuries. *Environmental science & policy*. **9**(4): 330-342.
- Kloepper JW, Leong J, Teintze M, Schroth MN. 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*. **286**(5776): 885-886.
- Kumar SN, Kumar CSP, Srihari E, Kancharla S, Srinivas K, Shrivastava S, Rao VJ. 2014. First total synthesis of fuzanins C, D and their analogues as anticancer agents. *RSC Advances*. **4**(16): 8365-8375.
- Kuyper TW, Cardoso IM, Onguene NA, Murniati van Nordwijk M. 2004. Managing mycorrhiza in Tropical Multispecies Agroecosystems. In M. van Nordwijk G. Cadisch dan CK Ong. *Below Ground Interactions in Tropical Agroecosystems*. CAB International.
- Laghari M, Hu Z, Mirjat MS, Xiao B, Tagar AA, Hu M. 2016. Fast pyrolysis biochar from sawdust improves the quality of desert soils and enhances plant growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. **96**(1): 199-206.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*. **220**(1-3): 242-258.
- Lal R. 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. **363**(1492): 815-830.
- Langeroodi ARS, Campiglia E, Mancinelli R, Radicetti E. 2019. Can biochar improve pumpkin productivity and its physiological characteristics under reduced irrigation regimes. *Scientia Horticulturae* **247**: 195–204.
- Larcher W. 1995. Photosynthesis as a tool for indicating temperature stress events. In *Ecophysiology of photosynthesis*. Springer. Berlin Heidelberg.
- Lehmann J, Joseph S. 2012. *Biochar for environmental management. Science and technology*. Routledge.
- Lehmann J, Silva JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin, fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and soil*. **249**(2): 343-357.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*. **11**(2): 403-427.
- Li Z, Song Z, Singh B, Wang H. 2019. The impact of crop residue biochars on silicon and nutrient cycles in croplands. *Science of the Total Environment*. **659**: 673–680.
- Liebman M, Davis AS. 2000. Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed research oxford*. **40**(1): 27-48.
- Lu Q, Li W, Zhu X, 2009. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. *Energy Conversion and Management*. **30**: 1479–1493.
- Lugtenberg B, Kamilova F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of mikrobiology*. **63**: 541-556.

- Lv B, Xing M, Yang J, Qi W, Lu Y. 2013. Chemical and spectroscopic characterization of water extractable organic matter during vermicomposting of cattle dung. *Bioresource technology*. **132**: 320-326.
- Maia CE, Morais ERC, De Filho FDQP, Gueyi HR. 2005. Teores foliares de nutrientes em meloeiro e de nutriente irrigado com águas de di-ferentes salinidades. *Rev. Bras. Eng. Agric. Okolní*. **9**: 292-295.
- Major J, Rondon M, Molina D, Riha S, Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Columbian savanna Oxisol. *Plant and Soil*. **333**: 117–128.
- Markou G, Wang L, Ye J, Unc A. 2018. Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds. Contamination risks and biomass safety concerns. *Biotechnology advances*. **36**(4): 1238-1254.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 Soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun Soil Sci Plant Anal*. **15**: 1409-1416.
- Ministerstvo zemědělství. 2015. Situační a výhledová zpráva. Půda. Report on current and anticipated state of soil. Praha.
- Mirza MMQ. 2003. Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt. *Climate policy*. **3**(3): 233-248.
- Mohan D, Sarswat A, Ok YS, Pittman Jr CU. 2014. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review. *Bioresource technology*. **160**: 191-202.
- Mollinedo J, Schumacher TE, Chintala R. 2016. Biochar effects on phenotypic characteristics of “wild” and “sickle” *Medicago truncatula* genotypes. *Plant and Soil*. **400**(1-2): 1-14.
- Navas-Lopez, JF, León L, Rapoport HF, Moreno-Álías I, Lorite IJ, de la Rosa R. 2019. Genotype, environment and their interaction effects on olive tree flowering phenology and flower quality. *Euphytica*. **215**(11): 1-13.
- Neumann G. 2016. Re-plant problems in long-term no-tillage cropping systems: causal analysis and mitigation strategies. Doctoral dissertation. Universität Hohenheim.
- Ngo PT, Rumpel C, Ngo QA, Alexis M, Vargas GV, Gil MDLLM, Jouquet P. 2013. Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost, vermicompost and their mixture with biochar. *Bioresource technology*. **148**: 401-407.
- Nguyen TTN, Xu CY, Tahmasbian I, Che R, Xu Z, Zhou X, Bai SH. 2017. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen a review and meta-analysis. *Geoderma*. **288**: 79-96.
- Nortcliff S. 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **88**(2): 161–168.
- Novak J, Lima I, Xing B, Gaskin J, Steiner C, Das K, Schomberg H. 2009. Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and Their Effects on a Loamy Sand. *Annals of Environmental Science*. **3**: 195–206.

- Novák J, Skalický M, Hakl J, Hejnák V, Steklová J. 2008. The effect of mowing on the presence of weeds and ruderal species in a natural compensation area. *Journal of plant diseases and protection*. 431-435.
- Nursyamsi D, Setyorini D. 2009. Availability of P in neutral and alkaline soils. *Journal of Soil and Climate*. **30**: 1-12.
- Pamuna K, Darman S, Patadungan YS. 2013. Effects of SP-36 fertilizer and arbuscular mycorrhizal fungi on uptake of P by maize grown on an Oxic Distrudept of Lemban Tongoa. *Journal of Agrotekbis*. **1**: 9-14.
- Papathanasiou F, Papadopoulou I, Tsakiris I, Tamoutsidis E. 2012. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Food Agric. Environ*. **10**(2): 677-682.
- Pereira LS, Oweis T, Zairi A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural water management*. **57**(3): 175-206.
- Pieterse CM, Zamioudis C, Berendsen RL, Weller DM, Van Wees SC, Bakker PA. 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual review of phytopathology*.
- Poláková J, Janků J, Nocarová M. 2018. Soil erosion, regulatory aspects and farmer responsibility, assessing cadastral data. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*. **68**(8): 709-718.
- Poormansour S, F Razzaghi, Sepaskhah AR. 2019. Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of faba bean in a sandy loam soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **50** (15): 1799–810.
- Pramanik P, Ghosh GK, Banik P. 2009. Effect of microbial inoculation during vermicomposting of different organic substrates on microbial status and quantification and documentation of acid phosphatase. *Waste Management*. **29**(2): 574-578.
- Ramzani PMA, Iqbal M, Kausar S, Ali S, Rizwan M, Virk ZA. 2016. Effect of different amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth, yield, nutrient uptake and grain quality in Ni-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*. **23**(18): 18585-18595.
- Roberts CM. 2010. *The dissertation journey: A practical and comprehensive guide to planning, writing, and defending your dissertation*. Corwin Press.
- Roy RN, Finck A, Blair GJ, Tandon HLS. 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*. **16**: 368.
- Şahin Ö, Taşkın MB, Kaya EC, Taşkın H. 2016. Fosfor ile Zenginleştirilmiş Biyokömürün Marul Bitkisinin (*Lactuca sativa* L. cv. Maritima) Gelişimi ve Mineral Element Konsantrasyonu Üzerine Etkisi. *Çukurova Tarım Ve Gıda Bilimleri Dergisi*. **31**(3): 101–07.
- Seufert V. 2012. Organic agriculture as an opportunity for sustainable agricultural development. *Research to Practice Policy Briefs, Policy Brief*. **13**.

- Shackley S, Carter S, Knowles T, Middelink E, Haefele S, Sohi S, Haszeldine S. 2012. Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy*. **42**: 49-58.
- Shanta N, Schwinghamer T, Backer R, Allaire SE, Teshler I, Vanasse A, Smith DL. 2016. Biochar and plant growth promoting rhizobacteria effects on switchgrass (*Panicum virgatum* cv. Cave-in-Rock) for biomass production in southern Québec depend on soil type and location. *Biomass and Bioenergy*. **95**: 167-173.
- Shipley B, Meziane D. 2002. The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation. *Functional Ecology*. **16**(3): 326-331.
- Schmidt HP, Pandit BH, Martinsen V, Cornelissen G, Conte P, Kammann CI. 2015. Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. *Agriculture*. **5**(3): 723-741.
- Schmidt H. 2010. 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. *Journal für Terroirwein und Biodiversität*.
- Smider B, Singh B. 2014. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **191**: 99-107.
- Smil V. 2011. Harvesting the biosphere: The human impact. *Population and development review*. **37**(4): 613-636.
- Solaiman ZM, Murphy DV, Abbott LK. 2012. Effect of Rice Straw Biochar on Soil Quality and the Early Growth and Biomass Yield of Two Rice Varieties. *Agricultural Sciences* **353**: 273–287.
- Sönmez F, Çığ F. 2019. Artan dozdaki biyokömür ve solucan gübresi uygulamalarının buğdayda ve toprakta besin elementi içeriği üzerine etkilerinin belirlenmesi. *KSÜ Tarım Ve Doga Dergisi*. **22**(4): 526–36.
- Spokas K, Novak J, Venterea R. 2012. Biochar’s role as an alternative N – fertilizer? Ammonia capture. *Plant and Soil*. **350**: 35–42
- Steiner C, Glaser B, Geraldtes Teixeira W, Lehmann J, Blum WE, Zech W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. **171**(6): 893-899.
- Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, de Macêdo JL, Blum WE, Zech W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and soil*. **291**(1): 275-290.
- Svobodová I, Misa P. 2004. Effect of drought stress on the formation of yield elements in spring barley and the potential of stress expression reduction by foliar application of fertilizers and growth stimulator. *Plant Soil and Environment*. **50**(10): 439-446.
- Šimek M. 2004. Základy nauky o půdě: 4. degradace půdy. Vlastimil Johanus TISKÁRNA. Jihočeská univerzita, České Budějovice.

- Špaldon E. 1982. Rastlinná výroba. Příroda. Bratislava.
- Tanure MMC, da Costa LM, Huiz HA, Fernandes RBA, Cecon PR, J. D. P, da Luz JDP. 2019. Soil water retention. physiological characteristics. and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*. **192**: 164–73.
- Thiele-Bruhn S, Bloem J, de Vries FT, Kalbitz K, Wagg C. 2012. Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. **4**(5): 523-528.
- Tisdell CA. 1993. *Environmental economics*. Elgar. Aldershot.
- Tripathi G, Bhardwaj P. 2004. Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg). *Bioresource technology*. **92**(3): 275-283.
- Usman K, Khan S, Ghulam S, Khan MU, Khan N, Khan MA, Khalil SK. 2012. Sewage sludge: an important biological resource for sustainable agriculture and its environmental implications.
- Vaccari FP, Baronti S, Lugato E, Genesio L, Castaldi S, Fornasier F, Miglietta F. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European journal of agronomy*. **34**(4): 231-238.
- Valíček J, Držik M, Hryniewicz T, Harničárová M, Rokosz K, Kušnerová M, Bražina D. 2012. Non-contact method for surface roughness measurement after machining. *Measurement Science Review*. **12**(5): 184-188.
- Verheijen FG, Jones RJ, Rickson RJ, Smith CJ. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*. **94**(1-4): 23-38.
- Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, Van der Velde M, Diafas I. 2010. Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions.
- Zaller JG. 2007. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Scientia Horticulturae*. **112**(2): 191-199.
- Zhang J, Lindsay R, Schweiger A, Steele M. 2013. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat. *Geophysical Research Letters*. **40**(4): 720-726.
- Zhao L, Cao X, Mašek O, Zimmerman A. 2013. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of hazardous materials*. **256**: 1-9.
- Zimolka J. 2008. *Kukuřice, hlavní a alternativní užitkové směry*. Profi Press.
- Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. 2010. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil Journal*. **327**: 235-246