

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Vliv aplikace kompostu a vermikompostu na růst a výživu rostlin

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zpracovatel: Martin Fabián

Vedoucí práce: Ing. Barbora Hudcová, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Jiří Bouček

Praha, 2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Fabián

Rozvoj venkova a zemědělství
Územní plánování

Název práce

Vliv aplikace kompostu a vermikompostu na růst a výživu rostlin

Název anglicky

Influence of compost and vermicompost application on plant growth and nutrition

Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce bude zpracování literární rešerše zaměřené na vliv aplikace kompostu a vermikompostu na růst a výživu rostlin. Úvodní část práce bude obsahovat základní informace o půdě (obecné informace, biogenní prvky, migrace prvků v prostředí). Dále bude pozornost zaměřena na půdní organickou hmotu, a to na obecný popis i rizika spjatá s jejím nedostatkem. Následující část práce bude věnována kompostu a vermikompostu, jako vhodným organickým hnojivům, kde budou popsány jejich základní vlastnosti, příprava a vliv na růst a výživu rostlin. Získané poznatky budou dále rozvedeny v Diskuzi a shrnuty formou Závěru.

Metodika

Bakalářská práce bude věnována zpracování důkladné literární rešerše na základě dostupné literatury (doporučené a vyhledané). Literární rešerše bude zaměřena na několik témat: 1) půda (obecné informace, biogenní prvky, migrace prvků v prostředí), 2) půdní organická hmota, 3) kompost a vermikompost, 4) diskuze vlivu (vermi)kompostu na růst a výživu rostlin. Vypracování se bude řídit Metodickými pokyny pro zpracování bakalářských prací na FŽP ČZU.

Doporučený rozsah práce

40-45

Klíčová slova

kompost, vermikompost, výživa rostlin, organická hmota

Doporučené zdroje informací

- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Babenko, A., Cannon, J., Galvis, P., & Metzger, J. D. (2008). Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology*, 39, 91-99
- Edwards, C. A., Dominguez, J., & Arancon, N. Q. (2004). The influence of vermicomposts on plant growth and pest incidence. In: *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century* (Shakir, S. H., Mikhaïl, W. Z. A., Eds.), Cairo, pp. 397-420.
- Grantina-Ievina, L., Andersone, U., Berkolde-Pīre, D., Nikolajeva, V., & Ievinsh, G. (2013). Critical tests for determination of microbiological quality and biological activity in commercial vermicompost samples of different origins. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(24), 10541-10554.
- Grigatti, M., Giorgonni, M., & Ciavatta, C. (2007). Compost-based growing media: influence on growth and nutrient use of bedding plants. *Bioresource Technology*, 98, 3526-3534.
- Mathur, S. P., Owen, G., Dinell, H., and Schnitzer, M. (1993). Determination of compost biomaturity. I. Literature review. *Biological Agriculture and Horticulture*, 10(2), 65-85.
- Nurhidayati, N., Machfudz, M., & Murwani, I. (2018). Direct and residual effect of various vermicompost on soil nutrient and nutrient uptake dynamics and productivity of four mustard Pak-Coi (*Brassica rapa* L.) sequences in organic farming system. *International journal of recycling of organic waste in agriculture*, 7(2), 173-181.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Barbora Hudcová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra geoenvironmentálních věd

Konzultant

Ing. Jiří Bouček

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2022

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2022

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Barbory Hudcové, Ph.D. a konzultanta Ing. Jiřího Boučka, a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

Souhlasím se zveřejněním bakalářské práce.

V Praze, dne 31.3. 2022

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat nejprve mé vedoucí, Ing. Barboře Hudcové, Ph.D., za cenné připomínky, rady a pomoc při psaní této bakalářské práce na dané téma, a především za vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Jiřímu Boučkovi za upřesnění problematiky v oblasti kompostování a vermikompostování.

Abstrakt

V této bakalářské práci byla řešena aplikace kompostu a vermikompostu do půd s nízkým obsahem živin a organické hmoty (OH). Dále byl řešen vliv jejich aplikace na výživu vybraných rostlin. Jak již naznačila řada výzkumů, aplikace kompostu a vermikompostu zlepšuje kvalitu půdy a výnos plodin tím, že zvyšují podíl OH v půdě, vyrovnávají roční/sezónní výkyvy vodní, vzdušné a tepelné bilance půd a zvyšují dostupnost živin pro rostliny z důvodu pomalého uvolňování živin vázaných na huminové látky. Cílem této bakalářské práce bylo potvrzení této hypotézy a shrnutí literatury a současných poznatků o vlivu aplikace kompostů a vermikompostů na půdní rostlinný systém. Všechny dlouhodobé experimenty s aplikací kompostu a vermikompostu vedou ke zvýšeným koncentracím OH. Nicméně vyzrálý, neboli stabilizovaný, (vermi)kompost zvyšuje OH mnohem lépe než čerstvý a nezralý (vermi)kompost, a to díky vyšší úrovni stabilizace uhlíku. Pro udržitelné zemědělské systémy v rámci drobného zemědělství v rozvojových zemích může být aplikace těchto organických aditiv dobrou volbou pro vývoj účinných strategií řízení v zemědělství. Hlavním přínosem této bakalářské práce je vytvoření ucelené literární rešerše umožňující zhodnotit význam aplikace použití kompostu a vermikompostu na zlepšení vlastností půd, spotřebu vody a zvýšení produkce vybraných plodin.

Klíčová slova: kompost, vermikompost, organická hmota, biogenní prvky, výživa rostlin

Abstract

In this bachelor thesis, the application of compost and vermicompost to soils with low nutrient and organic matter (OM) content was solved. Furthermore, the influence of their application on the nutrition of selected plants was addressed. As suggested by a number of studies, application of compost and vermicompost improves soil quality and crop yield by increasing the OM content in the soil, balancing annual/seasonal fluctuations in soil water, air and heat balance and increasing nutrient availability to plants due to slow release of nutrients bound to humic substances. The aim of this bachelor thesis was to confirm this hypothesis and to summarize the literature and current knowledge about the effect of compost and vermicompost application on the soil plant systems. All long-term experiments with the application of compost and vermicompost lead to elevated OM concentrations. However, mature, or stabilized (vermi)compost, increases OM much better than fresh and immature (vermi)compost due to a higher level of carbon stabilization. For sustainable small-scale farming systems in developing countries, the application of these organic additives may be a good option for developing effective management strategies in agriculture. The main contribution of this bachelor thesis is the elaboration of a comprehensive literature research to evaluate the importance of the application of compost and vermicompost to improve soil properties, water consumption and increase the production of selected crops.

Key words: compost, vermicompost, organic matter, biogenic elements, plant nutrition

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	10
3. Obecké informace o půdě.....	11
4. Biogenní prvky.....	12
4.1. Dusík a jeho migrace v půdě	13
4.2. Síra a její migrace v půdě	14
4.3. Vápník a jeho migrace v půdě	16
4.4. Hořčík a jeho migrace v půdě.....	17
4.5. Draslík a jeho migrace v půdě	18
5. Úrodnost půdy.....	19
6. Příjem živin z půdy	20
7. Hnojiva a jejich vliv na výživu rostlin	21
8. Půdní organická hmota.....	21
8.1. Význam a funkce organické hmoty v půdě	22
8.2. Základní procesy přeměn organických látek	22
8.3. Nedostatek organické hmoty v půdě	23
9. Kompost a vermikompost	24
9.1. Obecký úvod do problematiky (vermi)kompostování.....	24
9.2. Vliv (vermi)kompostování na obsah biogenních prvků a jejich migrací prostředí .	26
9.3. Vliv (vermi)kompostování na růst a výživu rostlin.....	27
9.4. Rizika spjatá s využitím (vermi)kompostu.....	28
10. Diskuze.....	29
11. Závěr.....	32
12. Použitá literatura	33
13. Seznam použitých zkratk.....	40

1. Úvod

V poslední době přineslo intenzivní zemědělství nejen ekonomický a sociální rozvoj, ale přispělo také k degradaci půdy z hlediska úbytku (OH) v půdě, erozi půdy, ztrátě biologické rozmanitosti a kontaminaci půdy a vody (Kirschenmann, 2010). Ve snaze zvrátit trend klesající kvality půdy se výzkumníci snaží identifikovat vhodné postupy hospodaření s půdou (Sharma et al., 2008). Vhodné nástroje pro hodnocení kvality půdy jsou nutné pro zajištění udržitelného zemědělství a pro možné zhodnocení vlivů postupů hospodaření. K tomu všemu je samozřejmě nezbytné celkové pochopení půdních procesů. Jedním ze způsobů hodnocení kvality půdy je sledování jednotlivých změn fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností půdy. V ideálních podmínkách by hodnocení kvality půdy mělo zahrnovat všechny tři zmíněné indikátory (Bhardwaj et al., 2011).

S rostoucími emisemi CO₂ do atmosféry, a možnými důsledky tohoto jevu na globální změny klimatu, roste zájem o studium sekvestrovaného uhlíku (C) v suchozemských ekosystémech, tj. v půdě (Wang et al., 2004). Jednou z možností zadržení CO₂ je aplikace OH do půdy, kdy díky přidání organických hnojiv či pomocí technologického zpracování půdy neničící její strukturu dojde ke zvýšení mikrobiální aktivity půdy. Stimulace půdní mikroflóry (a následně i půdní fauny) má za následek zlepšení struktury půdy a zvýšení obsahu i kvality OH (Nannipieri et al., 2017). Díky tomu se zvýší infiltrace srážkové vody, což zároveň vede i ke snížení povrchového odtoku a riziku půdní eroze (Moore et al., 1990). Bez aplikace organických hnojiv se úrodnost půdy a celkové výnosy plodin často snižují a plodiny jsou náchylnější k napadení škůdci i různým chorobám, protože jsou ve špatném fyziologickém a botanickém stavu (Lim et al., 2015).

Vhodným organickým hnojivem řešící výše zmíněné problémy je například kompost a vermikompost. Termín „kompost“ a „vermikompost“ se vztahuje na jakýkoli biologický materiál různého původu s širokým rozsahem složení, který prošel buď kompostovacím procesem, anebo trávicím traktem žížal (Richard and Woodbury, 1992). Vermikompost i kompost vznikají z rostlinných a živočišných zbytků, kdy je hlavním cílem recyklace zbytků a plodin po sklizni. Dále mohou být využity i odpadní materiály ze skládek, kdy dojde během procesu (vermi)kompostování k odstranění patogenního inokula (materiál, který obsahuje mikroorganismy nebo virové částice), semen plevelů, či případných herbicidních nebo pesticidních zbytků. Aplikací kompostu a vermikompostu do půdy je možné zlepšit produkci zahradnických produktů a také podpořit produkci biopotravin skrze toto ekologické hnojení (Rajiv et al., 2010).

2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce bude zpracování literární rešerše zaměřené na vliv aplikace kompostu a vermikompostu na růst a výživu rostlin. Úvodní část práce bude obsahovat základní informace o půdě (obecné informace, biogenní prvky, migrace prvků v prostředí). Dále bude pozornost zaměřena na půdní organickou hmotu, a to na obecný popis i rizika spjatá s jejím nedostatkem. Následující část práce bude věnována kompostu a vermikompostu, jako vhodným organickým hnojivům, kde budou popsány jejich základní vlastnosti, příprava a vliv na růst a výživu rostlin. Získané poznatky budou dále rozvedeny v Diskuzi a shrnuty formou Závěru.

3. Obecné informace o půdě

Půda („pedosféra“) je svrchní zvětralá kůra pevného povrchu Země na rozhraní mezi litosférou, biosférou, atmosférou a hydrosférou. Je to směs sekundárních a primárních minerálů, OH, vzduchu a živých organismů. Důležitost půdy jako média pro růst rostlin je dána klasickou definicí dle Thompsona (Thompson et al., 1957) - půda je „horní vrstva země, kterou lze rýt, orat, konkrétně sypký povrchový materiál země, ve kterém rostou rostliny“. Jedná se o komplexní materiál, který je extrémně variabilní ve svém fyzikálním a chemickém složení. Vzniká z odkrytých mas částečně zvětralých hornin a minerálů tvořících zemskou kůru a tato tvorba je silně závislá na podmínkách prostředí jak v atmosféře, tak v litosféře. Do geneze půd zasahují půdotvorné faktory jako klima a jeho změny, čas, působení organismů, topografie a složení mateřských materiálů. Velká variabilita půd vyplývá právě z interakcí těchto faktorů a jejich vlivu na tvorbu různých půdních profilů (Ben-Dor et al., 2009). Přibližně 90 % půdy se skládá z kyslíku, křemíku a hliníku. Tyto prvky nejsou pro výživu rostlin tak důležité, protože rostliny získávají kyslík ze vzduchu a vody a hliník není esenciálním prvkem. Křemík se také nepovažuje za nepostradatelný, i když pro některé rostliny může být prospěšný, např. pro rýži a cukrovou třtinu pěstovanou na půdách s nízkým obsahem křemičitanů. Čtvrtým nejhojnějším minerálním půdním prvkem je železo, které rostliny využívají ve velmi malých množstvích. Obecně řečeno, základní živiny, které rostliny z půdy přijímají, představují relativně malé procento z celkového množství prvků obsažených v půdě. Rostliny absorbují živiny v dostatečném množství, pokud změna nějakého faktoru, jako je například pH půdy, nepůsobí, že jsou za daných podmínek živiny nerozpustné nebo nedostupné.

Se zvyšujícím se množstvím OH se odpovídajícím způsobem zvyšuje obsah dusíku a snižuje se obsah těch živin, které se vyskytují především v minerální frakci půdy. Organické půdy (tzv. histosoly) jsou definovány tak, že mají 40 centimetrů nebo více organického půdního materiálu v horních 80 centimetrech profilu. Histosoly se tvoří vždy, když se OH tvoří rychleji, než se degraduje. K tomu dochází kvůli omezené drenáži, která vylučuje aerobní rozklad, a zbytky rostlin a zvířat zůstávají v půdě. Primárně jsou tvořeny pouze mírně rozloženými organickými materiály, často nazývanými rašelina, či vysoce rozloženými organickými materiály, často nazývanými bahno (obsahuje 2 až 4 % OH, což má za tvorbu asi 0,1 až 0,2 % N). Z ekologického hlediska jsou histosoly velmi důležité, protože se v nich ukládá velké množství organického uhlíku (Stevenson, 1982). Tyto půdy ve srovnání s minerálními půdami mají vysoké procento živin, které se hromadí v humusu, jako je dusík, fosfor a síra. Naproti tomu však histosoly obsahují pro potřeby plodin nedostatečné množství draslíku. Stejně tak je

pro histosoly typický nízký obsah silikátových minerálů, což vede k obecně nízkému množství rozpustného SiO_2 v půdním roztoku. Tento nízký obsah může negativně ovlivňovat určité plodiny např. cukrovou třtinu. Z tohoto důvodu je často vhodné aplikovat křemíkové hnojivo, i když, jak již bylo zmíněno dříve, Si není základním prvkem nezbytným pro výživu rostlin (Stevenson, 1982).

Půdy, ať už chudé, nebo úrodné, často obsahují více živin, než je potřeba pro roční příjem plodin, ale část živin je v půdě chemicky fixována. Například biologická dostupnost P je omezená asi na 30–40 % celkového obsahu v orné půdě, a to kvůli své silné reakci s půdou a následné snížené mobilitě (zejména v kyselých půdách tropů a subtropů). Obecně jsou pro získání přístupu k těmto biologicky nedostupným živinám nezbytné rozsáhlé kořenové systémy, jako jsou delší kořeny, více laterálních kořenů a více kořenových vlásků. Změny v kořenové architektuře jsou indukovány nedostatkem iontů v půdě: P, NH_4^+ , Zn, K a Na. Tento účinek může být významný, když jsou tyto živiny aplikovány v raném růstu rostlin, protože podporují změny v kořenové architektuře, a tím se stimuluje raný růst rostlin. Navzdory těmto informacím je stále patrný nedostatek systematického výzkumu, který přímo spojuje změny v architektuře kořenů vyvolané živinami s celkovým zlepšením růstu rostlin a výživy s ohledem na navržení strategií hnojení pro konkrétní plodiny (López-Bucio et al., 2003).

4. Biogenní prvky

Zemskou kůru lze považovat za přirozený rezervoár pro všechny chemické prvky biosféry. Více než 99 % celkové hmotnosti zemské kůry je tvořena pouze 8 z 88 přirozeně se vyskytujících prvků. Skládá se ze 46,4 % O, 28,2 % Si, 8,23 % Al, 5,63 % Fe, 4,16 % Ca, 2,36 % Na, 2,33 % Mg a 2,09 % K. Kyslík je jediný nekov mezi těmito 8 nejčastěji se vyskytujícími prvky v zemské kůře. Zbývajících 80 prvků periodické tabulky představuje méně než 1 % složení zemské kůry (Markert, 1992). V biosféře existuje přibližně 20 prvků nezbytných pro růst a vývoj rostlin. Lze je rozdělit do dvou skupin: minerální makro- a mikroživiny. Minerální makroživiny (N, P, K, Ca, Mg, Fe, S) jsou pro rostliny potřebné v relativně vysokých množstvích ve srovnání s jinými prvky a dělí se na primární a sekundární (Tripathi et al., 2014). Primární makroživiny reprezentované N, P a K jsou často hlavními složkami hnojiv, která se do půdy zavádějí v různých chemických formách. Obě skupiny makronutrientů hrají významnou roli v metabolismu rostlin (protein, DNA, RNA, rostlinné fotosyntetické pigmentové složky, enzymové kofaktory spojené s transportem metabolitů) a také v jejich

ochraně před různými abiotickými stresory, včetně přítomnosti rizikových kovů v životním prostředí (Tripathi et al., 2014).

4.1 Dusík a jeho migrace v půdě

V půdním systému se dusík (N) nachází v mnoha sloučeninách, které se velmi snadno tvoří a mění (transformují) z jedné formy na druhou. Cyklus dusíku je ovlivněn biologickými procesy, které souvisí s klimatickými podmínkami a fyzikálními a chemickými vlastnosti konkrétní půdy. Atmosférický N je hlavní zásobárnou dusíku na planetě Zemi (jelikož vzduch je tvořen ze 79 % N₂). Ačkoli je N v této formě nedostupný pro většinu rostlin, velké množství atmosférického N₂ může být přijato rostlinami čeledi bobovitých (*Fabaceae*), které vytváří na svých kořenech uzliny, které osídlují bakterie *Rhizobium*. Ty převádí atmosférický N₂ do formy, kterou může rostlina přijímat. Část bobovitých, která zbyla po sklizni, a to včetně kořenů a kořenových vlásků, může dodávat N do půdního systému, který následně v půdě podléhá biologickému rozkladu. V neposlední řadě se ještě malé množství N dostává do půdy přes srážky (Lamb et al., 2014).

Dusík je rostlinám dostupný buď jako amonný (NH₄⁺) nebo dusičnanový (NO₃⁻) iont. Komerční dusíkatá hnojiva jsou získávána z atmosférického N₂, a to například reakcí mezi N₂ a vodíkem (H₂), kdy vzniká amoniak (NH₃). Bezvodý NH₃ je dále využit jako výchozí bod k výrobě jiných dusíkatých hnojiv. Organický dusík může být pro rostliny také dostupný, musí však být převeden do anorganické formy, která je již pro rostliny dostupná. V půdě je hlavním zdrojem dusík a OH, která se skládá z poměrně stabilního materiálu, který se nazývá humus (Lamb et al., 2014). Z hlediska organických látek, které lze přidat do půdy, mohou být důležitými zdroji N, které pozitivně ovlivňují rostlinný růst, například zvířecí hnůj a další organické odpady. Množství N dodaného v hnoji, kompostu či vermikompostu se liší podle druhu hospodářských zvířat, vstupních materiálů, krmiva, ročního období a způsobem aplikace. I když se u organických hnojiv/kompostu liší jak N forma, tak i jeho celkový obsah, aplikace se doporučuje pro celkové zlepšení hospodaření s N. Zbytky plodin z jiných než bobovitých rostlin obsahují také N, ale v relativně menším množství ve srovnání s luštěninami. Navíc N v rostlinných zbytcích existuje v komplexních organických sloučeninách, které se degradují (rozkládají) až několik let na formu pro rostliny využitelnou.

Jak již bylo zmíněno, dusík (přítomný nebo přidaný do půdy) podléhá několika změnám (transformacím), které určují jeho dostupnost pro rostliny a ovlivňují potenciální mobilitu v půdním roztoku. Zbytky plodin a organická hnojiva jsou přeměněna na anorganický N

procesem mineralizace. V tomto procesu bakterie tráví organický materiál a uvolňují NH_4^+ . Tvorba NH_4^+ se tak zvyšuje s mikrobiální aktivitou, kdy bakteriální růst přímo souvisí s teplotou půdy a obsahem vody. Jak je patrné, NH_4^+ má kladný náboj, a proto je přitahován/držen záporně nabitými částicemi půdy a půdní organickou hmotou (POH). To znamená, že obecně nedochází k jeho migraci v půdách směrem dolů. Dusík ve formě NH_4^+ pak podléhá v půdním systému dalším přeměnám na NO_3^- (Lamb et al., 2014).

Jedním z takových procesů je nitrifikace, tedy přeměna NH_4^+ až na NO_3^- , což je biologický proces, jehož rychlost se zvyšuje v teplých, vlhkých a dobře provzdušněných půdách. Nitrifikace se v půdě zpomaluje při teplotě pod $15\text{ }^\circ\text{C}$. Dusičnany mají záporný náboj, tudíž nejsou přitahovány k půdním částicím nebo POH jako NH_4^+ . Dusičnany jsou dobře rozpustné ve vodě a mohou se za určitých podmínek pohybovat pod zónou zakořeněné rostliny. Dalším půdním procesem je denitrifikace, při které bakterie naopak převádí NO_3^- na N_2 , který je uvolňován do atmosféry. Denitrifikační bakterie využívají NO_3^- v metabolických procesech místo kyslíku. Tato reakce probíhá převážně v podmáčených půdách s dostatkem OH poskytující energii pro bakterie. Denitrifikace probíhá rychleji, když jsou půdy teplé a nasycené vodou po dobu 2-3 dny (Lamb et al., 2014). Dalším jevem, během kterého může docházet ke ztrátám dusičnanů, je proces vyluhování, což je ztráta NO_3^- rozpuštěného v půdním roztoku. Obecně mají půdy s hrubou texturou (ve srovnání s půdami s jemnou strukturou) nižší schopnost zadržovat vodu, a proto větší potenciál ke ztrátě dusičnanů vyluhováním. Dusičnan, který se pohybuje pod kořenovou zónou, má potenciál vstoupit do podzemních i povrchových vod. Dusičnany mohou být vyluhovány z jakékoli půdy během zavlažování či prostřednictvím půdní eroze a odtoku během dešťů (Lamb et al., 2014).

4.2 Síra a její migrace v půdě

Od průmyslové revoluce bylo využívání fosilních paliv nejdůležitější lidskou manipulací s globálním cyklem síry (S). Těžbou a následným spalováním lidé mobilizovali formy biologicky dostupného a chemicky reaktivního S, které se následně dostávaly do vzduchu, půdy i vodních systémů, kde se koncentrace S více než zdvojnásobily. Emise SO_2 , tvorba síranových aerosolů a transport a distribuce těchto složek v životním prostředí tak předčily přírodní procesy (sopečná činnost) a dramaticky zhoršily kvalitu ovzduší, půdy a vody, což mělo (a stále má) negativní dopad na ekosystémy. Příkladem může být oxid siřičitý (SO_2), který vzniká při spalování uhlí a topných olejů. Uniká také z hutí při vypalování železných i jiných kovových rud. Tento oxid se dobře rozpouští ve vodě a vzniklý roztok se dále chová jako slabá kyselina.

Tímto procesem mohou vznikat kyselé deště (reakcí oxidů síry s vodou v atmosféře), které následně snižují pH, a tím zvyšují ztráty kationtů živin a mobilizují stopové kovy v půdách a vodních ekosystémech. Následkem depozice S je tak změněna struktura a funkce lesních a vodních ekosystémů, což má za následek úbytek nebo úhyn lesních druhů a toxicitu povrchových vod. Hlavním mechanismem poškození rostlin v důsledku okyselování půd je otrava hliníkem (Al). Tento prvek se v horninách a půdách běžně vyskytuje, dokonce jako jeden z nejvíce zastoupených (je třetím nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře). Pokud ale nejsou půdy okyseleny, vyskytuje se ve formě nerozpustných sloučenin (převážně primárních a sekundárních minerálů půd a hornin), které nejsou toxické, protože je organismy nedokáží přijmout. Jakmile se ale půdní prostředí okyselí, Al se velmi rychle rozpouští a v rozpuštěném stavu působí jako buněčný jed. Pokud kyselost klesne, Al se opět rychle sráží ve formě nerozpustných sloučenin (Wright et al., 2005). Podobné narušení ekosystémů bylo zaznamenáno například v lesních půdách přirozeně chudých na báze, zejména v dříve zaledněných oblastech severovýchodních Spojených států (Wright et al., 2005). Nedávný výzkum ukázal, že dlouhodobá acidifikace lesních půd ovlivňuje vodní bilanci (zintenzivňuje využívání vodní vegetace, zvyšuje evapotranspiraci) i v systémech mírného i tropického prostředí (Prietz et al., 2020). I dnes na celém světě dochází k narušování cyklu S, avšak možné důsledky jsou často nedostatečně řešeny. Jedná se hlavně o zvýšení obsahu S díky přidávání reaktivního S do hnojiv, pesticidů a půdních kondicionérů, které jsou aplikovány na velkoplošných zemědělských plochách (Aebischer et al., 1993)

Ve srovnání s N a P se využití S v zemědělství dostává jen malé pozornosti. Navíc jsou nedostatečně řešeny následné toky S a její další vliv na životním prostředí. Míra, do jaké přídavky S zvyšují kyselost a vyluhovatelnost kationtů, a tím ovlivňují funkce rostlin, závisí na klimatických podmínkách, typu půdy, intenzitě používání S a hospodaření s půdou. Účinky dlouhodobých vstupů S lze zmírnit vápněním, zpracováním půdy nebo přidáním vhodných hnojiv. Tyto možné zásahy odlišují potenciální reakci orné půdy od reakce horských lesů. Stále je však nedostatek studií, které detailně popisují účinky dlouhodobých vstupů S na plodiny, a agronomických zkoušek, které zkoumají možná řešení pro řízení těchto vstupů. Není například známo, do jaké míry dlouhodobé aplikace elementárního S způsobuje epizodické (občasné) okyselení půd. Studie naznačuje, že v průběhu času by jeho používání mohlo zhoršit kondici půdy (Hinckley et al., 2020). Jak již bylo zmíněno je S základní makroživinou pro všechny živé organismy. Rostliny jsou schopny asimilovat anorganickou S a začlenit ji do organických sloučenin, zatímco zvířata jsou zcela odkázána na organické zdroje S. V posledních desetiletích se dostupnost SO_4^{2-} v půdě stala hlavním limitujícím faktorem pro rostlinnou produkci v mnoha

zemích kvůli významnému snížení antropogenních emisí síry vynucené zavedením přísné environmentální legislativy. Příjem síry rostlinami je za optimálních okolností regulován na několika úrovních včetně transkripce, translace a aktivity enzymů potřebných pro asimilaci síranů a syntézu metabolitů obsahujících S. Reakce rostlin na omezení síry jsou složité a lze je rozdělit do fází v závislosti na stupni nedostatku síry. Počáteční reakce jsou omezeny na adaptaci v rámci metabolické dráhy S, zatímco při závažnějším nedostatku jsou ovlivněny četné metabolické dráhy a vývojový proces rostlin. Většina regulačních kroků však ještě není plně charakterizována.

4.3 Vápník a jeho migrace v půdě

Vápník (Ca) je pátý nejhojnější prvek v zemské kůře a nejrozšířenější kov alkalických zemin. Je základní živinou v mořské a pozemské biosféře, tvořící řadu sekundárních minerálních fází v přírodních systémech (kalcit, dolomit, fosfát, sádrovec) a je strukturálním základem pro různé organismy. Skořápky a kostry bohaté na vápník jsou dominantním úložištěm Ca v oceánu a jsou kritickým záznamem chemického vývoje oceánu v geologických časových měřítcích. Prostřednictvím zvětrávání primárních silikátových minerálů obsahujících Ca a srážení CaCO_3 dochází také k regulaci dlouhodobého uhlíkového cyklu, která udržuje klima Země po celou geologickou historii. Globální cyklus Ca spojuje litosféru, hydrosféru, biosféru a atmosféru (Holmén, 1992).

Vzhledem k zásadnímu významu Ca pro řadu procesů na zemském povrchu je globální biogeochemický cyklus Ca zásadním tématem. Jednou z možností přirozeného výskytu Ca je biomineralizace, což je kompletní přeměna organických látek na anorganické deriváty živými organismy (zejména mikroorganismy). Biomineralizace CaCO_3 má za následek produkci bezvodých polymorfů (kalcit, aragonit a vaterit) či dvou hydratovaných krystalických fází, monohydrokalcitu ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) a ikaitu ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Tyto procesy srážení probíhají také v půdě a způsobují zpevnění půdy, zachycení kovových kontaminantů z podzemní vody tvorbou pevné fáze (tj. precipitace) a/nebo efektivní (dlouhodobou) sekvestrací CO_2 prostřednictvím bakteriální mineralizace CaCO_3 (Fantle and Tipper, 2014). Půdy s dostatečným množstvím Ca mají tendenci být drobnější a mají lepší vlastnosti pro infiltraci vody. Je to proto, že Ca vytlačuje Na v půdě, a při dostatečném zavlažování vyluhováním může pomoci zlepšit celkovou kvalitu půdy (Dordas et al., 2008).

Při příjmu Ca kořeny rostlin dochází ke konkurenci s dalšími ionty jako je NH_3 , K a Mg. Je také známo, že velmi vysoké hladiny Mg mohou nepříznivě ovlivnit strukturální stabilitu půdy a vysoké koncentrace Mg spolu s Na mohou navíc rušit dynamiku půdního K. V rostlinách je Ca důležitý pro stabilitu a funkci rostlinných membrán a také je součástí struktury buněčné stěny. Při jeho nedostatku dochází k membránovému prosakování nízkomolekulárních sloučenin, např. cukrů a aminokyselin, z cytoplazmy k apoplastu a rostliny jsou více náchylné k houbám, které přednostně napadají xylem a rozpouštějí buněčné stěny vodivých cév, což vede k vadnutí rostlin. Kromě toho jsou rostlinná pletiva s nízkým obsahem Ca mnohem náchylnější na parazitární onemocnění při skladování (Dordas et al., 2008).

4.4 Hořčík a jeho migrace v půdě

Hořčík (Mg) je osmý nejrozšířenější minerální prvek na Zemi (Yan and Hou, 2018). V půdách pochází ze zdrojové horniny obsahující různé typy silikátů. Obsah Mg u různých typů silikátů se značně liší (muskovit > biotit > rohovec > augit > olivín). Důvodem pro kolísání obsahu Mg je to, že v silikátech je Al^{3+} různě nahrazován Mg^{2+} . Tento dobře popsáný jev způsobuje typické trvalé přebytky náboje silikátů (nahazováním trojmocného prvku za dvojmocný), což je rozhodující pro fyzikálně-chemické vlastnosti půd. Křemičitany a uhličitan, jako je například magnezit (MgCO_3) a dolomit ($\text{MgCO}_3 \times \text{CaCO}_3$), ale také v kalcit (CaCO_3) v koncentracích kolem 1–3 %, jsou rovněž významnými zdroji Mg. Vzhledem k velkému kolísání obsahu Mg ve výchozím materiálu se celkový obsah Mg v půdách pohybuje mezi 0,05 a 0,5 %. Rozdíly v obsahu silikátů v půdách také vysvětlují vyšší obsahy Mg, které se typicky vyskytují více v jílovitých a hlinitých půdách ve srovnání s písčítými půdami. K fixaci Mg může dojít v extrémních případech v půdách s vysokým obsahem křemičitanů, které jsou však ochuzeny o Mg, zejména chloritanů v mezivrstvách silikátů, čímž dojde k imobilizaci Mg. Do mobilních frakcí se pak Mg uvolňuje pouze procesy zvětrávání, které je dlouhodobým a pomalým procesem (Gransee et al., 2013).

Jako základní rostlinná živina má Mg širokou škálu rolí v mnoha funkcích rostlin. Hraje klíčovou roli v procesu fotosyntézy a jeho nedostatek je škodlivý pro růst rostlin. Je také nezbytným prvkem po celou dobu růstu rostliny, kde je centrální složkou chlorofylu a nosičem P v metabolismus fosfátů. Dále je také potřebný pro buněčné dělení a tvorbu bílkovin, aktivaci několika enzymových systémů a je nezbytnou složkou pro dýchání rostlin. Nedostatek Mg je běžně pozorován v intenzivně využívaných zemědělských půdách, ale může být způsoben i zvětráváním půdy. Často se vyskytuje v písčítých, silně vyplavených a kyselých půdách. Mezi

běžné příznaky nedostatku Mg patří pomalý růst a žloutnutí listů, zejména na vnějších okrajích, u kterých se pak vyvíjí mezižilní chloróza, nově rostoucí listy mohou zežloutnout s tmavými skvrnami a tvoří se fialové nebo načervenalé skvrny na listech. Pouze akutní nedostatek, když je příliš pozdě na výnos plodiny, vykazuje viditelné známky, jako je interveinální chloróza a omezení růstu (Gransee et al., 2013).

Na rozdíl od jiných kationtů, jako je K, Ca a NH_4 , je Mg v půdě relativně mobilní, což vede k jeho vyluhování ve značném množství, zejména během podzimních a zimních měsíců se silnými dešti. Vyplavování Mg je také ovlivněno kyselostí půdy, koncentrací Ca a kapacitou kationtové výměny ovlivněnou organickou hmotou a jílem. Uvádí se, že koncentrace Mg dostupné pro rostliny v půdních roztocích kolísají mezi 125 μM a 8,5 mM (Yan and Hou, 2018). Nejčastějším zdrojem Mg je dolomitický vápenec, který poskytuje Ca i Mg a zároveň neutralizuje kyselost půdy. Účinnost výživy rostlin Mg závisí nejen na obsahu dostupného prvku v půdě, ale také na různých iontech v půdě a více na antagonismu iontů K/Mg v rostlině. Bylo zjištěno, že čím více K rostliny absorbují, tím méně přijímají Mg a opačně čím více Mg rostliny přijmou, tím méně K vstřebávají (Dordas, 2008).

4.5 Draslík a jeho migrace v půdě

Draslík (K) je jedním z nejhojněji zastoupených biogenních prvků v půdě. Celkový obsah K v půdách se pohybuje od 0,01 % do přibližně 4 % (běžně asi 1 %), přičemž jeho hlavními skupinami minerálů jsou K-živce a slídy. K-živce mohou přímo uvolňovat K do půdního roztoku odkud je přijímán rostlinami. Ve slídové mezivrstvě je K držen elektrostatickými silami, kdy je možné za vhodných podmínek tento K vyměnit iontovou výměnou, nebo dalšími přeměnami slíd (např. rozpuštěním). K rozpuštění může dojít například okyselením rhizosféry vylučováním H^+ z kořenů rostlin. Retence K v půdě je velmi závislá na složení půdy a fyzikálních a environmentálních faktorech, které ovlivňují adsorpci/uvolňování K a jeho vyplavování půdním profilem. Významné zásoby K mohou vznikat zejména v hnojených půdách. Z těchto rezerv se K pak může v průběhu let uvolňovat do půdního roztoku, což významně přispívá k dostupnosti K rostlině (Blake et al., 1999). Uvolňování K z minerálních povrchů je ovlivněno strukturou půdy a velikostí částic mateřských minerálů, biologickou aktivitou, komplexotvornými organickými kyselinami a anorganickými kationty v půdním roztoku. Draslík se v půdě vyskytuje ve třech formách: (1) jako dostupný K^+ , který je adsorbován na půdní částice díky jejich kationtové výměnné kapacitě, (2) fixován v minerálech,

ze kterých se velmi pomalu uvolňuje do dostupné formy, a (3) v nedostupných minerálních formách (Martin and Saprks, 1985).

Draslík hraje roli ve fyziologii a chemii rostlin, a to v procesech souvisejících s pohybem vody, živin a sacharidů v rostlině. Simuluje raný růst, zvyšuje produkci bílkovin, zlepšuje efektivitu využití vody a zlepšuje odolnost vůči chorobám a hmyzu. Rostliny s nedostatečným množstvím K obtížněji absorbují vodu a N z půdy, což může zvýšit stres ze sucha. Plodiny mají schopnost uzavírat průduchy listů. Při nízkých hladinách K se však průduchy nezavírají, což snižuje schopnost rostliny minimalizovat stres ze sucha. Při nedostatku K je také narušena syntéza vysokomolekulárních sloučenin (proteiny, škrob a celulóza), takže dochází k akumulaci nízkomolekulárních organických sloučenin, jako jsou jednoduché N sloučeniny (amidy). Nedostatek půdního K lze upravit hnojem, kompostem či komerčními hnojivy. Bylo prokázáno, že hnojení K může snížit intenzitu několika infekčních onemocnění obligátních i fakultativních parazitů (Dordas, 2008).

5. Úrodnost půdy

Úrodnost půdy je definována jako schopnost půdy dodávat dostatečné množství prvků nezbytných pro růst rostlin bez toxického vlivu jakéhokoli prvku. Úrodné půdy mají přiměřenou a vyváženou zásobu prvků v dostatečně labilních (dostupných) formách pro potřeby rostlin. Půdní úrodnost lze snadno změnit používáním hnojiv, organickými vstupy, či střídání plodin s luštěninami (Foth and Ellis, 2018). Produktivita půdy je schopnost půdy produkovat určitý výnos agronomických plodin (nebo jiných rostlin) při optimálním hospodaření. Zahrnuje úrodnost půdy a všechny další faktory ovlivňující růst rostlin, včetně postupů hospodaření s půdou. V půdě existuje silná pozitivní korelace mezi úrodností a ostatními půdními vlastnostmi, takže vysoce úrodné půdy mají žádoucí fyzikální a biologické vlastnosti. Úrodnost půdy se optimalizuje používáním komerčních hnojiv, hnoje, odpadních produktů a kompostů a OH. Nevhodné hospodaření se živinami však může vést ke kontaminaci životního prostředí. Kromě toho je přidávání aditiv do půdy nákladné a snižuje ziskovost zemědělské produkce, nemluvě o tom, že vysoké hladiny živin toxicky působí na růst rostlin (Lim et al., 2015).

6. Příjem živin z půdy

Příjem živin z půdy je dán koncentrací živin v půdním roztoku a absorpční schopností kořenů. Schopnost absorpce živin rostlinnými kořeny je ovlivněna délkou/plochou povrchu kořene, druhem a stářím kořenů, věkem rostlin, teplotou, rostlinným druhem a iontovou konkurencí nebo interakcí s dalšími ionty v půdě (Jungk, 2001). Dosažení žádané produkce v rámci ekologických limitů planety Země vyžaduje neustálou reflexi a přestavbu zemědělských technologií a postupů. Mezi takové technologie patří již zmíněné hnojení, jehož objev a použití byly jedním z klíčových faktorů pro zvýšení výnosu plodin, zemědělské produktivity a potravinové bezpečnosti. Kromě toho by měly být ke zvýšení příjmu živin využívány i ekologické procesy, včetně interakcí specifických pro živiny v rostlině a půdě, symbiózy rostlina-mikroorganismus a nanotechnologie (Erisman et al., 2008). Vzhledem k nezbytnosti hnojiv pro zajištění dostatečného množství potravin je nezbytné přehodnotit koncepci hnojiv a snížit jejich dopad na životní prostředí a zároveň je učinit ekonomicky efektivnějšími pro zemědělce. Agronomické postupy pro aplikaci stávajících minerálních hnojiv, které primárně obsahují N, P a K, ve správný čas, na správném místě, ve správném množství a správném složení (tj. dle potřeb dané půdy a plodin) může zlepšit účinnost použití hnojiv (Bindraban et al., 2015).

Celkový pokrok ve snižování negativních vedlejších účinků je však stále nedostačující pro žádanou transformaci směrem k udržitelnému zemědělství v chudých zemích. Důležitou roli při výběru hnojiv hraje znalost fyziologických procesů v rostlinném těle, tj. rozmanitost mechanismů příjmu minerálních živin obsažených v hnojivech, jejich translokaci a metabolismus. Kromě dodávání hnojiva přes kořen je doporučena i současná aplikace na nadzemní části a semena. Při aplikaci hnojiv je základním předpokladem, aby živiny skončily pouze v cílové rostlině. Ve skutečnosti však všechny živiny obsažené v hnojivech nekončí přímo v dané rostlině, 20–80 % živin se ztrácí v prostředí nebo se dočasně akumuluje v půdě v důsledku půdních chemických procesů, které znemožňují jejich okamžitou dostupnost pro rostlinu. To platí pro P a mikroživiny více než pro N (Sebilo et al., 2013).

Obecně potřebují rostliny pro svůj normální růst 14 živných prvků v různém množství. Mezi další prospěšné prvky patří Co, Se, Si a Na. Vzhledem k podobnosti některých prvků je důležité porozumět antagonistickým a synergickým interakcím, které mohou nastat během příjmu živin z půdy. Souhrnně je příjem živin rostlinami řízen několika přenašeči, z nichž mnohé přenášejí více než jeden typ živin. Obecně tyto transportéry, pokud by jim byla

předložena směs živin složená z iontů, které mohou transportovat, by přednostně transportovaly více hojnějších živin, čímž by inhibovaly vychytávání méně hojných minerálů (Dordas, 2008).

7. Hnojiva a jejich vliv na výživu rostlin

Po zjištění, které základní prvky hrají primární roli pro výživu rostlin, se výzkum také soustředil na chemické formy těchto prvků v půdě a dále na faktory ovlivňující jejich dostupnost pro rostliny. To vedlo k výzkumu v oblasti hnojiv a dalších půdních přísad. Byl objasněn význam pohybu živin na velmi krátké vzdálenosti ke kořenům před jejich samotným příjmem rostlinou. Chemická hnojiva se po desetiletí ve velké míře používají ke zlepšení produktivity rostlinných potravin v zemědělství, což zčásti zvýšilo významné riziko pro zdraví rostlin, zvířat, lidí a ekosystémů (Sooraki and Moghadamyar, 2017). Některá hnojiva, jako je například čistírenský kal, však mohou obsahovat škodlivé látky, převážně rizikové kovy, které mohou být následně absorbovány rostlinami, kde mohou působit fytotoxicky, a tím ovlivňovat kvalitu potravin. Je proto nezbytné v rámci výzkumu úrodnosti půd provádět pravidelné testování půdy a rostlin, aby bylo možné zvolit vhodnou dávku hnojiva pro účinnou produkci plodin, prevenci elementární toxicity pro rostliny a zvířata a zabránění kontaminaci životního prostředí hnojivy (Peeverill, et al., 1999).

8. Půdní organická hmota

Přítomnost OH v půdě je zásadní pro udržení půdní úrodnosti a snížení ztráty živin. V půdě, která má nízký podíl OH, je výnos biomasy velice nízký, i když se aplikují anorganická hnojiva. Organická hmota slouží jako médium pro biologickou aktivitu a zvyšuje počet přirozeně se vyskytujících mikroorganismů tzv. edafonu. Dále dodává půdě potřebné živiny, zlepšuje zadržování vodní kapacity a pomáhá půdě udržovat dobrý sklon, a tím zlepšuje provzdušňování pro klíčící semena a následný vývoj kořenů (Jouquet et al., 2011). Půdní organická hmota (POH) může být zdrojem nebo jímkou pro atmosférický CO₂ v závislosti na využití půdy a hospodaření s půdou, vegetací a vodními zdroji. Posílení rezervy POH je zásadní pro obnovu degradované půdy, zlepšení potravinové bezpečnosti a zlepšení životního prostředí (Stolt and Lindbo, 2010). Přeměna orby na bezorebné zemědělství je důležitá praxe pro posílení fondu POH a vede k omezení herbicidů a secích strojů a zároveň ke konkurenčnímu využití

rostlinných zbytků. Mezi organická hnojiva, která vznikají z rostlinných zbytků, a jsou bohatá na organickou hmotu, patří kompost a vermikopost.

8.1 Význam a funkce organické hmoty v půdě

Přímé přínosy POH zahrnují zlepšení struktury půdy, zadržování vody a rostlinných živin, zvýšení biologické rozmanitosti půdy a snížení rizik eroze půdy a související s degradací. Mezi vedlejší přínosy patří také zmírnění klimatu prostřednictvím sekvestrace atmosférického CO₂ do stabilního prostředí. Půdní degradační procesy, které vedou k vyčerpání zásobárny POH, zahrnují pokles půdní struktury, vyčerpání rostlinných živin a změnu teplotních a vlhkostních režimů půdy, které zvyšují mineralizaci. Rychlost a rozsah vyčerpání zásoby POH jsou umocněny například zrychlenou erozí půdy. Naproti tomu procesy vedoucí k obnově POH zahrnují zvýšení agregace, zlepšení koloběhu prvků, zvýšení biologické rozmanitosti půdy a snížení ztrát odtokem a erozí. Zachování/zlepšení POH má silný a pozitivní dopad na kvalitu půdy a životního prostředí a obecně pro obnovu kvality degradovaných půd (Soane, 1990).

8.2 Základní procesy přeměn organických látek

Primárními rozkladači OH v suchozemských ekosystémech jsou mikroorganismy. Chemické složení rostlinných zbytků a OH v půdě zase naopak ovlivňuje samotnou mikrobiální aktivitu a strukturu mikrobiálního společenstva, a tím i rychlost rozkladu. Rostlinný detritus (např. opad z listů, dřevní úlomky, odumřelé kořeny) představuje hlavní zdroj energie a živin pro společenství mikrobiálních rozkladačů (mimo samotnou POH). Mikrobiální diverzita vzniká částečně díky široké rozmanitosti substrátů, ale hlavním faktorem je pravděpodobně prostorově heterogenní povaha půdy. Minerální částice mají odlišné chemické složení a povrchové vlastnosti, které ovlivňují mikrobiální přežití a aktivitu a složení půdního roztoku. Půda také obsahuje organické zbytky rostlinného, živočišného nebo mikrobiálního původu, které mají opět širokou škálu chemických vlastností a potenciál pro biologický rozklad. Pevné částice jsou spojeny různými způsoby a jsou odděleny buď vodou, nebo vzduchem. Velikost a rozložení prostorů mezi částicemi řídí transport a difúzi rozpuštěných látek a plynů, zejména kyslíku. Všechny tyto faktory vedou k velké variabilitě prostředí v mikroskopickém měřítku. Kromě oblasti vedle kořene, zvané rhizosféra, je půda prostředím chudým na živiny pro mikrobiální růst. Půdní mikroorganismy rozkládají složité organické sloučeniny, jako je celulóza a lignin v rostlinných zbytcích, na jednoduché organické sloučeniny. Část C v těchto

jednoduchých organických sloučeninách se stává součástí mikrobiální biomasy a poskytuje energii pro mikrobiální růst. Z některých se stává oxid uhličitý. Stabilnější frakce POH, jako je humus, jsou také zdrojem uhlíku pro mikroorganismy. Organické sloučeniny nacházející se v humusu mají složité chemické struktury a jsou odolnější vůči rozkladu než čerstvé rostlinné nebo živočišné zbytky. Humus je také spojen s minerálními částicemi a tvoří materiály zvané humát-jílové komplexy, které chrání organickou hmotu před rozkladem půdními mikroorganismy. Proto humus slouží jako pomalu se uvolňující zdroj uhlíku a energie (Adekunle et al., 2017).

Kromě C obsahuje půdní OH značné množství organického N, P, S a mnoho stopových prvků. Mikroorganismy plní důležitou funkci i v koloběhu těchto živin. Převádějí organicky vázané prvky na anorganické nebo minerální formy, které jsou dostupné pro rostliny. Tento proces se nazývá mineralizace. Dusík je živinou, která je pro rostliny nejžádanější. Rostliny využívají především anorganické formy N, které jsou produkty mikrobiálních přeměn. Mikroorganismy s rostlinami soutěží o N. Při rozkladu organických zbytků jsou nejprve uspokojeny mikrobiální potřeby transformace dusíku, pokud je mikroby nevyužívají, tak se uvolňuje do půdy a stává se dostupným pro rostliny. Dalším prvkem, kde hraje v OH důležitou roli, je K, protože ten je vázán na organické koloidy, které mají negativní náboje díky disociaci karboxylových a fenolických skupin během rozkladu OH. Zbytkový K se tak stává dostupnějším díky působení organických kyselin uvolňovaných při rozkladu OH, což může zvýšit poměr selektivity K^+/Na^+ v rostlině (Said-Pullicino et al., 2007).

8.3 Nedostatek organické hmoty v půdě

Důležitými globálními problémy 21. století jsou: (1) nárůst lidské populace o další tři miliardy do poloviny 21. století, přičemž se očekává, že k většině z nich dojde v rozvojových zemích; (2) pokles dostupnosti obdělávatelné půdy a obnovitelných zdrojů sladké vody na obyvatele; (3) zvýšení atmosférického množství CO_2 a dalších skleníkových plynů s doprovodným rizikem globálního oteplování; (4) zvýšení poptávky po energii; (5) zvýšení poptávky po potravinách, zejména v rozvojových zemích, a (6) zvýšení rozsahu a závažnosti degradace půdy způsobené lidskou činností (Bodirsky et al., 2015). S intenzivním zemědělským obhospodařováním výrazně klesá obsah OH v půdě. Obděláváním půdy se přimíchává O_2 do půdy a zvyšuje se její průměrná teplota, čímž se zvyšuje rychlost rozkladu OH. Přestože POH tvoří pouze malou část hmoty zemědělských půd, je její přítomnost spojena se zlepšením struktury půdy, a i nepatrné navýšení POH v půdě přináší výhody: sníženou erozi

a zvýšení výnosu plodin. Pro udržení adekvátních fyzikálních chemických vlastností půdy se na používá mnoho různých metod, jako jsou fyzikální (hluboká orba, podorávání, pískování a inverze profilu) či chemické meliorace (úprava vlastností půdy anorganickými či organickými aditivami). Hospodaření s hnojivem, např. chemické hnojení, aplikace hnoje a zadržování slámy, bylo uznáno za nejúčinnější a nejefektivnější způsob, jak podpořit akumulaci POH nebo snížit rychlost jejího úbytku. V oblastech s nedostatkem živin hnojiva zvyšují výnos plodin a biomasu a tím i příjem rostlinných zbytků a kořenového C do půdy (Agegnehu et al., 2016).

9. Kompost a vermikompost

Kompost je jednou z vhodných cest využívajících „odpadních“ organických materiálů k výrobě hnojiva. Kompostování je biologickým postupem využívání bioodpadu, při kterém se za řízených aerobních podmínek činností mikroorganismů přeměňuje OH (zpravidla biologicky rozložitelný odpad – BRO; bioodpad) na biochemicky stabilní kompost. Technologie aerobního kompostování zabezpečuje mikrobiologickou přeměnu organických látek obsažených ve vstupní surovině na stabilní sloučeniny (např. na huminové látky). Jde o analogické procesy, jako při přirozené přeměně OH v půdním prostředí. Vytvářením optimálních podmínek pro rozvoj mikroorganismů se však celý děj urychluje a intenzifikuje (Mathur, 1993).

Vermikompost je kompost, který byl vytvořen ve specifickém prostředí pomocí žížal rodu *Eisenia foetida* (kalifornský červený hybrid). Žížaly ve svém trávicím traktu zpracovávají organický materiál, z toho asi 40 % organických látek využívají a zbytek (natrávené části), který vylučují do prostředí, je základem kompostu. Jako potrava slouží žížalám organický materiál (nejlépe napřed fermentovaný) s poměrem C:N přibližně 1:20. Pro žížaly je nutné zajistit dobré podmínky. Kromě dostatku organického materiálu vyžadují teplotu okolo 20 °C, vlhkost 80 %, pH v rozsahu 6-8 a dostatek vzduchu (Adhikary, 2012).

9.1 Obecný úvod do problematiky (vermi)kompostování

Komposty hrají významnou roli v koloběhu transformace organických látek a živin v přírodě. Mají nezastupitelnou úlohu při nakládání s odpady a vedlejšími produkty rostlinné produkce pro obnovu půdní úrodnosti. Fáze kompostování jsou velmi specifické a liší se převážně teplotou, vlhkostí a množstvím O₂ (Mengqi et al., 2021). Základní fáze kompostování jsou:

a) Mezofilní fáze:

Směs surovin má okolní teplotu a mikroorganismy, které rostou mezi 20-45 °C se začnou množit rozkladem C a N. Postupně se metabolická aktivita mikroorganismů zvyšuje, čímž dochází ke zvýšení teploty na 40-45 °C v průběhu dvou až osmi dnů. Snižuje se také pH směsi v důsledku produkce organických kyselin.

b) Termofilní fáze:

V této fázi teplota stoupne nad 45 °C a mezofilní mikroorganismy jsou nahrazeny „termofily“ (mikroorganismy, které se množí při teplotách mezi 45 °C a 70 °C). Termofily rozkládají složitější zdroje C, jako je celulóza a lignin. Další důležitou změnou je, že se N přeměňuje na NH₃ a pH směsi se stává zásadité. S teplotou 60 °C se objevují sporagenní bakterie (produkující spóry) a aktinobakterie, které jsou zodpovědné za rozklad vosků, hemicelulóz a složitějších bílkovin. Poté (několik dní i měsíců v závislosti na použité surovině) se udržuje vysoká teplota a snižuje se biologická aktivita mikroorganismů – dochází k pasterizačnímu procesu, při kterém umírají bakterie a škodlivé mikroorganismy. Během této fáze musí být směs často větrána s cílem dodat mikroorganismům O, aby mohly pokračovat v procesu rozkladu.

c) Fáze chlazení:

Po spotřebování C a N se teplota sníží na 40-45 °C. Znovu se objeví mezofilní mikroorganismy (Campioni, 2018) a rozloží zbývající materiál celulózy a ligninu. Také opět mírně klesá hodnota pH.

d) Fáze zrání:

V této fázi procesu je nutné, aby směs zůstala při pokojové teplotě. Během této doby dochází k řadě sekundárních reakcí, které spouští kondenzaci a polymeraci humusu.

Racionálním kompostováním je do půdy vráceno velké množství živin a organických látek, a současně se snižuje množství odpadů, které by zatěžovaly životní prostředí. Případné zapojení dalších látek do koloběhu živin má tudíž kromě agrochemického hlediska i velký hygienický a ekologický dopad. Jedná se v podstatě o transformaci C z organického odpadu do stabilních organických látek v kompostu (humusových substancí) a omezení produkce (sekvestrace) CO₂. Produktem stabilního kompostu je OH s vysokým obsahem mikroorganismů, která je částečně transformována na humusové látky a je stabilizována minerální koloidní frakcí. Postupnými transformačními procesy se zvyšuje kationt-výměnná kapacita (KVK nebo CEC-cation

Exchange capacity) a tvoří se stabilní organické látky. Kompostovat je možné celou řadu organických materiálů, mezi nejčastější patří např. listí, tráva, sláma, piliny, kůra, zbytek zelenin po sklizni, nat' brambor nebo mrkve, odpad z ovocné a okrasné zahrady, kuchyňský odpad a jiné. Značným zdrojem biologicky rozložitelných látek jsou odpady ze sídlišť a zástavby rodinných domů. Pokud se podaří tyto bioodpady rozumně třídit a zapojit do kompostování, tak lze předpokládat produkci kvalitního kompostu, který je dobře využitelný v celé řadě málo úrodných půd, kde může částečně nahradit nedostatečný obsah OH (Gao et al., 2019).

Alternativou ke klasickému kompostování je již výše zmíněné vermikompostování, které 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. Díky tomu je ve stabilizovaném vermikompostu možno docílit až desetkrát většího počtu mikroorganismů ve srovnání s klasickým kompostem (Carrasquero-Durán et al., 2009). Jedná se o proces biooxidace, kdy se stabilizuje OH rostlinného a/nebo živočišného původu. Při tomto mezofilním procesu je udržována teplota udržována pod 25 °C, což je hraniční teplota pro přežití žížal. Proces tedy nezahrnuje termofilní fázi rozkladu jako u kompostování. Vermikompostování slouží k likvidaci organického odpadu, snižuje jeho objem a přeměňuje ho na hodnotné živiny. Odpady jsou degradovány o více jak 50 % a mnohem rychleji oproti konvenčním způsobům. Navíc je vzniklý kompost dezinfikován, detoxikován a je bohatší na živiny (Sinha et al., 2014).

9.2 Vliv (vermi)kompostování na obsah biogenních prvků a jejich migraci v prostředí

Komposty a vermikomposty nejsou již považovány za odpad, ale za organické půdní aditivum, které zlepšuje příjem živin. Obsah živin v kompostu a vermikompostu je závislý na zdrojích, které byly k jeho přípravě využity a dle metod zpracování. Aby bylo možné kompost využít jako hnojivo v zemědělství, musí být obsah celkového dusíku (TN) vyšší než 1 % DW (suchá hmotnost). Pokud kompost obsahuje TN méně než 1 %, je vyžadováno doplňkové N hnojivo. Komposty a vermikomposty obvykle obsahují Ca a Mg, které působí jako báze (např. pokud jsou ve formě oxidů, hydroxidů a uhličitanů), tudíž po jejich aplikaci do půdy mohou působit proti okyselení půdy a měnit (zvýšit) hodnoty pH. V důsledku zvýšené koncentrace Ca^{2+} v půdním roztoku dochází k výměně $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ v půdě, vyplavování vyměněného Na^+ v percolační vodě (gravitační vertikální pohyb vody) a následnému snížení zasolení půdy.

Typický rozsah Ca v kompostu je mezi 1,0 a 4,0 % a Mg je 0,2–0,4 % suché hmotnosti (Barthod et al., 2018). Hlavním cílem aplikace kompostu není okamžitě obohatit půdu o základní prvky pro růst a vývoj rostlin, jako je N, P a K, ale přispět ke zlepšení struktury půdy a umožnit rostlinám mobilizaci živin. Přestože vstupní suroviny do procesu kompostování kompostováním jsou pro rostliny velmi užitečné, mají zjevnou nevýhodu v tom, že ve srovnání s chemickými hnojivy nedodávají vhodné koncentrace makroživin potřebné pro výživu rostlin. Obecně se tyto požadavky odhadují takto: 1,5 % N, 0,2 % P a 1,0 % K (Sánchez et al., 2017).

Jak již bylo zmíněno, kvalita (vermi)kompostů a obsah živin souvisí se složením vstupních surovin. Tyto suroviny se silně podílejí na obohacování kompostu biogenními prvky, ale i potenciálně rizikovými kovy či dalšími látkami. Jelikož je možné vyrábět (vermi)komposty ze směsí různých odpadů, může se zvyšovat znečištění konečného produktu. Během kompostovacího procesu se rozloží některé organické kontaminanty, produkt je dezinfikován během pasterizace, ale v konečném produktu zůstávají stopové kovy, což představuje velmi významný problém z hlediska zemědělství a životního prostředí. Vezmeme-li v úvahu, že proces kompostování vede ke ztrátě asi 50 % původní hmoty, hladina kovů se zvýší dvakrát (Kästner and Miltner, 2016). V případě vermikompostu žížaly ovlivňují půdní prostředí především produkcí exkrementů a tvorbou chodeb. Význam exkrementů je umocněn vlastním vyprodukovaným množstvím. Žížaly spotřebují jen malou část půdy a organických zbytků, které projdou jejich zažívacím traktem, zbytek vyloučí v podobě výkalů s vysokým podílem živin (Pommeresche et al., 2010). Exkrementy žížal jsou centry mikrobiální aktivity v půdě a také obsahují více NH_4^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} a dalších výměnných iontů než okolní půda. Dále mají oproti půdě vyšší obsah auxinových látek, giberelinů, cytokininů a volných aminokyselin stimujících růst rostlin (Pižl, 2002).

9.3 Vliv (vermi)kompostování na růst a výživu rostlin

Zapřavováním (vermi)kompostu do půd se výrazně stimuluje půdní mikrobiální biomasa a její aktivita. V důsledku zapřavování OH se obecně zvyšuje úrodnost půdy, což má za následek zvýšení příjmu N a P rostlinami. Vermikompost, ve srovnání s klasickým kompostem, obsahuje méně rizikových kovů, a navíc některé hormony podporující růst, které se uvolňují z těl žížal (Suhane, 2007). Obecně obsahuje vermikompost i vysoké hladiny huminových kyselin. Všechny tyto jevy mají pozitivní účinek na zdraví rostlin (Edwards et al., 1988). Díky nim má vermikompost blahodárné účinky na vegetativní vývoj a stimulaci vývoje výhonků a kořenů a (Edwards et al., 2004). Jeho aplikací se zlepšuje morfologie rostlin (např. listové plochy),

zlepšuje se klíčení semen, růst sazenic a zvyšuje se celková rostlinná produkce (Arancon et al., 2008; Lazcano et al., 2009; Nagavallemma et al., 2004). Mezi pozitivní výsledky přidání vermikompostu do půdy patří i zlepšení kořenového systému (např. hmotnost kořene, délku kořenů). Několik studií prokázalo zvýšení biomasy a výnosu zrna v různých plodinách po uvážlivé aplikaci vermikompostu a chemického hnojiva. Kromě výše uvedených výsledků existuje v literatuře několik příkladů, které dokumentovaly zvýšený růst široké škály rostlinných druhů po zabudování vermikompostu do půdy, protože funguje jako okamžitý zdroj zásobování rostlin živinami (Edwards et al., 2004; Grigatti et al., 2007).

9.4 Rizika spjatá s využitím (vermi)kompostu

Využití (vermi)kompostu v zemědělství je legislativně upraveno tak, aby se zabránilo škodlivým účinkům na půdu, vegetaci, zvířata a lidské zdraví, čímž se podporuje správné používání biogenních látek a ochrana životního prostředí. Předpisy se však mezi zeměmi do značné míry liší, pokud jde o požadavky na kvalitu organického odpadu a množství znečišťujících látek, které lze přidat do půdy. Přebytkem rizikových kovů a solí s nízkým stupněm stabilizace dochází ke snížení kvality kompostu a vermikompostu. Velké množství huminových látek, které tvoří hlavní část OH ve (vermi)kompostu, navíc může snížit rozpustnost kovů tvorbou stabilních kovových chelátů. Rozdíly s ohledem na účinky na dostupnost kovů mezi úpravami mohou souviset s rozdíly nejen v OH (zvlhčování), ale také v minerálních frakcích (obsah soli, pH) a kationtové výměnné kapacitě (KVK), stejně jako se změnami redoxních podmínek půdy. Přítomnost organických toxinů je dalším možným rizikem, a to hlavně při aplikaci (vermi)kompostu špatné kvality do půdy. Zapravování organických hnojiv do půdy v nadměrné dávce může vést k akumulaci toxických látek v důsledku anaerobního rozkladu organických látek. Je známo, že řada organických polutantů, jako jsou hydrofobní perzistentní organické kontaminanty a povrchově aktivní látky, se hromadí v organických odpadech. Chování organických polutantů během kompostování a vyhnívání naznačuje degradaci během kompostování, ale u odolnějších sloučenin, jako jsou PCB nebo PCDD/F, může docházet jen k částečné degradaci. Odhady ročních zátěží některých organických znečišťujících látek vypouštěných do zemědělské plochy po aplikaci kompostu však ukázaly, že zátěž pocházející z použití kompostu má menší význam ve srovnání se zátěží způsobenou vzdušnou depozicí a také aplikací statkových hnojiv a splaškových kalů (Walling and Webb, 1985).

10. Diskuze

Současné používání organických hnojiv zemědělci je stále nízké kvůli jejich vyšší maloobchodní ceně ve srovnání se syntetickými hnojivy. Rovněž stále existují určité překážky, s nimiž se setkávají drobní zemědělci, a to například nedostatek znalostí a zkušeností s používáním organických hnojiv; špatná schopnost reagovat na nepředvídatelné vnější faktory, jako je sucho, náhlý příchod nových chorob a škůdců; vysoké náklady na certifikaci (Karak and Bhattacharyya, 2011). Z tohoto důvodu je proto nezbytné provádět další výzkumy, který by následně pomohly vyřešit i obavy zemědělců. Například by mohly být implementovány a vyvinuty inovativní a efektivní systémy zemědělských služeb, které by vzdělávaly a pomáhaly zemědělcům v oblasti mechaniky ekologického zemědělství s cílem řešit nedostatečné znalosti a zkušenosti s udržováním systému ekologického zemědělství (Kroma, 2006). Důležitou roli by také měly hrát ekonomické analýzy aplikovaných systémů hnojení, aby bylo možné zhodnotit výhody a nevýhody nových postupů. Nové výzkumy by se tedy měly této problematice více věnovat, tj. zkoumat ekonomickou udržitelnost v dlouhodobém horizontu.

Je důležité rovněž zmínit, že výběr pěstebních médií v ekologickém zemědělství/zahradnictví je omezený kvůli požadavkům používat pouze materiály, které byly schváleny pro použití v ekologickém zemědělství. V tomto ohledu je kompost běžně používanou složkou například pro pěstování skleníkových bylin (Treadwell et al., 2007). O použití vermikompostu v zahradnických substrátech se také uvažovalo kvůli jeho vysoké koncentraci živin dostupných pro rostliny (Pant et al., 2009). Pro praktické účely však mohou být důležité i další přímé účinky vermikompostu na rostliny v důsledku přítomnosti rostlin prospěšných mikroorganismů, jak již bylo zmíněno i v této bakalářské práci. Hormonální účinky byly popsány v dřívějších studiích (Krishnamoorthy and Vajranabhaiah 1986; Tomati et al., 1988), kdy byla přítomnost látek s aktivitou podobnou hormonům ve vermikompostových přípravcích potvrzena instrumentálními metodami (Scaglia et al., 2016). S ohledem na další možné přínosy použití vermikompostu pro pěstování plodin je důležité také zmínit uváděný pozitivní účinek vermikompostu z hlediska ochrany proti patogenům a býložravcům (Arancon et al., 2007; Cardoza and Buhler, 2012).

Podobně vermikompost pozitivně ovlivňuje obecnou úrodnost půdy přítomností relativně vysokého procenta prospěšných mikroorganismů (Grantina-Ievina et al., 2013). Při porovnání kompostu a vermikompostu se významně lišila kvalita výsledného materiálu s ohledem na strukturu mikrobiálního společenství. Ve srovnání s aerobním kompostem měl vermikompost nižší pH, nižší koncentrace ligninu a celulózy ($P < 0,05$), vyšší hodnotu EC (elektrická vodivost)

a vyšší TN (totální obsah dusíku) a dostupné koncentrace P (Cai et al., 2018). Výsledky půdního rozboru v další studii ukázaly, že aplikace vermikompostu výrazně zvýšila pH půdy a dokázala udržet obsah živin v půdách. Ačkoli příjem některých živin rostlinami byl nižší, bylo dosaženo podobných hodnot jako při použití chemických hnojiv. Z toho lze odvodit, že oba typy hnojiv (chemické hnojivo a vermikompost) nemohly dodávat ideální koncentraci živin vyžadovanou studovanými rostlinami (ananas), když byly použity jako jediný poskytovatel živin pro hlinitopísčitou půdu. Proto je třeba provést další výzkum s cílem určit nejlepší poměr kombinace mezi vermikompostem a chemickým hnojivem pro podporu růstu a vývoje rostlin, zajištění udržitelnosti zemědělství a dalšího snížení znečištění životního prostředí (Lim et al., 2015). Další studie se zabývala aplikací vermikompostu vedoucí k významnému zvýšení dostupnosti půdních živin, příjmu živin a výnosu plodin ve srovnání s kontrolní půdou (tj. bez aplikace vermikompostu) pro pěstování hořčice. Aplikace vermikompostu zajistila vyšší dostupnost N a K v půdách. Tyto výsledky naznačují, že aplikace vermikompostu je vyžadována v systémech ekologického zemědělství, aby byl zajištěn nejlepší přímý a reziduální účinek na dostupnost půdních živin, příjem živin rostlinami a výnosy plodin (Nurhidayati et al., 2018).

Jak již bylo zmíněno, vermikompost zlepšuje úrodnost půdy z hlediska fyzikálních a chemických vlastností půdy. Fyzikální vylepšení zahrnují lepší provzdušnění, pórovitost a objemovou hustotu půdy. Chemické vlastnosti, jako je pH, elektrická vodivost a obsah organického uhlíku, jsou také vylepšeny pro lepší růst rostlin. Bylo však zjištěno, že nutriční faktor vermikompostů neposkytuje dostatečné důkazy, které by plně vysvětlily zvýšený růst rostlin, což naznačuje, že ve vermikompostech existují další materiály zodpovědné za růst rostlin. Tyto látky ovlivňující růst rostlin zahrnují huminové kyseliny a rostlinné růstové hormony, jako jsou auxiny, gibbereliny a cytokininy. Ačkoli kompost obvykle obsahuje mnoho prospěšných rostlinných živin, není považován za hnojivo kvůli vysoké variabilitě (nehomogenitě) živin v různých kompostovacích produktech dle parametrů a testovacích metod (United States Composting Council (USCC)). Navzdory zdokumentovaným výhodám použití kompostu pro růst rostlin se některé použití kompostu setkala se skepticismem kvůli možné vysoké koncentraci soli. Existují nejasné informace, že aplikace kompostů s vysokou koncentrací rozpustných solí může vést ke snížení kvality půdy a růstu rostlin. V regionech s problémy se salinitou půdy (např. salinizací) a sodicitou pak často není vermi(kompost) doporučován, a to kvůli fyto toxicitě spojené s konkrétními rozpustnými solemi, což by vedlo ke zvýšené koncentraci Na^+ a Cl^- (Reddy and Crohn, 2012; Wu, Ma and Martinez, 2000). Naopak bylo publikováno, že přínosem může být úprava rašelinového substrátu kompostem

vedoucí k potlačení různých chorob (Pane et al., 2011). Obecně se uvádí, že aplikace kompostů do pěstebního média v nádobách chrání rostliny před půdními patogeny (De Brito et al., 1995). Bylo dokonce popsáno, že aplikace kompostu vyvolává systémovou získanou rezistenci vůči chorobám a škůdcům (Zhang et al., 1996). Tyto vlastnosti jsou mimořádně důležité v ekologickém zemědělství kvůli jinak omezeným možnostem ochrany proti predátorům. Kromě přímého vlivu rostlinných živin v kompostech mají na růst rostlin také pozitivní vliv jejich půdní aktivita a struktura mikrobiálního společenstva spojen s přítomností polysacharidů a sloučenin odvozených od ligninu (Pane et al., 2015). Výsledky další studie potvrdily pozitivní roli aplikací kompostu a vermikompostu pro zlepšení výnosu plodů rajčat a obsahu živin, kde byl potvrzen rozdílný vzorec kompostu a vermikompostu. Obsahy biologicky dostupných živin v testovaných substrátech byly obecně vyšší v půdě ošetřené vermikompostem než v půdě ošetřené kompostem (Bouček et al., 2021). Z výše uvedeného je tedy patrné, že přínosy (vermi)kompostu převažují, v případě správné přípravy, nad pozorovanými nedostatky, a tento způsob úpravy půdy by jistě měl být dále zkoumán a následně aplikován, aby se podporovala produkce rostlin a obecně zlepšovala kvalita půd včetně zadržování organické hmoty.

11. Závěr

Dostupnost makroživin i mikroživin je obecně vyšší ve vermikompostu než v tradičním kompostu a anorganickém hnojivu, což naznačuje, že vermikompost je lepší doplněk pro zlepšení a stimulaci růstu rostlin. Vermikompost má tedy obrovský potenciál pro použití na zemědělských plodinách. V blízké budoucnosti by měly být vermikomposty ve velké míře a extenzivně aplikovány na zemědělskou půdu jako náhrada, nebo případně kombinování s anorganickými hnojivy. Přestože lze mezi komposty a vermikomposty nalézt pouze nepatrné rozdíly v chemických vlastnostech, bude potřeba důkladněji zhodnotit jejich nepřímé účinky po přidání do půdy (např. na zralost rostlin, výnosové vlastnosti, strukturu půdy, vodní režim). Na závěr je třeba zdůraznit, že aplikace biohnojiv, kompostu a hlavně vermikompostu může zvýšit výnos zemědělských plodin a obecně zvýšit množství organické hmoty v půdě. Z tohoto důvodu je právě aplikace kompostu a vermikompostu v ekologickém zemědělství budoucností zemědělské techniky. Kromě toho, protože ekologické zemědělství neustále roste v celosvětovém měřítku, jsou organická hnojiva, jako je vermikompost, potřebná i k udržení výnosu a růstu organických plodin jako celku. Budoucnost ekologického zemědělství zahrnuje zlepšování a vývoj současných technologií pro zlepšení účinnosti hnojiv z hlediska zásobování živinami a využití lokálně dostupných zdrojů organických hnojiv.

12. Použitá literatura

Adekunle, A., Raghavan, V., & Tartakovsky, B. (2017). Carbon source and energy harvesting optimization in solid anolyte microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 356, 324-330.

Adhikary, S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review.

Aebischer, N. J., Robertson, P. A., & Kenward, R. E. (1993). Compositional analysis of habitat use from animal radio-tracking data. *Ecology*, 74(5), 1313-1325.

Agegehu, G., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil and Tillage Research*, 160, 1-13.

Ali, U., Sajid, N., Khalid, A., Riaz, L., Rabbani, M. M., Syed, J. H., & Malik, R. N. (2015). A review on vermicomposting of organic wastes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(4), 1050-1062. ISO 690

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Babenko, A., Cannon, J., Galvis, P., & Metzger, J. D. (2008). Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology*, 39, 91-99

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Yardim, E. N., Oliver, T. J., Byrne, R. J., & Keeney, G. (2007). Suppression of two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*), mealy bug (*Pseudococcus* sp) and aphid (*Myzus persicae*) populations and damage by vermicomposts. *Crop Protection*, 26(1), 29-39.

Barthod, J., Rumpel, C., and Dignac, M. F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 1-23.

Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G. R., Hill, J., Whiting, M. L., and Sommer, S. (2009). Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote sensing of environment*, 113, S38-S55.

Bhardwaj, A. K., Jasrotia, P., Hamilton, S. K., and Robertson, G. P. (2011). Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(3-4), 419-429.

Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., and Rabbinge, R. (2015). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*, 51(8), 897-911.

Blake, L., Mercik, S., Koerschens, M., Goulding, K. W. T., Stempen, S., Weigel, A., ... and Powlson, D. S. (1999). Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant and Soil*, 216(1), 1-14.

Bodirsky, B. L., Rolinski, S., Biewald, A., Weindl, I., Popp, A., and Lotze-Campen, H. (2015). Global food demand scenarios for the 21 st century. *PloS one*, 10(11), e0139201.

Bouček, J., Kulhánek, M., Košnář, Z., Podhorecká, K., Obergruber, M., Hönig, V., ... & Trakal, L. (2021). Is *Bacillus amyloliquefaciens* inoculation effective for the enhancement of soil and plant nutrient status and fruit quality of *Solanum lycopersicum* L. in the presence of composted organic fertilisers?. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-15.

Cai, L., Gong, X., Sun, X., Li, S., & Yu, X. (2018). Comparison of chemical and microbiological changes during the aerobic composting and vermicomposting of green waste. *PloS one*, 13(11), e0207494.

Campioni, T. S. (2018). Development of bioprocess for fibrolytic fungal enzymes production from lignocellulosic residues and its application on kraft pulp biobleaching and xylooligosaccharides production.

Cardoza, Y. J., & Buhler, W. G. (2012). Soil organic amendment impacts on corn resistance to *Helicoverpa zea*: Constitutive or induced?. *Pedobiologia*, 55(6), 343-347.

Carrasquero-Durán, A., and Flores, I. (2009). Evaluation of lead (II) immobilization by a vermicompost using adsorption isotherms and IR spectroscopy. *Bioresource technology*, 100(4), 1691-1694.

De Brito, A. M., Gagne, S., & Antoun, H. (1995). Effect of compost on rhizosphere microflora of the tomato and on the incidence of plant growth-promoting rhizobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(1), 194-199.

Dordas, C. (2008). Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 28(1), 33-46.

Edwards, C. A., Dominguez, J., & Arancon, N. Q. (2004). The influence of vermicomposts on plant growth and pest incidence. In: *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century* (Shakir, S. H., Mikhaïl, W. Z. A., Eds.), Cairo, pp. 397-420.

Edwards, C., & Burrows, I. (1988). The potential of earthworm compost as plant growth media, 211-219. In: C. Edwards and E. Neuhauser (eds.). *Earthworms in waste and environmental management*. Academic, The Hague, The Netherlands.

Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature geoscience*, 1(10), 636-639.

Fantle, M. S., and Tipper, E. T. (2014). Calcium isotopes in the global biogeochemical Ca cycle: Implications for development of a Ca isotope proxy. *Earth-Science Reviews*, 129, 148-177.

Foth, H. D., and Ellis, B. G. (2018). *Soil fertility*. CRC Press.

Francois, L. E., and Maas, E. V. (1999). Crop response and management of salt-affected soils. *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker Press Inc., New York, 169-201.

Gao, X., Tan, W., Zhao, Y., Wu, J., Sun, Q., Qi, H., ... and Wei, Z. (2019). Diversity in the mechanisms of humin formation during composting with different materials. *Environmental science and technology*, 53(7), 3653-3662.

- Gransee, A., & Führs, H. (2013). Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368(1), 5-21.
- Grantina-Ievina, L., Andersone, U., Berkolde-Pīre, D., Nikolajeva, V., & Ievinsh, G. (2013). Critical tests for determination of microbiological quality and biological activity in commercial vermicompost samples of different origins. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(24), 10541-10554.
- Grigatti, M., Giorgonni, M., & Ciavatta, C. (2007). Compost-based growing media: influence on growth and nutrient use of bedding plants. *Bioresource Technology*, 98, 3526-3534.
- Hinckley, E. L. S., Crawford, J. T., Fakhraei, H., and Driscoll, C. T. (2020). A shift in sulfur-cycle manipulation from atmospheric emissions to agricultural additions. *Nature Geoscience*, 13(9), 597-604.
- Holmén, K. (1992). 11 The Global Carbon Cycle. In *International Geophysics* (Vol. 50, pp. 239-262). Academic Press.
- Jouquet, E. P., Bloquel, E., Doan, T. T., Ricoy, M., Orange, D., Rumpel, C., and Duc, T. T. (2011). Do compost and vermicompost improve macronutrient retention and plant growth in degraded tropical soils?. *Compost science and utilization*, 19(1), 15-24.
- Jungk, A. (2001). Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164(2), 121-129.
- Karak, T., & Bhattacharyya, P. (2011). Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, conservation and recycling*, 55(4), 400-408.
- Kästner, M., and Miltner, A. (2016). Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(8), 3433-3449.
- Kirschenmann, F. (2010). Comprehending soil within the context of the land community. In *Soil and Culture* (pp. 227-238). Springer, Dordrecht.
- Krishnamoorthy, R. V., & Vajranabhaiah, S. N. (1986). Biological activity of earthworm casts: an assessment of plant growth promotor levels in the casts. *Proceedings: Animal Sciences*, 95(3), 341-351.
- Kroma, M. M. (2006). Organic farmer networks: facilitating learning and innovation for sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 28(4), 5-28.
- Lamb, J. A., Fernandez, F. G., and Kaiser, D. E. (2014). Understanding nitrogen in soils. *University of Minnesota Extension, (Revised)*, 1-5.
- Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J. G., & Domínguez, J. (2009). Compost and vermicompost as nursery pot components: Effects on tomato plant growth and morphology. *Span. Journal of Agricultural Research*, 7, 944-951.

Lim, S. L., Wu, T. Y., Lim, P. N., & Shak, K. P. Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1143-1156.

López-Bucio, J., Cruz-Ramírez, A., & Herrera-Estrella, L. (2003). The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 280-287.

Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., & Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural water management*, 120, 30-38.

Markert, B. (1992). Presence and significance of naturally occurring chemical elements of the periodic system in the plant organism and consequences for future investigations on inorganic environmental chemistry in ecosystems. *Vegetatio*, 103(1), 1-30.

Martin, H. W., & Sparks, D. L. (1985). On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16(2), 133-162.

Mathur, S. P., Owen, G., Dinel, H., and Schnitzer, M. (1993). Determination of compost biomaturity. I. Literature review. *Biological Agriculture and Horticulture*, 10(2), 65-85.

McLauchlan, K. (2006). The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: a review. *Ecosystems*, 9(8), 1364-1382.

Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., & Awais, M. (2021). Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-24.

Moore, D. C., & Singer, M. J. (1990). Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Science Society of America Journal*, 54(4), 1117-1123.

Nagavallema, K., Wani, S., Stephane, L., Padmaja, V., Vineela, C., Babu, R. M., & Sahrawat, K. (2004). Vermicomposting: recycling wastes into valuable organic fertilizer. *Journal of SAT Agricultural Research*, 2, 1-16.

Nannipieri, P., GRECO, S., and Ceccanti, B. (2017). Ecological significance of the biological activity in soil. *Soil biochemistry*, 293-356.

Nurhidayati, N., Machfudz, M., & Murwani, I. (2018). Direct and residual effect of various vermicompost on soil nutrient and nutrient uptake dynamics and productivity of four mustard Pak-Coi (*Brassica rapa* L.) sequences in organic farming system. *International journal of recycling of organic waste in agriculture*, 7(2), 173-181.

Pane, C., Celano, G., Piccolo, A., Vilecco, D., Spaccini, R., Palese, A. M., & Zaccardelli, M. (2015). Effects of on-farm composted tomato residues on soil biological activity and yields in a tomato cropping system. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2(1), 1-13.

Pane, C., Spaccini, R., Piccolo, A., Scala, F., & Bonanomi, G. (2011). Compost amendments enhance peat suppressiveness to *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani* and *Sclerotinia minor*. *Biological control*, 56(2), 115-124.

- Pant, A. P., Radovich, T. J., Hue, N. V., Talcott, S. T., & Krenek, K. A. (2009). Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, *Chinensis* group) grown under vermicompost and chemical fertiliser. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(14), 2383-2392.
- Peverill, K. I., Sparrow, L. A., and Reuter, D. J. (Eds.). (1999). *Soil analysis: an interpretation manual*. CSIRO publishing.
- Pižl, V. (2002). Žížaly České republiky. Earthworms of the Czech Republic. *Sborník Přírodovědného klubu v Uherském Hradišti*, 9, 1-154.
- Pommeresche, R., Hansen, S., Løes, A. K., and Sveistrup, T. (2010). Žížaly a jejich význam pro zlepšování kvality půdy. *Bioinstitut a Bioforsk Organic, Olomouc*.
- Prietzl, J., Falk, W., Reger, B., Uhl, E., Pretzsch, H., & Zimmermann, L. (2020). Half a century of Scots pine forest ecosystem monitoring reveals long-term effects of atmospheric deposition and climate change. *Global Change Biology*, 26(10), 5796-5815.
- Rajiv K, S., Sunita, A., Krunal, C., Vinod, C., and Brijal Kiranbhai, S. (2010). Vermiculture technology: reviving the dreams of Sir Charles Darwin for scientific use of earthworms in sustainable development programs. *Technology and Investment*, 2010.
- Reddy, N., & Crohn, D. M. (2012). Compost induced soil salinity: A new prediction method and its effect on plant growth. *Compost science & utilization*, 20(3), 133-140.
- Richard, T. L., and Woodbury, P. B. (1992). The impact of separation on heavy metal contaminants in municipal solid waste composts. *Biomass and bioenergy*, 3(3-4), 195-211.
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., and Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource technology*, 98(9), 1822-1831.
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., and Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste management*, 69, 136-153.
- Scaglia, B., Nunes, R. R., Rezende, M. O. O., Tambone, F., & Adani, F. (2016). Investigating organic molecules responsible of auxin-like activity of humic acid fraction extracted from vermicompost. *Science of the Total Environment*, 562, 289-295.
- Sebilo, M., Mayer, B., Nicolardot, B., Pinay, G., and Mariotti, A. (2013). Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(45), 18185-18189.
- Sharma, K. L., Grace, J. K., Mandal, U. K., Gajbhiye, P. N., Srinivas, K., Korwar, G. R., ... and Yadav, S. K. (2008). Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indices in a semi-arid tropical Alfisol. *Soil research*, 46(4), 368-377.

- Sinha, R. K., Patel, U., Soni, B. K., & Li, Z. (2014). Earthworms for safe and useful management of solid wastes and wastewaters, remediation of contaminated soils and restoration of soil fertility, promotion of organic farming and mitigation of global warming: A review. *Journal of Environment and Waste Management*, 1(1), 011-025.
- Soane, B. D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage research*, 16(1-2), 179-201.
- Sooraki, F. Y., and Moghadamyar, M. (2017). Growth and quality of cucumber, tomato, and green bean under foliar and soil applications of an aminochelate fertilizer. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58(6), 530-536.
- Stevenson, F. J. (1982). Organic forms of soil nitrogen. *Nitrogen in agricultural soils*, 22, 67-122.
- Stolt, M. H., and Lindbo, D. L. (2010). Soil organic matter. In *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths* (pp. 369-396). Elsevier.
- Suhane, R. K. (2007). Vermicompost. Rajendra Agriculture University, Pusa, pp. 88.
- Thompson, P. D. (1957). Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns. *Tellus*, 9(3), 275-295.
- Tomati, U., Grappelli, A., & Galli, E. (1988). The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biology and fertility of soils*, 5(4), 288-294.
- Treadwell, D. D., Hochmuth, G. J., Hochmuth, R. C., Simonne, E. H., Davis, L. L., Laughlin, W. L., ... & Osborne, L. S. (2007). Nutrient management in organic greenhouse herb production: where are we now?. *HortTechnology*, 17(4), 461-466.
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Gangwar, S., Prasad, S. M., Maurya, J. N., and Chauhan, D. K. (2014). Role of silicon in enrichment of plant nutrients and protection from biotic and abiotic stresses. In *Improvement of crops in the era of climatic changes* (pp. 39-56). Springer, New York, NY.
- Walling, D. E., & Webb, B. W. (1985). Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers: some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin*, 16(12), 488-492.
- Wang, W. J., Baldock, J. A., Dalal, R. C., and Moody, P. W. (2004). Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(12), 2045-2058.
- Wright, R. F., Larssen, T., Camarero, L., Cosby, B. J., Ferrier, R. C., Helliwell, R., ... & Schöpp, W. (2005). Recovery of acidified European surface waters. *Environmental Science & Technology*, 39(3), 64A-72A.
- Wu, L., Ma, L. Q., & Martinez, G. A. (2000). *Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost* (Vol. 29, No. 2, pp. 424-429). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Yan, B., and Hou, Y. 2018, July. Effect of soil magnesium on plants: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 170, No. 2, p. 022168). IOP Publishing.

Zhang, W., Dick, W. A., & Hoitink, H. A. J. (1996). Compost-induced systemic acquired resistance in cucumber to *Pythium* root rot and anthracnose. *Phytopathology*, 86(10), 1066-1070.

13. Seznam použitých zkratek

<u>Zkratka</u>	<u>Význam</u>
OH	Organická hmota
OM	Organic matter
POH	Půdní organická hmota
N	Dusík
P	Fosfor
K	Draslík
C	Uhlík
S	Síra
Si	Křemík
O	Kyslík
Al	Hliník
Fe	Železo
Zn	Zinek
Na	Sodík
Mg	Hořčík
NH ₄ ⁺	Amonný kation
SO ₂	Oxid siřeičitý
SO ₄ ²⁻	Síran
NH ₃	Amoniak
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý
H ₂ O	Voda
MgCO ₃	Uhličitan hořečnatý
H ⁺	Kation vodíku
NO ₃ ⁻	Dusičnanový
K ⁺	Kation draslíku
H ₂ PO ₄	Kyselina fosforečná
PCB	Polychlorované bifenyly
PCDD/F	Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany
KVK	Kationtová výměnná kapalina