

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra botaniky a fyziologie rostlin**



**Mikrobiální inokulace při pěstování užitkových rostlin  
v písčitém substrátu**

**Diplomová práce**

**Autor práce: Bc. Martin Švorc**

**Obor studia: Produkční zahradnictví**

**Vedoucí práce: Ing. Helena Hniličková, Ph.D.  
Konzultant: doc. RNDr. Miroslav Vosátka, CSc.**

© 2021 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Mikrobiální inokulace při pěstování užitkových rostlin v písčitém substrátu" jsem vypracoval 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 autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 24.4.2021

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé práce Ing. Heleně Hniličkové Ph.D. za konzultace při psaní této práce. Panu doc. RNDr. Miroslavu Vosátkovi, CSc. za mentoring během experimentu, i po něm, při psaní této práce. Mgr. Dušanu Kuncovi a Ing. Soně Zvolenskéé, za pomoc s vedením pokusu na pracovišti AV v Průhonicích. Ing. Anetě Klímové Ph.D. za pomoc se statistickými metodami.

# Mikrobiální inokulace při pěstování užitkových rostlin v písčitém substrátu

## Souhrn

V této diplomové práci jsem provedl experiment, jehož cílem bylo zjistit, zda přidání různých mikroorganismů do sterilizovaného písku, dokáže zlepšit růst vybraných druhů zeleniny. Z mikroorganismů bylo v experimentu použito endomykorhizní inokulum *Rhizophagus irregularis* var. Chomutov, endofytní houby MR 67 *Verticillium leptobactrum*, MR 75 *Periconia macrospinosa*, MR 52 *Leptodontidium orchidicola* a směs endofytních bakterií ENDOSTIM B®. Rostliny, na kterých byl pokus proveden, byly pór zahradní (*Allium porrum* L. 'Albus') a rajče jedlé (*Solanum lycopersicum* L. 'Bajaja'). Ke všem rostlinám vyjma kontroly se přidával jako zdroj živin výluh z vermikompostu Florium Růst a k mykorhizní variantě se navíc přidávala řasová suspenze pěstované mikrořasy *Dicosphaerium chlorelloides*. Kontrolní varianta byla hnojena minerálním hnojivem Kristalon Start. Sledovanými znaky bylo vyhodnocení výšky a hmotnosti nadzemní biomasy u obou zelenin a u rajčat bylo předmětem výzkumu také množství sebraných plodů. Přidání mikrobiálního inokula vedlo ke snížení nadzemní biomasy obou zelenin a u rajčete se snížila produkce plodů. Tento výsledek byl pozorován jak oproti kontrolní variantě, tak i proti ostatním variantám bez mikrobiálního inokula, které dostávaly stejné množství živin. Zvýšené množství živin v řasové suspenzi mělo za následek významný nárůst biomasy zelenin a zároveň zvýšení produkce plodů u rajčete. Vyhodnocení mykorhizní kolonizace kořenů rostlin, ke kterým se přidávala tato řasová suspenze, prokázalo snížení výskytu mykorhizy, které mohlo být zapříčiněno buď zvýšením množství živin, anebo zdrojem živin obsaženým v mikrořasové suspenzi. Snížení produkce nadzemní biomasy zelenin a množství plodů u rajčete bylo nejspíše zapříčiněno nízkým množstvím celkově dodaných živin rostlinám, které nebyly optimální pro potřebu rostlin samotných. Protože bylo množství dodaných živin nejspíše jediným limitním faktorem růstu rostlin, mikroorganismy přítomné při kultivaci rostlin se staly pro rostliny zátěží.

**Klíčová slova:** mykorhiza, endofytní houby, endofytní bakterie, vermikompost, mikrořasy

# Microbial inoculation for crop cultivation in a sand substrate

## Summary

The goal of my diploma thesis experiment was to determine if the inoculation of different genera of microorganisms can improve the growth of chosen vegetables in the sterilized sandy culturing medium. The microorganisms chosen for this experiment were the arbuscular mycorrhizae fungi *Rhizophagus irregularis* var. Chomutov, endophyte fungi MR 67 *Verticillium leptobactrum*, MR 75 *Periconia macrospinoso*, MR 52 *Leptodontidium orchidicola* and the registered endophytic bacteria ENDOSTIM B<sup>®</sup>. The vegetables used were the leek (*Allium porrum* L. 'Albus') and the tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Bajaja'). The nutrition added to all the plants except the control was the vermicompost tea Florium Rúst. Along with the vermicompost tea, a solution of the microalgae *Dicospaerium chlorelloides* was applied to the plants that had mycorrhizae. The control was fertilized with the mineral fertilizer Kristalon Start. The height of the vegetables as well as the dry weight of their above-ground biomass was measured at the end of the experiment. In addition, the tomatoes were harvested weekly and the yield was measured. Adding the microbial inoculation suppressed the growth in both vegetables and decreased the fruit development of the tomatoes. This result was noticeable when compared to both the control and the plants without microbial inoculations while receiving the same fertilizer treatment. Higher loads of the nutrition in the microalgae solution significantly raised the above-ground biomass of the vegetables as well as promoted the fruit development in tomato plants. Measurement of the mycorrhizae revealed a lower colonization in the plants where the microalgae solution was added, probably due to the increased nutrition present in the solution or the origin of these nutrients. The lower above-ground biomass and the lower production of fruit in the tomatoes was probably due to a low total amount of the nutrient available to the plants, which was not sufficient for their own growth. With the nutrient deficit being the only growth-limiting factor for these vegetables, the presence of the microorganisms has become a burden for the plants.

**Keywords:** mycorrhizae, endophytic fungi, endophytic bacteria, vermicompost, microalgae

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Literární rešerše .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Mikroorganismy pro inokulaci.....</b>	<b>3</b>
3.1.1	Mykorhizní houby.....	3
3.1.1.1	Arbuskulární mykorhiza.....	6
3.1.1.2	Využití AM při pěstování rostlin .....	7
3.1.2	Endofytní mikroorganismy .....	12
3.1.2.1	Endofytní houby .....	12
3.1.3	Endofytní bakterie.....	15
<b>3.2</b>	<b>Výživa rostlin .....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Řasová suspenze .....	19
3.2.2	Vermikompost.....	23
3.2.3	Minerální výživa .....	26
<b>4</b>	<b>Metodika.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Varianty .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Založení pokusu .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Hnojení .....</b>	<b>31</b>
4.3.1	Minerální výživa .....	31
4.3.2	Organická výživa.....	31
<b>4.4</b>	<b>Sklizeň plodů.....</b>	<b>31</b>
<b>4.5</b>	<b>Konec pokusu.....</b>	<b>31</b>
<b>4.6</b>	<b>Vyhodnocení.....</b>	<b>32</b>
4.6.1	Mykorhizní kolonizace.....	32
4.6.2	Statistické vyhodnocení .....	32
<b>5</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>Pór zahradní.....</b>	<b>33</b>
5.1.1	Výška sklizené natě .....	34
5.1.2	Hmotnost sklizené natě.....	36
5.1.3	Mykorhizní kolonizace.....	37
<b>5.2</b>	<b>Rajče jedlé .....</b>	<b>38</b>
5.2.1	Výška .....	38
5.2.2	Hmotnost .....	40
5.2.3	Mykorhizní kolonizace.....	41
5.2.4	Plody.....	41

<b>6</b>	<b>Diskuze.....</b>	<b>43</b>
6.1	Výživa rostlin .....	43
6.2	Mikroorganismy použité k rostlinám .....	45
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>48</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>72</b>

# 1 Úvod

Rostoucí populace lidí na světě vyžaduje hledat nové možnosti pro zvýšení produkce zemědělské činnosti. V roce 2018 bylo 95 % procent světové produkce potravin vyprodukováno pouze v 58 zemích světa (Pellegrini & Fernández 2018). Předpokládá se, že nynější populace čítající okolo 7 bilionů lidí vzroste do roku 2050 na hodnotu přesahující 9 bilionů, a bude zapotřebí do té doby zvýšit zemědělskou produkci v rozvojových zemích o 70 % až 100 % (FAO 2011). Období zelené revoluce, které začalo po druhé světové válce, mělo za následek trojnásobné zvýšení produkce potravin v období od roku 1961 do roku 2014 (Pellegrini & Fernández 2018). Vyšlechtění a zavedení nových vysoce výnosových odrůd, mělo z velké části zásluhu na tomto zvýšení rostlinné produkce (Evenson & Gollin 2003). Zásluhu na navýšení produkce mělo také zavedení používání vysokého množství minerálních hnojiv a kontrolovaná závlaha během kultivace plodiny (Cleaver Jr 1972). Technický pokrok umožnil zemědělcům zavést nové zemědělské praktiky, které jsou dnes známy jako intenzivní zemědělská produkce. Některé přípravky používané například na ochranu rostlin se prokázaly jako velice nevhodné, protože poškozovaly místní ekosystém a jejich další použití bylo zakázáno. Dlouholeté výzkumy však ukazují, že při intenzivním nevhodném zemědělství dochází k postupné degradaci půd, která má za následek snížení půdní úrodnosti, a tedy i snížení výnosů rostlinné produkce v následujících letech (Beretta-Blanco et al. 2019). Degradace půd v důsledku zemědělské činnosti by tak do budoucna mohla být velkým celosvětovým problémem, jelikož v roce 2019 bylo 98,8 % světové produkce potravin vypěstováno v půdě (Kopittke et al. 2019). Hlavní příčinou degradace zemědělských půd je vlivem eroze (větrné, vodní), zasolením půd, nadměrným zhutněním, kontaminací a množstvím dostupných živin (Bindraban et al. 2012). Procesy v půdě zaručující půdní úrodnost jsou komplexním souborem více faktorů. Jsou to fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, které dohromady spolu s vnějšími faktory vytvářejí dobré podmínky pro růst rostlin a při kterých se může dosáhnout potřebného výnosu. Množství organické hmoty v půdě bývá na degradovaných půdách nízké, a proto často slouží jako ukazatel půdní úrodnosti (Lehman et al. 2015). Navrácení půdní úrodnosti degradovaným půdám může být různě složitý a enegeticky i finančně náročný proces. Mikroorganismy nacházející se v půdě, mohou pomoci zlepšit růst a vývoj rostlin na úrodných i degradovaných půdách a tím zvýšit jejich výnos. V přirozeném prostředí většinou žijí v kontaktu s kořeny rostlin a některé se dostávají také do jejich vnitřních částí. Vzájemné vztahy mezi rostlinami a těmito mikroorganismy, a i mezi mikroorganismy samotnými jsou velmi komplikované. V neojedinělých případech mohou mikroorganismy mít na rostliny také negativní vliv. Přípravky používané v intenzivním zemědělství a způsob obhospodařování ploch ovlivňují také tyto organismy, které nejsou okem viditelné. Jejich přítomnost při vývoji rostlin může přitom přímo ovlivnit fyziologické procesy rostliny. Veliká část organické hmoty v půdě je mikroorganismy mineralizována a slouží jako zdroj živin nejen pro rostliny, ale také pro tyto mikroorganismy. Použití mikroorganismů na degradovaných půdách k podpoře růstu rostlin může pomoci, ale především by se měly také vytvořit vhodné podmínky pro rozvoj těchto mikroorganismů. Zemědělské praktiky by neměly negativně ovlivnit půdní úrodnost z dlouhodobého hlediska, aby zemědělská půda mohla být zachována pro příští generace.



## **2 Cíl práce**

Cílem této diplomové práce je zjistit, zda oživení písčitého substrátu mikrobiální inokulací (mykorhizní houby, endofytní bakterie, endofytní houby) spolu s aplikací výluhu z vermikompostu a řasové suspenze kladně ovlivní růst a vývoj vybraných plodin.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Mikroorganismy pro inokulaci

Všechny organismy jsou tvořeny z buněk, na jejichž základě se dělí na prokaryota a eukaryota. Mezi prokaryota patří mikroorganismy řazené do říše Bacteria a Archaea, mezi eukaryota mikroorganismy Fungi, Algae a Protozoa (Ivanov 2010). V přirozeném ekosystému spolu žijí mikroorganismy a rostliny v těsné blízkosti. Některé se přirozeně nacházejí na nadzemních částech rostlin, například rod *Saccharomyces*, a také bakterie mléčného kvašení (Ivanov 2010). Nejznámější místo pro pozorování vztahů mezi rostlinami a mikroorganismy se odehrává v půdě. Rostliny získávají soužitím s mikroorganismy výhodu díky mutualistickému a komenzálnímu vztahu (Barton & Northup 2011). Při mutualistickém vztahu, mají prospěch ze soužití jak rostliny, tak mikroorganismy. U komenzálního vztahu, mikroorganismy přijímají od rostliny živiny při kořenové exsudaci a rostlina přímo od mikroorganismů žádné látky nedostává. Kořenová exsudace rostlin má za následek výrazně větší množství mikroorganismů v nejbližší vrstvě kořenů (rhizosféře), převážně bakterií a hub, oproti mikroorganismům ve volné půdě (Vaněk et al. 2012). Některé druhy bakterií a hub jsou však rostlinnými patogeny, a tedy jejich blízká přítomnost rostlině není žádoucí. Jsou to tedy hlavně druhy bakterií a hub tvořící s rostlinou synergická spojení, která jsou předmětem jejich využití při kultivaci rostlin.

#### 3.1.1 Mykorhizní houby

Mykorhizní symbióza, je převážně vzájemně prospěšný vztah mezi houbami žijícími v půdě a rostlinnými kořeny, která je v přírodě velmi rozšířena. Do mykorhizních hub patří houby z oddělení Basidiomycetes, Ascomycetes a Glomeromycetes (Smith & Read 2008). Glomeromycetes patřilo původně do oddělení Zygomycetes (Gryndler et al. 2004), z kterého se osamostatnilo na základě využití molekulárně genetických technik při určování jednotlivých taxonů. Rostliny dodávají svým symbiontům kořenovou sekrecí především energeticky bohaté sloučeniny. Mykorhizní houby na oplátku zvyšují aktivní povrch kořenů a jejich hyfy zlepšují přijatelnost některých minerálních prvků, hlavně fosforu (Gregory 2006; Vaněk et al. 2012). Mykorhizní symbióza se vyskytuje převážně u cévnatých rostlin, avšak kolonizace kořenů mykorhizními houbami byly popsány i u bezcévnatých rostlin, například mechorostů (Gryndler et al. 2004). Podle toho, jestli symbiotické houby pronikají do buněk primárního kořene a zda vytvářejí na kořeni houbový plášť, se rozdělují na endomykorhizní, ektomykorhizní a ektendomykorhizní. Endomykorhizní houbový symbionti pronikají svými hyfy do vnitřní části kořenových buněk – buněk primárního kořene a mezibuněčných prostor. Nevytváří se tak ochranný plášť na povrchu kořene (Harley & Harley 1987). Ektomykorhizy tvoří na povrchu kořenů houbový plášť a pronikají do primární kůry kořene, ale již většinou nepronikají do jednotlivých buněk, přičemž se navzájem propojují a tvoří tzv. Hartigovu síť. Ektendomykorhizy jsou podobné ektomykorhizím, avšak hyfy hub pronikají do jednotlivých buněk, což bylo doloženo například u semenáčků *Pinus* spp. (Kozłowski 1971), které po infikování mykorhizní houbou rostly velmi pomalu. Podrobná klasifikace mykorhizních hub se rozděluje do sedmi typů, podle jejich symbiontů (Smith & Read 2008) viz. obrázek č. 1.

Mykorhizní typ	Arbuskulární mykorhiza	Ektomykorhiza	Ektendomykorhiza	Arbutoidní mykorhiza	Monotropoidní mykorhiza	Erikoidní mykorhiza	Orchideoidní mykorhiza
Přítomnost přezek	-	+	+	+	+	+	+
Mezibuněčná kolonizace	+	-	+	+	+	+	+
Hyfový plášť	-	+	+ anebo -	+ anebo -	+	-	-
Hartigova síť	-	+	+	+	+	-	-
Achlorofylní	-(+)	-	-	-	+	-	+*
Zařazení hub	Glomero	Basidio/Asco (Glomero)	Basidio/Asco	Basidio	Basidio	Asco	Basidio
Zařazení rostlin	Bryo Pterido Gymno Angio	Gymno Angio	Gymno Angio	Ericaceae	monotropaceae	Ericaceae Bryo	Orchidaceae

**Obrázek č. 1** Přehled důležitých mykorhizních typů. Strukturální charakteristika je zde u dospělců, nikoliv u juvenilní anebo senescentní fáze vývoje. Údaje uvedené v závorkách značí ojedinělé případy. \* Všechny zástupci Orchideaceae jsou achlorofylní v klíčící fázi rostliny, přičemž v dospělosti většinou chlorofyl mají. Houby se řadí do oddělení Glomeromycetes, Ascomycetes a Basidiomycetes. Rostliny se řadí do Bryophytae, Pteridophyta, Gymnospermae a Angiospermae. Převzato od Smith & Read (2008).

Několik z nich má velmi podobná vývojová stádia, a proto se rozlišují čtyři hlavní klasifikační typy mykorhizních hub, a to houby arbuskulární (AM), ektomykorhizní (EkM), orchideoidní (OrM) a erikoidní (ErM) (van der Heijden et al. 2015). Poměrové zastoupení jednotlivých typů mykorhizy u cévnatých rostlin je 72% AM, 2% EkM, 1,5% ErM a 10% OrM (Brundrett & Tedersoo 2018). ErM tvoří mykorhizu s rostlinami z čeledi *Ericaceae*, které často rostou na méně vhodných stanovištích (Leopold 2016). Stanoviště jsou charakteristická kyselou půdní reakcí, při které dochází k hromadění látek pro rostliny toxických. Obsahují malé množství dostupných živin, způsobené pomalejším rozkladem organické hmoty a vysokými nebo nízkými teplotami. Rostlinní symbionti ErM nemají kořenové vlášení (Gryndler et al. 2004). Vyznačují se také zvláštním typem laterálních kořínků tzv. vlasové kořínky, které jsou velmi úzké a nepodléhají druhotnému tloušťnutí (Peterson et al. 2004). Tyto kořínky mají jednoduché uspořádání a jejich vnější obal, tvořený rhizodermis, je kolonizovaný ErM houbami (Smith & Read 2008). Tak jako většina mykorhizních symbióz, dokáží zvýšit příjem fosforu tvorbou enzymu, který zajistí uvolnění fosforu z hůře přijatelných forem v dané lokalitě. Také příjem dusíku, který je rozhodující při růstu rostliny, může být hyfy hub přijat a poslán rostlině. Odolnost proti těžkým kovům, převážně zinku a mědi, předurčují vřesovcovité rostliny být kolonizátory rekultivačních ploch po těžebních pracích (Cairney & Meharg 2003; Peterson et al. 2004). Většina rostlin jsou autotrofní organismy, které svým fotosynteticky aktivním aparátem mohou za vhodných podmínek přeměnit světelnou energii na energii chemickou. Semenné autotrofní rostliny před rozvinutím fotosyntetického aparátu spotřebovávají energii uloženou v podobě ATP v semeni, která jim většinou postačuje v začátku průběhu normálního vývoje. Menšina rostlin však chlorofyl může postrádat po delší dobu svého vývoje a stává se tak závislá na jiných organismech a alespoň část svého života získává potřebnou energii

heterotrofně. Toto období může být přechodné anebo trvat po celou dobu jejich života. Pokud rostliny k tomuto účelu využívají houby, jedná se o mykoheterotrofní způsob života, při kterém od hub získávají mimo jiného i uhlík, který při většině jiných mykorhizních symbióz houbám naopak dodávají. Tak je tomu u čeledi *Orchidaceae*, kdy většina rostlin je autotrofních až v dospělém stádiu, ale v klíčících stádiích jsou vzhledem k absenci chlorofylu a malého množství zásobních látek obligátní parazité na houbách (Rasmussen & Rasmussen 2009). Při klíčení vstavačovitých rostlin se nejprve vytvoří protokorm, z kterého se později vyvine kořen, anebo stonek. K tomu, aby se takto vyvinul, potřebuje energetické látky dodané symbiontem, a tedy OrM vzniká již v začátcích při klíčení rostliny (Gryndler et al. 2004). Houby dodávají mladé mykotrofní rostlině uhlík, dusík a fosfor, přičemž dodávka dusíku a fosforu se nejspíše děje i u klíčenců a dospělců vstavačovitých rostlin obsahujících chlorofyl (Martin 2017). Někdy přítomnost chlorofylu nemusí být zcela dostačující pro potřeby rostlin, a tak využívají zároveň svého hostitele a tyto rostliny jsou tedy mixotrofní (Smith & Read 2008). Karbohydráty, které houby dodávají hostitelské rostlině, získávají z okolního prostředí saprofyticky anebo paraziticky od další rostliny (Barton & Northup 2011). Vztah mykorhizních hub a jejich hostitele se liší podle druhu houby a rodu orchideje. Podle Smith & Read (2008) je OrM výrazně méně poklidné soužití oproti ostatním druhům mykorhizních symbióz a mohla by se popsat jako potenciální útok patogena, který je kontrolován obrannými schopnostmi rostliny. Přestože je OrM řazena mezi endomykorhizní typ, v mnoha případech tvoří symbiózu s houbami řazenými do ektomykorhizních druhů. To prokázal ve svém pokusu Girlanda et al. (2006), v kterém odebral 80 vzorků hnědence (*Limodorum* spp.). Z kořenových vzorků následně zjistil, že nejčastějším symbiontem v dané lokalitě byly houby z čeledi Rosulacidae. Jedná se tedy hlavně o zmiňované mixotrofní a mykotrofní druhy vstavačovitých rostlin, které ektomykorhizní houby upřednostňují (Smith & Read 2008). Ektomykorhiza (EkM) je přítomna převážně u mnoha hospodářsky významných dřevin, například *Abies* spp., *Picea* spp., *Pinus* spp., *Larix* spp., *Fagus* spp., *Quercus* spp., a také u některých pionýrských druhů dřevin jako *Alnus* spp., *Betula* spp. a *Salix* spp. EkM se také vyskytují u několika křovitých a bylinných druhů (Peterson et al. 2004). Houba od rostliny přijímá glukózu a fruktózu a převádí ji na karbohydráty a ostatní látky, které následně mohou být uskladněny na různě dlouhou dobu v plášti hyf. Ten také může hromadit proteiny, polyfosfáty a některé ostatní látky. Zároveň dokáže akumulovat nebezpečné kovy a chrání kořeny před patogeny a abiotickými stresovými podmínkami. Tento plášť hyf může dosáhnout až 40 % hmotnosti sušiny kořene (Barton & Northup 2011). Hartigova síť je formována z vnitřní části pláště hyf a dále se rozvíjí do kořenových mezibuněčných prostor. Vzniká tak velmi rozvinutá síť hyf, která zvýší výměnu živin s hostitelskou rostlinou. Hyfy, rostoucí z vnější části pláště hyf, kolonizují vzdálenější půdní částice a další potenciální zdroje cenných látek a vytvářejí tak extraradikální mycelium. V případě EkM se tímto myceliem mohou propojit ostatní EkM dřeviny v okolí a vytvořit tak společnou mykorhizní síť (common mycorrhizal network), při které může dojít k výměně uhlíku a dalších látek mezi hostujícími rostlinami (Simard & Durall 2004). To vede ke stabilizaci ekosystému a k lepší adaptabilitě při náhlých změnách prostředí v kterém rostliny žijí (Courty et al. 2010).

### 3.1.1.1 Arbuskulární mykorhiza

Houby arbuskulární mykorhizy (AM) Glomeromycetes, jsou velmi staré organismy, které se vyvíjejí po více než 400 milionů let a pravděpodobně pomohly rostlinám osídlit zemský povrch (Remy et al. 1994; Smith & Smith 2011; Martin 2017). Tvoří tak nejspíše nejrozšířenější symbiózu s rostlinami vůbec (Feddermann et al. 2010). Vzhledem k této skutečnosti je jednodušší vyjmenovat některé čeledi s kterými houby AM symbiózu netvoří, anebo tvoří pouze v omezené míře, kterými jsou zástupci čeledi *Brassicaceae*, *Cyperaceae*, *Caryophyllaceae*, *Juncaceae* (Vosátka 2009). Při klíčení spóry hub se následná kolonizace kořenů rozděluje na tři části. Bez symbiontní část, před symbiotická a symbiotická část (Garcia-Garrido & Vierheiling 2009). Při bez symbiontní fázi, spóra houby klíčí a z ní roste do okolí hyfa bez jakéhokoliv ovlivnění rostlinami. V pokusu, který uskutečnil Juge et al. (2002), byla prokázána závislost délky stratifikace na počet klíčících spór houby *Rhizophagus irregularis* (Błaszk, Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & Schüßler, 2010, při kterém se s delší dobou stratifikace snížila mortalita spór, zvýšil se počet klíčících spór a byl pozorován rozdílný růst hyf, který se klasifikoval do dvou typů. První, měl při delší stratifikaci jasně rozlišenou hlavní hyfu dlouhou několik centimetrů a v druhém typu při kratší stratifikaci měl indiferentní hlavní hyfu a hyfy byly provázány v těsné blízkosti spóry. Toto zjištění vede k domněnce, že při stresovém faktoru jako je přerušení přirozené dormance může vést ke snížení šance najít svého symbionta. Vzhledem k povaze AM je zapotřebí, aby houba našla kořen svého symbionta. Pokud kořen rostliny včas nenalezne, může být další růst hyfy zastaven a dochází k přesunu protoplastu z konce hyf zanechávající tak za sebou prázdné segmenty. Tímto energeticky úsporným režimem dokáže houba přežít bez svého symbionta i 6 měsíců s ponecháním dostatečné energie pro případné vytvoření symbiózy se svým hostitelem (Logi et al. 1998). Pokud hyfa zaregistruje přítomnost vhodného kořene pro vytvoření symbiózy, přechází bez symbiontní část do před symbiotické fáze, při které u hyfy dochází k morfologickým změnám. Tyto změny, při kterých dochází k rozvětvení hyf, jsou zapříčiněny kořenovými exsudáty a molekulami v nich obsažených, jejich koncentrací a množstvím přítomného oxidu uhličitého (Juge et al. 2009). Jakmile dojde ke kontaktu hyfy a kořene, vytvoří se během dvou až tří dnů na styku kořene a hyfy terček (apresorium), z kterého následně proniká houba přes rhizodermis do primární kůry kořene (Mejstřík 1988). Následné šíření vnitřní části kořene se dělí podle typu na *Arum* a *Paris*. Při typu *Arum* se hyfy šíří v mezibuněčných prostorách (apoplastickou cestou) a poté pronikají do buněk primární kůry, kde tvoří arbuskuly (Gregory 2006). Tento typ byl potvrzen u póru zahradního s houbami patřícího do řádu Glomelares (Smith & Smith 1997). Oproti tomu při typu *Paris* se hyfy šíří vnitrobuněčně (symplasticky), kde tvoří shluky, z kterých se dále vytvářejí arbuskuly. Jestli se houba bude ve svém hostiteli šířit podle typu *Arum*, nebo *Paris* je individuální a záleží jak na konkrétním druhu houby tak rostliny (Dickson 2004). U lilku rajčete byly pozorovány při polním pokusu oba typy šíření hyf uvnitř kořene (Kubota et al. 2005). Arbuskuly (z lat. *arbuscula*, stromeček nebo keř) jsou vytvořeny opakovaným větvením hyf a nikdy nepronikají do cytoplazmy hostitele. Ta je oddělena periarbuskulární membránou, která vznikla vchlípením rostlinné cytoplazmatické membrány (Gryndler et al. 2004; Pumplín & Harrison 2009). Arbuskuly mají veliký význam při přenosu látek mezi symbionty, avšak jsou poměrně krátkověké. Jejich životnost je nejspíše úměrná přísunu minerálních látek rostlině, a tak čím více jsou pro hostitele prospěšné, tím déle se

dožívají (Parniske 2008). Vezikuly (z lat. *vesicula*, měchýřek) jsou útvary hyf, v kterých se hromadí lipidy a proteiny (Peterson et al. 2004; Gregory 2006). Fungují tak jako zásobní útvar uhlíku obdržený od svého hostitele. Rostlina nemůže zpět získat lipidy z vezikul a tak tyto zásoby slouží pouze pro potřeby houby (Bach et al. 2018). Vezikuly se mohou tvořit jak uvnitř buněk, tak i v mezibuněčných prostorech. Nemusí se také vytvořit vůbec, jejich vznik je závislý na více okolnostech. Podle Smith & Read (2008) některé houby tvořící AM vezikuly vůbec nevytvářejí, jako je tomu u některých druhů čeledi Gigasporaceae, například rod *Scutellospora* a *Gigaspora*, a proto se opustilo od dřívějšího názvu vezikulo arbuskulární mykorhiza. Peterson et al. (2004) však poznamenává, že tyto rody nevytvářejí intraradikální vezikuly, avšak vytvářejí auxiliární vezikuly na extraradikálním myceliu, které vznikají po symbiotickém spojení houbového mycelia s rostlinou. Extraradikální mycelium expanduje do okolní půdy kde osídluje půdní částice, vytváří opětovná spojení jak s již osídleným kořenem, tak i kořeny jinými, včetně ostatních rostlin v okolí. Slouží jako spojovací článek pro přenos minerálních látek z půdy ke svému hostiteli a zároveň se jím dopravují karbohydráty získané od rostliny do nově vznikajících extraradikálních hyf (Juge et al. 2009). Dochází zde také k tvorbě sporů, jejichž morfologická odlišnost mezi jednotlivými druhy hub sloužila ještě v nedávné době k jejich základní klasifikaci (Redecker 2002).

### 3.1.1.2 Využití AM při pěstování rostlin

Veliký výskyt AM ve většině ekosystémů a porozumění jejich interakcí vede k možnostem využití této symbiózy při kultivaci užitkových rostlin, přičemž pro testování AM je zapotřebí nejprve získat izolát. Kromě vlastních sporů se houba může množit také hyfami a fragmenty mykorhizních kořenů souhrně nazývaných diaspory (Gryndler et al. 2004). Izolát je možné získat pomocí intraradikálních hyf, extrakcí sporů anebo *In situ* pomocí vysazení rostliny na stanoviště (Dalpé 2009). Získaný izolát je dále potřeba namnožit, aby se mohl použít pro inokulaci. K tomu houba potřebuje hostitelskou rostlinu, anebo její část, vzhledem ke svému statusu obligátního symbionta. Nejčastěji se využívá kultivace v pěstebních kontejnerech se substrátem, ale může být i bezsubstrátová technologie – hydroponie, aeroponie a i *In vitro* propagace například postupem ROC (root organ cultures) (Fortin et al. 2002). Při kultivaci je třeba dát veliký pozor na kontaminaci jinými mikroorganismy (Vosátka et al. 2012). Vysoké riziko kontaminace hrozí zvláště u kontejnerovaných rostlin, při zalévání a manipulaci s nimi. Toto riziko lze minimalizovat pokud jsou rostliny dále od sebe a opatřeny průhlednými obaly s mikrotkaninou, která umožní výměnu plynů (Walker & Vestberg 1994). Namnožené mycelium se poté využije k inokulaci vytipovaných rostlin. Inokulace je provedena přenosem propagulí (diaspor) k rostlině, nejlépe v brzkých fázích jejího vývoje (Gianinazzi & Vosátka 2004). Metoda kultivace, použité druhy hub a následný výběr rostlin pro kolonizaci by měl být pečlivě vybrán, jakožto i schopnost infikovat kořen rostliny u jednotlivých druhů hub použitím různých diaspor je rozdílná (Klironomos & Hart 2002). Velmi důležitá je také zvolená metodika pro sledování mykorhizní symbiózy v kořenech, kdy by měl být zvolen postup podle sledovaných cílů výzkumu (Vierheilig et al. 2005). První pokusy symbiotického spojení pro sledované znaky se provádí nejčastěji v kontejnerových nádobách na sterilních substrátech, jako je písek, expandovaný jíl, rašelina, perlit a jím podobné. Poté se pokus opakuje na nesterilním substrátu, následně v poloprovozních podmínkách a nakonec i na velkých plochách

v provozních podmínkách (Gryndler et al. 2004). Výsledky však nemusejí být vždy pozitivní. Houby AM jsou většinou polyfágové a mohou tvořit symbiotické spojení s mnoha rostlinami. V pokusu, který provedl Klironomos (2003) bylo dokázáno, že různé druhy rostlin rostly jinak po infekci různými druhy arbuskulárních hub a to i méně oproti kontrolní variantě, která rostla bez přidání inokula. V některých případech, zvláště pokud je dostatek fosforu pro potřebu rostliny v půdě, může houba negativně ovlivnit růst svého symbionta. Zároveň při celkově malém obsahu fosforu v pěstebním substrátu může dojít k situaci, kdy si houba fosfor zřejmě ponechá pro své potřeby a nepředá ho svému symbiontu (Hart & Forsythe 2012). Množství dostupného fosforu nejspíše také ovlivňuje rozvoj mykorhizní kolonizace kořenů rostlin rajčete, které pozoroval ve svém pokusu Nedorost & Pokluda (2013). Možné využití AM při pěstování užitkových rostlin je tedy závislé na mnoha faktorech a nedá se souhrně označit.

Z pěstovaných rostlin by mohlo mít veliký význam použití AM při kultivaci zeleniny. Zeleninu rozlišujeme podle konzumní části na košťálovou, kořenovou, plodovou, cibulovou, luskovou a na listovou a stonkovou. Z botanického hlediska byla popsána AM u zeleniny z čeledi *Amarillidaceae*, *Asteraceae*, *Cucurbitaceae*, *Fabaceae* a *Solanaceae* (Baum et al. 2015). Naopak zelenina, která netvoří AM je z čeledi *Brassicaceae* a *Chenopodiaceae* (Barker et al. 1998). Některé rostliny netvořící AM produkují ve své rhizosféře látky, které zamezují růstu hyfy AM a tím zpomalují kolonizaci potenciálního symbionta (Vierheilig et al. 1995). To potvrzuje ve svém pokusu i Gavito & Miller (1998), kdy při pěstování kukuřice po řepce olejné došlo ke zpoždění v kolonizaci kořenů oproti variantě, kde v předešlé kultuře byla pěstována plodina tvořící AM, a to jak v polním pokusu, tak i v kontejneru při kontrolovaných podmínkách. Dalším faktorem ovlivňujícím vznik AM je příprava zpracování půdy v zemědělské praxi. Příprava půdy před setím je důležitou součástí konvenčního pěstování zeleniny, a ve své knize Welbaum (2015) popisuje důležitost a různé způsoby zpracování půdy. Důležité je to zejména z hlediska zajištění podmínek pro dobré klíčení osiva, při kterém se vytvoří potřebný kontakt půdy s osivem. Orbou dochází ke zničení plevelných druhů, které by mohly omezit v růstu žádoucí plodinu. Zaoráním rostlinných zbytků se také zabráni v rozvoji houbových chorob, které se na nich mohou rozvíjet. Negativním efektem je eroze na svazích a exponovaných místech, ke které dochází na holých polích. Težká technika také utužuje půdní strukturu. Někteří zemědělci proto volí jiný šetrnější způsob pěstování zeleniny. Při bezorebném systému se nechávají na poli zbytky předešlé plodiny, do které se přímo vysadí následující plodina. Tento způsob má výhody především v suchých oblastech, protože vede k zadržování vody v půdě. Nedá se však v tomto případě použít plastová nastelací fólie, a tak je tento způsob vhodný pro rostliny ke kterým se nedává. Větší množství přítomného extraradikálního mycelia má možná za následek menší zhutnění půdy při bezorebném systému, který zjistil Blanco-Canqui et al. (2010). Používáním systému šetrného zpracování půdy se také zvýší výskyt půdní fauny (Busari et al. 2015). V případě AM to již dříve uvedlo ve svých studiích několik autorů (Dodd 2000; Jansa et al. 2002; Kabir 2005). Kromě omezení orby mělo na AM pozitivní vliv i přidání kompostu jako organického hnojiva (Willekens et al. 2014). V důsledku omezení orby, může na poli dojít k většímu výskytu plevelů, na které zemědělci používají herbicidní postřik. Aplikace těchto postřiků nejen herbicidních, ale i ostatních použitých přípravků na ochranu rostlin, mohou ovlivnit půdní mikroorganismy, jelikož je kromě cílových rostlin zasažena i okolní půda (Zocco et al. 2008; de Novais et al. 2019). V pokusu, který provedl de Novais et al. (2019), mělo použití herbicidů s účinnou látkou glufosát a dikamba negativní vliv na

extraradikální mycelium AM. Herbicid s účinnou látkou dikamba, dokonce ovlivnil i tvorbu sporů a tím potenciálně může vést k omezení výskytu AM v místech, kde se tento přípravek aplikuje. Vytvořením vhodné protiplevebné strategie se může snížit množství použitých herbicidů (Calado et al. 2010) a tím zlepšit podmínky pro rozvoj AM. Při dlouhodobém vynechání orby dochází k hromadění organického materiálu ve vrchních vrstvách půdy a mykorhizní houby z rodu *Gigasporaceae* spp. mají větší šanci na konkurování ostatním druhům hub s vysokou sporulací (Goss et al. 2017). Použití minerálního hnojiva a jeho účinek na AM se v dostupné literatuře různí. Nejvíce je zmiňován vliv dodaného anebo přítomného množství fosforu a dusíku na vznik a fungování AM. Výsledky se nejspíše různí na základě zkoumaného genotypu symbiotické houby a rostliny použité v pokusech, ale také ve formě v jaké byly živiny dodány (Kahiluoto & Vestberg 1998; Kahiluoto et al. 2012). Většina autorů však uvádí, že vysoký obsah fosforu má negativní vliv na symbiózu (Plenchette et al. 2005), avšak hnojením, ať již organickými anebo minerálními pomalu rozpustnými hnojivy, vliv na mykorhizní houby nemá.

Osevní postup, při kterém se střídají vhodné druhy rostlin, má za následek menší výskyt houbových nemocí a škůdců, ovlivňuje úrodnost půdy a živiny v ní obsažené (Mohler & Johnson 2009) a má pozitivní vliv na diverzitu mykorhizních hub (Öpik et al. 2006). Využití AM je možné při redukci následků stresové reakce, při kterém rostlina infikovaná houbou může přejít tuto stresovou situaci lépe, nežli kdyby v symbióze nebyla. Stresová situace, je každá situace lišící se od ideálních podmínek, za kterých se rostlina vyvíjí a jejím působením za ideálním vývojem zaostává. Stresové situace se dělí na biotické a abiotické. Biotické jsou důsledkem působení jiných živých organismů, patogenů anebo živočišných škůdců. Abiotické stresové situace jsou způsobeny vnějším prostředím. V souvislosti s arbuskulární mykorhizou je z abiotických stresových podmínek uváděno hlavně půdní sucho, zasolení půdy, nedostatek minerálních látek v půdě, zamoření půdy těžkými kovy a pH půdy (Rouphael et al. 2015).

Voda se v půdě i rostlině pohybuje z míst vyšší koncentrace do míst nižší koncentrace na základě vodního potenciálu (Nobel 2009). Při přijetí vody kořeny se snižuje její množství v okolí kořenů a na její místo se tak dostává voda ze vzdálenějšího okolí. V kořenech jsou sorbční místa, kudy se voda dostává dále dovnitř přes cévní svazky až do míst potřeby, nejčastěji do listů, kde dochází k jejímu výparu do atmosféry. Tento proces pohybu vody v rostlině se nazývá respirace. Voda se v rostlině pohybuje také na základě vodního potenciálu a při respiraci se voda z epidermálních buněk evaporuje do mezibuněčných prostor, kde dále na principu difuze přechází do okolní atmosféry. To je uskutečněno pomocí průduchů (stomata) a epidermálních buněk na listech (Pallardy 2007). Průduchy pokrývají pouze malou část listu, ale jejich rozmístění je velmi efektivní. Otevírání a zavírání průduchů je řízeno okolními buňkami přes jejich turgor (tlak protoplastu na buněčnou stěnu), kdy se přesouvá velké množství iontu draslíku. Při půdním suchu mykorhiza podporuje zvýšení odolnosti stresu z nedostatku vody. V pokusu, který provedl Davies et al. (2002) měly rostliny papriky (*Capsicum annum* L.) infikované vybranými druhy *Glomus* spp. pod označením ZAC-19 větší odolnost k suchu, oproti ostatním rostlinám po dvacetidenním skleníkovém pokusu. V listech je vyšší vodní potenciál (méně škodlivý) oproti kontrolní variantě a také méně peroxidovaných lipidů (Porcel & Ruiz-Lozano 2004), při kterých dochází ke změnám struktur organických sloučenin. Dokáží zvýšit expresi genu P5CS v rostlině, která vede ke zvýšení tolerance k suchu



(Ruiz-Lozano et al. 2006). Tato exprese má za následek produkci víceúčelného enzymu, který katalyzuje biosyntézu prolinu (Rai & Penna 2013). Prolin působí osmoticky při vodním deficitu, je zapojen do interakcí s rostlinnými patogeny a plánovaného odumírání rostlinných buněk (Verslues & Sharma 2010). Při nedostatku vody byla v kořenech detekována ve zvýšené míře kyselina abscisová (ABA), která se dostává dále do transpiračního proudu a je jedním z hlavních impulsů k uzavření průduchů (Zhang et al. 2006; Daszkawska-Golec 2016). Produkce ABA může nastat i v listech při snížení turgoru vlivem dehydratace na základě nízké vzdušné vlhkosti (Gregory 2006). Tento rostlinný hormon je také důležitý pro dormanci osiv a celkový vývoj a růst rostlin (Lim et al. 2015). ABA společně s ethylenem mají vliv na vznik a vývoj mykorhizní symbiózy a později po kolonizaci arbuskulárními houbami je jejich nahromadění regulováno symbiontem (Fracetto et al. 2017). Stomatální vodivost pro vodní páru je vyšší u AM asi o 20 %, a byly provedeny pokusy v kterých se ukázalo, že s větší kolonizací kořenů mykorhizních hub roste (Augé et al. 2015).

Zasolení půdy je dalším stresovým faktorem, který celosvětově způsobuje v zemědělství ztráty větší než 20 % na zavlažovaných plochách (Porcel et al. 2011). Zasolení půdy nastává, když hodnota solí naměřená v půdě anebo roztoku přesáhne více než 4 dS/m a může být způsobeno přirozeně přírodními procesy anebo lidskou činností (Jenks & Hasegawa 2014). Přirozenou cestou dochází k zvětvování hornin, z kterých se soli postupně uvolňují, a také k unášením mořských solí větrem. Lidskou činností má nejvyšší vliv na zasolení půdy závlaha pěstebních pozemků. Při závlaze, která obsahuje 500 mg solí na metr krychlový vody, dochází při potřebě 6000 až 10 000 metru krychlových vody na hektar za rok k celkovému nánosu solí o hmotnosti až 5 tun na hektar (Parihar et al. 2015). Zasolení půdy omezuje rostliny v jejich normálním vývoji z důvodu nedostatku příjmu vody z hlediska vysoké koncentrace osmoticky aktivních látek v roztoku a příjmem nadbytku solí do rostliny, který způsobuje poškození rostlinných buněk. Nadměrný obsah solí v půdě vede k poruchám rostlin při jejich klíčení, růstu, tvorbě chlorofylu a fotosyntéze, vodního potenciálu rostliny, vyváženosti příjmů jednotlivých živin, oxidačnímu stresu a může vést až k odumření rostliny (Tilbrook & Roy 2014). Většina zeleniny je velmi citlivá na zasolení půdy a vyžaduje maximální elektrickou vodivost půdy do 2,5 dS/m (Machado & Serralheiro 2017). Při pokusu na lilku rajčeti (*Lycopersicon esculentum* Mill.) s mykorhizní houbou *Glomus mosseae* (T. H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe, 1974, který provedl Latef & Chaoping (2011) byl u rostlin po vytvoření AM pozorován větší celkový nárůst biomasy, včetně zvětšené listové plochy oproti kontrolní variantě. Stejný výsledek měl i pokus na paprice (*Capsicum annum* L.) s mykorhizní houbou *Glomus clarum* T. H. Nicolson & N. C. Schenck, 1979, který provedl Kaya et al. (2009). S rostoucí zasoleností půdy se snížil i výnos paprik, ale rostliny tvořící mykorhizu měly při zasolení větší úrodu. Také koncentrace chlorofylu, která byla zasolením v rostlině snížena, byla u mykorhizních rostlin podstatně vyšší. Je nutné podotknout, že při kultivaci v nezasolené půdě se koncentrace chlorofylu ani výnos paprik mezi kontrolní variantou a mykorhizní nelišil. Koncentrace Na<sup>+</sup> byla značně vyšší v listech a kořenech v zasolených půdách, ale u mykorhizních rostlin byla menší oproti kontrolní variantě. Možný rozdíl je způsoben větší biomasou mykorhizních rostlin. Také byl zaznamenán vyšší obsah fosforu, dusíku a draslíku v rostlinných pletivech u inokulovaných rostlin a stejně jako u stresu ze sucha zvýšená produkce osmolytů (Evelin et al. 2019).

Příjem minerálních látek rostlinami bude podrobněji vysvětlen v kapitole minerální výživa. Na toto téma bylo zhotoveno doposud nejvíce odborných prací v souvislosti se studiem vlivu

mykorhizních hub s rostlinami a mnoho kombinací různých druhů mykorhizních hub a rostlin neukázalo velké zlepšení v příjmu minerálních látek, alespoň u hrnkovaných pokusů (Smith & Read 2008). Oběh dusíku v ekosystému je jistě ovlivněn mykorhizními houbami (Veresoglou et al. 2012). Mykorhizní houby nejspíše upřednostňují amonný dusík před nitrátovým, a vzhledem k jeho celkově velké pohyblivosti v půdě, a tedy relativně snadné dostupnosti pro rostliny se nepřikládá jeho příjem AM a následnému předání rostlině veliký význam. Houboví symbionti přijímají převážně anorganický dusík (Smith & Smith 2011), avšak mohou nejspíše přijímat i organický dusík (Hodge et al. 2001). Cappellazzo et al. (2008) pomocí metody PCR našel sekvenční kódování pro aminokyselinu permeázu u mykorhizní houby *Glomus mosseae*. Symbiont si neojediněle nechá dusík nejspíše pro své potřeby (Hodge & Storer 2015). Stejný závěr vyvodil také Püschel et al. (2016) při pokusu na voutsatici (*Andropogon gerardii* Vit.) v kombinaci s různými mykorhizními houbami při různé dávce hnojiv. Fosfor je makroprvek, který je v půdě málo pohyblivý a jeho obsah v půdním roztoku je oproti ostatním makroprvkům nízký (Vaněk et al. 2012). Koncentrace fosforu v kořenových buňkách, anebo v mykorhizní hyfě je 1000 krát vyšší oproti koncentraci v půdním roztoku, a tak příjem fosforu do kořene je pro rostlinu velmi energeticky náročný proces (Bagyaraj et al. 2015). Vytvořením AM se v souvislosti s příjmem tohoto prvku uvádí speciální termín mykorhizní příjem fosforu (mycorrhizal phosphate uptake), který je další možností příjmu fosforu kromě běžného příjmu rostlinou přes rhizodermis kořene (Wipf et al. 2019). Kořeny rostlin odebírají fosfor z blízkého okolí kořenového vlášení a tím dochází ke snížení množství tohoto prvku v okolí rostliny. Aby se rostlina dostala k nové zásobě fosforu, musí její kořeny osídlit nové půdní částice. Hyfy mykorhizních hub přijme anorganický fosfor a transportuje ho do mezikořenových struktur okolí arbuskuly houby, kde je apoplastickou cestou předána rostlině (Nayyar 2009). Schopnost extraradikálních hyf mykorhizních hub dostat se mimo zónu okolí kořenů a přijmout fosfor ze vzdálenějších míst, které následně předá rostlině, je základem pozitivního pohledu na příjem fosforu u AM (Smith & Read 2008). Příjem fosforu se tak zvýšil z oblasti 1 cm od kořenové špičky u kontrolní varianty do vzdálenosti 11,7 cm (délka hyfy) u AM v pokusu který provedl Li et al. (1991) a příjem fosforu mykorhizou dosahoval 76 % z celkově přijatého fosforu. U ostatních makroprvků jsou výsledky rozdílné a záleží převážně na výběru druhu mykorhizní houby a rostliny, množství ostatních prvků v půdě a jejím pH (Clark & Zeto 2000).

Činností člověka se staly těžké kovy závažným problémem na mnoha pěstebních plochách. Rostliny rostoucí na těchto půdách akumulují těžké kovy ve svých pletivech, a tím je snížena kvalita potravin, protože se mohou dále dostávat do potravního řetězce. Houby arbuskulární mykorhizy mají vysoký zemědělský a ekologický význam při tlumení škod způsobených těžkými kovy a rostliny pěstované na místech s vyšším obsahem těchto kovů rostou lépe s mykorhizní symbiózou (Andrade & Silveira 2008). Použitím mykorhizních hub se snížila pohyblivost kadmia v pěstebním substrátu a tím se snížila možnost otravy rostlin nadměrnou dávkou tohoto kovu v pokusu, který provedla Janoušková et al. (2006). Přítomnost různých těžkých kovů zapříčiní zvýšení exprese genu tvořící proteiny, které nejspíše zvýší odolnost rostliny proti jinak toxické dávce a u různých arbuskulárních hub se přítomnost těžkých kovů projevuje jinak na intraradikálním a extraradikálním myceliu (Hildebrandt et al. 2007). Na půdách s vyšším výskytem arsenu se kromě délky hyf také snižuje klíčivost spór *Rhizophagus intraradices* (N. C. Schenck & G. S. SM.) C. Walker & A. Schüßler, 2010 a množství kolonizovaných kořenů (Spagnoletti & Lavado 2015). Biologická sorbce těžkých kovů z půdy

za využití rostlin, hub a dalších půdních organismů se jeví jako nejšetrnější a ekonomicky dostupné řešení nápravy škody zaviněné lidskou činností (Miransari 2011). Vytvořením AM se zlepšil i výnos cukety (*Cucurbita pepo* L.) při pěstování na půdě s vysokým výskytem hliníku rostla lépe jak na půdách s pH 3.5, tak i pH 6.0 oproti kontrolní variantě bez inokula a mykorhizní varianta snížila množství hliníku jak v nadzemní, tak i podzemní části rostliny v pokusu, který provedl Rouphael et al. (2015).

Příjem jednotlivých živin rostlinami a jejich uvolnění do půdního roztoku je ovlivňováno pH půdy. Při pěstování okurky na alkalických půdách přidáním biologického hnojiva s inokulem *Rhizophagus intraradices* se snížil nepříznivý vliv vysokého pH a rostliny rostly a plodily více než kontrolní rostliny bez mykorhizní symbiosy (Rouphael et al. 2010). Na alkalických půdách měly rostliny AM více chlorofylu v listech, a byl zvýšen příjem živin, převážně železa, jehož příjem bývá na alkalických půdách omezený.

AM také mohou ovlivnit nutriční hodnotu plodin. Zelenina a ovoce obsahují látky zdraví prospěšné, například polyfenoly, flavonoidy a antokyaniny (Perveen et al. 2015). Tyto látky zlepšují tělní metabolismus a ovlivňují detoxikační procesy v těle. Lilek rajče (*Solanum lycopersicum* L.) je jednou z rostlin, u které byly prokázány léčivé účinky. Požitím rajčat se do těla dostává karotenoid lykopen, který působí preventivně proti kardiovaskulárním onemocněním, neurodegenerativním poruchám a několika typům rakoviny (Saini et al. 2020). Kromě toho také obsahuje další látky například lutein a karoteny, které nejspíše působí synergicky proti dalším nemocem, jako je hyperglykémie a obezita (Perveen et al. 2015). Giovannetti et al. (2012) ve svém pokusu na lilku rajčeti a mykorhizní houbě *Rhizophagus intraradices* potvrdil, že jde změnit nutriční hodnota plodů rajčete za přítomnosti AM, které ovlivnilo produkci sekundárních metabolitů bez produkce mutagenů. Plody rajčete vykazovaly také vyšší množství antiestrogenové hodnoty. Také salát listový (*Lactuca sativa* L.) produkuje antioxidační látky jako vitamín C a E, karotenoidy, polyfenoly a veliké množství vlákniny (Baslam et al. 2013). Zvýšením těchto látek pomocí arbuskulární mykorhizy je alternativou pro genové inženýrství a používání UV záření při pěstování těchto plodin (Baslam et al. 2012). Tyto fytochemické látky jsou ovlivněny biotickými a abiotickými podmínkami závislými na genotypu použité rostliny, způsobu jejího pěstování a období sklizně, kvalitě půdy a dostupných živin, na světle a vláhových poměrech (Sbrana et al. 2014). Úrodnost půdy je jedním z hlavních aspektů pěstování rostlin a kromě mykorhizních hub jsou i jiné mikroorganismy, které pomáhají rostlinám v jejich vývoji.

### **3.1.2 Endofytní mikroorganismy**

#### **3.1.2.1 Endofytní houby**

Specifikace endofytních organismů se u různých autorů liší, ale všeobecně je nejvíc citována definice od Petriniho (1991). Endofytní organismy jsou veškeré organismy, které žijí na kterékoli části rostliny, a které v některý okamžik svého života kolonizují vnitřní pletiva rostliny, aniž by jí touto kolonizací uškodila. Do skupiny endofytních organismů tak mohou patřit i některé latentní patogenní houby, které část svého života mohou žít epifyticky. Mohou se vyskytovat v různých částech rostlin (kořenech, stonku, listech) a na jedné rostlině se může vyskytovat zároveň několik různých endofytů (Vega et al. 2008).

Na rozdíl od mykorrhizních hub, které kolonizují kořeny rostlin a rostou dále do okolní půdy, endofytní houby zůstávají uvnitř rostlinných pletiv (Carroll 1988). Většina endofytních hub patří do oddělení hub vřecovýtrusných (Ascomycota) (Rungjindamai et al. 2008). Endofytní houby (EH) se dělí do dvou skupin. První skupinou je čeleď paličkovité (Clavicipitaceae), v kterých se vyskytují EH působící hlavně na travinách. Druhou skupinou jsou ostatní endofytické houby nepatřící do čeledi paličkovité (Non-clavicipitaceae), které obývají rostlinná pletiva nižších rostlin, kapradin a jejich spojenců, jehličnanů a krytosemenných rostlin. Tuto druhou skupinu Rodriguez et al. (2009) rozděluje dále do tří skupin, podle evolučních znaků, klasifikace, rostlinných symbiontů a ekologických funkcí.

Znaky	<u>Clavicipitaceae</u>		<u>Nonclavicipitaceae</u>	
	Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4
<i>množství rostlin u kterých se vyskytuje</i>	malé	veliké	veliké	veliké
<i>pletiva které kolonizuje</i>	stonek a oddenek	stonek, kořen a oddenek	stonek	kořen
<i>In planta kolonizace</i>	vysoká	vysoká	nizká	vysoká
<i>in planta biodiversita</i>	nizká	nizká	vysoká	neznámá
<i>přenos genů</i>	vertikální a horizontální	vertikální a horizontální	horizontální	horizontální
<i>podpora rostliny*</i>	NOP	NOP a OP	NOP	NOP

\*Není ovlivněno původem rostliny(NOP) jsou vlastnosti jako tolerance k suchu a podpora růsta jsou společné znaky pro endofyty nezávislé na podmínkách v kterých se rostlina vyvíjela

**Obrázek č. 2** Zařazení do jednotlivých tříd podle posouzení symbiotických znaků endofytních hub. \* Není ovlivněno původem rostliny (NOP) jsou vlastnosti jako tolerance k suchu a podpora růstu jsou společné znaky pro endofyty nezávislé na podmínkách v kterých se rostlina vyvíjela. Ovlivněno původem rostliny (OP) je soubor vlastností, které jsou ovlivněny podmínkami, v kterých se rostlina vyvíjela, jako pH půdy, teplota a zasolení půdy. Převzato z Rodriguez et al. (2009)

Houby první skupiny jsou z čeledi Clavicipitaceae (C-endofyti) osídlující traviny, se mohou pohlavně množit pokud houba vytvoří stromata a askospory, anebo asexuálně vertikálním přenosem hyfy do osiva a klíčku rostliny (Tintjer et al. 2008). Infikované rostliny EH zůstávají infikované většinou po celý svůj život (Clay & Schardl 2002). Využití vertikálního, anebo horizontálního způsobu přenosu může být výhodné za různých vnějších podmínek prostředí. Typickým znakem pro C-endofyty je systematické osídlení vnitřních pletiv rostliny. C-endofyti dokáží podpořit růst rostliny a vytvořit v pletivech rostlin fyziologické alkaloidy, které zvýší odolnost proti hmyzím býložravcům (Clay 1988). Například EH *Epichloë festucae* Leuchtman, Schardl & M. R. Siegel, 1994 tvoří na obranu proti hmyzu jedovatý alkaloid peramin a loline a proti obratlým býložravcům alkaloidy lolitrem B a ergovaline (Schardl 2001; Philippe 2016). Stejná houba také produkuje seskviterpeny, které pravděpodobně zamezují šíření ostatních patogenních hub a zvyšuje tak resistenci proti houbovým chorobám (Yue et al. 2000). C-endofyti systematicky osídlují mezibuněčné prostory rostlin, kde získávají v apoplastu cukry a aminokyseliny. Tato cena za dodanou ochranu se možná odráží v množství endofytů v populaci jak uvádí White et al. (2001), kdy při velkém výskytu žravých mravenců dosahoval výskyt endofytních hub *Neotyphodium tembladarae* Cabral & J. F. White, 1999 více než 80 %

vzorků rostlin sveřepu (*Bromus setifolius* J. Presl.) a v místech kde se žraví mravenci vyskytovali jen v malé míře zaznamenal u rostlin EH u méně než 20 %. EH nepůsobí pouze jako obrana proti škůdcům a ostatním patogenům. *Metarhizium robertsii* J. F. Bisch., S. A. Rehner & Humber, 2009 nejspíše podporuje rozvoj kořenového systému rostlinného symbionta (Sasan & Bidochka 2012). Podpora růstu byla pozorována u kostřavy rákosovité (*Festuca arundinacea* Schreb.) a jílku vytrvalého (*Lolium perenne* L.) (Kuldau & Bacon 2008). Použití EH *Acremonium coenophialum* Morgan-Jones & W. Gems, 1982 vedlo ke zvýšené činnosti rostlinného hormonu IAA, přičemž v pokusu zvýšenou tvorbu IAA byl zaznamenán ještě u některých jiných EH (De Battista et al. 1990). Přítomností EH se může zvýšit odolnost rostlin na nedostatek vláhy a zamořením půdy těžkými kovy produkcí antioxidantů (White & Torres 2010). V podpoření růstu rostliny může rostlina následně lépe čelit abiotickému i biotickému stresu. Kromě zvětšené kořenové soustavy může pomoci i včasné uzavření průduchů, které pomůže rostlině uchovat vodu, kterou by jinak ztratila při transpiraci, jako bylo již zmíněno v předchozím odstavci. Rostliny s EH uzavřely stomata rychleji při vysoušení vzduchu nežli rostliny bez EH v pokusu, který provedl Buck et al. (1997). Důvodem pro rychleji uzavřené průduchy může být i to, že EH jako xenobiotický organismus v rostlinných pletivech udržuje rostlinu v neustálém stresu, který vede ke zvýšené citlivosti na stres vyvolaný vnějšími podmínkami (Malinowski & Belesky 2000). Odolnost rostliny k nedostatku vody v půdě se může projevit i schopností tyto nepříznivé podmínky vydržet a následně se zotavit. V rozsáhlém pokusu, který provedl Gilbert et al. (2012), bylo vybráno 22 populací jílku vytrvalého s EH *Neotyphodium lolii* (Latch, M. J. Chr & Samuels) Glenn, C. W. Bacon & Hanlin, 1996 z různých míst pyrenejského masivu s rozdílným srážkovým poměrem. Z těchto míst bylo 5 populací naklonováno pro následný skleníkový experiment. Z pokusu vyplynulo, že výskyt EH byl vyšší u rostlin, kde bylo více srážek. Dále se ve skleníkovém pokusu ukázalo, že rostliny pocházející ze sušších oblastí, mají větší odolnost proti suchu, a že symbióza s EH tuto odolnost zvýšila. Přítomností vhodných EH se může také zvýšit odolnost rostliny proti zasolení půdy, kdy se zvýšil u kostřavy luční (*Festuca pratensis* Huds.) infikovanou EH *Neothypodium* sp. poměr vodíkových a draslíkových kationtů v prýtu rostliny (Reza Sabzalilian & Mirlohi 2010). Kostřava tak mohla pokračovat beze změny ve svých metabolických procesech, na rozdíl od rostlin bez C-endofyta. Výběr vhodné EH a zároveň vhodné množství minerálních látek v půdě, může mít za následek zlepšení růstu rostliny pěstované v monokultuře, které popsal ve svém pokusu Dirihan et al. (2015). Během počátku vzcházení nebyla pozorována konkurenční výhoda rostlin s EH nad kontrolní variantou rostlin bez EH. V půdách s nízkým obsahem minerálních živin dokonce rostliny s EH měly nižší výnos. V mnoha případech tak rostlina s EH může mít neutrální, ale i negativní účinek (Hume et al. 2016).

V případě druhé skupiny Nonclavicipitaceae (NC-endofyti) je infekce houby většinou přesně lokalizovaná u několika málo epidermálních buněk bez systematického šíření (Clay & Schardl 2002). NC-endofyti jsou dle Rodriguez et al. (2009) rozděleni do tří tříd. Třída č. 1 patří do podříše Dikarya (Ascomycota a Basidiomycota). Houby z této třídy osídlují kořeny, stonek i listy. Zástupci této třídy byli považováni za mykorhizní houby, protože se často nalézají v kořenech rostlin, avšak nevytvářejí vnitrobuněčné mykorhizní struktury. Při stresových podmínkách bývá kolonizace těchto hub u rostlin většinou vysoká a dosahuje často 90 – 100 %. Třída č. 2 jsou endofytní houby, které osídlují převážně nadzemní část rostlin a vyskytuje

se u cévnatých i bezcévnatých rostlin, dřevin i bylin od tropů po arktické oblasti. Jedna rostlina může obsahovat stovky různých endofytních hub.

Třída č. 3 jsou endofytní houby označované jako houby s černými přepážkami (dark septate fungi) a vyskytují se v kořenech rostlin. Patří převážně mezi Ascomycota a osídlují kořeny rostlin, kde tvoří mezibuněčné i vnitrobuněčné melaninové struktury z hyf a mikrosklerocia. Vyskytují se u velkého počtu rostlin, dokonce i u kterých se nevyskytuje mykorhizní symbióza od tropických oblastí po arktické (Newsham et al. 2009). NC-endofyti jsou svoji širokou ekologickou nikou méně prozkoumání nežli C-endofyti, ale z dosavadních poznatků vyplývá, že za daných okolností také zlepšují celkový fyziologický stav rostliny (Sinno et al. 2020). U lilku rajčete se zlepšila přijatelnost živin a tím zvýšil růst (Vergara et al. 2017), omezil houbový a virový patogen a zvýšila se produkce celkové biomasy plodů (Fakhro et al. 2010), zvýšila obrana proti žravému hmyzu (Shrivastava et al. 2015) a savému hmyzu (Menjivar et al. 2012). Záleží však na výběru vhodného genotypu rostliny i patogena v daných environmentálních podmínkách (Agbessenou et al. 2020). Ve studii, kterou provedl Mohammad Golam Destogeer et al. (2020), byly zjištěny EH ve stonku rajčete ze tří oblastí Japonska, kde se pěstuje dohromady sedm různých kultivarů přirozeným způsobem ve volné půdě. Nejčastěji byla přítomna EH *Fusarium* spp. (45,1 %), *Alternaria* spp. (12,8 %), *Gibberella* spp. (12,0 %) a *Dipodascus* spp. (6,8 %). Při pokusu na rýži seté (*Oryza sativa* L.), který provedli Redman et al. (2011), byly vybrány EH 2. třídy z míst, kde jsou nevyvážené vláhové poměry a zasolení půdy. Rostliny s EH měly vyšší odolnost proti zasolení a suchu a snížily spotřebu vody o 20 – 30 % s větším nárůstem své biomasy, nežli kontrolní varianta. Když měly rostliny optimální podmínky pro svůj růst, nebyl patrný rozdíl v rostlinách s EH a bez nich, avšak kolonizace rostlin se snížila ze 100 % na 65 %. Během domestikace užitkových plodin, mohly dle Luthenberg et al. (2016) jak rostliny, tak i endofytní houby ztratit důležité vlastnosti ze své původní podporující symbiózy z několika důvodů. Při šlechtění rostlin působil pouze malý, anebo žádný negativní faktor, a tak mohla schopnost pro zlepšení příjmu minerálních látek z půdy anebo odolnost proti patogenům být ztracena. Užívání systémových fungicidů během *In vitro* pěstování mohlo poškodit i EH. Fungicidy jsou také používány při moření osiva. Vztah mezi endofytní houbou a jejím rostlinným hostitelem se jeví jako antagonistická rovnováha, kdy ze strany houby je patrná virulence pro potřebnou kolonizaci rostlinných pletiv za účelem získání místa úkrytu a organických látek a odpoví na to se rostlina brání a zabraňuje houbám ve větší kolonizaci svých pletiv (Schulz & Boyle 2005; Verma et al. 2017). Tato rovnováha je velmi tvárná, jelikož fenotyp obou účastníků je měnný a záleží na momentálním stavu symbiontů.

### 3.1.3 Endofytní bakterie

Endofytní bakterie (EB) byly izolovány ve všech částech jak jednoděložných, tak dvouděložných rostlin (Lodewyckx et al. 2002). EB se do vnitřních částí rostlin dostávají přes podzemní část (kořeny), anebo nadzemní části (stonek, listy, květy, děložní lístky), přitom hlavním vstupním místem jsou kořeny (Kobayashi & Palumbo 2000). Rostliny si vytvářejí organické látky, jejichž podstatná část je posílána do kořenů. Vaněk et al. (2012) udává 30 % až 60 % čisté fotosyntézy. Část těchto látek je dále vydávána kořeny do okolní půdy spolu

s dalšími složkami, které ovlivňují nejen chemické a biologické vlastnosti půdy, ale i fyzickou přítomnost živých mikroorganismů (Uren 2007). Množství mikroorganismů v rhizosféře bývá díky kořenovým exsudátům větší oproti volné půdě. Příklad množství bakterií v rhizosféře, kořenech rostlin a listech, včetně nejčastějších zástupců popisuje ve svém článku Bulgarelli et al. (2013). V rhizosféře může být množství bakterií v rozmezí  $10^6$ - $10^9$  na gram půdy, v kořenech  $10^4$ - $10^8$  na gram rostlinných pletiv a v listech  $10^6$ - $10^7$  na  $\text{cm}^2$  listové plochy.

Ve vnitřních částech rostlin jsou nejčastěji zastoupeny bakterie kmenů Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes a Bacteroidetes. EB se dostávají dovnitř rostliny pasivní, anebo aktivní cestou (Kumar et al. 2020). Pasivní průnik EB do kořene je nejčastěji přes ztenčená místa rhizodermis jako jsou kořenové vlásky a prodlužovací zóna apikálního meristému. Některé bakterie se mohou dostat až do cévních svazků, z kterých jsou dále xylémem dopraveny do nadzemních částí rostlin (Compant et al. 2005). U nadzemní části se dostávají například přes listové průduchy, hydatody a lenticely. EB mohou také proniknout do rostliny přes poškozená povrchová pletiva (epidermis, rhizodermis) (Hallmann et al. 1997). Aktivní cesta EB do vnitřních částí rostliny začíná přichycením na povrchová pletiva rostliny a porušením její celistvosti za pomoci enzymatických látek, například celulázou, pektinázou, xylanázou a endoglukanázou (Monteiro et al. 2012; Straub et al. 2013; Kumar et al. 2020). Hlavním vstupním místem pro EB je přes kořen rostliny. Rostlina svými exsudáty ovlivňuje bakterie v blízkosti svých kořenů a během jednotlivých fází růstu se může měnit i složení bakterií v rhizosféře sledované rostliny (Li et al. 2014). U mladých rostlin se mohou vyskytovat bakterie, které efektivně využívají aminokyseliny a u dospělých zase bakterie, které lépe využívají karbohydráty (Houlden et al. 2008). Dorozumivací proces mezi rostlinou a EB probíhá na genetické úrovni, a to jak při vzájemných interakcích v rhizosféře, tak i po vstupu do vnitřních částí rostliny. Dle Papik et al. (2020) mají na množství a druh EB v rostlině vliv následující biotické a abiotické faktory. Genotyp rostliny a její vývojový stupeň je zásadní pro vniknutí EB do vnitřních částí rostliny a rozmnožení se. Rostlina produkuje sekundární metabolity pro potlačení přítomnosti patogenů a právě tato reakce může značně omezit, anebo i zabránit přítomnosti EB. Také přítomnost jiného mikroorganismu může buď povzbudit rozvoj daného endofyta, anebo ho naopak zastavit. Mezi abiotické faktory patří typ půdy, přítomnost škodlivin v půdě, vláha, pH půdy a teplota.

Rozlišují se tři typy interakcí EB s rostlinou, a to komenzální, pozitivní mutualistický a negativní antagonistický (Hardoim et al. 2015). Nejčastěji pozorovaným vztahem je komenzální, při kterém EB žije uvnitř rostlinných pletiv z látek dodaných rostlinou, ale jaký význam má pro rostlinu zatím vysvětleno nebylo. Bylo však pozorováno mnoho pozitivních mutualistických situací, při kterých byl kladně ovlivněn vývoj pozorované rostliny, ať již při běžných podmínkách, tak i ve stresových situacích (Afzal et al. 2019). Zlepšení růstu je ovlivněno dle Afzal et al. (2019) přímo EB, anebo nepřímo. Mezi přímo ovlivněné patří zlepšení příjmu živin a podpoření tvorby fytohormonů. Nepřímo může EB zlepšit zdravotní stav rostliny tvorbou látek účinných proti houbovým patogenům a živočišným škůdcům, například tvorbou antibiotik, hydrolytických enzymů, zastavení přísunu živin potřebných pro patogeny a brzkým upozorněním na patogona. Například u lilku rajčete EB s označením TEP3 z *Pseudomonas* sp. prokazatelně zabránila šíření patogena *Fusarium oxysporum* var. *Lycopersici* (Sacc.) W. C. Snyder & H. N. Hansen, 1940 (Nandhini et al. 2012).

Zlepšení příjmu živin bylo prokázáno u několika prvků, hlavně dusíku, fosforu a železa (Santoyo et al. 2016). Nejznámější je biologická fixace dusíku při symbióze bakterií rodu *Rhizobium* spp. s bobovitými rostlinami. Tyto bakterie dokáží zachytit vzdušný dusík, který ukládají jako amoniak a tím může dojít k zachycení až 460 kg dusíku na hektar za rok (Bulgarelli et al. 2013). U většiny diazotrofních bakterií je však zachycení dusíku menší než 10 kg dusíku na hektar za rok a jelikož se jedná o energeticky velmi náročný proces, jde hlavně o strategii pro přežití bakterie na místech s nízkým výskytem dusíku v půdě.

EB dokáží rychle uschovat větší množství rozpustného fosforu a tím předejít jeho pozdější horší dostupnosti pro rostliny (Khan & Joergensen 2009). K tomu může dojít i při vyšším množství fosforu na alkalických půdách, kde rostliny inokulované EB mohou zlepšit přijímání fosforu (Emami et al. 2020). Některé EB mohou tak jako EH získat fosfor z méně rozpustných sloučenin, ke kterým by se rostliny bez pomoci nedostaly. Anorganický fosfor získávají pomocí produkce organických kyselin a organický fosfor pomocí enzymu fosfatázy a lyázy (Walia et al. 2017). Bakterie produkují v místech s malým výskytem železa chélator siderofor, který na sebe váže železo, a to je pak přístupné pro potřeby bakterie anebo rostliny (Ahmed & Holmström 2014). Siderofor, dokáže kromě železa navázat i ostatní těžké kovy jako kadmium, hliník, zinek, měď a olovo, a tím pomoci rostlině v růstu na místech s vyšším obsahem těchto kovů (Złoch et al. 2016). Podobně jako endofytní houby dokáží i bakterie stimulovat produkci rostlinných hormonů, které mohou vést ke zlepšení růstu rostliny a potlačení stresových vnějších podmínek prostředí. Jedná se o kyselinu abscisovou, cytokininy, tvorbu ethylenu, gibbereliny a kyselinu indol-3-octovou (Miliute et al. 2015; Afzal et al. 2019). Bylo provedeno mnoho pokusů v kontejnerovaných kulturách s popsány kladnými výsledky, avšak v polních podmínkách již mnoho pokusů s pozitivním výsledkem zhotoveno nebylo (Liu et al. 2017). V polním pokusu je důležité, aby byly genotypově shodné jak rostliny, tak i bakterie, které se osvědčily ve skleníkovém pokusu. Získání izolátu EB z vnitřních pletiv rostlin je obtížný proces a zvolený postup může významně ovlivnit výsledek množství a rozmanitost druhů EB ve zkoumané rostlině (Hallmann et al. 1997).

U některých kmenů bakterií byl pozorován neblahý vliv na lidský organismus, a tak před použitím endofytních mikroorganismů pro komerční využití by měl být podroben důkladnému zkoumání (Rosenblueth & Martínez-Romero 2006; Złoch et al. 2016).

## 3.2 Výživa rostlin

Primárním zdrojem většiny zelených rostlin je pro svůj normální vývoj včasné započetí fotosyntézy, při které je přijímána energie světelného záření a přeměněna na energii chemickou. Ta je dále využita na tvorbu organických látek, které vznikají z látek anorganických, a to primárně z oxidu uhličitého a vody. Rostliny potřebují pro svůj vývoj a dokončení životního cyklu také látky, které se nazývají živinami. Ty se zapojují přímo do metabolismu rostlin a jsou nezbytné a nezastupitelné jinými látkami (Vaněk et al. 2012). Rostliny potřebují 16 látek a to uhlík, vodík, kyslík, dusík, fosfor, draslík, vápník, hořčík, síru, železo, mangan, zinek, měď, bór, molybden a chlor. Z těchto látek je uhlík a v některých případech i síra odebírána ze vzduchu jako oxid uhličitý a oxid siřičitý, zatímco kyslík a vodík jsou odebírány z vody (Pandey 2018). Živiny se dělí podle jejich obsahu a zastoupením množství v rostlině na makroprvky,



mikroprvky a také na prvky pro vývoj rostliny užitečné. Mezi makroprvky patří dusík, fosfor, draslík, vápník, hořčík a síra a jejich množství v rostlině odpovídá 1 – 150 g na každý kilogram rostlinné sušiny. Mikroprvky jsou železo, zinek, mangan, měď, bór, molybden a chlor a v sušině rostliny se nacházejí na každý kilogram rostliny v rozmezí 0,1 – 100 mg. V půdě, se živiny dostávají ke kořenům rostliny třemi způsoby, a to růstem kořene, pohybem vodního roztoku (hmotným tokem) a difuzí (Barber et al. 1963). Hmotným tokem se živiny nejčastěji dostávají do okolí kořenů na základě vodního gradientu a transpirací a difuzí jsou sorbovány do vnitřních částí kořene. Velmi přitom záleží na několika faktorech, převážně na množství vodního toku v půdě, na množství živin v půdě a jejich mobilitě a na nahromadění živin v rhizosféře kořenů (Pallardy 2007). Před příjmem živin kořeny, se nejdříve živiny dostávají pasivně do volného prostoru buněk kořenu rostlin. Aby se dostaly dále do vnitřních prostor buněk, musejí projít přes membrány. To se děje buď aktivně, anebo pasivně (Gregory 2006). Aktivní příjem převládá nad pasivním a probíhá i proti směru koncentračního gradientu a nejspíše se tak děje za pomoci přenašečů (Vaněk et al. 2012). Přenašeče jsou organické sloučeniny (nejspíše proteiny), které jsou kódovány větším počtem genů. Každý přenašeč je kódován zvláště pro přenos určitého prvku. Tyto přenašeče se nacházejí uvnitř pórů na plazmatické membráně a regulují vstup každého prvku do cytoplazmy. Jejich tvorba je regulovaná na základě potřeby určité živiny v rostlině (Mitra 2017). Podle směru přenosu látek a jejich počtu se označuje přenos jako uniport (jedna látka jedním směrem), symport (více látek jedním směrem) a antiport (více látek oběma směry). Pasivní příjem živin je na základě rozdílu elektrochemického potenciálu, kde pronikají převážně kladně nabitě kationty do vnitřního záporně nabitého prostoru buňky (Vaněk et al. 2012). K průchodu iontů pasivní cestou jsou uzpůsobeny proteinové iontové kanálky (hydrofilní póry), které se nacházejí nejen v plazmatické membráně, ale i v ostatních membránách vnitrobuněčných organel. Některé jsou vysoce vybíravé v iontech, které jimi projdou, převážně kationtů a jiné méně. Uvnitř kanálku se nachází výběrový element (filtr) který určuje jaký typ iontů může kanálkem projít (Hermann et al. 2012). Koncentrace minerálních živin v roztoku je často nedostatečná pro potřebu rostliny. Aby v takovém prostředí mohly rostliny existovat, mají kořenový systém, který je hlavním rostlinným orgánem v příjmu živin. Příjem živin kořenem rostliny je ovlivněn velikostí, architekturou a morfologií kořenového systému, například průměrem kořenů a kořenového vlášení, kořenové exsudací látek pro uvolnění živin z hůře rozpustných forem a symbiózou s ostatními mikroorganismy (Jungk 2001). Pro zlepšení příjmu živin má většina rostlin kořenové vlásky, které zvětšují plochu kořene a tím i obsazenost půdních částic a vedou k zlepšení příjmu vody a minerálních látek na různých půdních typech (Haling et al. 2013). Kromě kořeny, může rostlina přijímat živiny také přes pokožková pletiva, ale funkci kořene nemůže plně nahradit. V produkčním zemědělství množství dostupných živin nemusí být dostačující pro očekávané množství rostlinného produktu a je potřeba tyto živiny k rostlinám dodat. Člověk rostlinám dodává živiny v látkách, kterým se říká hnojiva. Hnojiva se rozdělují podle původu jejich vzniku na organická a minerální. Organická hnojiva vznikají z organické hmoty a minerální hnojiva jsou většinou vyrobeny chemickým průmyslem z přírodních surovin. Na rozdíl od minerálních hnojiv, mohou organická hnojiva kromě vlastních živin obsahovat i další organické sloučeniny, mikroorganismy a stimulační růstové a hormonální látky (Vaněk et al. 2012).

### 3.2.1 Řasová suspenze

Řasy jsou fotosyntetizující organismy s jednoduchou buněčnou stavbou. Podle své velikosti se rozdělují na makrořasy, tvořeny mnoha buňkami dosahující délky až 60 metrů (mořské chaluhy) a jednobuněčné mikrořasy, které dosahují nejčastěji velikosti několika mikrometru (Posten 2012). Řasy se vyskytují takřka ve všech ekosystémech, ve slané i sladké vodě, v půdě, na rostlinách a zvířatech (Richmond & Hu 2013). Vodní řasy se významně podílejí na tvorbě kyslíku. Z celkové produkce tvoří až 50 % kyslíku vyprodukovaného na naší planetě a zároveň jsou primárním producentem biomasy s roční produkcí až 50 t na hektar (Posten 2012). Mají vysokou účinnost fotosyntézy, při které dochází k velmi rychlému růstu a k fixaci vysokého množství oxidu uhličitého (Chew et al. 2020). Řasy mají široké spektrum využití. Různé druhy řas mají různé uplatnění a výsledný produkt je ovlivněn také formou jejich kultivace. Kromě environmentální hodnoty se pěstují pro komerční využití. Největší komoditou je potravinářské využití pro přímý konzum a jako doplněk stravy. Řasy obsahují polynenasycené mastné kyseliny (Ramesh Kumar et al. 2019), polysacharidy, které slouží jako zdroj vlákniny a mají další kladné účinky na lidské zdraví (Mišurcová et al. 2012), karotenoidy (antioxidanty) asraxanthin, fucoxanthin,  $\beta$ -karoten, lutein a zeaxanthin (Christaki et al. 2013) a velké množství terpenů (Cannell 1993). Karotenoidy získané z řas se také často využívají k barvení ostatních potravinových produktů. Kromě výše zmíněného jsou také zdrojem mnoha vitamínů, minerálních látek a bílkovin, a mají využití jako krmivo pro zvířata, především vodní kultury (Shields & Lupatsch 2012). V potravinářství se používají hydrokoloidní látky získané z řas, a to hlavně alginát, agar a karagenan (Khalil et al. 2018), přičemž své využití mají i v dalších odvětvích kromě potravinářství například farmacii nebo kosmetice. V lékařství se používají biopolymery získané z řas, které mají protizánětlivé (Zampieri et al. 2020), protinádorové (Halaj et al. 2018; Gaignard et al. 2019), oxidační (Andrew & Jayaraman 2020) a jiné účinky (Alassali et al. 2016). Exopolysacharidy, které produkují některé druhy mikrořas a sinic, chrání řasy před vnějšími stresovými podmínkami. Mají zároveň hydrofobní a hydrofilní vlastnost, která pomáhá efektivnímu hospodaření s vodou, dokáží vázat různé kladně nabitě kationty (živiny, těžké kovy) a zabraňují větrné erozi soudržností s půdními částicemi (Paniagua-Michel et al. 2014; Kumar et al. 2017). Veliké využití má také možná produkce biopaliv (biodisel, biovodík, bioethanol, biometan) (Oncel 2013; Suganya et al. 2016). Řasové biotechnologie se začaly ve větším měřítku rozvíjet po roce 1950 a v následujících desetiletích byly kulivační plochy v Japonsku, Mexiku a Asii (Spolaore et al. 2006). Postupně se rozšířily i do ostatních oblastí a v roce 2004 se odhadovala celková produkce mikrořas na 5000 tun (Pulz & Gross 2004). Kultivace mikrořas vyžaduje specifické podmínky, jako jsou teplotní minima a maxima, intenzita světla, množství živin a pH rozkoku a výměna plynů. Rozdělení kultivace může být podle získání energie ze světla (fototrofně), z anorganických solí a organického substrátu (heterotrofně) anebo kombinací obojích dvou předchozích způsobů (mixotrofně) (Vuppaladiyam et al. 2018). Podle způsobu pěstování řas, se jedná o zařízení otevřené, anebo uzavřené. Otevřené kulivační systémy mohou být přírodní i umělé nádrže, oběžné náhony anebo kaskádovitě nakloněné plochy, při kterých dochází k přímému kontaktu mikrořas s okolním prostředím (Masojídek et al. 2016). Důležité je, aby nedocházelo k sedimentaci řas, a proto musí docházet k častému míchání řasové suspenze. Nevýhodou otevřených kulivačních ploch může být možná kontaminace jiným mikroorganismem a vyšší ztrátou vody evaporací.

Uzavřené kultivační systémy (fotobioreaktory) jsou takové, při kterých kultura řas nepřichází přímo do kontaktu s okolní atmosférou. V této kategorii se jedná nejčastěji o kulturu ve vertikální, anebo horizontální trubici nebo válců menšího průměru nejčastěji do 20 cm a délkou většinou do 4 m a dále plochého panelu po kterém proudí řasová suspenze (Wang et al. 2012). V horizontální poloze bývá délka válců podstatně delší. V uzavřeném systému dochází k vysokým výnosům biomasy řas, ale za vyšší cenu nežli v otevřených systémech, ať již při pořízení vybavení tak i při ztížené údržbě celého systému. Problémem bývá také nahromadění kyslíku v zařízení, které musí být eliminováno. Heterotrofní produkce mikrořas může oproti fototrofnímu způsobu zvýšit produkci až na 25 násobek, avšak celkové náklady na tuto kultivaci jsou tak veliké, že se můžou vyplatit pouze při zaměření na určitý výsledný produkt, jako je získání některého cenného metabolitu mikrořas (Morales-Sánchez et al. 2017). Nejvhodnějším systémem pro kultivaci řas, tak může být otevřený systém kultivace řas na plochých deskách, někdy kaskádovitě uspořádaných, při kterých dochází k vysokému ozáření buněk řas. Toho je docíleno tenkou vrstvou řasové suspenze, většinou několik centimetrů, která obýhá za pomoci přečerpávajícího čerpadla. Výhodou tohoto systému je vysoká efektivita a snadná údržba (Masojídek et al. 2016; Pires et al. 2017).

Řasy se dělí podle teplotních nároků na psychrofyty, vyžadující teplotu menší než 15 °C, mezofyty, vyšší než 15 °C a menší než 50 °C a termofyty s teplotou vyšší než 50 °C (Zuccaro et al. 2020). Mimo optimální teplotní podmínky se rychlost růstu lineárně snižuje a záleží na teplotním rozmezí jednotlivých druhů nežli dojde k úplnému zastavení růstu (Ras et al. 2013). Osvětlení a jeho intenzita je důležitým faktorem u fototrofní a mixotrofní kultivace. Společně s teplotou, oxidem uhličitým a minerálními látkami, rozhoduje o průběhu fotosyntézy. Různé řasové kultury vyžadují různá optimální osvětlení buněk a od ní je závislá i hloubka otevřených pěstebních nádrží. Mícháním řas se docílí rovnoměrného střídání mezi světlou a tmavou fází fotosyntézy, kdy se řasy usazené u dna, kde je nedostatek světla dostávají na povrch kde je více světla (Borowitzka & Moheimani 2013). V případě nadměrného osvětlení může u některých druhů docházet také ke zpomalení anebo i zastavení fotosyntézy. Například u *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890 u světelné intenzity 37,5  $\mu\text{mol fotonů na m}^{-2} \text{s}^{-1}$  byl pomalý růst, který se zvyšoval do hodnoty 62,5  $\mu\text{mol fotonů m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a nad tuto hodnotu se opět zpomaloval (Khoeyi et al. 2012). U *Nannochloropsis* sp. byla nejvyšší produkce biomasy při osvětlení 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a periodicitou střídáním 18 hodin světla a 6 hodin tmy v uzavřeném fotobioreaktoru (Wahidin et al. 2013). U *Dictiosphaerium chlorelloides* (Nauman) Komárek & Perman, 2019 byl zaznamenán nejvyšší růst mezi osvětlením 11,9 – 50,3  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Kumar et al. 2017). Některé druhy řas rostou lépe při střídavé fotoperiodě 12 hodin tma 12 hodin světlo a jiné při neustálém osvětlení (Krzemińska et al. 2014). Objem mikrořasové biomasy může být také limitován množstvím dodaného oxidu uhličitého a nadměrné přítomnosti kyslíku. U otevřených kultur je poměrně malé využití oxidu uhličitého oproti uzavřeným kulturám, kde je využití tohoto plynu vysoké. U heterotrofních fermentorů je zapotřebí uhlík řasám dodat, nejčastěji ve formě glukózy, glycerolu a acetátu (Perez-Garcia et al. 2011). U uzavřených fotobioreaktorů dochází k probublávání kultury proudem stlačeného vzduchu s přísadkou oxidu uhličitého. Při fotosyntéze dochází k produkci kyslíku, který se v uzavřených a heterotrofních kulturách může hromadit a tím ovlivnit snížení produkce biomasy (Kazbar et al. 2019). Je zapotřebí množství a poměr nasycení oxidu uhličitého a kyslíku ve vodě optimálně naplánovat. PH pěstebního média je rozdílné dle nároků jednotlivých kmenů. U *Chlorella* spp. byl pozorován nejvyšší nárůst

biomasy při pH 7, avšak při pH 8 biomasy ubylo o jednu třetinu, ale zvýšilo se množství produkce lipidů (Rai et al. 2015). Stejně jako rostliny, potřebují i mikrořasy ke svému životu makroprvky a mikroprvky. V hlubokém oceánu a v mořském fytoplanktonu, je poměr prvků uhlíku, dusíku, a fosforu dle Redfieldovy stechiometrie 106 C : 16 N: 1 P (Arrigo 2005). Stejně jako v oceánech se jednotlivé poměry zastoupených prvků mohou lišit pro různé mikrořasové kultury. Souhrn potřebných anorganických látek shrnul ve své práci Grobbelaar (2013). Celkový obsah solí a míra zasolení prostředí mikrořas je odvozena od přizobených podmínek, v kterých se určitý druh řasy nachází. Přísun uhlíku je buď dodáním oxidu uhličitého anebo hydrogen uhličitanu. Po přidání hydrogen uhličitanu dochází k uvolnění hydroxidových aniontů, které mohou zvýšit pH roztoku. Zvolení způsobu dodání uhlíku je závislé na pH kultivačního media. Dusík je po uhlíku druhým nejvíce zastoupeným prvkem v řasové kultuře. Řasy přijímají dusík ve formě nitrátového aniontu anebo amonného kationtu. Nejčastěji se dodává jako nitrát, jelikož amoniak může být pro mnoho řasových kultur v závislosti na pH toxický, pokud je koncentrace v roztoku nad  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , zatímco nitrát se dodává v koncentracích  $100 - 800 \text{ mg L}^{-1}$  (Acién et al. 2017). Některé sinice mohou také asimilovat vzušný dusík, ale v produkčním pěstování řas tomu není přikládán veliký význam. Přestože je fosfor zastoupen v řasách méně, jeho nedostatek způsobuje nejčastěji nižší výtěžnost řasové kultury. Ten je většinou řasám dodáván jako orthofosfát. Důvod jeho nedostatečného příjmu může být i zvýšený obsah oxidu uhličitého anebo železa, který může být řasou sorbován na úkor fosforu. Ostatní prvky jsou neméně důležité, ale již nejsou potřebovány v takovém množství jako ty předešlé.

Sběr mikrořas z roztoku je vzhledem k jejich velikosti obtížný proces, který je energeticky i finančně náročný. Existuje několik způsobů sběru, a to za pomoci mechaniky, chemie, biologie a elektrickými metodami. Mikrořasy se oddělují od média filtrací, centrifugací, metodou nadnášení, flokulací, gravitační sedimentací, elektrolytickými procesy, elektroforetickými a magnetickými separacemi (Singh & Patidar 2018; Okoro et al. 2019). V pěstebním médiu bývá koncentrace mikrořas  $0,02 - 0,06 \text{ gramů řas na } 100 \text{ gramů pěstebního média}$ . Sběr může probíhat jedním krokem, anebo více kroky za sebou a postup sběru a oddělení pěstebního média i následné sušení je závislý na druhu pěstované řasy a způsobu jejího pěstování. Jednokroková může být například centrifugace, která je ovšem finančně náročná a bývá uplatňována u menšího objemu řas s vysokou hodnotou produktu. Jedna z nejeftivnějších variant pro snížení ceny sběru mikrořas je vícefázový proces (Bilad et al. 2014). Analýzu ceny a energetické náročnosti procesu zhotovil Fasaai et al. (2018). U otevřených systémů byly v roce 2018 náklady na produkci  $1 \text{ kg mikrořas } 0,3 \text{ až } 2 \text{ eura}$  a přitom se spotřebovalo  $4,5 \text{ kWh kg}^{-1}$  energie. V uzavřených systémech vzhledem k vyšší výtěžnosti biomasy mikrořas náklady klesly pod  $0,5 \text{ eura kg}^{-1}$  a energie pod  $0,5 \text{ kWh kg}^{-1}$  a tím výsledný náklad sběru mikrořas dosahoval  $3 - 15 \%$  z ceny celkových nákladů.

Mikrořasy mohou být v budoucnu důležitou součástí čištění odpadních vod (Li et al. 2019). Mohly by snížit množství nitrátů, fosforů, a organických složek přímo v místě jejich výroby. Těžké kovy se z odpadních vod odstraňují za pomoci iontových výměn a dalších postupů, které jsou podobné praktikám sběru mikrořas a biologická sorbce těžkých kovů již byla prokázána u některých hub a bakterií (Fu & Wang 2011). Běžné druhy řas se na mnoho odpadních vod použít nedají, jelikož tyto vody vykazují různé výkyvy v pH, mnoho organických látek nebo teploty, které nejsou slučitelné s fyziologickými potřebami těchto řas (Wollmann et al. 2019).

Existují však řasy termofilní, acidofilní a psychrofilní, které by se využít mohly. Při výběru vhodného druhu mikrořasy je zapotřebí zapojit genetické, molekulární a metabolické inženýrství, aby mikrořasa odpovídala specifickým požadavkům (Leong & Chang 2020). Stejně tak následné využití mikrořasové kultury z těchto vod. Mikrořasy sebrané z odpadních vod nejsou v závislosti na obsahu látek vhodné jako zdroj potravy pro lidi ani zvířata (Van Den Hende et al. 2016). Kromě ostatních využití zmíněných v tomto odstavci, je možnost mikrořasy použít jako organické hnojivo (Amenorfenyo et al. 2019). Použitím mikrořasového hnojiva se zvýší organická složka půdy a tím se zvýší její úrodnost. Dále se do půdy dostávají minerální složky, růstové hormony produkované mikrořasami, protimikrobiální složky a další metabolity mikrořas, které podporují růst rostlin (Coppens et al. 2016; Renuka et al. 2018; Guo et al. 2020). Řasovou suspenzi je možné použít k přihnojování rostlin na list (Dineshkumar et al. 2020). Aplikací roztoku z řas *Chlorella vulgaris* a *Spirulina platensis* (Gomot) Geitler, 1925 se zjistila u mungo fazole (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) zvýšená produkce aminokyselin a obsah minerálních makro i mikroprvků, která vedla ke zvýšení výnosu o 10- 25 % oproti kontrolní variantě. U *Solanum lycopersicum* var. Roma, mělo přidání mikrořasy *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. M. Tsarenko, 2001 do pěstebního media před přesazením za následek vyšší počet květů, rozvětvení a dřívější produkci plodů oproti kontrolní variantě (Garcia-Gonzalez & Sommerfeld 2016). Použití mikrořasových hnojiv často vede ke zvýšenému množství chlorofylu v listech (Hajnal-Jafari et al. 2020; Mutale-joan et al. 2020). Ošetření semínek vybraných druhů zeleniny řasovou suspenzí z mikrořasy *Chorococcum* sp. mělo kladný vliv na okurku setou (*Cucumis astivus* L.), rajče jedlé, papriku roční a mungo fazole, které byly sledovány do desátého dne od vyklíčení (Deepika & MubarakAli 2020). Nejlepší výsledky měly semínka, která byla ošetřena 20% roztokem řasové suspenze. Větší biomasu kořenů a nadzemní části u rajčete jedlého a okurky seté potvrzuje u semínek ošetřených mikrořasou *Chlorella vulgaris* (Bumandalai & Tserennadmid 2019). Přihnojení na list extraktem polysacharidu získaným z mikrořasy *Spirulina platensis* vedlo ke zvýšení velikosti rajčete jedlého o 20 % a papriky roční o 30 % (Elarroussi et al. 2016). Polysacharidový extrakt, získaný z několika mikrořas byl přidáván do závlivky k rajčatům v pokusu provedeným Rachidi et al. (2020), měl za následek zvýšení suché nadzemní biomasy o 46,61 % oproti kontrolní variantě. Použití mikrořasových hnojiv získaných převážně z odpadních vod, může pomoci recyklaci živin, které mohou způsobovat zátěž pro ekosystém. Při použití softwaru Sinapro, došel Castero et al. (2020) k závěru, že použití mikrořas jako zdroj fosforečnatého hnojiva oproti používanému tryfosfátu má za současných pěstebních podmínek horší dopad na životní prostředí oproti průmyslové výrobě tryfosfátu o 75 %. Důvodem jsou vysoké náklady kultivace mikrořasy a následného zpracování. Pokud by se použil ideální případ, kdy by byla veškerá potřebná energie získána fotovoltaikou, sběr mikrořas by proběhl sedimentací a sušení by proběhlo přirozeně rozprostřením mikrořasy na sušící plochu, namísto energeticky náročných procesů, dosáhlo by se podobných výsledků hodnotících environmentálních faktorů. V kategorii ekotoxicita, však mělo stále o 58 % větší dopad nežli produkce trifosfátu. Pro celkové zastoupení minerálních hnojiv se tak prozatím nehodí, avšak jako doplňkové organické hnojivo využití má.

### 3.2.2 Vermikompost

Kompostování je přirozeným procesem, při kterém se čerstvá organická hmota přeměňuje na stabilní humínové látky (Cooperband 2002). V přírodě k tomu dochází takřka ihned při vytvoření biologického odpadu. Žížaly, hlístice, roztoči, stejnonožci, chvostokoci, mravenci a brouci, rozmělní většinu organického materiálu na drobné části, a tím zvýší plochu pro následnou degradaci organického materiálu mikroby (Chen et al. 2010). Uhlík v rostlinných zbytcích je využit mikroby jako zdroj energie za vzniku oxidu uhličitého. Přitom mikroby spotřebovávají kyslík, který musí být do kompostu dodán, jinak se vytvoří anaerobní podmínky. Proces kompostování je možné rozdělit do tří fází a účastní se ho mikroorganismy hub, bakterií, hlístic a prvoků, jejichž počet se při jednotlivých fázích mění (Mehta et al. 2014). V první fázi, dosahují teploty do 40 °C a jsou přítomny mezofilní mikroorganismy. Při rozkladu organických látek vzniká mikrobiální aktivitou teplo, které dosahuje až 60 °C (Strom 1985; Waszkielis et al. 2013). Při teplotě přesahující 40 °C nastupují termofilní mikroorganismy a v této fázi mikroorganismy zpracovávají tuky, proteiny a komplexní karbohydráty (Mehta et al. 2014). Vysoká teplota likviduje většinu patogenů, které jsou rostlinám i lidem nebezpečné. Zároveň dochází k likvidaci většiny rostlinných semen, které by později mohly vyklíčit a zaplevelit půdu (Wiese et al. 1998). Teplota kompostu poté postupně klesá a nastupuje poslední fáze kompostování, při které kompost zraje. Během tohoto procesu jsou přítomny opět mezofilní mikroorganismy a teplota bývá do 40 °C. Obsah vody při aerobním kompostování by měl být ideálně okolo 60 % minimálně však 45 % (de Bertoldi 2010). Pokud je kompost sušší než uvedené hodnoty, rozvíjí se v kompostu převážně mikroorganismy z řad hub, a následně hrozí vyšší výskyt patogenů *Pythium* spp. V procesu kompostování se tak často voda do kompostu musí doplnit. Houby jsou u kompostování přítomny zejména při vyzrávání kompostu a rozkládají například celulózu a lignin (de Bertoldi et al. 1983). Limitujícím faktorem pro mikroorganismy je obsah minerálních látek obsažený v organických sloučeninách při kompostování. Všeobecně uznávaný poměr uhlíku a dusíku při kompostování je 30 : 1 (Md Khudzari et al. 2016). Méně přítomného dusíku znamená menší aktivitu mikroorganismů a při vyšším obsahu dusíku může docházet k jeho ztrátám amonifikací (Bueno et al. 2008). V případě anaerobních podmínek je kompostování možné a v přírodě k němu také běžně dochází. Na rozdíl od kompostování za přítomnosti vzduchu je proces rozkladu organické hmoty delší a nedochází k tak velikému teplotnímu zahřátí (Mehta & Sirari 2018). Vyskytuje se v něm tedy více patogenů a semen plevelů.

Zhotovený kompost se používá jako organické hnojivo a pokud se přidá do půdy ve správném množství, má pozitivní účinek na půdní vlastnosti. Především se jedná o zvýšení množství zadržené vody v půdě, vyšší kationtové výměnné kapacity, vyšší zadržování živin v půdě a vyšší odolnost proti výkyvu pH (Johnston 1986).

Vermikompostování, je kompostování organického materiálu za účasti mikroorganismů a některých druhů žížal. Je to aerobní mezofilní proces rozkladu organických látek. Žížaly rozmělní organický materiál na drobnější částice a provzdušňují půdu, zatímco hlavní přeměnu organických látek obstarávají přítomní mikroorganismy (Dominguez & Edwards 2010). Přestože při vermikompostování nedochází k termofilní části, výsledný produkt nemusí obsahovat zvýšený výskyt patogenů a plevelných semen. Patogeni, kteří jsou zničeni vysokou teplotou při aerobním kompostování, jsou eliminováni následkem žížal, které požívají

organický materiál i s bakteriemi, škodlivými hlísticemi, patogenními houbami a semeny rostlin (Boran et al. 2017). V trávícím traktu žížal dochází k úhynu většiny škodlivých organismů. Uvnitř trávícího traktu se nachází množství mikroorganismů, mezi kterými dochází k neustálým interakcím. Genotypové zastoupení těchto mikroorganismů je závislé na genotypu a původu stravy žížal (Sapkota et al. 2020). Jsou mezi nimi také bakterie schopné zachycovat vzdušný dusík a převádět fosfor na pro rostliny dostupnější formy. Exkrementy, které žížaly vyloučí, jsou rychle osídlovány dalšími mikroorganismy, a tak proces vermikompostování bývá rychlejší oproti procesu klasického aerobního kompostování. Tyto mikroorganismy, kterých bývá více nežli při klasickém aerobním kompostování, mohou omezit rozvoj patogenních organismů rostlin a škůdců, proti kterým jim pomáhá i přítomnost fenolických látek (Joshi et al. 2015; Ravindran et al. 2016). Nejčastější zástupci žížal používaných při vermikompostování jsou *Eisenia andre* Bouché, 1972 a *Eisenia fetida* Savigny, 1826 (Domínguez 2018). Vermikompostování je náročnější na obsah vody, který dosahuje 80 % – 85 % a limitními faktory jsou 60 % až 90 % (Dominguez & Edwards 2010). Výsledný produkt, vermikompost, zlepšuje fyzické, biologické a chemické vlastnosti půd (Joshi et al. 2015). Některé vlastnosti má vermikompost podobný s konvečním kompostem, jako je větší retenční jímavost vody, stabilizaci pH, vyšší iontovou výměnnou kapacitu. V pokusech, kdy dochází ke kompostování a vermikompostování stejného materiálu, vykazuje vermikompost nižší hodnotu pH, vyšší homogenitu, nižší hodnotu elektrické vodivosti, více organické hmoty, růstové hormony (auxiny, gibbereliny a cytokininy) a půdní enzymy, vyšší množství dostupných živin převážně dusíku a fosforu, který je navíc pro rostliny dostupnější (Tognetti et al. 2005; Lazcano et al. 2008; Adhikary 2012; Ravindran et al. 2016; Bhat et al. 2018). Kompost na druhou stranu vykazoval devítinásobek živin dusíku, draslíku a síranu oproti vermikompostu v rozboru, který provedl Fornes et al. (2012). Byla také zjištěna u vermikompostu vyšší koncentrace huminových substancí a i když některé těžké kovy byly přítomny ve zvýšeném množství oproti aerobnímu kompostu, byly zabudované do pro rostliny bezpečných sloučenin (Dominguez et al. 1997). Poměr uhlíku a dusíku je menší než při běžném kompostování a mineralizace dusíku probíhá rychleji a je zde vyšší zastoupení nitrátové formy dusíku oproti amonné (Atiyeh et al. 2000). Živiny jsou navíc obalené v slizovitém exkretu zvaném mukus, který zajišťuje pomalejší uvolňování živin (Adhikary 2012). Mukus také zrychluje rozklad a humifikaci organického materiálu a může zvyšovat mikrobiální diverzitu a aktivitu (Huang & Xia 2018). Vzhledem ke své drobné struktuře připomínající rašelinu, provedl Lazcano et al. (2009) pokus v kterém zjišťoval, zda by mohl kompost a vermikompost nahradit rašelinu v pěstebních substrátech při kultivaci rajčete. Přidáním kompostu nad 50 % celkového objemu pěstebního substrátu mělo za následek mortalitu rostlin, ale 10 % a 20 % mělo na růst rajčete pozitivní účinek. U vermikompostu byly nejlepší výsledky pozorovány při vysokých procentech zastoupení v substrátu 50 %, 75 % a 100 %, a tak byl doporučen jako možná alternativa rašeliny. Použití vermikompostu jako substrátu doporučuje také Morales-Corts et al. (2014). V pokusu s minerálními hnojivými, který provedl Abou El-Hassan et al. (2017), však kompost ani vermikompost nevykazoval zlepšený růst oproti plně minerálně hnojené variantě při kultivaci fazolu obecného (*Phaseolus vulgaris* L. 'Paulista'). Pokud se k vermikompostu přidala navíc 50 % dávka minerálního hnojiva, byl výsledek podobný jako při plném hnojení minerálními hnojivými. Minerální hnojiva měla také pozitivní vliv na růst salátu, ale u rajčete byl pozorován lepší růst jen v počátečních stádiích vývoje rostlin a po osmi týdnech dosahovaly rostliny

s vermikompostem vyššího růstu (Atiyeh et al. 2000). Salát setý rostl lépe po hnojení močovinou oproti hnojení vermikompostem a kompostem (Hernández et al. 2010). Také u Bachman & Metzger (2008) byly nejlepší výsledky, když se kombinoval kompost s minerální zálivkou. Přidání vermikompostu na zasolené půdě může zlepšit růst rostlin (Mahmoud et al. 2015). Ve víceletém pokusu může být pozorováno jen nepatrné zlepšení růstu, ale v případě delšího období sucha může rostlinám významně pomoci (Doan et al. 2015). Vermikompost přidáný do písku neměl vyšší výtěžnost rajčat oproti kontrole s minerálním hnojivem, ale rostliny byly zdravé s dobrou kvalitou plodu (Reséndez et al. 2012). Při vyhodnocení látkového složení plodu rajčete jedlého se u rostlin pěstovaných v substrátu s příměsí vermikompostu z ovčího hnoje, zvýšilo množství rozpustných a nerozpustných látek a karbohydrátů oproti variantě bez příměsí vermikompostu (Gutiérrez-Miceli et al. 2007).

Z vermikompostu je možné připravit výluh, který se může použít k přihnojení rostlin na list, které se ukázalo jako efektivní (El-Haddad et al. 2020). Vermikompostový výluh se připravuje vyluhováním hotového vermikompostu ve vodě při různém poměru, například 1 : 5 (vermikompost : voda) kdy se připraví 20% výluh. Tento poměr nemusí být konečný a může se dále upravovat následným zředěním dle potřeby. Používání těchto extraktů má pozitivní vliv na růst rostlin. Obsahuje podobné látky jako vermikompost, z kterého se do vody vyluhují humínové látky, živiny a mikroorganismy (Pant et al. 2012; Ievinsh et al. 2017). V porovnání s vermikompostem, byla zjištěna třetinová populace mikroorganismů ve výluhu. Obsah podpůrných látek pro růst rostlin a množství mikroorganismů se prokázal být závislý také na způsobu přípravy výluhu. Přítomnost vzduchu při vyluhování obsah těchto látek zvýšil a při zkoušce klíčení a následného růstu rostlin rajčete a okurky byl výrazně lepší výsledek u rostlin ošetřených okysličeným výluhem v pokusu, který provedl Arancon et al. (2007). Do výluhu z vermikompostu se při přípravě někdy přidávají další látky. Tyto látky byly původně myšleny pro rozvoj mikroorganismů přítomných ve výluhu a těmito látkami jsou například humínové kyseliny, řasové prášky, rybí emulze, melasa a jiné (Salter & Edwards 2010). Potřeba přidávat tyto látky do vermikompostu se názorově různí. Pant et al. (2011) se domnívá, že pokud je doba extrakce dostatečně dlouhá, přidání těchto aditiv není potřebné pro zlepšení růstu rostlin a kvalitu živin ve výluhu obsažených. Doba výluhu může být od několika hodin po několik dní, často ale bývá okolo 24 hodin. Výsledný produkt vermikompostu, je závislý na původu kompostovaného materiálu. Vyšší množství živin má výluh z vermikompostování chlévského hnoje oproti rostlinným zbytkům (Zarei et al. 2018). U rajčete jedlého 'Anibal' při kultivaci na písčitém substrátu byl nejvyšší výnos při použití minerálního hnojiva podle doporučených dávek následován hnojením vermikompostem, kde byl výnos o 12,5 % menší v experimentu provedeném Márquez-Quiroz et al. (2014). Ošetření osiva rajčat jedlých a salátů setých výluhem z vermikompostu podpořilo klíčení v pokusu který provedl Arancon et al. (2012). Oproti tomu v pokusu který provedl Ievinsh (2011), došlo k zastavení klíčení některých druhů zeleniny. Jelikož se jedná o tekuté hnojivo je možné využít výluh z vermikompostu také v hydroponických systémech. V hydroponickém pokusu na rajčeti a salátu který provedl Arancon et al. (2019) se u salátu výrazně zvýšil výnos, při použití koncentrací 1,6% a 3,2% a zároveň při snížené dávce minerálního hnojiva oproti plně doporučené dávce o 25 % a 50 %. U rajčat se zlepšil růst po přidání výluhu z vermikompostu v koncentraci 0,14%, 0,28% a 0,56%.



### 3.2.3 Minerální výživa

Minerální výživa má zásadní vliv na rostlinnou produkci. Rostliny přijímají živiny převážně svými kořeny z půdy a odtud jsou transportovány do ostatních rostlinných orgánů. Při sklizni je tak část těchto živin ze svého místa nenávratně odebrána. Kromě sklizně, jsou však potřebné minerální látky z půdy ztraceny například vyplavením a plynnými úniky. Nedostatek živin, bývá jedním z nejčastějších příčin snížení výnosu sklizně (Ali et al. 2008). Nároky na živiny se u jednotlivých rostlin liší. Pěstování jednoho druhu rostlin na stejném stanovišti po několik let vede k jednostrannému odčerpání živin a může dojít k rychlejšímu nedostatku určité živiny na stanovišti (Fu et al. 2017). Příjem živin rostlinami se řídí Sprengel – Liebigovým zákonem minima, kdy i jediná živina, která není rostlině dostupná vede ke snížení příjmu ostatních živin (Ferreira et al. 2017). Minerální hnojiva se rozdělují na jednosložková (obsahují jednu živinu) a vícesložková (obsahují více živin). Dále se dělí na pevná hnojiva dodávána nejčastěji granulovaná a kapalná, rozpuštěná v roztoku. Hnojiva mohou být dodána pro rostliny v ihned dostupné formě, anebo jsou pomalu uvolňovací. Dodáním živin rostlině v podobě minerálních hnojiv však nemusí znamenat zlepšení dostupnosti této živiny pro rostliny. Hlavní úlohu v příjmu živin rostlinami má půda. Živiny jsou do půdy dodávány jako sloučeniny více prvků a půdní pH velmi ovlivňuje, zda rostlina tyto prvky dokáže využít. Pokud je využit nedokáže anebo nejsou pro rostlinu v dané situaci limitním prvkem, může vyšší koncentrace této živiny být pro rostlinu i nebezpečná (White 2012). Půdní reakci ovlivňují ionty vodíku, hliníku, železa, které okyselují půdu a vápníku, hořčíku, draslíku a sodíku, které půdu alkalizují. Jednotlivé prvky mají optimální pH, při kterém jsou rostlinami přijímány a značí jejich dostupnost. Mimo tyto hodnoty bývají živiny rostlině dostupné, ale většinou v omezeném množství. Dostupnost jednotlivých prvků shrnul McCauley et al. (2009). Makroprvky (kromě P, které je nejdostupnější v pH 6 – 7) N, K, Ca, Mg a S jsou nejvíce dostupné pokud pH je mezi 6,5 až 8. Většina mikroprvků B, Cu, Fe, Mn, Ni a Zn jsou dostupnější při pH 5 – 7. Půdní částice dokáže navázat ionty živin a tato vlastnost se nazývá iontová výměnná kapacita půdy. Půdní částice vykazují na svém povrchu buď kladný, anebo záporný náboj na základě elektrostatické síly a podle toho jsou přitahovány anionty, anebo kationty. V České republice převládá v půdách záporný náboj, a tak jsou přitahovány kationty dle Vaněk et al. (2012) v tomto pořadí  $Li^+ < Na^+ < NH_4^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+}$ . Kationty vpravo jsou silněji sorbovány a vytěsňují kationty s nižším oxidačním stupněm. Rozhoduje také, které kationty v půdním roztoku převládají, a to ovlivňuje i pH. Většinou půdy s vyšším obsahem jílových částic mají vyšší kationtovou výměnnou kapacitu (Shiri et al. 2017), a také půdy s vyšším podílem rozložené organické hmoty (Adrover et al. 2012). Jílové části jsou malé pouze 0,002 mm, kdežto pískové zrno je veliká asi 2 mm a široké 0,05 mm, avšak písek na rozdíl od jílu má velmi malou schopnost navázat živiny vzhledem k veliké vzdálenosti pórů mezi zrny a malým povrchem (Jones & Jacobsen 2005). Kationtová výměnná kapacita je důležitá z hlediska použití minerálních hnojiv. Například dusík se dodává ve sloučeninách jako amonný kationt  $NH_4^+$ , anebo jako nitrátový aniont  $NO_3^-$ . Zatímco amonný kationt může být zachycen a navázán půdními částicemi, nitrátový aniont se při jeho nevyužití rostlinami z půdy vyplavuje. Pokud je navíc v půdě nedostatek kyslíku a půda je zamokřená, probíhá denitrifikace nitrátu na oxid dusíku a dále na elementární dusík (Tei et al. 2020).

Z pohledu výnosu plodiny mohou jednotlivé živiny mezi sebou působit synergicky, neutrálně, anebo antagonisticky. Z 96 publikací porovnal 116 vztahů mezi živinami ovlivňující výnos Rietra et al. (2017) a vyvodil z nich tyto výsledky. Pokud jsou dvě živiny při kultivaci plodin nedostatkové, jejich přiměřeným dodáním se často docílí velmi zvýšeného výnosu. Většina makroživin působí synergicky a jejich vzájemné podpoření příjmu může mít zvýšený výnos nad očekávání při predikci nad přínosem hnojení živin zvláště. Antagonismus a snížení výnosu se často projevuje u bivalentních kationtů, které jsou rostlinami přijímány stejnými cestami. Snížení antagonismu těchto kationtů by se mohlo docílit použitím různých aplikačních metod. Jedna živina by byla dodána v hnojivu přidaném do půdy a druhá jako hnojivo k přihnojení na list. Použití minerálních hnojiv by mělo být takové, aby se dosáhlo požadovaného výnosu a aby se minimalizovaly ztráty těchto živin a nadměrně nedocházelo k zatěžování životního prostředí, neboli efektivní používání hnojiv. Efektivní používání hnojiv určuje pravidlo pro aplikaci správné sloučeniny, správného množství, ve správný čas na správné místo (Snyder 2017). Množství dodaných živin je závislé na množství přijatelných živin v půdě a před aplikací minerálního hnojiva při polním pěstování by měl předcházet rozbor půdy. Nároky na živiny jsou během růstové fáze rozdílné. Nejvyšší příjem dusíku je při vysokém nárůstu biomasy a tomu by mělo být přizpůsobené hnojení dusíkem. Optimální je použít na podzim amonné dusíkaté hnojivo, aby nedocházelo přes zimu k odplavení nitrátů (Johnston & Bruulsema 2014). Vhodnou strategií při přihnojování nitráty je plánované použití pomalu rozpustných nitrátových hnojiv. To může být na základě pomalu uvolňovacích hnojiv (urea-formaldehyd, isobutylendiurea), kontrolovaných uvolňovacích hnojiv (syrné a polymerové obaly hnojiv), nitrifikačních inhibitorů (chemické zpomalení přeměny amoniaku na nitrát) a inhibitoru enzymu ureinázy, která brání aktivitě enzymu ureázy jako katalyzátoru hydrolýzy močoviny na amoniak (Tei et al. 2020). Správné místo použití hnojiv je například u fosforu, který je v půdě špatně pohyblivý. Pokud je potřeba fosfor rostlině dodat, měl by být aplikován pod povrch půdy blízko osiva, nebo mladé sazenici. Vyplavení nitrátů je pro Evropu velkým ekologickým problémem. Během 20 let od roku 1985 do roku 2005 bylo v Evropě vyplaveno 50 až 80 milionů tun dusíku do říčních koryt a většina z tohoto množství je původem ze zemědělství (La Notte et al. 2017).

Největším uživatelem minerálních hnojiv je Čína. Celková výměra zemědělské plochy v Číně dosahovala v roce 2008 9 % z celkové světové zemědělské plochy, avšak na této ploše spotřebovala 1/3 veškerých použitých minerálních hnojiv na světě (Xiang et al. 2008). Nedostatek produktu na čínském trhu vede k užívání dusíkatých hnojiv, která nemusejí být pro jejich pole vhodná, jelikož se nabízejí pouze vícesložková hnojiva, anebo močovina (Johnston & Bruulsema 2014). Množství přijatých živin se u rostlin různí dle jejich genotypu (Han et al. 2015). Při polním pěstování se počítá množství živin, které je zapotřebí ke sklizni 1 tuny produktu. U rajčete jedlého je dle Vaněk et al. (2002) odebráno 2,7 kg N, 0,8 kg P, 3 kg K, 2,3 kg Ca a 0,3 kg Mg. U póru zahradního autor uvádí odběr 2,8 kg N, 0,5 kg P, 4,8 kg K, 1,7 kg Ca a 0,3 kg Mg. Hlušek et al. (2002) uvádí odběr živin u rajčete 2,75 kg N, 0,38 kg P, 3 kg K, 2,25 kg Ca, 0,25 MgO a 0,6 kg S a u póru zahradního 2,8 kg dusíku, 0,48 kg fosforu, 4,8 kg draslíku, 1,72 kg vápníku, 0,43 kg hořčíku a 0,57 kg síry. Pór se vyznačuje vyššími nároky na dusík s celkovou dávkou 110 – 140 kg ha<sup>-1</sup> avšak dle zákona je možné při integrované produkci dodat z tohoto množství maximálně 70 t ha<sup>-1</sup> (Petříková et al. 2012). U rajčete stejný autor zdůrazňuje potřebu dostatečného množství vápníku, který se musí přidat k předplodině,

jelikož nemají rajčata rádi čerstvé vápnění. Pokud nemají dostatek vápníku, vyskytují se na špičce plodů hnědočerné skvrny. Nárok na dusík mají nejvyšší do fáze kvetení, aby se podpořil vegetativní růst. Při přehnojení dusíkem, však hrozí příliš bujný vegetativní růst se zpožděným kvetením a menší násadou plodů (Rubatzky & Yamaguchi 1997). Fosfor je důležitý z hlediska rozvoje kořenového systému a zvyšuje násadu plodů a draslík mimo jiné ovlivňuje kvalitu a chuť plodů (Sainju et al. 2003). Vzhledem ke specifickým požadavkům jednotlivých plodin, jsou dnes na mnoha místech budovány rozsáhlé skleníky, které dovolují pěstovat zeleninu na místech, kde by to bylo jinak velmi obtížné, anebo nemožné (Herrero et al. 2014). Tyto skleníky jsou vybaveny různě pokročilou technologií pro optimalizaci světla, teploty, vlhkosti, výměně plynů a minerálních látek, při sníženém působení rostlinných škůdců a patogenů (Jensen 2001; Mancuso & Bustaffa 2006; Silber & Bar-Tal 2008; Shamshiri et al. 2018). V těchto optimálních podmínkách je možné podrobněji sledovat minerální výživu různých plodin, zejména v uzavřených hydroponických kulturách. Jednotlivá minerální hnojiva jsou ve větších provozech nejčastěji oddělena a jejich koncentrát je přesně dávkován do míchací nádrže, kde se promíchají hnojiva s vodou a upraví se hodnota pH (Resh 2013). Důležitý parametr je hodnota elektrické vodivosti a poměrové zastoupení jednotlivých živin, které se přizpůsobuje na základě pravidelných kontrol rostlinných výživových hodnot. Rostliny si z živného roztoku odebírají ionty živin, a tak při znovupoužití tohoto roztoku může nastat nerovnováha mezi jednotlivými živinami. Měření obsahu jednotlivých iontů (nejčastěji N, P, K) se provádí v moderních provozech hlavně selektivními elektrodami (Cho et al. 2018). Optimální elektrickou vodivost (EC) a hodnotu pH uvádí Sharma et al. (2018) pro rajčata EC 2,0 – 4,0 a pH 6,0 – 6,5 pro pór EC 1,4 – 1,8 a pH 6,5 – 7,0. Doporučené hodnoty dávkování jednotlivých živin pro rajče od několika autorů jsou v obrázku č. 3. Dávkování a poměr jednotlivých živin se provádí při komerčním skleníkovém pěstování plodin nejen na základě rozboru živného roztoku, ale také rozbohem množství živin obsažených v rostlinných pletivech (Sonneveld & Voogt 2009).

	N	P	K	Ca	Mg
Markiewicz	25,7	5,5	46,6	15,5	6,7
Sonneveld & Straver	49,3	1,3	28,8	14	6,6
Vaněk	23	7,2	43,4	22,3	4,2
Yamazaki NS	38,9	11,1	22,2	16,7	11,1
Agro Haná	20,8	5,3	54,4	17,9	1,6

**Obrázek č. 3** Poměrové zastoupení makroživin (kromě síry, jejíž hodnotu někteří autoři neudávají) v živném roztoku při hydroponické kultivaci rajčat. Markievitz (Markiewicz et al. 2016), Sonneveld & Straver (Sonneveld & Straver 1994), Vaněk (Vaněk et al. 2012), Yamazaki NS (Ohashi-Kaneko et al. 2009), Agro Haná (osobní obdržení množství živin). Množství dodaných živin a jejich poměry jsou u některých autorů různé s ohledem na růstovou fázi rajčete a v tabulce jsou udávány průměry z celkového množství dodaných živin za vegetaci.

Při hydroponickém pěstování je také efektivněji využívána voda. Při hydroponické kultivaci salátu se spotřebuje přibližně jedenáct krát méně vody, nežli při polním pěstování (Barbosa et al. 2015). Dochází také k účinnějšímu využití živin a tím se snižuje množství použitého minerálního hnojiva přibližně o 55 % až 85 %. V závislosti na použité technologii dochází po různě dlouhé době většinou k výměně živného roztoku, který může být zdrojem znečištění životního prostředí (Kumar & Cho 2014). Je možné tuto odpadní vodu znovu použít, pokud projde filtrací (například revezní osmóza), avšak tato technologie je velmi energeticky náročná (Adler et al. 2000; Kumar & Cho 2014). Celková produkce hydroponických systémů kultivace rostlin je mnohem energeticky náročnější oproti klasickému polnímu způsobu pěstování rostlin. Část z této energie může být dodána z obnovitelných zdrojů. Ronay & Dumitru (2015) vypočítal počáteční investici 24 000 euro, pro vybudování solární elektrárny dostačující pro provoz skleníku velikosti 20 x 20 m s pěstební plochou přibližně 280 m<sup>2</sup>. Návratnost této investice byla přibližně 5,5 let provozu skleníku. Sterilizace živného roztoku je také energeticky náročným procesem. Aby nedocházelo k rozšíření patogenů, probíhá sterilizace živného roztoku za pomoci filtru, tepla, ozónu a UV záření (Son et al. 2019). Poznatky z kultivací užitkových rostlin ze skleníků s kontrolovanými podmínkami by se v budoucnu mohly využít pro rozšíření precizního zemědělství při vertikálním způsobu pěstování plodin (Kalantari et al. 2018; Beacham et al. 2019). Používání minerálních hnojiv zatím nenaplnilo světově svůj úkol, a to, aby se zvýšila kvalita a množství rostlinné produkce a zajistil zdroj potravy i pro méně vyspělé a bohaté státy například na africkém kontinentě (Bindraban et al. 2015).

## 4 Metodika

Pokus proběhl ve skleníku Botanického ústavu Akademie věd České republiky, na pracovišti oddělení mykorhizních symbióz, Lesní 322, Praha – Průhonice. Pro kultivaci byly vybrány užitkové rostliny *Allium porrum* L. odrůda 'Albus' od firmy Nohel garden a.s., identifikační číslo produktu 2552nn a *Solanum lycopersicum* L. odrůda 'Bajaja' od společnosti Moravo Seed a.s. s identifikačním číslem 65364. Pro kultivaci rostlin se použily nádoby o objemu dva litry, černé barvy. Jako pěstební médium byl použit křemičitý písek v objemu 1,7 litru na pěstební nádobu. Obě odrůdy měly vždy osm variant se šesti opakováními na variantu, lišící se podle použití mikrobiálního inokula a odlišné formy výživy, která byla aplikována během průběhu celého pokusu. K zalévání byla použita destilovaná voda.

### 4.1 Varianty

První varianta byla hnojena minerálním hnojivem a sloužila jako kontrola k ostatním variantám. Druhá varianta byla hnojena výluhem z vermikompostu. Třetí varianta byla hnojena výluhem z vermikompostu a řasovou suspenzí. Při plnění nádob křemičitým pískem se do čtvrté varianty přidalo 20 gramů endomykorhizního inokula *Rhizophagus irregularis* 'Chomutov' a jako hnojivo se přidával výluh z vermikompostu. Pátá varianta obsahovala také 20 gramů endomykorhizního inokula *Rhizophagus irregularis* 'Chomutov', ale kromě výluhu z vermikompostu se přidávala také řasová suspenze. Šestá varianta obsahovala 20 mL suspenze směsi endofytních bakterií registrováno ÚKZUZ, ENDOSTIM B, ve složení třech bakterií: *Pseudomonas* sp. 500K6, *Bacillus mojavensis* Roberts et al., 1994 50K7C2 a *Variovorax boronicumulans* Miwa et al., 2008 500K5. Jako hnojivo byl přidáván výluh z vermikompostu. Sedmá varianta obsahovala 20 mL suspenze směsi endofytních hub registrovaných ÚKZUZ a to pod označením MR 67 *Verticillium leptobactrum* W. Gams, 1971, MR 75 *Periconia macrospinosa* Lefebvre & Aar. G. Johnson, 1949, MR 52 *Leptodontidium orchidicola* Singer & Currah, 1987. K sedmé variantě se také přidával jako hnojivo výluh z vermikompostu. Osmá varianta obsahovala směs 20 mL inokula ENDOSTIMU B a 20 mL endofytních hub MR 67, MR 75 a MR 52 a i zde se přidával výluh z vermikompostu.

### 4.2 Založení pokusu

K založení pokusu došlo 17. 5. 2018 formou výsevu. Pro *A. porrum* v počtu 3ks na pěstební květník a u *S. lycopersicum* v počtu 2 ks na pěstební nádobu. Vyjednání pokusu proběhlo 17. 5. 2018, kdy došlo k ponechání 1 ks *S. lycopersicum* v květináči a 2 ks *A. porrum*. 20. 6. 2018 byla provedena randomizace pokusu náhodným přemístěním jednotlivých variant na pěstebním stole.

### 4.3 Hnojení

Aplikace hnojiv probíhala shora do květníku, zálivka destilovanou vodou do podmisek.

#### 4.3.1 Minerální výživa

Hnojení první kontrolní varianty bylo po celou dobu pokusu hnojivem Kristalon Start o koncentraci 1g/1L roztoku v dávce 60 mL na rostlinu jednou týdně.

#### 4.3.2 Organická výživa

Řasová suspenze se získávala z nádrže otevřeného kultivačního zařízení umístěného uvnitř skleníku, v kterém byla kultivována mikrořasa *Dictiosphaerium chlorelloides*. 60 mL řasové suspenze se přidávalo do vybraných variant nejprve jednou týdně a od 14. 6. 2018 se přidávala dvakrát týdně. Výluh z vermikompostu Florim – Růst, byl přidávám ke všem variantám vyjma varianty kontroly. Od začátku pokusu do 14. 6. 2018 se přidávalo 60 mL ředěného výluhu poměrem 100 mL výluhu z vermikompostu ku 900 mL destilované vody. Od 14. 6. 2018 do 28. 6. 2018 se 60 mL přidávalo dvakrát týdně a od 28. 6. 2018 se stejná dávka přidávala třikrát týdně.

### 4.4 Sklizeň plodů

U variant *S. lycopersicum* docházelo během vegetace ke sklizni plodů. Plody byly sklizeny vždy po sedmi dnech ve stádiu konzumní zralosti. Po záznamu počtu sklizených plodů a zjištěním jejich čerstvé hmotnosti se plody usušily do konstantní hmotnosti a poté byly znovu zváženy. V devátém týdnu byly všechny zbývající plody včetně těch nedozrálých sklizeny a byla provedena stejná měření.

### 4.5 Konec pokusu

Sklizeň *S. lycopersicum* proběhla 1. 10. 2018. Všechny plody včetně nezralých byly otrhány a zaznamenány stejně jako v kapitole 4.4. Všechny rostliny byly vyfotografovány. Nadzemní část byla změřena a poté sklizena a vysušena do konstantní hmotnosti. Kořenový systém byl opatrně vyjmut a z prostřední části byl odebrán vzorek pro zjištění kolonizace kořene mykorhizními houbami. Sklizeň *A. porrum* se uskutečnila 10. 10. 2018. Nadzemní část byla změřena a poté byla sklizena a vysušena do konstantní hmotnosti. Stejně jako u *S. lycopersicum* byla od každého květníku odebrána prostřední část kořenového systému pro zjištění kolonizace mykorhizními houbami. Všechny rostliny byly též vyfotografovány.

## 4.6 Vyhodnocení

### 4.6.1 Mykorhizní kolonizace

Po odběru vzorků kořenového systému z každého květníku byly důkladně omyty pomůcky pro odebrání vzorků (tác pro vyjmutí kořenového systému, nůžky) a ruce pod tekoucí vodou. Po každé variantě byly pomůcky a ruce důkladně umyty čistícími prostředky. Každý vzorek byl vložen do hermeticky uzavřených sáčků a nadepsán. Po dokončení sklizně byly vzorky kořenové soustavy přeneseny do laboratoře, kde byly důkladně promyty na jemném sítu pod tekoucí vodou, aby byly zbaveny zbytků křemičitého písku. Síto bylo po každém vzorku promyto samostatně, aby se předešlo přenesením zbytků kořínků z minulého promytí do následujícího. Vzorek kořenů se poté vložil do nadepsané lahvičky a zalil 10% roztokem hydroxidu draselného. Poté byly lahvičky vloženy do horkovzdušné sušárny nastavené na 90 °C po dobu 60 minut. Následně se hydroxid draselný z kořenů důkladně vymyl pod tekoucí vodou. Lahvičky s promytými kořeny se zalily 2% kyselinou mléčnou a vložily se do horkovzdušné sušárny nastavené na 90 °C po dobu 20 minut. Kyselina mléčná se po zahřívání ze vzorku vylila a do lahviček s kořeny se nalil 0,05% roztok trypanové modři v laktoglycerinu a umístil do sušárny na 30 minut při 90 °C. Barva se následně ze vzorků vymyla pod tekoucí vodou a lahvičky s kořeny se zalily laktoglycerinem a uskladnily se v lednici do jejich vyhodnocení. Při vyhodnocení se použila průsečíková metoda podle McGonigle et al. (1990). Vzorek kořene rostliny se rozprostřel na Petriho misku opatřenou mřížkou. Následně se pod mikroskopem vyhodnotila mykorhizní kolonizace vždy na průsečíku mřížky s kořenem. Pozorované jevy se zaznamenaly na počítač. U každé varianty bylo provedeno 150 vyhodnocení.

### 4.6.2 Statistické vyhodnocení

Výsledky pokusu byly statisticky vyhodnoceny. U každého vyhodnocení se nejprve provedly základní popisné statistiky, a poté jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA. Následovalo dovyhodnocení pomocí mnohonásobného porovnání. Všechny statistické analýzy byly prováděny při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Sledované průměrné hodnoty s 95 % intervalem spolehlivosti byly následně znázorněny také graficky. Pokud byly pomocí ANOVY nalezeny statisticky významné rozdíly, bylo provedeno mnohonásobné porovnání pomocí post-hoc testování homogenních skupin Tukeyovou metodou, nebo HSD testem pro nestejný počet zkoumaných znaků, které vedlo k určení statisticky významných rozdílů středních hodnot mezi konkrétními skupinami. Vyhodnocení plodů u rajčat se provedlo stejnou jednofaktorovou analýzou rozptylu. Byla také sledována mykorhizní kolonizace, která byla vyhodnocena pomocí kontingenční tabulky, a to sledováním závislosti mykorhizní kolonizace kořenů na dvou způsobech hnojení pomocí Chí kvadrát testu. Četnosti skupin byly následně graficky znázorněny pomocí histogramů. Pro přehlednost, je většina výsledků prezentována graficky průměrnými hodnotami se směrodatnými odchylkami a signifikancemi, které určují statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými variantami.

## 5 Výsledky

Výsledky pokusu byly vyhodnoceny statistickým programem Statistika 12 (Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA). Výsledky jsou strukturovány do kapitol dle rostliny a sledované vlastnosti.

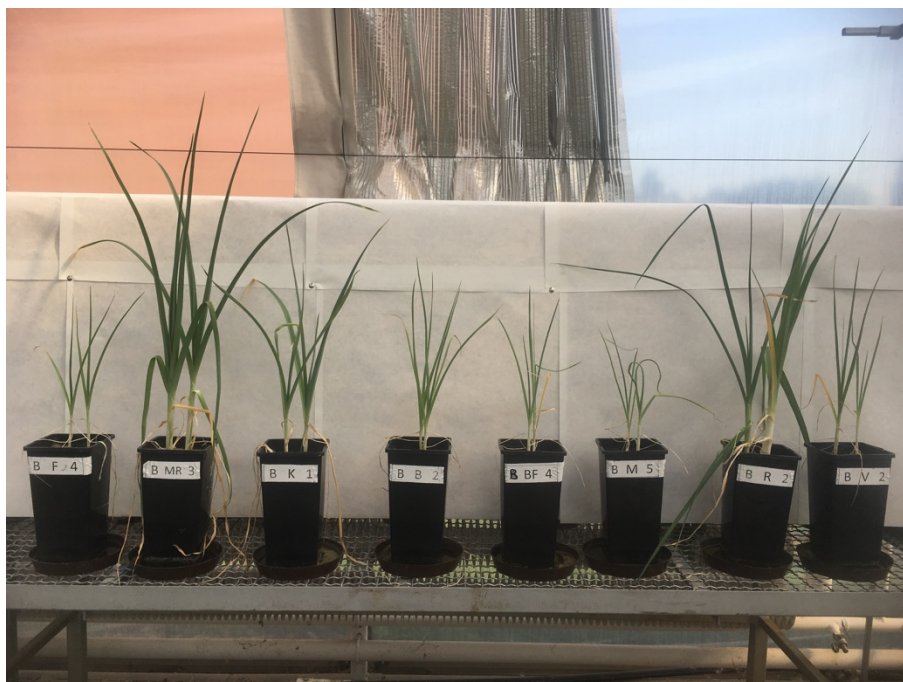


Obrázek č. 4 Celkový pohled na experiment.

### 5.1 Pór zahradní

U póru zahradního došlo během pěstování k úhynu rostlin v jednom opakování u všech variant. Tyto opakování byly vyřazeny ze statistického vyhodnocení, aby se docílilo stejných pěstebních podmínek pro všechny varianty.

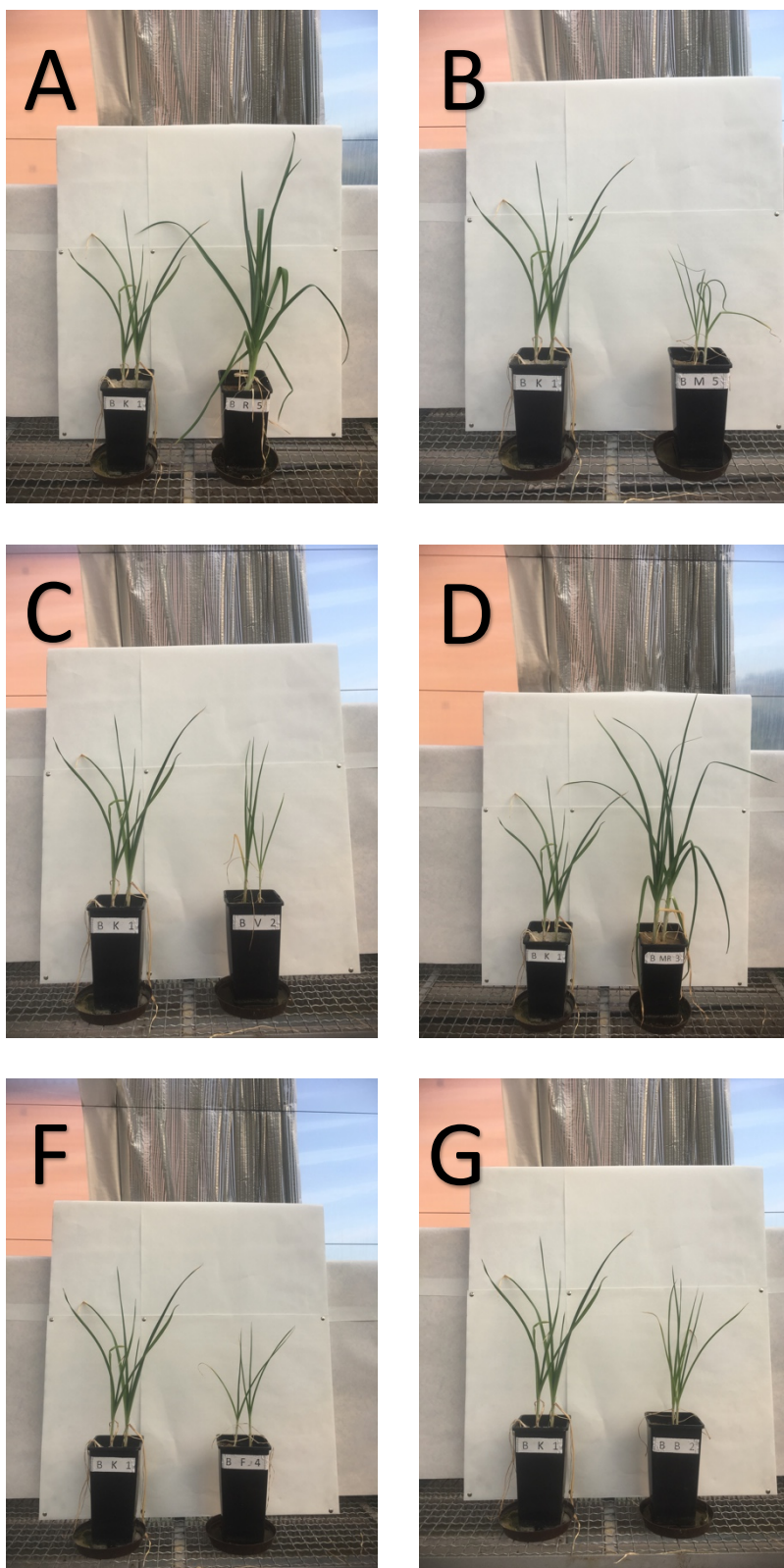




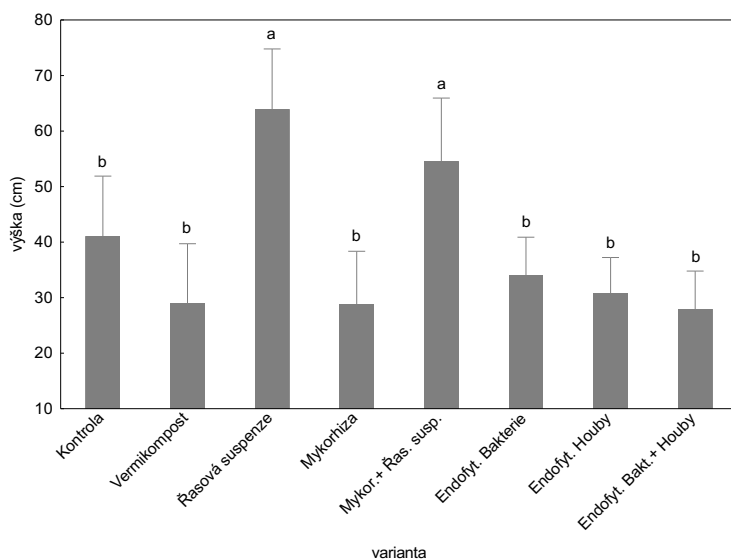
**Obrázek č. 5** Porovnání vybraných zástupců všech variant před sklizní. Prostřední písmeno značí variantu. F – endofytní houby; MR – mykorhiza s řasovou suspenzí; K – kontrola; B – endofytní bakterie; BF – endofytní bakterie s endofytními houbami; M – mykorhiza; R – řasová suspenze; V – vermikompost

### 5.1.1 Výška sklizené natě

Nejnižší průměrnou výšku rostlin měla varianta endofytních hub s bakteriemi, jejichž průměrná výška byla  $27,91 \pm 6,88$  cm. Druhá nejnížší byla varianta s mykorhizními houbami s hodnotou  $28,79 \pm 9,57$  cm. Nejvyšší výšku sklizené natě měla varianta s řasovou suspenzí, která dosáhla nejvyššího průměru výšky  $63,87 \pm 10,92$  cm a zároveň i nejvyšších hodnot minimální i maximální výšky. Druhá nejvyšší byla varianta s mykorhizními houbami, ke které se přidávala řasová suspenze. Tato varianta vykazovala průměrně o 17 % menší růst nežli první varianta, avšak v porovnání s mykorhizní variantou byla o 89 % vyšší. Porovnání jednotlivých variant je na obrázku č. 5. Statisticky průkazný rozdíl byl mezi variantami s přidáním řasové suspenze oproti všem ostatním variantám včetně kontroly.



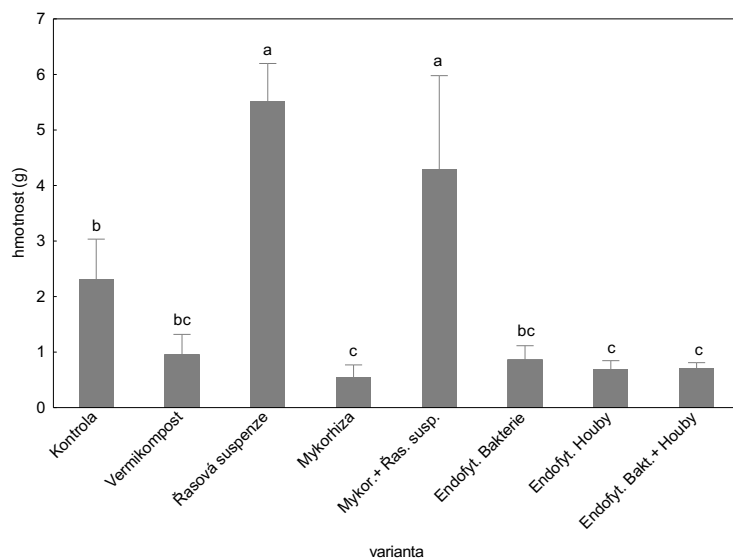
**Obrázek č. 6** Porovnání vybraných variant s kontrolou (K); A porovnání s variantou řasová suspenze; B porovnání s variantou mykohiza; C porovnání s variantou vermikompost; D porovnání s variantou mykorhiza s řasovou suspenzí; E porovnání s variantou endofytní houby; F porovnání s variantou endofytní bakterie



**Obrázek č. 7** Vyhodnocení nadzemní biomasy póru zahradního u jednotlivých variant. Průměrné hodnoty jsou uváděny v centimetrech  $\pm$  směrodatná odchylka. Stejná písmena nad směrodatnými odchylkami značí neprokázané statistické rozdíly mezi variantami ( $p > 0,05$ ) Tukeyovým testem.

### 5.1.2 Hmotnost sklizené natě

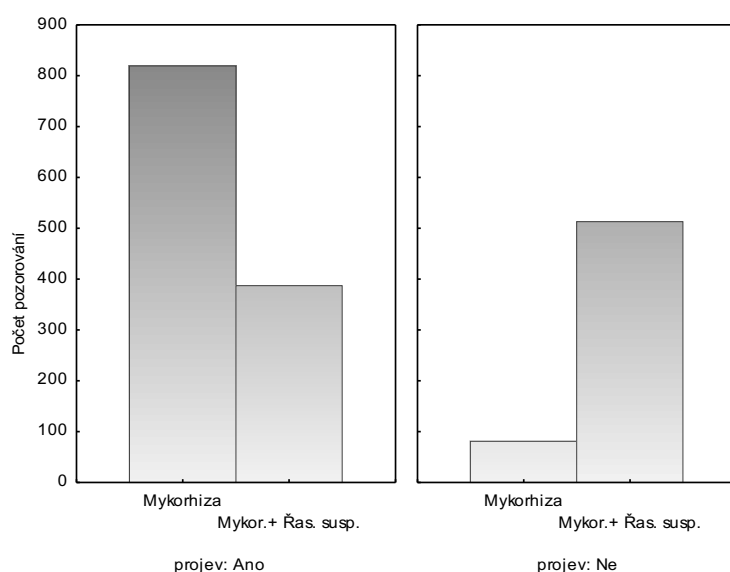
Značné rozdíly byly v hmotnosti sušiny nadzemní biomasy póru. U mykorhizní varianty dosahovala průměrná hmotnost  $0,55 \pm 0,22$  g. Nejvyšší hodnoty měla varianta se řasovou suspenzí, kde průměrně vážila  $5,51 \pm 0,69$  g a opět měla nejvyšší minimální (4,65 g) a maximální (6,32 g) hmotnost. Na druhém místě byla mykorhiza s řasovou suspenzí s průměrnou hodnotou  $4,28 \pm 1,69$  g. U této varianty byl nejvyšší rozdíl mezi jednotlivými opakováními. Minimální váha byla 1,66 g a maximální 6,09 g. V porovnání s mykorhizní variantou měla 7,8 násobek hmotnosti nadzemní biomasy. Statisticky významný rozdíl byl prokázán u variant s přidáním řasové suspenze oproti všem ostatním variantám. Průkaznou menší hmotnost natě oproti kontrolní variantě měly varianty mykorhizy, endofytních hub a směsi endofytních bakterií s houbami. Přehled jednotlivých výsledků je graficky znázorněn v obrázku č. 8.



**Obrázek č. 8** Hmotnost suché nadzemní biomasy póru zahradního u jednotlivých variant. Průměrné hodnoty jsou uváděny v gramech ± směrodatná odchylka. Stejná písmena nad směrodatnými odchylkami značí neprokázané statistické rozdíly mezi variantami ( $p > 0,05$ ) Tukeyovým testem.

### 5.1.3 Mykorhizní kolonizace

Rozdíl v počtu kořenů infikovaných mykorhizní houbou, byl pozorován mezi variantami mykorhiza a mykorhiza s řasovou suspenzí. U mykorhizy, byl projev ano v 819 případech z 900, zatímco u varianty mykorhiza s řasovou suspenzí byl projev ano v 387 případech z 900. Rozdílnými hodnotami, mezi použitou variantou a rozvojem mykorhizní kolonizace kořenů póru, byla prokázána závislost pomocí Pearsonova chí-kvadrátu  $p=0,0000$  a  $F$  pro tabulky  $2 \times 2$  0,5104073. Při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  byla zjištěna středně silná závislost.



**Obrázek č. 9** Histogram četnosti výskytu mykorhizy u pozorovaných variant

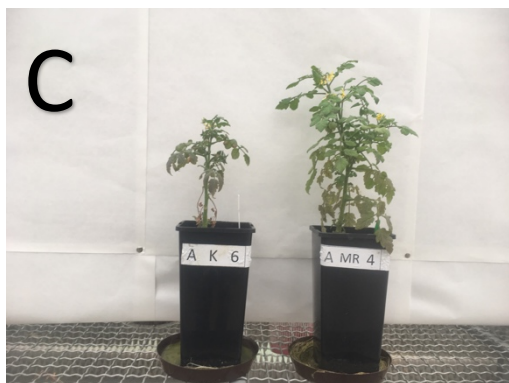
## 5.2 Rajče jedlé



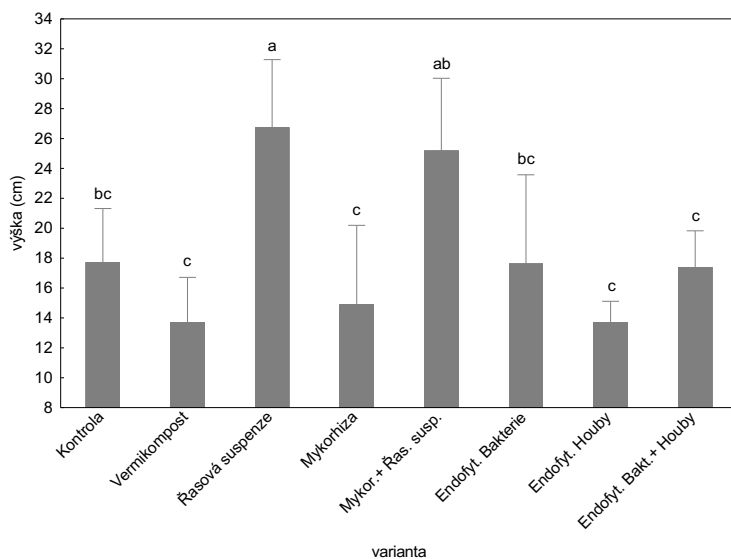
**Obrázek č. 10** Přehled vybraných zástupců všech variant před sklizní. Prostřední písmena na květníku značí variantu. BF - endofytní houby a bakterie; MR – mykorhiza s řasovou suspenzí; V – vermikompost; K - kontrola; M- mykorhiza; B – endofytní bakterie; R – řasová suspenze; F – endofytní houby

### 5.2.1 Výška

Nejvyšší hodnoty měla varianta řasová suspenze. Průměrná výška byla  $26,72 \pm 4,56$  cm a i v minimální (20 cm) a maximální (32,5 cm) hodnotě byla nejvyšší. Druhá v pořadí byla mykorhiza s řasovou suspenzí, která měla průměrnou hodnotu  $25,17 \pm 4,86$  cm. Nejmenší průměrnou hodnotu měly endofytní houby ( $13,7 \pm 2,43$  cm) a zároveň vermikompost ( $13,7 \pm 3,01$  cm). Mykorhiza dosahovala průměrné hodnoty  $14,88 \pm 5,31$  cm a zároveň nejnižší minimální hodnoty 8,2 cm. Endofytní bakterie s houbami měly podobný výškový průměr, kdy kontrola měla hodnotu průměru  $17,7 \pm 3,62$  cm a endofytní bakterie s houbami  $17,4 \pm 2,43$  cm. Nejvyšších hodnot dosahovaly varianty, ke kterým se přidávala řasová suspenze, avšak jediná varianta řasová suspenze měla statisticky průkazný rozdíl oproti kontrolní variantě.



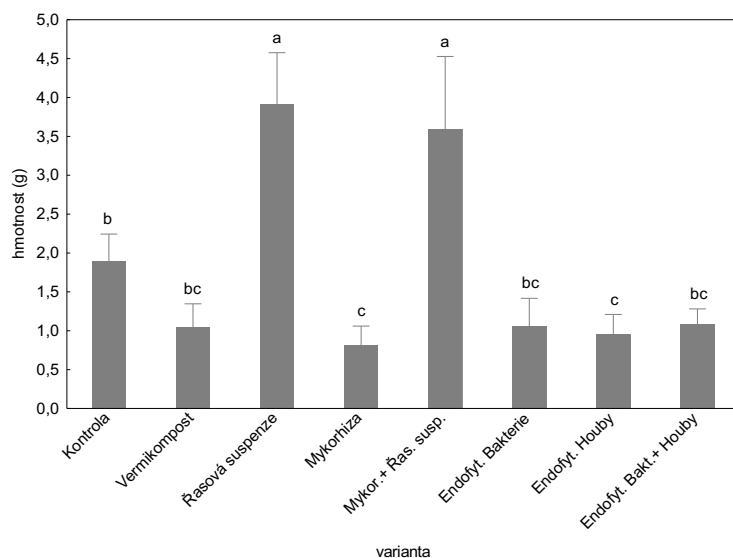
**Obrázek č. 11** Porovnání vybraných variant s kontrolou (K); A porovnání s mykorhizou; B porovnání s řasovou suspenzí; C porovnání s mykorhizou s řasovou suspenzí; D porovnání s vermikompostem; E porovnání s bakteriemi s endofytními houbami; F porovnání s endofytními houbami



**Obrázek č. 12** Vyhodnocení nadzemní biomasy rajčete jedlého u jednotlivých variant, průměrné hodnoty jsou uváděny v centimetrech  $\pm$  směrodatná odchylka. Stejná písmena nad směrodatnými odchylkami značí neprokázané statistické rozdíly mezi variantami ( $p > 0,05$ ) Tukeyovým testem.

### 5.2.2 Hmotnost

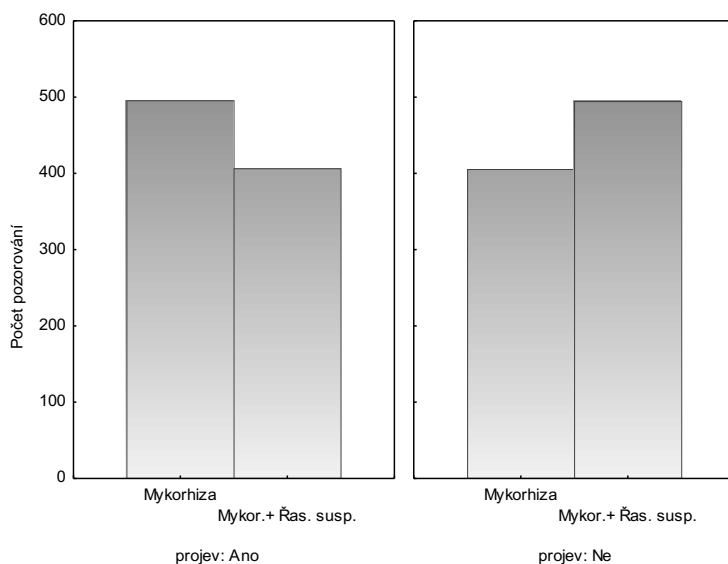
Nejvyšší průměrnou hmotnost sušiny rajčete měla varianta řasová suspenze, a to  $3,91 \pm 0,67$  g. Minimální hodnota u této varianty byla 2,8 g. Druhou nejvyšší hmotnost měla varianta mykorrhiza s řasovou suspenzí, kdy průměrná hodnota byla  $3,6 \pm 0,94$  g a měla nejvyšší hmotnost jedné rostliny ze všech variant 4,86 g. Nejmenší průměrnou hmotnost měla varianta mykorrhiza s hodnotou  $0,81 \pm 0,25$  g. Ta také vykazovala nejmenší hmotnost natě ze všech variant 0,36 g.



**Obrázek č. 13** Hmotnost suché nadzemní biomasy rajče jedlého u jednotlivých variant. Průměrné hodnoty jsou uváděny v gramech  $\pm$  směrodatná odchylka. Stejná písmena nad směrodatnými odchylkami značí neprokázané statistické rozdíly mezi variantami ( $p > 0,05$ ) Tukeyovým testem.

### 5.2.3 Mykorhizní kolonizace

Výskyt mykorhizy byl pozorován o 9,9 % vyšší u varianty mykorhiza oproti variantě mykorhiza s řasovou suspenzí. Pearsonův  $\chi^2$  test potvrdil závislost rozvoje mykorhizy v kořenech rajčete na použité variantě. Tato závislost byla vyhodnocena jako slabá, při hodnotě  $F$  0,0988889. Při vyhodnocování pokusu se zjistila přítomnost mykorhizních hub i u varianty bakterie.

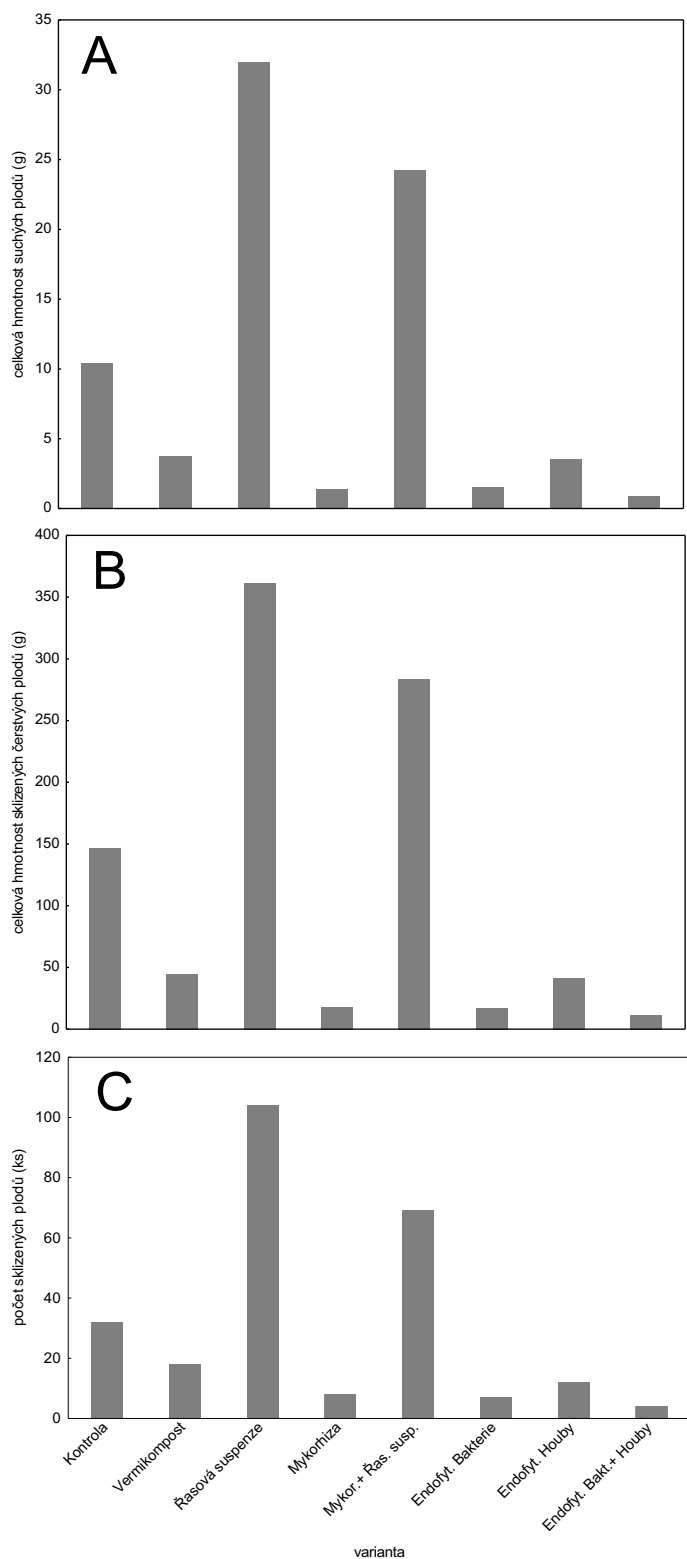


Obrázek č. 14 Graf četnosti pro výskyt mykorhizy

### 5.2.4 Plody

Plody rajčete byly sklizeny týdně. Minimálně jeden dozrálý plod byl každý týden u variant s přidavkem řasové suspenze. I přes viditelné vyšší hodnoty vyobrazené v grafu č. 10, nebyl potvrzen statisticky významný rozdíl mezi kontrolou a řasovou suspenzí při devíti týdenním sběru plodů. Nejvíce plodů bylo sklizeno u varianty řasová suspenze 104 ks o celkové hmotnosti čerstvých plodů 361,33 g. Druhou nejvyšší byla varianta mykorhiza s řasovou suspenzí, při které bylo sklizeno 69 plodů o celkové čerstvé hmotnosti 283,51 g. Kontrola byla na třetím místě 32 ks a 146,66 g. Kromě posledního týdne, kdy došlo ke sklizni všech plodů, byl zaznamenán nejvyšší počet sklizených plodů ve čtvrtém týdnu sběru plodů.





**Obrázek č. 15** Grafické zpracování dat získaných při sklizni plodů rajčat. Graf A značí celkovou hmotnost suchých plodů, graf B celkovou hmotnost čerstvých plodu a graf C celkový počet sklizených plodů.

## 6 Diskuze

Provedený výzkum popsáný v této diplomové práci byl součástí několika experimentů pro výsadbu rostlin v českém pavilonu na výstavě EXPO 2020, která by se měla uskutečnit v roce 2021 v Dubaji. Cílem práce bylo zjistit, zda přidání inokula různých mikroorganismů, které v minulosti měli kladný vliv na rostliny při různých stresových situacích v předešlých experimentech, zlepší růstové vlastnosti a tvorbu plodů u vybraných kultivarů lilku rajčete a póru zahradního. Tato hypotéza potvrzená nebyla. Jak se ukázalo ve výsledcích, rozdíl mezi jednotlivými variantami byl značný a hlavním důvodem pro velké rozdíly mezi variantami měla nejspíše výživa rostlin. Při použití stejných výživových metod se prokázaly také rozdíly ve variantách s různými mikroorganismy.

### 6.1 Výživa rostlin

Problémem kultivace rostlin v písčitém substrátu je velká vzdálenost pórů, která nedovolí ve větší míře sorpci živin jako by tomu bylo v případě jílových částic (Jones & Jacobsen 2005). Rostliny tak rychleji živiny zachycené v písku spotřebují, pokud mezitím nedojde k jejich vyplavení a je potřeba tyto živiny opět k rostlinám dodat. Dodání živin provedené v pokusu, bylo za pomoci minerálních hnojiv ke kontrole, vermikompostu a řasové suspenze. Minerální hnojivo Kristalon Start, které bylo použito, má hodnoty živin ve vzájemném poměru v procentech dle vyobrazení na produktu a převodu z oxidových forem 47,48 % N, 6,54 % P, 41,48 % K, 1,8 % Mg. V použitém hnojivu chybí vápníková makroživina, která se musela nacházet v písku (chemický rozbor živin použitého písčitého substrátu nebyl proveden). Tato živina mohla být limitujícím prvkem a na základě Sprengel – Liebigovým zákonu minima tak mohlo dojít ke sníženému příjmu i ostatních živin (Ferreira et al. 2017). Poměr jednotlivých živin použitých pro hnojení kontrolní varianty se tak nemůže srovnávat s poměry živin doporučených ke kultivaci rajčat, které jsou vyobrazeny v obrázku č.3. Nemohlo se tak využít maximálního genetického potenciálu rostlin použitých v pokusu a výsledky kontrolní varianty mohou být podhodnocené. Výluh z vermikompostu Florium – Růst obsahoval množství celkového dusíku 0,02, fosforu přepočteno z oxidové formy méně nežli 0,0436 a draslíku 0,25. Přítomnost a množství ostatních živin ve výluhu z vermikompostu nebyl znám.

Výnos rajčat se snížil oproti kontrolní variantě o 70 % a výsledek tak byl horší, nežli zaznamenal v obdobném pokusu Márquez-Quiroz et al. (2014), při kterém se snížil výnos rajčat oproti kontrolní variantě o 12,5 %. Tento rozdíl mohl být zapříčiněn rozdílným poměrem živin ve výluhu z vermikompostu a jejich dávkovaném množství. Vermikompost Florium Růst je připravovaný z rostlinného odpadu s malým množstvím živin, oproti vermikompostům připravovaných s příměsí chlévské mrvy, které mývají většinou vyšší množství živin (Zarei et al. 2018). Dodané množství živin při aplikaci vermikompostu jako jediný zdroj živin nebyl dostačující pro optimální růst a u rajčat také pro produkci plodů. Při porovnání hmotnosti plodů, se ukázal rozdíl mezi výsledky čerstvé hmotnosti a sušené hmotnosti oproti kontrolní variantě. Zatímco hmotnost čerstvých plodů, dosahovala u vermikompostu 30 % celkové váhy kontroly, u sušených plodů to bylo již 35 % hodnoty kontroly. Nejspíše zvýšená váha suchých plodů byla

způsobená jiným poměrovým zastoupením látek v plodu rajčate. Podobný výsledek již dříve popsal Gutiérrez-Miceli et al. (2007), kdy po přidání vermikompostu do pěstebního média se při následném vyhodnocení plodů zjistilo vyšší množství rozpustných a nerozpustných látek v plodu rajčeti se zvýšeným množstvím karbohydrátů. Rozdíl v chemickém složení plodů nebyl předmětem této práce, a proto nelze s jistotou tvrdit jaké látky zapříčinily nárůst suché hmotnosti plodů variant s výluhem z vermikompostu, oproti variantě s použitím minerálních hnojiv. Významné statistické rozdíly však mezi kontrolní variantou a variantou s výluhem z vermikompostu nebyly prokázány u obou zkoumaných plodin. Varianta s přidavkem řasové suspenze vykazovala nejvyšší nárůst biomasy u rajčat i póru, který byl statisticky významný u všech výškových i hmotnostních měření nadzemní biomasy. Mikrořasy na rozdíl od výluhu z vermikompostu zvyšují organickou složku půdy, protože kromě živin obsahují i velké množství uhlíku (Arrigo 2005). Použitá mikrořasa produkuje také exopolysacharidy, které mohou navázat živiny (kationty prvků) a tím předejít jejich vyplavením. Tyto kationty mohly být později přijmuty rostlinami pro jejich potřebu. V prvním týdnu sběru plodů bylo výrazně více plodů sebraných u variant s přidavkem řasové suspenze, oproti kontrolní variantě. Zatímco u kontroly byl zralý v prvním týdnu pouze jeden plod, řasová suspenze měla 9 plodů a mykorhiza s řasovou suspenzí 7 plodů. Větší násadu plodů a dřívější dozrávání prokázal ve své práci Garcia-Gonzalez & Sommerfeld (2016). V jeho případě se však přidaly usušené mikrořasy *Acutodesmus dimorphus* do pěstebního média při přesazení sazenic rajčete. Ve stejném pokusu autor pozoroval také vyšší suchou hmotnost plodů oproti čerstvým při použití řasového přípravku. To samé bylo pozorováno při vyhodnocení plodů v tomto pokusu. Čerstvá hmotnost sebraných rajčat byla u varianty řasová suspenze 2,46 násobek hmotnosti kontrolní varianty, u sušiny to bylo již 3,06 násobek. Byl tedy pozorován 19,6 % nárůst hmotnosti sušiny oproti kontrolní variantě. U varianty mykorhiza s řasovou suspenzí byl nárůst 16,8 %. Stejný autor použil pro foliární výživu suchou biomasu mikrořas s přidavkem destilované vody. Celková průměrná hmotnost nadzemní biomasy sušiny byla u varianty s přidáním řasové suspenze vyšší o 58 % oproti kontrolní variantě. Rachidi et al. (2020) po přidání 1 mg L<sup>-1</sup> polysacharidového extraktu z mikrořas, pozoroval nárůst 46,61 % oproti kontrolní variantě a bylo tedy dosaženo vyššího nárůstu nadzemní biomasy. K vytvoření řasového tekutého hnojiva použil Deepika & MubarakAli (2020) podobnou metodu, kde se usušená řasová kultura naředila s destilovanou vodou a navíc se ještě zahřívala 15 minut při 100 °C. Rozdílnou hodnotu minerálních látek měly různé mikrořasy v rozboru který provedl Coppens et al. (2016), a který doplnil řasové hnojivo o minerální živiny tak, aby dosahovalo celkového množství živin potřebného pro kultivaci rajčat v komerčním provozu. Řasová suspenze použitá v tomto pokusu se získávala přímo nabráním odměrky z fotobioreaktoru. Nebyla použita usušená řasová mikrořasa, které použili ve svých pokusech ostatní citovaní autoři. Zároveň s mikrořasou se tak k rostlinám dodávaly i živiny obsažené v živném roztoku pro kultivaci mikrořas. Tyto živiny mohly výrazně ovlivnit výsledky pokusu, zvláště pokud živný roztok ve fotobioreaktoru obsahoval množství vápníkových kationtů. Pokud 1 litr pěstebního média obsahoval horní hranici podle Bilad et al. (2014) množství 0,6 g mikrořas, přidáním 60 mL řasové suspenze se přidalo do květníku 0,036 g řasové kultury a zbylé množství představoval živný roztok pro kultivaci mikrořasy.

## 6.2 Mikroorganismy použité k rostlinám

Z mikroorganismů použitých v pokusu byly v jednotlivých variantách použity inokula zástupců mykorhizních hub, endofytních hub, endofytních bakterií a směsi endofytních bakterií s endofytními houbami. Všechny varianty s mikroorganismy byly hnojeny výluhem z vermikompostu, a varianta mykorhiza s řasovou suspenzí navíc dostávala zálivku řasové suspenze. Vyhodnocení mykorhizní kolonizace mezi variantami mykorhiza a mykorhiza s řasovou suspenzí, ukázalo prokazatelnou závislost mezi výskytem mykorhizy na použitém hnojení rostlin. Rostliny u obou plodin, ke kterým byla přidávána řasová suspenze vykazovaly menší výskyt mykorhizní kolonizace ve svých kořenech oproti variantě bez přidání řasové suspenze. U póru zahradního klesla mykorhizní kolonizace o 48 % oproti mykorhizní variantě bez přidáním řasové suspenze a u rajčete byl pokles o 10 %. Tento pokles mohl být způsoben množstvím živin, které se nacházely v živném roztoku mikrořas, zejména množství fosforu. Snížené množství kolonizovaných kořenů arbuskulárními houbami pozoroval ve svém pokusu také Nedorost & Pokluda (2013), kdy došlo ke snížení kolonizace kořenů rajčete při zvýšeném množství dodaného minerálního hnojiva. Při vyhodnocení mykorhizní kolonizace u zkoumaných variant, došlo také ke kontrole přítomnosti mykorhizní kolonizace u variant bez přídavku mykorhizního inokula. Byla tak zjištěna mykorhizní kolonizace u varianty s endofytními bakteriemi u rajčete. K infikování této varianty muselo dojít před randomizací květníků na pěstebním stole, protože mykorhizní kolonizace byla prokázána u více opakování této varianty. Nejspíše se tak stalo při zálivce varianty s mykorhizním inokulem, kdy došlo k přenosu diaspor z podmisky mykorhizní varianty do podmisky sousedního květníku s variantou endofytních bakterií. Walker & Vestberg (1994) popisuje nejčastější příčinu kontaminace zálivku a manipulaci s květníky a snížení rizika kontaminace ostatních květníků velkými rozestupy mezi opakováními a použitím průhledných obalů s mikrotkaninou, které v pokusu použity nebyly. Při použití stejných hnojiv se projeví rozdíl mezi jednotlivými variantami. Statisticky významný rozdíl nebyl potvrzen mezi variantou řasová suspenze a mykorhizní řasová suspenze, avšak ve všech sledovaných znacích dosáhla řasová suspenze vyšších hodnot oproti mykorhizní řasové suspenzi. U póru zahradního měla řasová suspenze o 22 % vyšší hmotnost a u rajčete o 8 %. Ve sběru plodů řasová suspenze měla o 21,5 % vyšší hmotnost plodů. Přítomnost mykorhizní houby *Rhizophagus irregularis* 'Chomutov' způsobila menší nárůst biomasy u daného kultivaru póru i rajčete a výnos plodů rajčete oproti variantě se stejným množstvím dodaných živin. Tyto výsledky jsou v kontrastu s pokusem provedeným Letef & Chaoxing (2011), v kterém pozoroval zvýšený nárůst biomasy rajčete, při stejném množství dostupných živin, při infikování mykorhizní houbou *Glomus mosseae*. Výluh z vermikompostu byl jako zdroj živin shodně přidáván k variantě vermikompost bez přítomnosti mikroorganismů a také ke všem ostatním variantám s mikroorganismy. Tyto varianty nevykazovaly mezi sebou statisticky významný rozdíl ani v jednom pozorovaném znaku. Nejnižší průměrnou hmotnost sklizené biomasy měla varianta mykorhiza u póru ( $0,55 \pm 0,22$ ) a rajčete ( $0,81 \pm 0,25$ ). Oproti vermikompostu tak měla meší hmotnost o 42 % respektive 23 %. Při porovnání sklizně plodů byl rozdíl mezi mykorhizní variantou a vermikompostem 39 %. Varianta vermikompost rostla hůře oproti kontrolní variantě, nejspíše protože neměla dostatek potřebných živin, anebo živiny nebyly ve správném vzájemném poměru. Mykorhizní houba *Rhizophagus irregularis* 'Chomutov' se při výživové stresové

situaci projevila sníženým růstem oproti stejně živěné variantě bez mykorhizní inokulace. Negativní vliv mykorhizy na růst rostlin při nedostatečném množství přítomných živin byl dříve popsán několika autory. Hart & Forsythe (2012) pozoroval u póru zahradního infikovaného různými mykorhizními houbami menší množství přijatých živin oproti variantě bez mykorhizní symbiózy při aplikaci malého množství živin k rostlině. Z jeho výsledku vyplynulo, že si tak mykorhizní houby nechávají určité živiny pro svoji potřebu a tyto živiny nejsou pro rostlinu dostupné. Toto tvrzení podporuje i Hodge & Storer (2015), který se domnívá, že mykorhizní houba se nejdříve zaměřuje na své vlastní potřeby v případě příjmu dusíku a ten posléze předává svému symbiontovi, pokud má nadbytek této živiny, anebo pokud potřebuje od rostliny získat uhlikaté látky. Při použití stejného druhu mykorhizní houby *Rhizophagus irregularis* 'Chomutov' byl potvrzen snížený příjem dusíku rostlinou při jeho celkovém nedostatku v květníku oproti kontrolní variantě bez mykorhizního symbionta v pokusu, který provedl Püschel et al. (2016) na rostlině *Andropogon gerardii*. Po přihnojení potřebnou živinou rychleji reagovaly rostliny s mykorhizním symbiontem, oproti kontrolním rostlinám.

Endofytní houby měly druhou nejnižší hmotnost biomasy v provedeném pokusu. U póru byla hodnota  $0,69 \pm 0,15$  g a u rajčete  $0,95 \pm 0,26$  g. Při porovnání s variantou vermikompostu byl pozorován menší růst o 27 % u póru a o více než 9 % u rajčete. Rostliny s endofytními houbami tak rostli hůře oproti variantě bez endofytních hub. Snížený růst travin *Festuca arundinacea* v přítomnosti endofytních hub popsal Dirihan et al. (2015), kdy rostliny bez endofytních hub rostly lépe při nízkém množství živin v substrátu oproti rostlinám s endofytními houbami. Při nedostatku živin v půdě může dojít k negativnímu vlivu endofytní houby na rostlinu, kdy zátěž v důsledku výskytu endofytní houby je větší, oproti prospěchu který rostlina z této symbiózy získá (Hume et al. 2016). Endofytní bakterie dosáhly nejvyšší hmotnosti nadzemní biomasy při stejném hnojení výluhem z vermikompostu ze všech použitých mikroorganismů v tomto pokusu. U póru zahradního byla průměrná hodnota hmotnosti nadzemní biomasy  $0,86 \pm 0,26$  g a v porovnání s variantou vermikompostu se snížila hmotnost nadzemní biomasy o 9 %. Použitím endofytních bakterií pod označením Endostim B, tak mělo negativní vliv na výnos póru zahradního. I když nebyl statisticky významný rozdíl průměrných hodnot oproti variantě s vermikompostem, snížení výnosu mohlo být způsobeno použitím části vytvořených uhlikatých látek pro potřebu bakterií na úkor rostlinné potřeby. U rajčete došlo u této varianty ke kontaminaci mykorhizními houbami, a tím se znehodnotila naměřená data, která tak nemohla být použita pro srovnání s ostatními variantami. Při použití varianty směsi endofytních bakterií s endofytními houbami byl u rajčete nejnižší výnos plodů ze všech variant. Celková hmotnost čerstvých plodů byla o 75 % nižší oproti vermikompostové variantě. Tento výsedeček byl překvapivý, jelikož průměrná hmotnost rostlin rajčete byla  $1,09 \pm 0,19$  g a tedy dosahovala podobné hodnoty jako měla varianta vermikompostu.

## 7 Závěr

Mikroorganismy tvořící symbiózu s rostlinami, mohou pomoci rostlinám překonat mnoho stresových situací. Zajištěním optimálních podmínek pro rozvoj těchto mikroorganismů na pěstebních plochách se může projevit zvýšením výnosů rostlinné produkce při menších nákladech. Z výsledku experimentu však vyplynulo, že pokud je nejspíše jako jediný negativně působící faktor celkový nedostatek živin pro potřebu rostliny, může přítomnost některých mikroorganismů mít nepříznivý vliv na růst a plodnost různých druhů zeleniny. Způsob a množství dodaných živin rostlinám také ovlivňuje přítomnost rostlinných symbiontů. Mykorhizní kolonizace kořenů se prokazatelně snížila přidáním řasové suspenze s množstvím minerálních hnojiv, oproti použití výluhu z vermikompostu s nízkým obsahem živin. Použití organických hnojiv podpořilo zvýšené množství mykorhizních symbióz. Různé množství a poměr jednotlivých živin při použití minerálních a organických hnojiv může být při experimentech na rostlinách zavádějící. Při vzájemném posuzování těchto hnojiv mezi sebou by se mělo docílit stejného zastoupení a poměru jednotlivých živin a zároveň stejné hodnoty pH při jejich aplikaci. Nadměrné užívání minerálních hnojiv je velkým ekologickým problémem. Vyplavené nitráty by mohly být z části zachyceny mikrořasovými kulturami. Využití mikrořasové kultury k recyklaci živin získaných z odpadních vod a jejich použití jako organického hnojiva je však zatím velmi energeticky náročný proces, a proto nemá dosud vysoké uplatnění. Precizní zemědělství je zatím nejpokročilejší technologií, kdy dochází k vysokým výnosům produkce a zároveň méně zatěžuje životní prostředí. Vysoké investice do technologie spolu s velkými nároky na kvalifikaci pracovníků mají za následek rozvoj precizního zemědělství pouze v několika vyspělých zemích. Nedostatek potravin je však hlavně u méně vyspělých zemí, kde je brzké použití těchto technologií bez pomoci vyspělých států málo pravděpodobné.

## 8 Literatura

- Abou El-Hassan S, Abd Elwanis M, El-Shinawy M. 2017. Application of compost and vermicompost as substitutes for mineral fertilizers to produce green beans. *Egyptian Journal of Horticulture* **44**:155–163.
- Acien FG, Molina E, Reis A, Torzillo G, Zittelli GC, Sepúlveda C, Masojídek J. 2017. Photobioreactors for the production of microalgae. Pages 1–44 in Gonzalez-Fernandez C, Muñoz R, editors. *Microalgae-based biofuels and bioproducts: From feedstock cultivation to end-product*. Woodhead Publishing, Duxford.
- Adhikary S. 2012. Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences* **03**:905–917.
- Adler PR, Harper JK, Takeda F, Wade EM, Summerfelt ST. 2000. Economic evaluation of hydroponics and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. *HortScience* **35**:993–999.
- Adrover M, Farrús E, Moyà G, Vadell J. 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal of Environmental Management* **95**:188–192.
- Afzal I, Shinwari ZK, Sikandar S, Shahzad S. 2019. Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research* **221**:36–49.
- Agbessenou A, Akutse KS, Yusuf AA, Ekesi S, Subramanian S, Khamis FM. 2020. Endophytic fungi protect tomato and nightshade plants against *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) through a hidden friendship and cryptic battle. *Scientific Reports* **10**:22195. DOI: 10.1038/s41598-020-78898-8.
- Ahmed E, Holmström SJM. 2014. Siderophores in environmental research: Roles and applications. *Microbial Biotechnology* **7**:196–208.
- Alassali A, Cybulska I, Brudecki GP, Farzanah R, Thomsen MH. 2016. Methods for upstream extraction and chemical characterization of secondary metabolites from algae biomass. *Advanced Techniques in Biology & Medicine* **04**:163. DOI: 10.4172/2379-1764.1000163.
- Ali S, Khan AR, Mairaj G, Arif M, Fida M, Bibi S. 2008. Assessment of different crop nutrient management practices for yield improvement. *Australian Journal of Crop Science* **2**:150–157.
- Amenorfenyo DK, Huang X, Zhang Y, Zeng Q, Zhang N, Ren J, Huang Q. 2019. Microalgae brewery wastewater treatment: Potentials, benefits and the challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **16**:1910. DOI: 20.3390/ijerph16111910.
- Andrade SAL, Silveira APD. 2008. Mycorrhiza influence on maize development under Cd stress and P supply. *Brazilian Journal of Plant Physiology* **20**:39–50.

- Andrew M, Jayaraman G. 2020. Structural features of microbial exopolysaccharides in relation to their antioxidant activity. *Carbohydrate Research* **487**:107881. DOI: 10.1016/j.carres.2019.107881.
- Arancon NQ, Edwards CA, Dick R, Dick L. 2007. Vermicompost tea production and plant growth impacts. *BioCycle* **48**:51–52.
- Arancon NQ, Owens JD, Converse C. 2019. The effects of vermicompost tea on the growth and yield of lettuce and tomato in a non-circulating hydroponics system. *Journal of Plant Nutrition* **42**:2447–2458.
- Arancon NQ, Pant A, Radovich T, Hue N V., Potter JK, Converse CE. 2012. Seed germination and seedling growth of tomato and lettuce as affected by vermicompost water extracts (teas). *HortScience* **47**:1722–1728.
- Arrigo KR. 2005. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature* **437**:349–355.
- Atiyeh RM, Domínguez J, Subler S, Edwards CA. 2000. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouche) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia* **44**:709–724.
- Augé RM, Toler HD, Saxton AM. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza* **25**:13–24.
- Bagyaraj DJ, Sharma MP, Maiti D. 2015. Phosphorus nutrition of crops through arbuscular mycorrhizal fungi. *Current Science* **108**:1288–1293.
- Bach EM, Narvaez-Rivera G, Murray K, Bauer JT, Hofmockel KS. 2018. The dynamic life of arbuscular mycorrhizal fungal symbionts. *Ecology* **99**:978–980.
- Bachman GR, Metzger JD. 2008. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. *Bioresource Technology* **99**:3155–3161.
- Barber SA, Walker JM, Vasey EH. 1963. Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **11**:204–207.
- Barbosa GL, Almeida Gadelha FD, Kublik N, Proctor A, Reichelm L, Weissinger E, Wohlleb GM, Halden RU. 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **12**:6879–6891.
- Barker SJ, Tagu D, Delp G, Science P, Campus W, Osmond G. 1998. Regulation of root and fungal morphogenesis in mycorrhizal symbioses. *Plant Physiology* **116**:1201–1207.
- Barton LL, Northup DE. 2011. Microbes at work in nature : biomineralization and microbial weathering. Pages 299–326 in Barton LL, Northup DE, editors. *Microbial ecology*. John Wiley & Sons, New Jersey.



- Baslam M, Esteban R, García-Plazaola JI, Goicoechea N. 2012. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for inducing the accumulation of major carotenoids, chlorophylls and tocopherol in green and red leaf lettuces. *Applied Microbiology and Biotechnology* **97**:3119–3128.
- Baslam M, Garmendia I, Goicoechea N. 2013. Enhanced accumulation of vitamins, nutraceuticals and minerals in lettuces associated with arbuscular mycorrhizal fungi (Amf): A question of interest for both vegetables and humans. *Agriculture* **3**:188–209.
- Baum C, El-Tohamy W, Gruda N. 2015. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Scientia Horticulturae* **187**:131–141.
- Beacham AM, Vickers LH, Monaghan JM. 2019. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **94**:277–283.
- Beretta-Blanco A, Pérez O, Carrasco-Letelier L. 2019. Soil quality decrease over 13 years of agricultural production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **114**:45–55.
- Bhat SA, Singh S, Singh J, Kumar S, Bhawana, Vig AP. 2018. Bioremediation and detoxification of industrial wastes by earthworms: Vermicompost as powerful crop nutrient in sustainable agriculture. *Bioresource Technology* **252**:172–179.
- Bilad MR, Arafat HA, Vankelecom IFJ. 2014. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: A review. *Biotechnology Advances* **32**:1283–1300.
- Bindraban PS et al. 2012. Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **4**:478–488.
- Bindraban PS, Dimkpa C, Nagarajan L, Roy A, Rabbinge R. 2015. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils* **51**:897–911.
- Blanco-Canqui H, Stone LR, Schlegel AJ, Benjamin JG, Vigil MF, Stahlman PW. 2010. Continuous cropping systems reduce near-surface maximum compaction in no-till soils. *Agronomy Journal* **102**:1217–1225.
- Boran D, Namli A, Akca MO. 2017. Determination of quality parameters of vermicompost under different thermal techniques. *Fresenius Environmental Bulletin* **26**:5205–5212.
- Borowitzka MA, Moheimani NR. 2013. Open pond culture systems. Pages 133–152 in Borowitzka MA, Moheimani NR, editors. *Algae for biofuels and energy*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Brundrett MC, Tedersoo L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist* **220**:1108–1115.
- Buck GW, West CP, Elbersen HW. 1997. Endophyte effect on drought tolerance in diverse *Festuca* species. Pages 141–143 in Bacon CW, Hill NS, editors. *Neotyphodium/Grass Interactions*. Springer US, Boston.

- Bueno P, Tapias R, López F, Díaz MJ. 2008. Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting. *Bioresource Technology* **99**:5069–5077.
- Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, Van Themaat EVL, Schulze-Lefert P. 2013. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology* **64**:807–838.
- Bumandalai O, Tserennadmid R. 2019. Effect of *Chlorella vulgaris* as a biofertilizer on germination of tomato and cucumber seeds. *International Journal of Aquatic Biology* **7**:95–99.
- Busari MA, Kukal SS, Kaur A, Bhatt R, Dulazi AA. 2015. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research* **3**:119–129.
- Cairney JWG, Meharg AA. 2003. Ericoid mycorrhiza: A partnership that exploits harsh edaphic conditions. *European Journal of Soil Science* **54**:735–740.
- Calado JMG, Basch G, de Carvalho M. 2010. Weed management in no-till winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Protection* **29**:1–6.
- Cannell RJP. 1993. Algae as a source of biologically active products. *Pesticide Science* **39**:147–153.
- Cappellazzo G, Lanfranco L, Fitz M, Wipf D, Bonfante P. 2008. Characterization of an amino acid permease from the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Plant Physiology* **147**:429–437.
- Carroll G. 1988. Fungal endophytes in stems and leaves: from latent pathogen to mutualistic symbiont. *Ecology* **69**:2–9.
- Castro J de S, Calijuri ML, Ferreira J, Assemany PP, Ribeiro VJ. 2020. Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Science of the Total Environment* **724**:138138.
- Clark RB, Zeto SK. 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition* **23**:867–902.
- Clay K. 1988. Fungal endophytes of grasses: a defensive mutualism between plants and fungi. *Ecology* **69**:10–16.
- Clay K, Schardl C. 2002. Evolutionary origins and ecological consequences of endophyte symbiosis with grasses. *The American Society of Naturalist* **160**:99–127.
- Cleaver Jr HM. 1972. The Contradictions of the Green Revolution. *The American Economic Review* **62**:177-186
- Compant S, Reiter B, Sessitsch A, Nowak J, Clément C, Barka EA. 2005. Endophytic colonization of *Vitis vinifera* L. by plant growth-promoting bacterium *Burkholderia* sp. strain PsJN. *Applied and Environmental Microbiology* **71**:1685–1693.

- Cooperband L. 2002. The art and science of composting. A resource for farmers and compost producers. Center for Integrated Agricultural Systems. University of Wisconsin, Madison
- Coppens J, Grunert O, Van Den Hende S, Vanhoutte I, Boon N, Haesaert G, De Gelder L. 2016. The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of Applied Phycology* **28**:2367–2377.
- Courty PE, Buée M, Diedhiou AG, Frey-Klett P, Le Tacon F, Rineau F, Turpault MP, Uroz S, Garbaye J. 2010. The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: New perspectives and emerging concepts. *Soil Biology and Biochemistry* **42**:679–698.
- Dalpe Y. 2009. Extraction, propagation, and conservation of arbuscular mycorrhizal fungi. Pages 93–103 in Damase Khasa APC, Piché Y, editors. *Advances in Mycorrhizal Science and Technology*. NRC research press, Ottawa.
- Daszkawska-Golec A. 2016. The role of abscisic acid in drought stress: how aba helps plants to cope with drought stress. Pages 123–151 in Hossain MA, Wani SH, Bhattacharjee S, Burritt DJ, Tran LSP, editors. *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 2: Molecular and Genetic Perspectives*. Springer International Publishing, Cham.
- Davies FT, Olalde-Portugal V, Aguilera-Gomez L, Alvarado MJ, Ferrera-Cerrato RC, Boutton TW. 2002. Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Scientia Horticulturae* **92**:347–359.
- De Battista JP, Bacon CW, Severson R, Plattner RD, Bouton JH. 1990. Indole acetic acid production by the fungal endophyte of tall fescue. *Agronomy Journal* **82**:878–880.
- de Bertoldi M. 2010. Production and utilization of suppressive compost: environmental, food and health benefits. Pages 153–170 in Insam H, Franke-Whittle I, Goberna M, editors. *Microbes at Work*. Springer Berlin, Heidelberg.
- de Bertoldi M, Vallini G, Pera A. 1983. The biology of composting: a review. *Waste Management & Research* **1**:157–176.
- de Novais CB, Giovannetti M, de Faria SM, Sbrana C. 2019. Two herbicides, two fungicides and spore-associated bacteria affect *Funneliformis mosseae* extraradical mycelium structural traits and viability. *Mycorrhiza* **29**:341–349.
- Deepika P, MubarakAli D. 2020. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **28**:101701. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101701.
- Dickson S. 2004. The Arum-Paris continuum of mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* **163**:187–200.

- Dineshkumar R, Duraimurugan M, Sharmiladevi N, Lakshmi LP, Rasheeq AA, Arumugam A, Sampathkumar P. 2020. Microalgal liquid biofertilizer and biostimulant effect on green gram (*Vigna radiata* L) an experimental cultivation. Biomass Conversion and Biorefinery. DOI: 10.1007/s13399-020-00857-0.
- Dirihan S, Helander ML, Saloniemi I, Gundel PE, Saikkonen K. 2015. Effects of systemic fungal endophytes on the performance of meadow fescue and tall fescue in mixtures with red clover. Grass and Forage Science **70**:465–473.
- Doan TT, Henry-Des-Tureaux T, Rumpel C, Janeau JL, Jouquet P. 2015. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. Science of the Total Environment **514**:147–154.
- Dodd JC. 2000. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro- and natural ecosystems. Outlook on Agriculture **29**:55–62.
- Domínguez J. 2018. Earthworms and Vermicomposting. Pages 63–77 in Ray S, editor. Earthworms - The Ecological Engineers of Soil. InTechOpen, London.
- Dominguez J, Edwards CA. 2010. Relationships between composting and vermicomposting. Pages 11–26 in Edwards CA, Arancon NQ, Sherman R, editors. Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management. CRC Press, Boca Raton.
- Dominguez J, Edwards CA, Subler S. 1997. A comparison of vermicomposting and composting. Biocycle **38**:57–59.
- El-Haddad ME, Zayed MS, El-Sayed GAM, Abd El-Satar AM. 2020. Efficiency of compost and vermicompost in supporting the growth and chemical constituents of *Salvia officinalis* L. Cultivated in sand soil. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture **9**:49–59.
- Elarroussi H, Elmernissi N, Benhima R, Meftah El Kadmiri I, Bendaou N, Smouni A. 2016. Microalgae polysaccharides a promising plant growth biostimulant. Journal of Algal Biomass Utilization **7**:55–63.
- Emami S, Alikhani HA, Pourbabae AA, Etesami H, Motasharezadeh B, Sarmadian F. 2020. Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improves phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. Rhizosphere **14**:100196.
- Evelin H, Devi TS, Gupta S, Kapoor R. 2019. Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: Current understanding and new challenges. Frontiers in Plant Science **10**:470. DOI: 10.3389/fpls.2019.00470.
- Evenson RE, Gollin D. 2003. Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. Science **300**:758–762.

- Fakhro A, Andrade-Linares DR, von Bargen S, Bandte M, Büttner C, Grosch R, Schwarz D, Franken P. 2010. Impact of *Piriformospora indica* on tomato growth and on interaction with fungal and viral pathogens. *Mycorrhiza* **20**:191–200.
- FAO. 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture managing systems at risk. The food and agriculture organization of the united nations and earthscan, London.
- Fasaei F, Bitter JH, Slegers PM, van Boxtel AJB. 2018. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research* **31**:347–362.
- Feddermann N, Finlay R, Boller T, Elfstrand M. 2010. Functional diversity in arbuscular mycorrhiza - the role of gene expression, phosphorous nutrition and symbiotic efficiency. *Fungal Ecology* **3**:1–8.
- Ferreira IEP, Zocchi SS, Baron D. 2017. Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical Biosciences* **293**:29–37.
- Fornes F, Mendoza-Hernández D, García-de-la-Fuente R, Abad M, Belda RM. 2012. Composting versus vermicomposting: A comparative study of organic matter evolution through straight and combined processes. *Bioresource Technology* **118**:296–305.
- Fortin JA, Bécard G, Declerck S, Dalpé Y, St-Arnaud M, Coughlan AP, Piché Y. 2002. Arbuscular mycorrhiza on root-organ cultures. *Canadian Journal of Botany* **80**:1–20.
- Fracetto GGM, Peres LEP, Lambais MR. 2017. Gene expression analyses in tomato near isogenic lines provide evidence for ethylene and abscisic acid biosynthesis fine-tuning during arbuscular mycorrhiza development. *Archives of Microbiology* **199**:787–798.
- Fu F, Wang Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management* **92**:407–418.
- Fu H, Zhang G, Zhang F, Sun Z, Geng G, Li T. 2017. Effects of continuous tomato monoculture on soil microbial properties and enzyme activities in a solar greenhouse. *Sustainability* **9**:317. DOI: 10.3390/su9020317.
- Gaignard C, Laroche C, Pierre G, Dubessay P, Delattre C, Gardarin C, Gourvil P, Probert I, Dubuffet A, Michaud P. 2019. Screening of marine microalgae: Investigation of new exopolysaccharide producers. *Algal Research* **44**:101711. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101711.
- Garcia-Garrido J, Vierheiling H. 2009. From a germinating spore to an established arbuscular mycorrhiza. Pages 15–37 in Khasa D, Piché Y, Coughlan AP, editors. *Advances in mycorrhizal science and Technologies*. NRC research press, Ottawa.
- Garcia-Gonzalez J, Sommerfeld M. 2016. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology* **28**:1051–1061.

- Gavito ME, Miller MH. 1998. Changes in mycorrhiza development in maize indeed by crop management practices. *Plant and Soil* **198**:185–192.
- Gianinazzi S, Vosátka M. 2004. Inoculum of arbuscular mycorrhizal fungi for production systems: Science meets business. *Canadian Journal of Botany* **82**:1264–1271.
- Gibert A, Voltaire F, Barre P, Hazard L. 2012. A fungal endophyte reinforces population adaptive differentiation in its host grass species. *New Phytologist* **194**:561–571.
- Giovannetti M et al. 2012. Nutraceutical value and safety of tomato fruits produced by mycorrhizal plants. *British Journal of Nutrition* **107**:242–251.
- Girlanda M et al. 2006. Inefficient photosynthesis in the Mediterranean orchid *Limodorum abortivum* is mirrored by specific association to ectomycorrhizal Russulaceae. *Molecular Ecology* **15**:491–504.
- Goss MJ, Carvalho M, Brito I. 2017. *Functional Diversity of Mycorrhiza and Sustainable Agriculture: Management to Overcome Biotic and Abiotic Stresses*. Academic press, London.
- Gregory PJ. 2006. *Plant roots: growth, activity and interactions with the soil*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford.
- Grobbelaar JU. 2013. Inorganic Algal Nutrition. Pages 123–133 in Richmond A, Hu Q, editors. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology: Second Edition*. John Wiley & Sons, Oxford.
- Gryndler M, Baláž M, Hršelová H, Jansa J, Vosátka M. 2004. Mykorhizní symbióza o soužití hub s kořeny rostlin. Academia, Praha.
- Guo S, Wang P, Wang X, Zou M, Liu C, Hao J. 2020. Microalgae as biofertilizer in modern agriculture. Pages 397–411 in Alam M, Xu J, Wang Z, editors. *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products*. Springer, Singapore.
- Gutiérrez-Miceli FA, Santiago-Borraz J, Montes Molina JA, Nafate CC, Abud-Archila M, Oliva Llaven MA, Rincón-Rosales R, Dendooven L. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Bioresource Technology* **98**:2781–2786.
- Hajnal-Jafari T, Seman V, Stamenov D, Uric S. 2020. Effect of *Chlorella vulgaris* on growth and photosynthetic pigment content in swiss chard (*Beta vulgaris* L. Subsp. Cicla). *Polish Journal of Microbiology* **69**:235–238.
- Halaj M, Paulovičová E, Paulovičová L, Jantová S, Cepák V, Lukavský J, Capek P. 2018. Biopolymer of *Dictyosphaerium chlorelloides* - chemical characterization and biological effects. *International Journal of Biological Macromolecules* **113**:1248–1257.
- Haling RE, Brown LK, Bengough AG, Young IM, Hallett PD, White PJ, George TS. 2013. Root hairs improve root penetration, root-soil contact, and phosphorus acquisition in soils of different strength. *Journal of Experimental Botany* **64**:3711–3721.

- Hallmann J, Quadt-Hallmann A, Mahaffee WF, Kloepper JW. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. *Canadian Journal of Microbiology* **43**:895–914.
- Han M, Okamoto M, Beatty PH, Rothstein SJ, Good AG. 2015. The Genetics of Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Annual Review of Genetics* **49**:269–289.
- Hardoim PR, van Overbeek LS, Berg G, Pirttilä AM, Compant S, Campisano A, Döring M, Sessitsch A. 2015. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **79**:293–320.
- Harley JL, Harley EL. 1987. A check-list of mycorrhiza in the british flora. *New Phytologist* **105**:1–102.
- Hart MM, Forsythe JA. 2012. Using arbuscular mycorrhizal fungi to improve the nutrient quality of crops; nutritional benefits in addition to phosphorus. *Scientia Horticulturae* **148**:206–214.
- Hermann A, Donato R, Weiger TM, Chazin WJ. 2012. S100 calcium binding proteins and ion channels. *Frontiers in Pharmacology* **3**:67. DOI: 10.3389/fphar.2012.00067.
- Hernández A, Castillo H, Ojeda D, Arras A, López J, Sánchez E. 2010. Effect of vermicompost and compost on lettuce production. *Chilean Journal of Agricultural Research* **70**:583–589.
- Herrero B, Blázquez ME, Cristóbal MD. 2014. Agronomic parameters assessment in hydroponic tomato crop. *Horticultura Blasireira* **32**:385–390.
- Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. 2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry* **68**:139–146.
- Hlušek J, Richter R, Ryant P, Kolář L. 2002. *Výživa a hnojení zahradních plodin*. Redakce odborných časopisů, Praha.
- Hodge A, Campbell<sup>2</sup> CD, Fitter AH. 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature* **413**:297–299.
- Hodge A, Storer K. 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: Implications for individual plants through to ecosystems. *Plant and Soil* **386**:1–19.
- Houlden A, Timms-Wilson TM, Day MJ, Bailey MJ. 2008. Influence of plant developmental stage on microbial community structure and activity in the rhizosphere of three field crops. *FEMS Microbiology Ecology* **65**:193–201.
- Huang K, Xia H. 2018. Role of earthworms' mucus in vermicomposting system: Biodegradation tests based on humification and microbial activity. *Science of the Total Environment* **610**:703–708.

- Hume DE, Ryan GD, Gibert A, Helander M, Mirlohi A, Sabzalain MR. 2016. *Epichloë* fungal endophytes for grassland ecosystems. Pages 233–305 in Lichtfouse E, editor. Sustainable agriculture reviews. Springer, Cham.
- Chen L, de Haro Marti M, Moore A, Falen C. 2010. The composting process. Dairy Compost Production and Use in Idaho **2**:513–532.
- Chew KW, Khoo KS, Foo HT, Chia SR, Walvekar R, Lim SS. 2020. Algae utilization and its role in the development of green cities. Chemosphere **268**:129322. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129322.
- Cho W-J, Kim H-J, Jung D-H, Kim D-W, Ahn TI, Son J-E. 2018. On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management. Computers and Electronics in Agriculture **146**:51–58.
- Christaki E, Bonos E, Giannenas I, Florou-Paneria P. 2013. Functional properties of carotenoids originating from algae. Journal of the Science of Food and Agriculture **93**:5–11.
- Ievinsh G. 2011. Vermicompost treatment differentially affects seed germination, seedling growth and physiological status of vegetable crop species. Plant Growth Regulation **65**:169–181.
- Ievinsh G, Vikmane M, Iirse A, Karlsons A. 2017. Effect of vermicompost extract and vermicompost-derived humic acids on seed germination and seedling growth of hemp. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences **71**:286–292.
- Ivanov V. 2010. Environmental Microbiology for Engineers. CRC Press, US.
- Janoušková M, Pavlíková D, Vosátka M. 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. Chemosphere **65**:1959–1965.
- Jansa J, Mozafar A, Anken T, Ruh R, Sanders IR, Frossard E. 2002. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. Mycorrhiza **12**:225–234.
- Jenks MA, Hasegawa PM. 2014. Plant abiotic stress. Second. John Wiley & Sons, Oxford.
- Jensen MH. 2002. Controlled environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions - A world review. Acta Horticulturae **578**:19-25
- Johnston AE. 1986. Soil organic matter, effects on soils and crops. Soil use and management **2**:97–105.
- Johnston AM, Bruulsema TW. 2014. 4R nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. Procedia Engineering **83**:365–370.
- Jones C, Jacobsen J. 2005. Plant Nutrition and Soil Fertility. Nutrient Management Module **11**:1–11.



- Joshi R, Singh J, Vig AP. 2015. Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: effect on growth, yield and quality of plants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* **14**:137–159.
- Juge C, Coughlan AP, Fortin JA, Piché Y. 2009. Growth and branching of asymbiotic, presymbiotic, and extraradical AM fungal hyphae: clarification of concepts and terminology. Pages 39–50 in Khasa D, Piché Y, Coughlin A, editors. *Advances in Mycorrhizal Science and Technologies*. NRC Research Press, Ottawa.
- Juge C, Samson J, Bastien C, Vierheilig H, Coughlan A, Piché Y. 2002. Breaking dormancy in spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*: a critical cold-storage period. *Mycorrhiza* **12**:37–42.
- Jungk A. 2001. Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **164**:121–129.
- Kabir Z. 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science* **85**:23–29.
- Kahiluoto H, Ketoja E, Vestberg M. 2012. Plant-available P supply is not the main factor determining the benefit from arbuscular mycorrhiza to crop P nutrition and growth in contrasting cropping systems. *Plant and Soil* **350**:85–98.
- Kahiluoto H, Vestberg M. 1998. The effect of arbuscular mycorrhiza on biomass production and phosphorus uptake from sparingly soluble sources by leek (*Allium porrum* L.) in Finnish field soils. *Biological Agriculture and Horticulture* **16**:65–85.
- Kalantari F, Tahir OM, Joni RA, Fatemi E. 2018. Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology* **11**:35–60.
- Kaya C, Ashraf M, Sonmez O, Aydemir S, Tuna AL, Cullu MA. 2009. The influence of arbuscular mycorrhizal colonisation on key growth parameters and fruit yield of pepper plants grown at high salinity. *Scientia Horticulturae* **121**:1–6.
- Kazbar A, Cogne G, Urbain B, Marec H, Le-Gouic B, Tallec J, Takache H, Ismail A, Pruvost J. 2019. Effect of dissolved oxygen concentration on microalgal culture in photobioreactors. *Algal Research* **39**:101432. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101432.
- Khalil HPS, Lai TK, Tye YY, Rizal S, Chong EWN, Yap SW, Hamzah AA, Nurul Fazita MR, Paridah MT. 2018. A review of extractions of seaweed hydrocolloids: Properties and applications. *Express Polymer Letters* **12**:296–317.
- Khan KS, Joergensen RG. 2009. Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers. *Bioresource Technology* **100**:303–309.
- Khoeyi ZA, Seyfabadi J, Ramezanpour Z. 2012. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella vulgaris*. *Aquaculture International* **20**:41–49.

- Klironomos JN. 2003. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology* **84**:2292–2301.
- Klironomos JN, Hart MM. 2002. Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza* **12**:181–184.
- Kobayashi DY, Palumbo JD. 2000. Bacterial endophytes and their effects on plants and uses in agriculture. Pages 199–233 in Bacon CW, White JF, editors. *Microbial Endophytes*. CRC Press, New York.
- Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, McKenna BA, Lombi E. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* **132**:105078. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105078.
- Kozłowski TT. 1971. Growth and development of trees Volume II cambial growth, root growth, and reproductive growth. Academic press, New York and London.
- Krzemińska I, Pawlik-Skowrońska B, Trzcńska M, Tys J. 2014. Influence of photoperiods on the growth rate and biomass productivity of green microalgae. *Bioprocess and Biosystems Engineering* **37**:735–741.
- Kubota M, McGonigle TP, Hyakumachi M. 2005. Co-occurrence of *Arum*- and *Paris*-type morphologies of arbuscular mycorrhizae in cucumber and tomato. *Mycorrhiza* **15**:73–77.
- Kuldau G, Bacon C. 2008. Clavicipitaceous endophytes: Their ability to enhance resistance of grasses to multiple stresses. *Biological Control* **46**:57–71.
- Kumar A, Droby S, Singh VK, Singh SK, White JF. 2020. Entry, colonization, and distribution of endophytic microorganisms in plants. Pages 1–33 in Kumar A, Radhakrishnan EK, editors. *Microbial Endophytes*. Woodhead Publishing, Duxford.
- Kumar D, Kvíderová J, Kaštánek P, Lukavský J. 2017. The green alga *Dictyosphaerium chlorelloides* biomass and polysaccharides production determined using cultivation in crossed gradients of temperature and light. *Engineering in Life Sciences* **17**:1030–1038.
- Kumar RR, Cho JY. 2014. Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research* **21**:9569–9577.
- La Notte A, Maes J, Dalmazzone S, Crossman ND, Grizzetti B, Bidoglio G. 2017. Physical and monetary ecosystem service accounts for Europe: A case study for in-stream nitrogen retention. *Ecosystem Services* **23**:18–29.
- Latef AAHA, Chaoxing H. 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and fruit yield of tomato grown under salinity stress. *Scientia Horticulturae* **127**:228–233.
- Lazcano C, Arnold J, Tato A, Zaller JG, Domínguez J. 2009. Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research* **7**:944–951.

- Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* **72**:1013–1019.
- Lehman RM et al. 2015. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. *Sustainability* **7**:988–1027.
- Leong YK, Chang JS. 2020. Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresource Technology* **303**:122886. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122886.
- Leopold DR. 2016. Ericoid fungal diversity: Challenges and opportunities for mycorrhizal research. *Fungal Ecology* **24**:114–123.
- Li K et al. 2019. Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology* **291**:121934.
- Li X, Rui J, Mao Y, Yannarell A, Mackie R. 2014. Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar. *Soil Biology and Biochemistry* **68**:392–401.
- Li XL, George E, Marschner H. 1991. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil* **136**:41–48.
- Lim CW, Baek W, Jung J, Kim JH, Lee SC. 2015. Function of ABA in stomatal defense against biotic and drought stresses. *International Journal of Molecular Sciences* **16**:15251–15270.
- Liu H, Carvalhais LC, Crawford M, Singh E, Dennis PG, Pieterse CMJ, Schenk PM. 2017. Inner plant values: Diversity, colonization and benefits from endophytic bacteria. *Frontiers in Microbiology* **8**:2552. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02552.
- Lodewyckx C, Vangronsveld J, Porteous F, Moore ERB, Taghavi S, Mezgeay M, Van der Lelie D. 2002. Endophytic bacteria and their potential applications. *Critical Reviews in Plant Sciences* **21**:583–606.
- Logi C, Sbrana C, Giovannetti M. 1998. Cellular events involved in survival of individual arbuscular mycorrhizal symbionts growing in the absence of the host. *Applied and Environmental Microbiology* **64**:3473–3479.
- Lugtenberg BJJ, Caradus JR, Johnson LJ. 2016. Fungal endophytes for sustainable crop production. *FEMS Microbiology Ecology* **92**:fiw194. DOI: 10.1093/femsec/fiw194
- Mahmoud IM, Mahmoud EK, Ibrahim DA. 2015. Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield. *International Agrophysics* **29**:157–164.

- Machado RMA, Serralheiro RP. 2017. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae* **3**:30. DOI: 10.3390/horticulturae3020030.
- Malinowski DP, Belesky DP. 2000. Adaptations of endophyte-infected cool-season grasses to environmental stresses: Mechanisms of drought and mineral stress tolerance. *Crop Science* **40**:923–940.
- Mancuso M, Bustaffa F. 2006. A Wireless Sensors Network for monitoring environmental variables in a tomato greenhouse. Pages 107–110 in IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS.
- Markiewicz B, Kleiber T, Bosiacki M. 2016. Hydroponic cultivation of tomato. Pages 105–129 in Konvalina P, editor. *Alternative Crops and Cropping Systems*. InTech, London.
- Márquez-Quiroz C, López-Espinosa ST, Sánchez-Chávez E, García-Bañuelos ML, De la Cruz-Lázaro E, Reyes-Carrillo JL. 2014. Effect of vermicompost tea on yield and nitrate reductase enzyme activity in saladette tomato. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **14**:223–231.
- Martin F. 2017. *Molecular Mycorrhizal Symbiosis*. Wiley Blackwell, New Jersey.
- Masojídek J, Lhotský R, Kopecký J, Prasil O. 2016. Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce. Středisko společných činností AV ČR v.v.i.
- McCauley A, Jones C, Jacobsen J. 2009. Soil pH and organic matter. *Nutrient Management Module* **8**:1–12.
- McGonigle TP, Miller MH, Evans DG, Fairchild GL, Swan JA. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* **115**:495–501.
- Md Khudzari J, Tartakovsky B, Raghavan GSV. 2016. Effect of C/N ratio and salinity on power generation in compost microbial fuel cells. *Waste Management* **48**:135–142.
- Mehta CM, Palni U, Franke-Whittle IH, Sharma AK. 2014. Compost: Its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Management* **34**:607–622.
- Mehta CM, Sirari K. 2018. Comparative study of aerobic and anaerobic composting for better understanding of organic waste management: A mini review. *Plant Archives* **18**:44–48.
- Mejstřík V. 1988. *Mykorrhizní symbiózy*. Academia, Praha.
- Menjívar RD, Cabrera JA, Kranz J, Sikora RA. 2012. Induction of metabolite organic compounds by mutualistic endophytic fungi to reduce the greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) infection on tomato. *Plant and Soil* **352**:233–241.
- Miliute I, Buzaitė O, Baniulis D, Stanys V. 2015. Bacterial endophytes in agricultural crops and their role in stress tolerance: a review. *Zemdirbyste-Agriculture* **102**:465–478.

- Miransari M. 2011. Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnology Advances* **29**:645–653.
- Mišurcová L, Škrovánková S, Samek D, Ambrožová J, Machů L. 2012. Health benefits of algal polysaccharides in human nutrition. *Advances in Food and Nutrition Research* **66**:75-145.
- Mitra G. 2017. Essential plant nutrients and recent concepts about their uptake. Pages 3–36 in Naeem M, Ansari AA, Gill SS, editors. *Essential Plant Nutrients*. Springer International Publishing, Cham.
- Mohammad Golam Dastogeer K, Oshita Y, Yasuda M, Kanasugi M, Matsuura E, Xu Q, Okazaki S. 2020. Host specificity of endophytic fungi from stem tissue of nature farming tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) in Japan. *Agronomy* **10**:1019. DOI: 10.3390/agronomy10071019.
- Mohler LC, Johnson ES. 2009. *Crop Rotation on Organic Farms a planning manual*. Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, New York.
- Monteiro RA et al. 2012. Genomic comparison of the endophyte *Herbaspirillum seropedicae* SmR1 and the phytopathogen *Herbaspirillum rubrisubalbicans* M1 by suppressive subtractive hybridization and partial genome sequencing. *FEMS Microbiology Ecology* **80**:441–451.
- Morales-Corts MR, Gómez-Sánchez MÁ, Pérez-Sánchez R. 2014. Evaluation of green/pruning wastes compost and vermicompost, slungum compost and their mixes as growing media for horticultural production. *Scientia Horticulturae* **172**:155–160.
- Morales-Sánchez D, Martínez-Rodríguez OA, Martínez A. 2017. Heterotrophic cultivation of microalgae: production of metabolites of commercial interest. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **92**:925–936.
- Mutale-joan C, Redouane B, Najib E, Yassine K, Lyamlouli K, Laila S, Zeroual Y, Hicham EA. 2020. Screening of microalgae liquid extracts for their bio stimulant properties on plant growth, nutrient uptake and metabolite profile of *Solanum lycopersicum* L. *Scientific Reports* **10**:1–12.
- Nandhini S, Sendhilvel V, Babu S. 2012. Endophytic bacteria from tomato and their efficacy against *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici, the wilt pathogen. *Journal of Biopesticides* **5**:178–185.
- Nayyar A. 2009. Impact of mineral N and P and manure on arbuscular mycorrhizal fungi, other soil microorganisms and on soil functionality in different agroecosystems [Ph.D. thesis]. University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Nedorost L, Pokluda R. 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on tomato yield and nutrient uptake under different fertilization levels. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **60**:181–186.

- Newsham KK, Upson R, Read DJ. 2009. Mycorrhizas and dark septate root endophytes in polar regions. *Fungal Ecology* **2**:10–20.
- Nobel PS. 2009. *Physicochemical and environmental plant physiology*. Academic press, New York.
- Ohashi-Kaneko K, Yoshii M, Isobe T, Park JS, Kurata K, Fujiwara K. 2009. Nutrient solution prepared with ozonated water does not damage early growth of hydroponically grown tomatoes. *Ozone: Science and Engineering* **31**:21–27.
- Okoro V, Azimov U, Munoz J, Hernandez HH, Phan AN. 2019. Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **115**:109364.
- Oncel SS. 2013. Microalgae for a macroenergy world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **26**:241–264.
- Öpik M, Moora M, Liira J, Zobel M. 2006. Composition of root-colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. *Journal of Ecology* **94**:778–790.
- Pallardy S. 2007. *Physiology of Woody Plants*. Page *Physiology of Woody Plants*. Academic press, New York.
- Pandey N. 2018. Role of plant nutrients in plant growth and physiology. Pages 51–93 in Hasanuzzaman M, Fujita M, Oku H, Nahar K, Hawrylak-Nowak B, editors. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer, Singapore.
- Paniagua-Michel J de J, Olmos-Soto J, Morales-Guerrero ER. 2014. Algal and microbial exopolysaccharides: new insights as biosurfactants and bioemulsifiers. *Advances in Food and Nutrition Research* **73**:221-257.
- Pant A, Radovich TJK, Hue N V., Arancon NQ. 2011. Effects of vermicompost tea (aqueous extract) on pak choi yield, quality, and on soil biological properties. *Compost Science and Utilization* **19**:279–292.
- Pant AP, Radovich TJK, Hue N V., Miyasaka SC. 2012. Pak Choi (*Brassica rapa*, Chinensis group) yield, phytonutrient content, and soil biological properties as affected by vermicompost-to-water ratio used for extraction. *HortScience* **47**:395–402.
- Papik J, Folkmanova M, Polivkova-Majorova M, Suman J, Uhlik O. 2020. The invisible life inside plants: Deciphering the riddles of endophytic bacterial diversity. *Biotechnology Advances* **44**:107614.
- Parihar P, Singh S, Singh R, Singh VP, Prasad SM. 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research* **22**:4056–4075.
- Parniske M. 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology* **6**:763–775.

- Pellegrini P, Fernández RJ. 2018. Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **115**:2335–2340.
- Perez-Garcia O, Escalante FME, De-Bashan LE, Bashan Y. 2011. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water Research* **45**:11–36.
- Perveen R, Suleria HAR, Anjum FM, Butt MS, Pasha I, Ahmad S. 2015. Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **55**:919–929.
- Peterson LR, Massicote HB, Melvillr LH. 2004. *Mycorrhizas: Anatomy and cell Biology*. NRC research press, Ottawa.
- Petrini O. 1991. Fungal endophytes of tree leaves. Pages 179–197 in Andrews JH, Hirano SS, editors. *Microbial ecology of leaves*. Springer, New York.
- Petříková K et al. 2012. *Zelenina pěstování, výživa, ochrana a ekonomika*. Profi press, Praha.
- Philippe G. 2016. Lolitrem B and indole diterpene alkaloids produced by endophytic fungi of the genus *Epichloë* and their toxic effects in livestock. *Toxins* **8**:47.
- Pires JCM, Alvim-Ferraz MCM, Martins FG. 2017. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **79**:248–254.
- Plenchette C, Clermont-Dauphin C, Meynard JM, Fortin JA. 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science* **85**:31–40.
- Porcel R, Aroca R, Ruiz-Lozano JM. 2011. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **32**:181–200.
- Porcel R, Ruiz-Lozano JM. 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany* **55**:1743–1750.
- Posten C. 2012. Discovering microalgae as source for sustainable biomass. Pages 1–30 in Posten C, Walter C, editors. *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. Walter de Gruyter GmbH, Boston.
- Pulz O, Gross W. 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* **65**:635–648.
- Pumplin N, Harrison MJ. 2009. Live-cell imaging reveals periarbuscular membrane domains and organelle location in *Medicago truncatula* roots during arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant Physiology* **151**:809–819.

- Püschel D, Janoušková M, Hujslová M, Slavíková R, Gryndlerová H, Jansa J. 2016. Plant–fungus competition for nitrogen erases mycorrhizal growth benefits of *Andropogon gerardii* under limited nitrogen supply. *Ecology and Evolution* **6**:4332–4346.
- Rachidi F, Benhima R, Sbabou L, El Arroussi H. 2020. Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution. *Biotechnology Reports* (e00426) DOI:10.1016/j.btre.2020.e00426.
- Rai AN, Penna S. 2013. Molecular evolution of plant P5CS gene involved in proline biosynthesis. *Molecular Biology Reports* **40**:6429–6435.
- Rai MP, Gautom T, Sharma N. 2015. Effect of salinity, pH, light intensity on growth and lipid production of microalgae for bioenergy application. *OnLine Journal of Biological Sciences* **15**:260–267.
- Ramesh Kumar B, Deviram G, Mathimani T, Duc PA, Pugazhendhi A. 2019. Microalgae as rich source of polyunsaturated fatty acids. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **17**:583–588.
- Ras M, Steyer JP, Bernard O. 2013. Temperature effect on microalgae: A crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* **12**:153–164.
- Rasmussen HN, Rasmussen FN. 2009. Orchid mycorrhiza: Implications of a mycophagous life style. *Oikos* **118**:334–345.
- Ravindran B, Wong JWC, Selvam A, Sekaran G. 2016. Influence of microbial diversity and plant growth hormones in compost and vermicompost from fermented tannery waste. *Bioresource Technology* **217**:200–204.
- Redecker D. 2002. Molecular identification and phylogeny of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* **244**:67–73.
- Redman RS, Kim YO, Woodward CJDA, Greer C, Espino L, Doty SL, Rodriguez RJ. 2011. Increased fitness of rice plants to abiotic stress via habitat adapted symbiosis: A strategy for mitigating impacts of climate change. *PLOS One* (e14823) DOI: 10.1371/journal.pone.0014823.
- Remy W, Taylort TN, Hass H, Kerp H. 1994. Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **91**:11841–11843.
- Renuka N, Guldhe A, Prasanna R, Singh P, Bux F. 2018. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances* **36**:1255–1273.
- Reséndez AM et al. 2012. Tomato production in sand: vermicompost mixtures compared with sand and nutritive solution. *Journal of Agricultural Science and Review* **1**:19–26.
- Resh HM. 2013. *Hydroponic Food Production*. CRC Press, Boca Raton.



- Reza Sabzalian M, Mirlohi A. 2010. *Neotyphodium* endophytes trigger salt resistance in tall and meadow fescues. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173**:952–957.
- Rietra RPJJ, Heinen M, Dimkpa CO, Bindraban PS. 2017. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **48**:1895–1920.
- Richmond A, Hu Q. 2013. *Handbook of Microalgal Culture*. John Wiley & Sons, Oxford.
- Rodriguez RJ, White JF, Arnold AE, Redman RS. 2009. Fungal endophytes: Diversity and functional roles: Tansley review. *New Phytologist* **182**:314–330.
- Ronay K, Dumitru C-D. 2015. Hydroponic greenhouse energy supply based on renewable energy sources. *Procedia Technology* **19**:703–707.
- Rosenblueth M, Martínez-Romero E. 2006. Bacterial endophytes and their interactions with hosts. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **19**:827–837.
- Rouphael Y, Cardarelli M, Di Mattia E, Tullio M, Rea E, Colla G. 2010. Enhancement of alkalinity tolerance in two cucumber genotypes inoculated with an arbuscular mycorrhizal biofertilizer containing *Glomus intraradices*. *Biology and Fertility of Soils* **46**:499–509.
- Rouphael Y, Franken P, Schneider C, Schwarz D, Giovannetti M, Agnolucci M, Pascale S De, Bonini P, Colla G. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* **196**:91–108.
- Rubatzky VE, Yamaguchi M. 1997. Tomatoes, peppers, eggplants, and other solanaceous vegetables. Pages 532–576 in Rubatzky VE, Yamaguchi M, editors. *World Vegetables*. Springer, Boston.
- Ruiz-Lozano JM, Porcel R, Aroca R. 2006. Does the enhanced tolerance of arbuscular mycorrhizal plants to water deficit involve modulation of drought-induced plant genes? *New Phytologist* **171**:693–698.
- Rungjindamai N, Pinruan U, Choeyklin R, Hattori T, Jones EBG. 2008. Molecular characterization of basidiomycetous endophytes isolated from leaves, rachis and petioles of the oil palm, *Elaeis guineensis*, in Thailand. *Fungal Diversity* **33**:139–161.
- Saini RK, Rengasamy KRR, Mahomoodally FM, Keum YS. 2020. Protective effects of lycopene in cancer, cardiovascular, and neurodegenerative diseases: An update on epidemiological and mechanistic perspectives. *Pharmacological Research* **155**:104730. DOI: 10.1016/j.phrs.2020.104730.
- Sainju UM, Dris R, Singh B. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment* **1**:176–183.

- Salter CE, Edwards CA. 2010. The production of vermicompost aqueous solutions or teas. Pages 153–164 in Edwards CA, Arancon NQ, Sherman RL, editors. *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press, Boca Raton.
- Santoyo G, Moreno-Hagelsieb G, del Carmen Orozco-Mosqueda M, Glick BR. 2016. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research* **183**:92–99.
- Sapkota R, Santos S, Farias P, Krogh PH, Winding A. 2020. Insights into the earthworm gut multi-kingdom microbial communities. *Science of the Total Environment* **727**:138301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138301.
- Sasan RK, Bidochka MJ. 2012. The insect-pathogenic fungus *Metarhizium robertsii* (Clavicipitaceae) is also an endophyte that stimulates plant root development. *American Journal of Botany* **99**:101–107.
- Sbrana C, Avio L, Giovannetti M. 2014. Beneficial mycorrhizal symbionts affecting the production of health-promoting phytochemicals. *Electrophoresis* **35**:1535–1546.
- Shamshiri RR, Jones JW, Thorp KR, Ahmad D, Man HC, Taheri S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics* **32**:287–302.
- Sharma N, Acharya S, Kumar K, Singh N, Chaurasia OP. 2018. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation* **17**:364–371.
- Shields R, Lupatsch I. 2012. Algae for Aquaculture and Animal Feeds. *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* **21**:23–37.
- Shiri J, Keshavarzi A, Kisi O, Iturraran-Viveros U, Bagherzadeh A, Mousavi R, Karimi S. 2017. Modeling soil cation exchange capacity using soil parameters: Assessing the heuristic models. *Computers and Electronics in Agriculture* **135**:242–251.
- Shrivastava G, Ownley BH, Augé RM, Toler H, Dee M, Vu A, Köllner TG, Chen F. 2015. Colonization by arbuscular mycorrhizal and endophytic fungi enhanced terpene production in tomato plants and their defense against a herbivorous insect. *Symbiosis* **65**:65–74.
- Schardl CL. 2001. *Epichloë festucae* and related mutualistic symbionts of grasses. *Fungal Genetics and Biology* **33**:69–82.
- Schulz B, Boyle C. 2005. The endophytic continuum. *Mycological Research* **109**:661–686.
- Silber A, Bar-Tal A. 2008. Nutrition of substrate-grown plants. Pages 291–339 in Raviv M, Lieth JH, editors. *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, San Diego.
- Simard SW, Durall DM. 2004. Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance. *Canadian Journal of Botany* **82**:1140–1165.

- Singh G, Patidar SK. 2018. Microalgae harvesting techniques: A review. *Journal of Environmental Management* **217**:499–508.
- Sinno M, Ranesi M, Gioia L, D’errico G, Woo SL. 2020. Endophytic fungi of tomato and their potential applications for crop improvement. *Agriculture* **10**:587. DOI: 10.3390/agriculture10120587.
- Smith FA, Smith S. 1997. Structural diversity in ( vesicular )— arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* **137**:373–388.
- Smith S, Read D. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic press, New York.
- Smith SE, Smith FA. 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* **62**:227–250.
- Snyder CS. 2017. Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the “4R” concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Research* **55**:463–472.
- Son JE, Kim HJ, Ahn TI. 2019. Hydroponic systems. Pages 273–283 in Kozai T, Niu G, Takagaki M, editors. *Plant Factory*. Academic press, London.
- Sonneveld C, Straver N. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. *Voedingsoplossingen Glastuinbouw*, No. 8, PBG, Aalsmeer: PBG Naaldwijk
- Sonneveld C, Voogt W. 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Pages 257–275 in Sonneveld C, Voogt W, editors. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer, Dordrecht.
- Spagnoletti F, Lavado RS. 2015. The arbuscular mycorrhiza *Rhizophagus intraradices* reduces the negative effects of arsenic on soybean plants. *Agronomy* **5**:188–199.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* **101**:87–96.
- Straub D, Rothballer M, Hartmann A, Ludewig U. 2013. The genome of the endophytic bacterium *H. frisingense* GSF30T identifies diverse strategies in the *Herbaspirillum* genus to interact with plants. *Frontiers in Microbiology* **4**:168.
- Strom PF. 1985. Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting. *Applied and Environmental Microbiology* **50**:899–905.
- Suganya T, Varman M, Masjuki HH, Renganathan S. 2016. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **55**:909–941.
- Tei F, De Neve S, de Haan J, Kristensen HL. 2020. Nitrogen management of vegetable crops. *Agricultural Water Management* **240**:106316. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106316.

- Tilbrook J, Roy S. 2014. Salinity tolerance. Pages 133–178 in Jenks MA, Hasegawa PM, editors. *Plant Abiotic Stress*. John Wiley & Sons, Iowa.
- Tintjer T, Leuchtman A, Clay K. 2008. Variation in horizontal and vertical transmission of the endophyte *Epichloë elymi* infecting the grass *Elymus hystrix*. *New Phytologist* **179**:236–246.
- Tognetti C, Laos F, Mazzarino MJ, Hernández MT. 2005. Composting vs. vermicomposting: A comparison of end product quality. *Compost Science and Utilization* **13**:6–13.
- Uren NC. 2007. Types, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil-grown plants. Pages 1–21 in Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P, editors. *The Rhizosphere: Biochemistry and organic substances at the soil plant interface*, second edition. CRC Press, Boca Raton.
- Van Den Hende S, Claessens L, De Muylder E, Boon N, Vervaeren H. 2016. Microalgal bacterial flocs originating from aquaculture wastewater treatment as diet ingredient for *Litopenaeus vannamei* (Boone) . *Aquaculture Research* **47**:1075–1089.
- van der Heijden MGA, Martin FM, Selosse MA, Sanders IR. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist* **205**:1406–1423.
- Vaněk V, Balík J, Černý J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Valtera J. 2012. *Výživa zahradních rostlin*. Academia, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2002. *Výživa a hnojení polních a zahradních plodin*. Redakce odborných časopisů, Praha.
- Vega FE, Posada F, Catherine Aime M, Pava-Ripoll M, Infante F, Rehner SA. 2008. Entomopathogenic fungal endophytes. *Biological Control* **46**:72–82.
- Veresoglou SD, Chen B, Rillig MC. 2012. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry* **46**:53–62.
- Vergara C, Araujo KEC, Urquiaga S, Schultz N, Balieiro F de C, Medeiros PS, Santos LA, Xavier GR, Zilli JE. 2017. Dark Septate endophytic fungi help tomato to acquire nutrients from ground plant material. *Frontiers in Microbiology* **8**:2437.
- Verma SK, Gond SK, Mishra A, Sharma VK, Kumar J, Singh DK, Kumar A, Kharwar RN. 2017. Fungal endophytes representing diverse habitats and their role in plant protection. Pages 135–157 in Satyanarayana T, Deshmukh SK, Johri BN, editors. *Developments in fungal biology and applied mycology*. Springer, Singapore.
- Verslues PE, Sharma S. 2010. Proline metabolism and its implications for plant-environment interaction. *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologist* (e0140) DOI: 10.1199/tab.0140.
- Vierheilig H, Alt M, Mäder P, Boller T, Wiemken A. 1995. Spreading of *Glomus mosseae*, a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, across the rhizosphere of host and non-host plants. *Soil Biology and Biochemistry* **27**:1113–1115.

- Vierheilig H, Schweiger P, Brundrett M. 2005. An overview of methods for the detection and observation of arbuscular mycorrhizal fungi in roots. *Physiologia Plantarum* **125**:393–404.
- Vosátka M. 2009. Basic aspects of mycorrhizal biotechnology: Fungal inocula production and application. Pages 1059–1087 in Chauhan AK, Varma A, editors. *A textbook of molecular biotechnology*. I K International publishing house, New Delhi.
- Vosátka M, Látr A, Gianinazzi S, Albrechtová J. 2012. Development of arbuscular mycorrhizal biotechnology and industry: Current achievements and bottlenecks. *Symbiosis* **58**:29–37.
- Vuppaladadiyam AK, Prinsen P, Raheem A, Luque R, Zhao M. 2018. Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **12**:304–324.
- Wahidin S, Idris A, Shaleh SRM. 2013. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp. *Bioresource Technology* **129**:7–11
- Walia A, Guleria S, Chauhan A, Mehta P. 2017. Endophytic Bacteria: Role in phosphate solubilization. Pages 61–93 in Maheshwari DK, Annapurna K, editors. *Endophytes: crop productivity and protection*. Springer, Cham.
- Walker C, Vestberg M. 1994. A simple and inexpensive method for producing and maintaining closed pot cultures of arbuscular mycorrhizal fungi. *Agricultural and Food Science* **3**:233–240.
- Wang B, Lan CQ, Horsman M. 2012. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances* **30**:904–912
- Waszkielis KM, Wronowski R, Chlebus W, Białobrzewski I, Dach J, Pilarski K, Janczak D. 2013. The effect of temperature, composition and phase of the composting process on the thermal conductivity of the substrate. *Ecological Engineering* **61**:354–357.
- Welbaum GE. 2015. *Vegetable production and practices*. CABI publishing, Boston.
- White J, Sullivan RF, Balady GA, Gianfagna TJ, Yue Q, Meyer WA, Cabral D. 2001. A fungal endosymbiont of the grass *Bromus setifolius*: Distribution in some Andean populations, identification, and examination of beneficial properties. *Symbiosis* **31**:241–257.
- White JF, Torres MS. 2010. Is plant endophyte-mediated defensive mutualism the result of oxidative stress protection? *Physiologia Plantarum* **138**:440–446.
- White PJ. 2012. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: Short-distance transport. Pages 7-47 in Marschner P, editor. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. Academic Press, London.

- Wiese AF, Sweeten JM, Bean BW, Salisbury CD, Chenault EW. 1998. High temperature composting of cattle feedlot manure kills weed seed. *Applied Engineering in Agriculture* **14**:377–380.
- Willekens K, Vandecasteele B, Buchan D, De Neve S. 2014. Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology* **82**:61–71.
- Wipf D, Krajinski F, van Tuinen D, Recorbet G, Courty PE. 2019. Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist* **223**:1127–1142.
- Wollmann F, Dietze S, Ackermann JU, Bley T, Walther T, Steingroewer J, Krujatz F. 2019. Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches. *Engineering in Life Sciences* **19**:860–871.
- Xiang Y, Ji-yun J, Ming-zao L. 2008. Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency. *Agricultural Sciences in China* **7**:469–479.
- Yue Q, Miller CJ, White JF, Richardson MD. 2000. Isolation and characterization of fungal inhibitors from *Epichloë festucae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **48**:4687–4692.
- Zampieri RM, Adessi A, Caldara F, Codato A, Furlan M, Rampazzo C, De Philippis R, La Rocca N, Valle LD. 2020. Anti-inflammatory activity of exopolysaccharides from *Phormidium* sp. ETS05, the most abundant cyanobacterium of the therapeutic euganean thermal muds, using the zebrafish model. *Biomolecules* **10**:582.
- Zarei M, Jahandideh Mahjen Abadi VA, Moridi A. 2018. Comparison of vermiwash and vermicompost tea properties produced from different organic beds under greenhouse conditions. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* **7**:25–32.
- Zhang J, Jia W, Yang J, Ismail AM. 2006. Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses. *Field Crops Research* **97**:111–119.
- Złoch M, Thiem D, Gadzała-Kopciuch R, Hrynkiewicz K. 2016. Synthesis of siderophores by plant-associated metallotolerant bacteria under exposure to Cd<sup>2+</sup>. *Chemosphere* **156**:312–325.
- Zocco D, Fontaine J, Lozanova E, Renard L, Bivort C, Durand R, Grandmougin-Ferjani A, Declerck S. 2008. Effects of two sterol biosynthesis inhibitor fungicides (fenpropimorph and fenhexamid) on the development of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Mycological Research* **112**:592–601.
- Zuccaro G, Yousuf A, Pollio A, Steyer JP. 2020. Microalgae cultivation systems. Pages 11–29 in Yousuf A, editor. *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. Academic press, London.

## 9 Seznam použitých zkratk a symbolů

AM	arbuskulární mykorhiza
EkM	ektomykorhiza
OrM	orchideoidní mykorhiza
ErM	erikoidní mykorhiza
EH	endofytní houby
EB	endofytní bakterie
C-endofyt	endofytní houby z čeledi Clavicipitaceae
NC-endofyt	endofytní houby z jiné čeledi nežli Clavicipitaceae
ABA	kyselina abscisová
ATP	adenosintrifosfát
ROT	symbióza mykorhizní houby vytvořená v laboratoři za přítomnosti kořene rostliny na živném médiu (angl. Root organ culture)