

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Využití vodných výluhů z vermikompostu v hydroponii**

**Diplomová práce**

**Bc. Nathalie Andrlová**

**Technologie odpadů**

**prof. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.**

**© 2024 ČZU v Praze**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Využití vodných výluhů z vermikompostu v hydroponii" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 19.4.2024

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu práce prof. Ing. Aleši Hančovi, Ph.D. za příležitost podílet se na laboratorním experimentu, vstřícnost a dohled nad mou prací. Dále mé díky patří Ing. Matěji Malíkovi a Ing. Vojtěchu Barákovi, Ph.D. za pomoc, trpělivost a cenné rady při zpracování této práce.

# Využití vodných výluhů z vermikompostu v hydroponii

## Souhrn

Organická hnojiva vyráběná z recyklovaného odpadu představují ekologicky šetrnou alternativu k minerálním hnojivům. Velkou výzvou je využití organických hnojiv v hydroponických systémech (bezpůdní pěstování plodin). Mezi výhody těchto systémů patří zlepšení výnosů a kvality produktů či recyklace živin, avšak vyvstávají otázky ohledně používání anorganických zdrojů živin. Ačkoli se (vermi-)kompostování (žížalí kompostování) stalo široce využívanou metodou recyklace organického odpadu na kvalitní hnojiva, využití jeho vodných výluhů v hydroponických systémech není dosud zcela prozkoumáno. (Vermi-)kompostování je doporučeno jako čistá a udržitelná technologie pro přeměnu akvakulturního kalu, a využití výluhu z takového vermikompostu v hydroponii by mohlo vést k uzavření cyklu živin.

Cílem této práce bylo popsat přednosti a nedostatky použití vodných výluhů připravených z (vermi-)kompostů při hydroponickém pěstování rostlin. Teoretická část se zabývala významem hydroponie, hydroponickým pěstováním plodin a využitím hnojiv v této pěstitelské technologii. Praktická část byla věnována využití výluhu z vermikompostů vyprodukovaných z akvakulturního kalu při pěstování zemědělských plodin. Hydroponický laboratorní experiment byl zaměřen na vliv čtyř typů živných roztoků (kontrolní roztok NPK, výluh z vermikompostu, fugát 100 a 50 %) na výnosy salátu a polníčku pěstovaných v systému kapkové závlahy. Fyzikálně-chemické vlastnosti roztoků byly pravidelně monitorovány a sklizeň nadzemní biomasy proběhla po čtyřech týdnech experimentu. Po jeho skončení byly provedeny podrobné laboratorní analýzy prvkového složení.

Bylo zjištěno, že využití vodného výluhu z vermikompostu v hydroponii je možné a efektivní. Nebyl zaznamenán žádný úhyn rostlin, a zastoupení TN, K, Ca v jejich biomase ukazovalo na schopnost rostlin maximálně využít živiny navzdory nízkým koncentracím ve výluhu. Výnosy rostlin (hmotnost nadzemní biomasy) však byly významně nižší pro organické roztoky ve srovnání s roztokem NPK, což platilo zejména pro výluh z vermikompostu. Svoji negativní roli sehrála množství dusíku a prokysličené roztoků.

Stanovené cíle práce byly splněny v teoretické i praktické části práce. Zjištěné výsledky rozšířily poznatky o využití produktů zpracování organického odpadu z hlediska možného uzavření cyklu živin. Zároveň poukázaly na fakt, že výběr a příprava výživy může mít významný dopad na růst a vývoj rostlin, a poskytly další informace pro optimalizaci pěstebních postupů v oblasti hydroponie. Další výzkum lze směřovat na kombinaci různých zdrojů živin a propojení kvantitativních a kvalitativních dat pro získání uceleného pohledu na využití hydroponických systémů.

**Klíčová slova:** hydroponie, akvakultura, vodný výluh, vermikompost

# Use of aqueous solutions from vermicompost in hydroponics

## Summary

Organic fertilizers made from recycled waste represent an eco-friendly alternative to mineral fertilizers. Using organic fertilizers in hydroponics (soilless crop production) is a great challenge. The main advantages of hydroponics are increasing crop yields, better quality of products, and nutrient recycling; however, using inorganic sources of nutrients have been questioned. Although an (vermi-)composting process (relying on earthworms) belongs to commonly used methods for organic waste recycling to the quality end-product (fertilizer), using aqueous solutions (extracts) from vermicomposts in the hydroponic systems has remained mostly unknown. The (vermi-)composting process is recommended as a clean and sustainable technology transforming aquaculture sludge, therefore, aqueous extracts from such a kind of vermicompost in hydroponics could contribute to close the nutrient cycles.

The objective of this study was to describe advantages and disadvantages for aqueous extracts from vermicomposts used as nutrient solutions in hydroponic crop production. The first part (a literature review) was focused on hydroponics and its importance, crop production and fertilizers. Using extracts from vermicomposted aquaculture sludge in hydroponic crop production was investigated in the second part (an experimental study). In the lab experimental study, there were assessed yields of Romaine lettuce and corn salad in the drip irrigation system using four types of nutrient solutions (i.e., control inorganic NPK solution, vermicompost extract, and 100 (50) % liquid digestate). Physical-chemical parameters of solutions were being regularly monitored, and above-ground biomass was harvested after a four-week period. When experiment finished, detailed lab analyses of substance concentrations were made.

Using aqueous extracts from vermicomposts in hydroponics was found to be possible and effective. There was no plant mortality, and total nitrogen, potassium and calcium contents in plant tissue showed that crops had been able to uptake nutrients in maximum rate, despite substance concentrations in the vermicompost extract being low. On the contrary, yields (above-ground biomass weight) were significantly lower for organic solutions compared to the NPK solution, and it was much more obvious for aqueous extract from vermicompost. Levels of nitrogen concentration and oxygenation had a negative effect on the crop yields.

The objectives set for this study were achieved in both parts of study. The final results help extend our knowledge on products of organic waste recycling and their potential use in nutrient cycles closing. Moreover, they referred to the selection and preparation of nutrient solutions highly impacting plant growth and development, and new information for optimum crop production in hydroponics was obtained. Other researchers could aim for use of nutrient source mix and linkage between quantitative and qualitative data to get a comprehensive view on hydroponic systems use.

**Keywords:** hydroponics, aquaculture, aqueous solution, vermicompost

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Vědecké hypotézy a cíle práce .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Výživa rostlin.....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Základní požadavky.....	10
3.1.2 Mechanismy absorpce .....	10
3.1.3 Základní živiny, jejich role a antagonismy.....	11
<b>3.2 Hydroponie .....</b>	<b>14</b>
3.2.1 Základní definice .....	14
3.2.2 Historie .....	14
3.2.3 Živný roztok.....	15
3.2.4 Substrát .....	19
3.2.5 Pěstební systémy.....	21
3.2.6 Pěstované plodiny .....	26
3.2.7 Souhrnné hodnocení .....	28
<b>3.3 (Vermi-)kompost .....</b>	<b>29</b>
3.3.1 Základní definice a procesy .....	29
3.3.2 Charakteristické vlastnosti.....	32
3.3.3 (Vermi-)kompostový čaj.....	33
3.3.4 Využití v hydroponii.....	35
<b>3.4 Digestát a fugát.....</b>	<b>36</b>
3.4.1 Základní definice a procesy .....	36
3.4.2 Charakteristické vlastnosti.....	37
3.4.3 Využití v hydroponii.....	37
<b>3.5 Akvakultura a akvaponie .....</b>	<b>38</b>
3.5.1 Akvakulturní kal .....	38
3.5.2 Recirkulační akvakulturní systémy a akvaponie .....	39
3.5.3 Úpravy akvakulturního kalu .....	39
3.5.4 Využití akvaponie .....	40
<b>4 Materiál a metody .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Pěstební prostor.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Uspořádání.....	41
4.1.2 Mikroklimatické podmínky .....	41
4.1.3 Osvětlení.....	41
<b>4.2 Rostlinný materiál.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3 Hydroponický experiment.....</b>	<b>42</b>
4.3.1 Stručný popis .....	42

4.3.2	Výživové varianty .....	44
4.3.3	Vzorkování roztoků .....	45
4.3.4	Vzorkování, skladování a homogenizace biomasy .....	45
<b>4.4</b>	<b>Laboratorní analýzy.....</b>	<b>46</b>
4.4.1	Prvkové složení nadzemní biomasy rostlin .....	46
4.4.2	Prvkové složení živných roztoků .....	46
<b>4.5</b>	<b>Statistické analýzy dat .....</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>49</b>
5.1	Výnosy .....	49
5.2	Prvkové složení nadzemní biomasy .....	49
5.2.1	Salát .....	49
5.2.2	Polníček .....	50
5.3	Prvkové složení živných roztoků.....	50
5.4	Doplňkové měření fyzikálně-chemických parametrů roztoků .....	51
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>55</b>
6.1	Výnosy a prvky v nadzemní biomase .....	55
6.1.1	Salát .....	55
6.1.2	Polníček .....	55
6.2	Role prvků v roztoku .....	56
6.3	Role fyzikálně-chemických parametrů roztoku .....	58
6.4	Limity při realizaci experimentu .....	59
6.5	Hypotézy.....	60
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>Terminologický slovníček.....</b>	<b>63</b>
<b>9</b>	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>64</b>

# 1 Úvod

Četné antropogenní aktivity, rychlá urbanizace, nárůst početnosti lidské populace a ekonomický růst – to všechno vyústilo v produkci velkého množství tuhého odpadu po celém světě za posledních několik desetiletí (Chowdhury et al. 2023). V minulosti bylo toto znečištění více tolerováno, neboť populace byla řidší a odpadní produkty převážně organického původu mohla příroda relativně snadno zpětně absorbovat. Nicméně s nárůstem hustoty obyvatelstva dochází také k exponenciálnímu nárůstu odpadních produktů (Bajsa et al. 2003). Vzrůstající objem organického odpadu (až cca 46 % celkového množství tuhého odpadu; Sharma & Garg 2018) výrazně komplikuje likvidaci odpadu jak v rozvojových, tak i v rozvinutých zemích (Mupondi et al. 2010).

Organický odpad je slibným zdrojem živin pro produkci plodin (Bergstrand et al. 2020) a energie, přičemž jeho přeměnou vzniká produkt s přidanou hodnotou. Tento význam je též zvýrazněn celosvětovou dostupností odpadu organického původu a nedostatkem fosilních paliv (Sharma & Garg 2018; Chavan et al. 2022). V kontextu rostoucího povědomí o vlivu potravin na člověka a životní prostředí nabízí organická hnojiva, vyráběná z recyklovaného odpadu, perspektivní cestu ke zlepšení kvality potravin a ochraně lidského zdraví. Taková hnojiva představují ekologicky šetrnou alternativu k minerálním hnojivům (Abou-El-Hassan & Desoky 2013).

Velkou výzvu představuje využití organických hnojiv v hydroponických systémech (Bergstrand et al. 2020). Hydroponické systémy s živnými roztoky představují inovativní metodu bezpůdního pěstování plodin. Jejich hlavními výhodami jsou zlepšení výnosů a kvality produktů, úspora vody a půdy, recyklace živin a kontrola patogenů (Loera-Muro et al. 2021). Jedná se o alternativní řešení pro nasycení hladovějící populace bez škodlivých dopadů na životní prostředí (Texier 2022). V souvislosti s ekologickou udržitelností však vyvstávají otázky ohledně používání anorganických látek jako zdrojů živin v roztocích. Toto je často diskutováno v kontextu ekologického zemědělství, kde mnozí argumentují, že by se mělo omezit používání těchto látek (NOSB 2016). Proto je základem technologií pro udržitelnou a cirkulární produkci potravy organická hydroponie (Park & Williams 2024).

Aerobní kompostování a vermikompostování (též žížalí kompostování) se staly široce využívanými metodami recyklace organického odpadu na vysoce kvalitní hnojiva, bohatá na živiny a mikroorganismy pro růst zdravých a produktivních rostlin (Adhikary 2012; Gómez-Brandón et al. 2015; Kim et al. 2015). Výsledkem těchto a následných procesů přitom není jen pevný, ale i kapalný produkt (neboli výluh). Využití vodných výluhů z (vermi-)kompostu v hydroponických systémech bohužel není dosud zcela prozkoumáno (Arancon et al. 2019), ale Loera-Muro et al. (2021) či Pilla et al. (2023) zmiňují možnost náhrady anorganických hnojiv výluhy pro dosažení udržitelné zemědělské produkce šetrné k životnímu prostředí. (Vermi-)kompostování je doporučeno jako čistá a udržitelná technologie pro přeměnu akvakulturního kalu produkovaného při chovu ryb v akvakultuře (Kouba et al. 2018). Toto téma bylo nedávno zpracováno v diplomové práci Kolářová (2023), přičemž zpracování kalu z akvakultury pro využití v hydroponii (v podobě výluhů z vermikompostu) by mohlo vést k uzavření cyklu živin.



## **2 Vědecké hypotézy a cíle práce**

Cílem této práce bylo popsat přednosti a nedostatky použití vodných výluhů připravených z (vermi-)kompostů při hydroponickém pěstování rostlin. Teoretická část se zabývala významem hydroponie, hydroponickým pěstováním plodin a využitím hnojiv v této pěstivelské technologii. Praktická část byla věnována využití výluhu z vermikompostů vyprodukovaných z akvakulturního kalu.

V tomto smyslu byly formulovány následující vědecké hypotézy:

- (1) Využití vodných výluhů v hydroponii je možné a efektivní.
- (2) Vodné výluhy z vermikompostů zvyšují výnosy plodin.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Výživa rostlin

#### 3.1.1 Základní požadavky

Rostliny jsou autotrofní organismy schopné přeměňovat látky anorganické na organické. S využitím slunečního záření o vlnovém rozsahu 400-700 nm (pásmo fotosynteticky aktivního záření) dochází k tvorbě energeticky bohatých organických sloučenin (cukrů) z jednoduchých anorganických látek ( $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ). Při oxygenním fotosyntetickém procesu se mění přijatá energie záření na energii chemických vazeb a uvolňuje se kyslík ( $\text{O}_2$ ). Procesem s opačným průběhem je respirace (buněčné dýchání) (Begon et al. 2006).

Tři hlavní biogenní prvky C, H a O tvoří většinu sušiny rostlin, a to až 96 % (45 % C, 45 % H, 6 % O). Jak C, tak O přijímají rostliny v plynné formě: prvně jmenovaný v podobě  $\text{CO}_2$  listy z okolní atmosféry, zatímco ten druhý v podobě  $\text{O}_2$  převážně kořeny (vzdušný kyslík či rozpuštěný ve vodě). Většina atomů H (a též část atomů O) pochází z vody. Pro dokončení celého životního cyklu včetně vývoje dospělé rostliny jsou ovšem nezbytné i další prvky, jejichž zastoupení v biomase je mnohem menší. Takové makro- a mikroživiny získává rostlina pomocí kořenů ze živného roztoku (tj. růstového média a zdroje vody a živin) (Roberto 2003). Obecně platí, že rostliny jsou životně závislé na tom prvku, jenž je v jejich prostředí obsažen nejméně (tzv. Liebigův zákon minima) (Begon et al. 2006).

#### 3.1.2 Mechanismy absorpce

Rostliny vstřebávají živiny jak organického, tak anorganického původu. Organické živiny mohou být přijímány až po jejich rozložení působením mikroorganismů, zatímco ve vodě rozpuštěné minerální soli mohou reagovat s rostlinami okamžitě (Bergstrand et al. 2020; Texier 2022). Z hlavních mechanismů podílejících se na výživě rostlin je tedy nejdůležitější absorpce, jež u většiny živin probíhá v iontové formě po hydrolýze solí rozpuštěných v živném roztoku. Aktivní kořeny jsou hlavním orgánem rostliny, jenž se podílí na vstřebávání živin. Anionty a kationty jsou vstřebávány z živného roztoku, a jakmile se dostanou dovnitř rostliny, způsobují výstup protonů ( $\text{H}^+$ ) nebo hydroxylů ( $\text{OH}^-$ ), udržující rovnováhu mezi elektrickými náboji (Haynes 1990). Tento proces může při zachování iontové rovnováhy způsobit změny pH roztoku v závislosti na množství a kvalitě absorbovaných živin (při výstupu  $\text{H}^+$  se pH snižuje, naopak se zvyšuje při uvolnění  $\text{OH}^-$ ). Praktický význam tohoto procesu je následující: zajistit dostatečnou pufrovací schopnost živného roztoku (v případě potřeby přidat hydrogenuhlíčitany) a vyvolat mírné změny pH výběrem hnojiva (Maucieri et al. 2019).

Na příjem živin mají zásadní vliv klimatické podmínky, zejména teplota vzduchu a substrátu či relativní vlhkost (Pregitzer & King 2005; Masclaux-Daubresse et al. 2010). Obecně platí, že nejlepší růst rostlin probíhá tam, kde jsou malé rozdíly mezi teplotou substrátu a vzduchu. Trvale vysoké hodnoty teploty v kořenovém systému mají negativní vliv: např. se zde zvyšuje spotřeba kyslíku. Naopak při nízké teplotě se akumuluje  $\text{NH}_4^+$ , vedoucí k poškození kořenového systému a nadzemní biomasy. Nízké teploty na úrovni kořenů ovlivňují příjem K a P, stejně jako stopových prvků (viz níže): zejména Cu, Zn, Mn a Mo (Tindall et al. 1990;

Fageria et al. 2002). O antagonistických či synergických účincích různých prvků, stejně jako vlivu pH, konduktivity či charakteru substrátu, více viz kap. 3.1.3, 3.2.3 a 3.2.4.

### 3.1.3 Základní živiny, jejich role a antagonismy

Vhodný management výživy rostlin vyžaduje základní znalosti o příjmu a využití makro- a mikroživin (Sonneveld & Voogt 2009). Makroživiny (základní a doplňkové) jsou potřebné v relativně velkém množství, kdežto mikroživiny (stopové prvky) postačují v malém množství. Dostupnost živin pro rostliny představuje víceméně konzistentní jevy synergie a antagonismu (Maucieri et al. 2019).

Kromě tří strukturálních prvků (C, H, O) lze rozlišit tři další skupiny prvků: *základní* (N, K, P), *doplňkové* (Ca, Mg, S) a *stopové* (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo, Cl). Uvedené prvky tvoří 16 základních minerálů sloužících k výživě rostlin (Texier 2022), přičemž někdy se k nim přidává ještě Ni (Salisbury & Ross 1992). S výjimkou strukturálních prvků přijímaných převážně z atmosféry jsou další prvky získávány z růstového média (George & George 2016; Velazquez-Gonzalez et al. 2022).

#### Strukturální prvky

*Uhlík* (C) tvoří páteř rostliny, stejně jako všeho živého. Je nutný k tvorbě sacharidů (cukrů), proteinů (bílkovin), nukleových kyselin a dalších sloučenin. Ve formě cukrů funguje jako skladiště energie (Texier 2022). Uhlík tvoří cca 50 % suché hmoty rostliny (Roberto 2003).

*Vodík* (H) je součástí všech organických molekul a je nezbytný k výrobě cukrů. Účastní se i mnoha reakcí včetně výměny elektrických nábojů a absorpce jiných prvků (Texier 2022). Voda (H<sub>2</sub>O) udržuje pevnou strukturu rostliny díky tzv. turgorovému (vnitrobuněčnému) tlaku: pokud má rostlina nedostatek vody, začne ztrácet tlak a vadnout (Roberto 2003).

*Kyslík* (O) je zodpovědný za buněčné dýchání rostliny. Tento prvek hraje klíčovou roli ve fotosyntéze: může být skladován pro energii nebo uvolňován jako vedlejší produkt (Texier 2022).

#### Základní prvky

*Dusík* (N) je rostlinami přijímán za účelem produkce aminokyselin a nukleových kyselin, proteinů, enzymů a chlorofylu (Maucieri et al. 2019). Ze všech uvedených prvků má právě dusík zcela zásadní vliv na růst rostlin (Texier 2022). Hraje klíčovou roli ve struktuře chlorofylu a aminokyselin, což vysvětluje, proč rostliny vyžadují velké množství N (Wiedenhoeft 2006). Mezi nejvyužívanější formy N pro výživu rostlin patří dusičnany (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Dusičnany jsou rychle vstřebávány kořeny, uvnitř rostlin se velmi rychle pohybují a mohou být ukládány bez výraznějších toxických účinků. Amonium mohou rostliny absorbovat v malém množství, při vysokém množství již působí toxicky. Nadbytek N způsobuje vysoký vegetativní růst, prodloužení délky vegetačního cyklu, výrazné zelené zbarvení listů, vysoký obsah vody v pletivech či nízkou lignifikaci pletiv. Naopak nedostatek N se vyznačuje bledě zeleným zbarvením starších listů (chloróza), sníženým růstem a také předčasným stárnutím (Maucieri et al. 2019).

*Draslík* (K) je nezbytný pro dělení a prodlužování buněk, syntézu proteinů, aktivaci enzymů a fotosyntézu a působí také jako přenašeč dalších prvků a sacharidů přes buněčnou membránu. Má důležitou úlohu při udržování osmotického potenciálu buňky v rovnováze

(reguluje pohyb vody v rostlinách) (Maucieri et al. 2019). Příznaky nedostatku K se projevují v podobě žlutavých skvrn, jež velmi rychle nekrotizují na okrajích starších listů (tzn. dochází k odumírání pletiv). Takové rostliny jsou náchylnější k náhlým poklesům teploty, vodnímu stresu a napadení houbami (Wang et al. 2013). Nadbytek  $K^+$  iontů v živném prostředí se může projevit vedlejšími antagonistickými nebo synergickými účinky. Brzdí příjem  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Na^+$  aj. (v důsledku toho se na rostlině mohou projevit příznaky jejich nedostatku), naopak se zvyšuje příjem  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  aj. (Pulkrábek 2007).

*Fosfor (P)* stimuluje vývoj kořenů, rychlý růst pupenů a množství květů. Fosfor se velmi snadno vstřebává a může se hromadit, aniž by došlo k poškození rostliny. Jeho základní úloha je spojena s tvorbou vysokoenergetických sloučenin (ATP) nezbytných pro metabolismus rostlin (Maucieri et al. 2019). Průměrné množství požadované rostlinami je spíše skromné (10 až 15 % N a K) (Le Bot et al. 1998). Zdá se, že absorpci P snižují nízké teploty substrátu či vyšší hodnoty pH, což může vést k nedostatku prvku (Vance et al. 2003). Příznaky se projevují zelenofialovým zbarvením starších listů, doprovázené mj. jejich zpomaleným růstem. Naopak nadbytek P může snižovat nebo blokovat příjem některých dalších živin (např. K, Cu, Fe) (Uchida 2000).

#### Doplňkové prvky

*Vápník (Ca)* se podílí na tvorbě buněčné stěny, propustnosti membrán, dělení a také prodlužování buněk (Maucieri et al. 2019). Příjem Ca je velmi úzce spojen s tokem vody mezi kořeny a nadzemními částmi. Její pohyb je ovlivňován zejména nízkými teplotami na úrovni kořenů, sníženým přísunem vody (sucho či zasolení roztoku) nebo nadměrnou relativní vlhkostí vzduchu. Jelikož Ca není v rostlině pohyblivý, jeho nedostatek začíná v nejnověji vytvořených částech (Adams & Ho 1992). Hlavními příznaky jsou zakrňlost rostlin, deformace okrajů mladších listů, světle zelené zbarvení nových pletiv a zakrňlý kořenový systém bez jemných kořenů (Maucieri et al. 2019). Nadbytek Ca rostlinám v podstatě neškodí (kromě kalkofobních, např. vřesovištních, rostlin) (Hrudová 2011).

*Hořčík (Mg)* se podílí na stavbě molekul chlorofylu. Při  $pH < 5,5$  je Mg imobilizován a vstupuje do konkurence s absorpcí K a Ca (Maucieri et al. 2019). Příznaky nedostatku Mg jsou žloutnutí mezi listovými žilkami a vnitřní chloróza bazálních listů rostlin. Takové rostliny nejprve odbourávají chlorofyl ve starších listech a transportují Mg do mladších listů. Proto je prvním příznakem nedostatku Mg chloróza ve starších listech – na rozdíl od nedostatku Fe, kdy se chloróza objevuje nejprve v nejmladších listech (Sonneveld & Voogt 2009). Nadbytek Mg způsobuje redukci tvorby kořenů a následně také nadzemní hmoty rostlin (Hrudová 2011).

*Síra (S)* hraje významnou roli při zmírnění poškození fotosyntetického aparátu rostlin, způsobeného nedostatečným množstvím Fe (Muneer et al. 2014). Pro optimální vstřebávání musí být přítomna v poměru 1:10 s N (McCutchan et al. 2003). Nedostatek S není snadné zjistit, protože jeho příznaky lze zaměnit s příznaky nedostatku N (jen s tím rozdílem, že nedostatek S se začíná projevovat od nejmladších listů) (Schnug & Haneklaus 2005). Nadbytek S může vyvolat předčasný opad listů (Hrudová 2011).

#### Stopové prvky

*Železo (Fe)* je klíčová mikroživina pro mnoho biologických procesů včetně fotosyntézy (Briat et al. 2015; Heuvelink & Kierkels 2016). Aby se zlepšila jeho absorpce, mělo by se pH

živného roztoku pohybovat mezi 5,5 až 6,0. Obsah Mn by přitom neměl být příliš vysoký, protože tyto dva prvky si následně konkurují. Optimální poměr Fe:Mn je pro většinu plodin přibližně 2:1 (Sonneveld & Voogt 2009). Při nízkých teplotách se účinnost využití Fe snižuje. Příznaky nedostatku Fe charakteristické chlorózou od mladých listů směrem ke starším bazálním listům a sníženým růstem kořenového systému jsou často způsobeny nedostupností samotného prvku pro rostlinu (stálou dostupnost Fe zaručuje použití chelatačních činidel) (Maucieri et al. 2019). Naopak nadbytek Fe se projevuje bronzovitým zbarvením listů a také vznikem drobných hnědavých skvrnek (Hrudová 2011).

*Měď* (Cu) se podílí na dýchacích a fotosyntetických procesech (Maucieri et al. 2019). Její absorpce je snížena při hodnotách pH > 6,5, zatímco hodnoty pH < 5,5 mohou mít toxické účinky (Rooney et al. 2006). Hladiny NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a P se vzájemně ovlivňují s Ca a snižují její dostupnost (Maucieri et al. 2019). Nedostatek Cu se projevuje chlorózou vedoucí k rozpadu listových pletiv, jež vypadají jako vysušená (Gibson et al. 2008). Nadbytek Cu ovlivňuje negativně příjem Fe, proto se projevuje chlorózou. Mezi žilkami listů se navíc objevují žlutavé až bělavé skvrnky (Hrudová 2011).

*Zinek* (Zn) hraje důležitou roli v některých enzymatických reakcích. Jeho vstřebávání je silně ovlivněno pH (doporučené hodnoty 5,5–6,5) a přísunem P v živném roztoku. Nízká teplota a vysoká hladina P snižují množství Zn absorbovaného rostlinou (Maucieri et al. 2019). Nedostatek Zn se obecně vyskytuje vzácně a je reprezentován chlorotickými skvrnami na listech a/nebo slabým růstem (Gibson et al. 2008). Při nadbytku Zn dochází k redukci růstu listů a kořenů, negativně je také ovlivňován příjem P a Fe (Hrudová 2011).

*Mangan* (Mn) je součástí mnoha koenzymů a podílí se mj. na prodlužování kořenových buněk a jejich odolnosti vůči patogenům. Jeho dostupnost je řízena pH živného roztoku a konkurencí s jinými živinami (Maucieri et al. 2019). Příznaky nedostatku Mn jsou podobné jako u Fe (Uchida 2000). Nápravu lze provést např. snížením pH roztoku (Maucieri et al. 2019). Nadbytek Mn způsobuje chlorózu, na rubu listů jsou hnědavé skvrnky, jež mohou splývat. Při nadměrně vysoké hladině odumírají listy, příp. celé rostliny (Hrudová 2011).

*Bor* (B) je nezbytný pro utváření plodů a vývoj semen. Metody absorpce jsou podobné jako u Ca, s nímž si může konkurovat. Hodnota pH živného roztoku musí být nižší než 6,0 (optimálně 4,5–5,5). Příznaky nedostatku B lze zjistit u novotvarů (jeví se jako tmavě zelené), mladé listy pak výrazně zvětšují svou tloušťku a mají kožovitou konzistenci. Následně se mohou jevit jako chlorotické a poté nekrotické, s rezavým zbarvením (Maucieri et al. 2019). Nadbytek B se projevuje u starších listů chlorózou a pokračující okrajovou nekrotózou (Hrudová 2011).

*Molybden* (Mo) je nezbytný pro syntézu proteinů v metabolismu N. Na rozdíl od ostatních mikroživin je lépe dostupný při neutrálních hodnotách pH (Maucieri et al. 2019). Příznaky jeho nedostatku začínají chlorózou starších listů, zatímco mladé listy se jeví jako deformované (Gibson et al. 2008). Při pěstování rostlin běžně nebývá vliv nadbytku Mo pozorován; pokud k tomu dojde, je provázen červenožlutou chlorózou listů (Hrudová 2011).

*Chlor* (Cl) je v poslední době považován za mikroživinu, i když jeho obsah v rostlinách je poměrně vysoký. Podílí se mj. na fotosyntetických reakcích. Rostlina jej snadno absorbuje a je v ní velmi pohyblivý. Nedostatek Cl je spíše vzácný a projevuje se typickými příznaky zasychání listů (zejména na okrajích). Mnohem rozšířenější je poškození v důsledku nadbytku Cl, jež vede k nápadnému scvrkávání rostlin (Maucieri et al. 2019).

## Další prvky

Výše uvedené prvky mají zcela jasnou fyziologickou roli a jejich absence brání úplnému životnímu cyklu rostliny (Taiz & Zeiger 1998). Ostatní prvky, jako jsou Na, Si, V, Se, Co, Al či I, jsou považovány za prospěšné, jelikož některé z nich mohou stimulovat růst, kompenzovat toxické účinky jiných prvků a/nebo nahradit základní minerály v méně specifické roli (Trejo-Téllez et al. 2007).

## **3.2 Hydroponie**

### **3.2.1 Základní definice**

Hydroponie je metoda pěstování rostlin ve vodě obohacené o rozpuštěné živiny (v živném roztoku). Slovo hydroponie pochází z kořene slov "hydro" (voda) a "ponos" (práce) – doslova "pracující voda" (Shrestha & Dunn 2010). Při hydroponii se nepoužívá půda, přičemž kořenový systém je buď přímo ponořen v živném roztoku, nebo upevněn v inertním substrátu. Základním principem této metody je umožnit kořenům rostliny přímý kontakt s živným roztokem a zároveň přístup ke kyslíku (Texier 2022).

### **3.2.2 Historie**

Koncept pěstování rostlin ve vodě bohaté na živiny se praktikuje po staletí. Nejstarší známé příklady hydroponie jsou vyobrazeny již na zdech egyptského chrámu Deir El Bahari, starých více než 4000 let (Raviv & Lieth 2008). Hydroponické pěstování bylo využíváno také v babylonských visutých zahradách (jednoho ze sedmi divů světa), postavených cca 600 př. n. l. (Texier 2022). Předpokládá se, že tyto zahrady byly zavlažovány pomocí systému tzv. řetězového tahu, jenž přiváděl vodu z řeky nahoru a umožňoval její stékání na každý schod nebo podestu zahrady (Dubey & Nain 2020). Dalším příkladem jsou plovoucí zahrady Aztéků v Mexiku z 10. až 11. století, zvané také chinampas (jde o technologii získávání nového území především pro zemědělské účely výstavbou umělých ostrovů ve vodách jezer) (Aghajanian 2018). K vytvoření těchto zahrad byl ze dna jezer odebrán sediment a ten umístěn do horní části vorů vyrobených z rákosy a kukuřice. Kořeny rostlin procházely jak sedimentem, tak vorem a dostávaly se do vody jezera bohaté na živiny (Dubey & Nain 2020; Texier 2022). Tímto způsobem prosperovaly rozmanité plodiny včetně zeleniny, květin a stromů (Aghajanian 2018). Podobné plovoucí zahrady jsou později známy také z dalších oblastí světa, např. z Číny (Dubey & Nain 2020; Texier 2022).

Teprve později, v souvislosti s porozuměním problematice fyziologie rostlin, začaly být prováděny vědecké experimenty zaměřené na růst a živinový režim rostlin. Belgičan Jan Van Helmont v roce 1600 zjistil, že rostliny mohou získávat látky potřebné pro růst z vody (Schwarz 1995). V roce 1699 anglický botanik John Woodward jako první experimentálně dokázal, že rostliny získávají živiny z půdy pomocí vody (Dubey & Nain 2020; Texier 2022), nicméně nebyl schopen určit konkrétní pěstební prvky. Až o dalších sto let později francouzští vědci De Saussure a Boussingault zjistili, že rostliny ke zdravému růstu vyžadují uhlík, vodík, kyslík a dusík. Německý vědec Julius von Sachs společně s odborníkem na chemii v zemědělství Wilhelmem Knopem v roce 1860 k těmto prvkům přidali ještě fosfor, síru, draslík, vápník a

hořčík (Schwarz 1995). Představili recept na živný roztok, po jehož přidání do vody v ní bylo možné pěstovat rostliny, a definovali základy pěstování rostlin na vodní bázi. Od té doby se tato forma pěstování začala těšit větší pozornosti a na základě přidávání anebo ubírání živin se postupně podařilo zjistit, které z nich jsou pro růst rostlin životně nezbytné, a které naopak může rostlina oželeť (Texier 2022). Vědecký pokrok vedl ke zjištění, že pro zdravý růst rostlin jsou kromě již zmíněných prvků potřeba i tzv. mikroprvky (mangan, molybden, chlor, železo, zinek, měď a bor) (Schwarz 1995). Dr. William F. Gericke ze Spojených států amerických se hydroponickému pěstování věnoval na začátku 20. století a je považován za zakladatele moderní hydroponie. Jako první opustil laboratoř a začal provozovat hydroponii jako komerční způsob pěstování rostlin. Také vymyslel a uvedl do praxe i samotný výraz hydroponie (v roce 1937) (Shrestha & Dunn 2010; Hussain et al. 2014; Dubey & Nain 2020; Texier 2022). K jejímu rozvoji přispěli i Dennis Hoagland a Daniel Arnon, již zjistili, že hydroponicky vypěstované plodiny mohou být kvalitnější než ty získané při tradičním způsobu pěstování v půdě (Dubey & Nain 2020).

Ve velkém měřítku se vědecký zájem o hydroponii objevil za druhé světové války. Tehdy armáda Spojených států amerických zřídila hydroponické jednotky na vojenských základnách na několika ostrovech v západním Pacifiku, aby během války poskytovaly vojákům čerstvé produkty (Shrestha & Dunn 2010). Jedna z prvních velkých farem byla založena na ostrově Ascension v jižním Atlantiku. Půda na ostrově byla zcela neúrodná, což z něj činilo ideální místo pro využití hydroponie. Nicméně až do 70. let 20. století trvalo, než se tato metoda začala více rozšiřovat. Tehdy totiž plasty osvobodily pěstitele od nákladné konstrukce a destruktivních vlastností prvních součástí systému. Díky vývoji plastových rozvodů stejně jako čerpadel, časovačů a účinných substrátů bylo možné hydroponické systémy automatizovat a zefektivnit, což snížilo investiční i provozní náklady (Patterson 2019). Mimo to Lawrence Brooke ze Spojených států amerických svými úpravami hydroponických systémů zajistil, že je mohli začít využívat i domácí pěstitelé (Texier 2022). Moderní hydroponické technologie dnes nacházejí využití v řadě zemí, jako jsou Nizozemsko, Francie, Izrael, Kanada, USA, Japonsko, Indie či Austrálie (George & George 2016; Sharma et al. 2018). V extrémních podmínkách (např. výzkumné stanice v odlehlých koutech světa či bezpečnostní úkryty) představují jediný zdroj čerstvých potravin (Texier 2022). NASA v posledních letech dokonce provádí výzkum využití hydroponie pro svůj projekt "Controlled Ecological Life Support System" i na Marsu (Wheeler 2010).

### 3.2.3 Živný roztok

Živný roztok pro hydroponické systémy je vodný roztok obsahující hlavně anorganické ionty z rozpustných solí prvků nezbytných pro (vyšší) rostliny. Živiny mohou pocházet z hnojiv dostupných na trhu nebo lze připravit umělé standardní či hybridní živné roztoky (Taiz & Zeiger 1998). Vlastní receptury živin zahrnují nejrůznější typy roztoků včetně Cooperova, Imaiova, Massantiniho a Hoaglandova roztoku (Karimaei et al. 2001; Shah & Shah 2009), přičemž Hoaglandův roztok patří mezi jedny z těch nejčastěji používaných (Sharma et al. 2018). Tento způsob přípravy živných receptur je znám také jako metoda „made-from-scratch“ (v překladu „vytvořeno úplně od začátku“) (Mattson & Peters 2014). Mattson & Peters (2014) uvádí, že pro malé pěstitele je obtížné řídit koncentrace živin při přípravě vlastních hydroponických receptur.

Hlavní potíží při sestavování výživového receptu pro roztok spočívá v tom, že základní a doplňkové prvky nejsou dostupné samostatně, ale vždy v párech, stejně jako všechny minerální soli (např. N se dodává v podobě dusičnanu draselného, amonného či vápenatého). Stopové prvky fungují na jiném principu: do roztoku se přidávají jako součást chelátů nebo sulfátů. Cheláty jsou velké, uměle vytvořené organické molekuly, jež izolují tyto prvky. Ve chvíli, kdy dojde k vyčerpání nějakého prvku, rozevřou se a dojde k jeho dalšímu uvolnění do roztoku. Bohužel jde o nejdražší položku z celého roztoku, a proto mnoho výrobců a pěstitelů dává přednost levnějším sulfátům (mají však takřka nulovou pufrací kapacitu, což se může projevit na chuti výsledného produktu) (Texier 2022). Veškeré uvedené překážky vedly k zájmu o komerčně připravovaná hnojiva rozpustná ve vodě. Tato metoda je známa i jako metoda jednoho nebo dvou sáčků a je vhodná pro hydroponickou produkci (Shah & Shah 2009; Mattson & Peters 2014).

Hydroponie může být i *organická*, přičemž lze uvažovat o zdrojích živin různého původu: živočišného (hnůj, odpadní produkty ryb, (vermi-)kompostový čaj), rostlinného (vedlejší produkty z cukrovarů, lihovarů a mlýnského zpracování kukuřice, (vermi-)kompostový čaj) a řasového (přímá aplikace řas či využití extraktů) (Texier 2022; Park & Williams 2024). Mimo to jsou na vzestupu také organické materiály, jež prošly procesem anaerobní digesce (více viz kap. 3.4.1) (Park & Williams 2024). Organická hnojiva z hlediska obsahu prvků sice někdy nelze zcela poměřovat s tradičními anorganickými hnojivy (Eudoxie & Martin 2019; Texier 2022; Vambe et al. 2023), avšak do hydroponických systémů mohou vstupovat prospěšné mikroorganismy. Zpřístupňují živiny, potlačují choroby, některé z nich fixují dusík a dále zlepšují dostupnost živin, a jiné podporují růst kořenů a tvorbu biofilmů pro zlepšení účinnosti příjmu živin (Shinohara et al. 2011; Chinta et al. 2015; Saijai et al. 2016; Hooks et al. 2022). Proto se někdy hovoří o *bioponii*, přičemž mikroorganismy mohou být k hnojivům i přímo přidávány (Fang & Chung 2018; Texier 2022; Park & Williams 2024). V současnosti se vyvíjejí nové technologie pro znovuvyužití produktů rozkladu organické složky tuhých odpadů jako zdrojů živin (Park & Williams 2024).

Někteří autoři zkoumali i možnost využití odpadních vod v hydroponii. Vaillant et al. (2003) či Sutar et al. (2018) kromě podpory růstu rostlin popisují pozitivní vliv na proces čištění odpadních vod, kdy došlo k výraznému poklesu parametrů CHSK (82, resp. 57 %) a BSK (91, resp. 52 %), udávajících množství spotřebovaného kyslíku pro odstranění znečišťujících látek. Sutar et al. (2018) však upozorňují na přítomnost bakterií způsobujících skvrnitost listů. Lee et al. (2021) se zajímali o aplikaci přečištěných odpadních vod jakožto živného hydroponického média a zjistili, že lze dosáhnout příznivých výsledků při produkci plodin za předpokladu využití nitrifikačních procesů při úpravě odpadních vod. Navíc zdravotní riziko pro člověka při konzumaci vypěstovaných produktů bylo z hlediska těžkých kovů shledáno jako nevýznamné.

Parametry definující živný roztok jsou podrobně popsány v následujících odstavcích.

## Teplota

Udržování teploty roztoku je zásadní vzhledem k jejímu ovlivnění kyslíkového režimu a metabolismu rostlin. Ideální rozmezí hodnot se udává 18 až 24 °C (Texier 2022), nicméně je třeba zohlednit i druh rostliny. Vysoká teplota prostředí podporuje nežádoucí morfologické a biochemické změny u různých druhů zeleniny. Např. u čínské zelí byl zjištěn snížený růst či naopak vyšší míra hořkosti a tuhosti listů, snižující komerční hodnotu produktu (Midmore



2015; Churilova & Midmore 2019). Růst většiny rostlin lze označit jako nedostatečný při teplotě v kořenové zóně nižší než 20 °C a vyšší než 30 °C (Benton Jones 2014). Nízká teplota souvisí s dostatkem kyslíku a pomalejším metabolismem. Vyšší teploty sice vedou ke snížení obsahu kyslíku a nebezpečí úhynu kořenů, na druhou stranu slibují rychlejší růst (Churilova & Midmore 2019; Texier 2022).

Teplota prostředí také významně reguluje metabolismus a dynamiku mikrobiálních společenstev v organických roztocích (Churilova & Midmore 2019).

### Kyslík

Zajištění dostatečného prokysličení roztoku je důležité z hlediska růstu a metabolické aktivity kořenů (Park & Williams 2024). Koncentrace O<sub>2</sub> by měla být držena na úrovni blízko přirozené saturace, tzn. 8 až 9 mg/l (v rámci běžného rozsahu teploty kontrolovaného prostředí pro produkci plodin) (Moran 2018). Pro splnění tohoto požadavku je třeba zajistit kontinuální a dostatečnou zásobu kyslíku, čehož lze dosáhnout tekoucím roztokem nebo jeho probublávání vzduchem (Churilova & Midmore 2019; Langenfeld et al. 2022).

Přítomnost organických hnojiv v hydroponických systémech může vést k poklesu úrovně O<sub>2</sub> vzhledem k procesu mikrobiálního rozkladu organické hmoty (Kano et al. 2021), přičemž koncentrace rozpuštěného kyslíku v daném prostředí ovlivňuje i chování mikrobioty v roztoku (Churilova & Midmore 2019).

### pH

Parametr pH stanovuje kyselost nebo zásaditost roztoku. Tato hodnota označuje vztah mezi koncentrací volných iontů (H<sup>+</sup> a OH<sup>-</sup>) přítomných v roztoku, přičemž se pohybuje mezi 0 a 14. Změna pH živného roztoku ovlivňuje speciaci a biologickou dostupnost prvků. Termín „speciace“ označuje rozložení prvků mezi jejich různé chemické a fyzikální formy, jako jsou volné ionty, rozpustné komplexy, cheláty, iontové páry, pevná a plynná fáze či různé oxidační stavy (De Rijck & Schrevens 1998). Důležitou vlastností živných roztoků je, že musí obsahovat ionty v roztoku v takových formách, jež mohou být absorbovány rostlinami: produktivita rostlin tedy úzce souvisí s příjmem živin a regulací pH (Marschner 1995). Každá živina vykazuje rozdílné reakce na změny pH živného roztoku. Například dusík ve formě NH<sub>3</sub> tvoří komplexy s volnými ionty H<sup>+</sup>: zatímco v rozsahu pH 2–7 je zcela přítomen jako NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, při vyšších hodnotách pH se již zvyšuje koncentrace NH<sub>3</sub> na úkor NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (De Rijck & Schrevens 1999). Obecně panuje shoda na tom, že hodnota pH by se měla pohybovat od 5 do 7: při vyšším pH dochází k omezení absorpce Fe, Cu či Mn, zatímco při nižším pH je negativně ovlivněn příjem N, Ca či Mg (Lu & Shimamura 2018; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). V hydroponických systémech je obvyklé lehce kyselé prostředí (max. pH kolem 6,8), přičemž se doporučuje, aby se hodnota pH (samovolně) pohybovala kolem 6 (Texier 2022).

V bioptonii nehraje pH tak zásadní roli, horní hranici lze překročit až na 7,5. Až v tu chvíli je třeba pH pozvolna snižovat směrem k hodnotě 6. Možnosti snížení pH s využitím striktně organických látek jsou dosti omezené, přičemž je třeba se vyhýbat kyselině octové (může být toxická pro rostliny) (Texier 2022). Mikrobiálně produkované kyseliny, jako např. kyselina citronová, jsou slabší než jejich anorganické protějšky, a proto musí být dodávány do roztoku ve větším objemu pro dosažení obdobné hodnoty pH (Park & Williams 2024).

## Konduktivita (elektrická vodivost)

Celková koncentrace iontů živného roztoku určuje růst, vývoj a produkci rostlin (Steiner 1961). Celkové množství iontů rozpuštěných solí v živném roztoku působí silou zvanou osmotický tlak, což je charakteristická vlastnost živných roztoků (Landowne 2006). Hojně se používá také termín „osmotický potenciál“, jenž vyjadřuje vliv rozpuštěných látek na vodní potenciál (rozpuštěné látky totiž snižují volnou energii vody) (Taiz & Zeiger 1998). Termíny osmotický tlak a osmotický potenciál lze používat zaměnitelně (Sandoval-Villa et al. 2007). Nepřímým způsobem odhadu osmotického tlaku živného roztoku je konduktivita (elektrická vodivost; EC). EC živného roztoku představuje dobrý indikátor množství dostupných solí pro rostliny v kořenové zóně (Nemali & van Iersel 2004).

Ideální hodnota EC je specifická pro každou plodinu a závisí na podmínkách prostředí (Sonneveld & Voogt 2009); vhodné hodnoty pro hydroponické systémy se pohybují v rozmezí 1,5 až 2,5 dS/m. Zvýšená EC brání příjmu živin vzhledem k vyššímu osmotickému tlaku, zatímco snížená EC může vážně ovlivnit zdraví a výnos rostlin (Samarakoon et al. 2006). Snížení příjmu vody je též silně (lineárně) závislé na elektrické vodivosti (Dalton et al. 1997). Čím více rozpuštěných solí v roztoku, tím větší problémy s absorpcí vody budou rostliny mít. Pokud se tedy výrazně zvýší koncentrace solí (tedy i hodnota EC), kořeny nebudou vstřebávat vodu a rostlina (ač ponořená ve vodě) může uschnout. Elektrická vodivost by se přitom měla upravovat i s ohledem na teplotu. V létě budou rostliny potřebovat přijímat hodně vody (je lepší EC snížit), kdežto v zimě při obecně pomalejších procesech vyžadují silnější roztok (je lepší EC zvýšit) (Texier 2022).

Elektrická vodivost představuje nejkompexnější součást bioponie: mnoho organických molekul před zahájením mikrobiální degradace totiž nemá elektrický náboj, a jejich množství v roztoku tedy nelze přesně změřit (Texier 2022; Park & Williams 2024). Běžně se začíná s hodnotami 0,6 až 0,7 dS/m, postupně se navyšují až na 1 dS/m. Dále se dodáváním živin udržují v rozmezí 0,8 až 1 dS/m (Texier 2022).

## Složení

Složení modifikovaného Hoaglandova roztoku (Hoagland & Arnon 1938) lze v přehledné podobě nalézt v práci Al Meselmani (2022), kde se uvádí tyto koncentrace (mg/l): N 210, P 31, K 234, Ca 160, Mg 34, S 64, Fe 2,5, Cu 0,02, Zn 0,05, Mn 0,5, B 0,5, a Mo 0,01.

Běžně dostupné a využívané komerční živné roztoky označují obsah makroživin pomocí sekvence tří čísel podle koncentrace N-P-K (vyjádřené v hmotnostních %). Jako příklad lze uvést roztoky 8-15-16, resp. 8-15-36 pro pěstování salátu, resp. rajčat (Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Často se používají dvousložková hnojiva (část A + B), rozmíchaná v doporučeném množství ve vodě dle návodu (Churilova & Midmore 2019; Harahap et al. 2020; Wang et al. 2023). Složení živného roztoku lze též modifikovat pro optimalizaci růstu plodin pěstovaných v hydroponickém systému. Například pro čínskou brukev (druh čínského zelí) se uvádí tyto relativní hmotnostní podíly: N 1,00 (NO<sub>3</sub>-N 0,93 + NH<sub>4</sub>-N 0,07), P 0,2, K 1,37, Ca 0,64, Mg 0,15, S 0,18, Fe 0,012, Mn 0,003, Zn 0,0017, B 0,00014, Cu 0,0002, a Mo 0,00024 (Sonneveld & Straver 1994; Bergstrand & Hultin 2014).

Zatímco při tradičním pěstování v půdě může rostlina do určité míry ovlivnit dostupnost živin uvolňováním kořenových exsudátů nebo prozkoumáváním některých nových oblastí půdy pěstováním svých kořenů, v hydroponii by všechny živiny měly být poskytovány v přiměřeném

množství nepřírozně (Page & Feller 2013). Pokud jsou tedy živiny v roztoku v nadbytku, mohou se hromadit ve struktuře rostlin a při konzumaci mohou představovat zdravotní rizika (Cavarianni et al. 2008). Pokud je přijat člověkem produkt s vysokým obsahem dusičnanů, dochází k jejich přeměně na dusitany a následně mohou dusitany v kombinaci s aminy tvořit karcinogenní sloučeniny (Boink & Speijers 1999).

### 3.2.4 Substrát

Inertní substráty při hydroponickém způsobu pěstování rostlin zajišťují ukotvení kořenů, oporu pro rostliny a vzhledem ke své mikroporozitě a kationtové výměnné kapacitě ovlivňují mechanismus výživy rostlin. Rostliny, jež se pěstují v bezpůdních systémech, se vyznačují nevyváženým poměrem výhonů a kořenů, přičemž nároky na vodu, vzduch a živiny jsou u nich mnohem vyšší než při tradičním pěstování v půdě. Pro splnění těchto požadavků je třeba použít substráty, jež samostatně anebo ve směsi zajišťují optimální a stabilní fyzikálně-chemické a výživové podmínky (Maucieri et al. 2019).

Na počátku moderního bezpůdního pěstování v 70. letech 20. století byla testována řada substrátů (Verwer 1978; Blok et al. 2008; Wallach 2008). Mnohé z nich selhaly z důvodů, jako jsou příliš velká vlhkost či naopak sucho, uvolňování toxických látek, příliš vysoké náklady a neudržitelnost (Maucieri et al. 2019). Několik typů pórovitých substrátů obstálo, přičemž musí splňovat některé požadavky, jako jsou trvanlivá struktura bez zvýšeného množství vázaných zbytků solí, neutralita (bez výraznějšího vlivu na hodnoty pH a elektrické vodivosti) či absence látek škodlivých jak pro rostliny, tak pro člověka. Prostředí musí být pravidelně zavlažováno „čerstvou“ vodou pro doplňování kyslíku v kořenové zóně – za tímto účelem by se nabízela též možnost nechat substrát zcela proschnout mezi jednotlivými závlahami, nicméně vzhledem k úhynu menších a slabších kořenů se toto spíše nedoporučuje (Texier 2022). Systémy substrátů lze rozdělit následovně, přičemž zatím neexistuje jediný substrát, jenž by bylo možné použít univerzálně ve všech situacích (Maucieri et al. 2019):

#### Vláknité substráty

Mohou být anorganické (např. rockwool) či organické (např. rašelina, kokosová vlákna či substráty na bázi dřeva).

*Rockwool* neboli kamenná vlna je nejpoužívanějším substrátem (George & George 2016), vznikajícím při tavení čedičového kamene, vápence a koksu při teplotách 1500 až 2000 °C. Zkapalněná směs se vytlačuje v tenkých vlákních, po jejichž stlačení a přidání speciálních pryskyřic lze získat velice lehký materiál s vysokou pórovitostí, poskytující vynikající ukotvení pro kořeny rostlin (Maucieri et al. 2019). Ačkoli je známý i svou nízkou pořizovací cenou, tento materiál má několik zásadních nevýhod: nerovnoměrné vsakování, výskyt zelených řas, nutnost používání ochranných pomůcek při manipulaci či postupnou ztrátu původních vlastností (není již dále využitelný) (Texier 2022).

*Rašelina* vzniká tlením zbytků rostlin bez přístupu vzduchu v přírodních podmínkách na prameništích podzemní vody a místech s trvalou akumulací vody. Ve vyšších polohách vzniká z rašelíníku, zatímco v nížinách z kyselých trav (Machovec 1976; Bedrna 1989). Jde o kyprou hmotu, jež snadno dokáže poutat vodu a minerální živiny (Fleischer & Schütz 1978; Bedrna 1989). Kvalita rašeliny je vázána na stupeň rozložení. Nejvíce kvalitní je v nejméně rozloženém

stavu, kdy si zároveň udržuje svou strukturu. Samotná rašelina je však poměrně kyselá, proto se používá ve směsích s pískem nebo pemzou. Tím se dosáhne zvýšení pH, ale zároveň dojde ke snížení schopnosti zadržovat vodu. Důležitá však je tvorba příznivějších podmínek prostředí pro prospěšné mikroorganismy (Texier 2022).

*Kokosová vlákna* se získávají odstraněním vláknitých slupek kokosových ořechů. Jsou vedlejším produktem jak tohoto procesu extrakce, tak průmyslové výroby kopry (kokosového oleje). Poté se po dobu 2–3 let kompostují, následně dehydratují a lisují. Před použitím se musí rehydratovat přidáním vody (v množství 2- až 4násobku stlačeného objemu hmoty) (Maucieri et al. 2019). Jsou kvalitním substrátem vhodným pro rozvoj prospěšných mikroorganismů (George & George 2016), jenž může při pěstování přinášet skvělé výsledky. Kokosová vlákna jsou ideální pro pěstování dlouhodobějších plodin (rajčata či okurky) nebo okrasných rostlin, protože jejich struktura se v průběhu delšího pěstování nerozpadá. Pro kořenovou zónu je proto typické vysoké provzdušnění a zachování vlhkosti, díky čemuž jsou výsledkem vysoké výnosy a dobré zdraví kořenů (Morgan 2021). Je však třeba vzít v potaz, že vlákna obsahují větší množství NaCl (kvůli namáčení kokosů v přímořských oblastech s cílem prvotního oddělení slupek) (Texier 2022). Proto se používala hlavně v otevřených systémech, aby nedocházelo k usazování solí, nicméně dnes je substrát upravován výměnou sodíkových iontů za vápníkové a lze jej používat i v uzavřených systémech (viz kap. 3.2.5). Obecně platí, že v porovnání s některými jinými substráty je při jeho použití dosahováno vyšších výnosů (Jordan et al. 2018), přičemž udržování vlhkosti lze ošetřit kombinací např. s keramzitem (viz níže) (Texier 2022).

*Substráty na bázi dřeva*, jako jsou např. dřevní štěpka, kůra nebo piliny, se používají v celosvětové komerční rostlinné produkci (Maher et al. 2008). Tyto substráty mají obecně vysoký obsah vzduchu, nicméně jejich nevýhodou může být nízká schopnost zadržovat vodu, nevhodná distribuce velikosti částic či akumulace solí a toxických látek (Dorais et al. 2006).

### Granulované substráty

Jsou obvykle anorganické (např. písek, pemza, vermikulit, perlit, keramzit), vyznačují se různou velikostí částic a vysokou pórovitostí (Texier 2022).

*Písek* představuje jeden z prvních substrátů používaných v hydroponii. Jedná se o zrna minerálů (převážně křemene) o velikosti 0,02 až 2 mm. Dnes se již příliš nepoužívá, zejména kvůli své hmotnosti a nízké schopnosti udržet vodu (George & George 2016; Texier 2022).

*Pemza* se skládá z křemičitanu hlinitého vulkanického původu. Je velmi lehká a porézní (Maucieri et al. 2019). Nachází se na různých lokalitách po celém světě, ale kvalita ani složení nejsou všude stejné (Texier 2022).

*Vermikulit* se vyrábí z jílovité slídy obsahující vodu mezi jednotlivými vrstvami. Jde o velmi lehký a pórovitý materiál s vysokou schopností pohlcovat vodu (až pětinasobek své vlastní hmotnosti). Má poměrně vysokou kationtovou kapacitu, a proto v zásobě udržuje živiny, jež jsou později uvolňovány (Hussain et al. 2014; Morgan 2021). Jeho objemová hustota je velmi nízká a je k dostání v několika velikostech částic od 2 do 8 mm (Texier 2022). Hlavní nevýhody zahrnují cenu a energetickou náročnost výroby (Hussain et al. 2014).

*Perlit* je amorfní vulkanické sklo s vysokým obsahem vody, jež se drtí a zahřívá na teplotu kolem 1000 °C. Jedná se o lehký a snadno dostupný substrát s neutrálním pH (Vinci & Rapa 2019), s optimální velikostí částic 1,5 až 3 mm. Může být vhodným substrátem při přesazování rostlin (nepoškodí mladé kořeny při vytahování), stejně jako rockwool však podléhá rychlé

degradaci a řasy na povrchu vytváří zelený nános (Texier 2022). Mezi další nevýhody patří cena a nižší schopnost zadržet vodu (Vinci & Rapa 2019).

*Keramzit* neboli expandovaný jílový granulát se vyrábí při teplotě 1100 °C ve speciálních rotačních pecích (díky tomu má specifický kulatý tvar). Nejběžněji se používají frakce 4–8 mm, pro větší rostliny 8–16 mm. Má řadu výhod: je extrémně stabilní, nevstřebává ionty z živného roztoku a lze jej použít opakovaně s možností dezinfekce. Není však ideálním prostředím pro rozvoj prospěšných mikroorganismů (Texier 2022).

### Inertní směsi

Ve většině případů jde o mix několika typů substrátů, přičemž organická složka slouží k zadržování vody a anorganická složka zajišťuje postupné prosychání směsi. Tato kombinace umožňuje pravidelné zavlažování rostlin (Texier 2022).

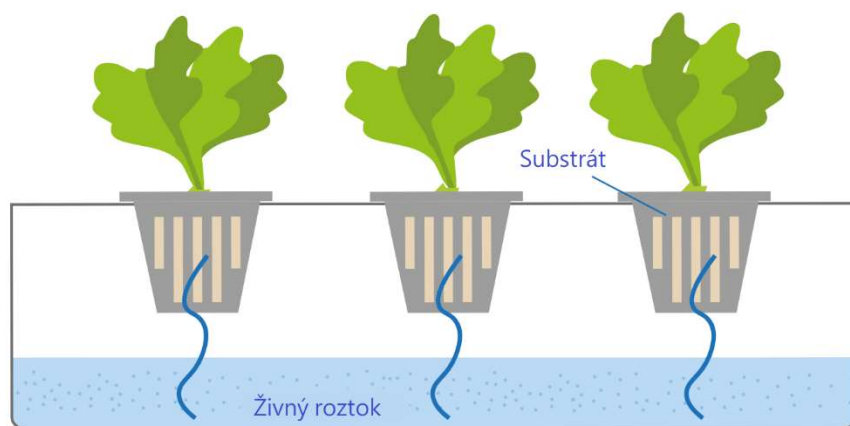
### **3.2.5 Pěstební systémy**

Pro hydroponické pěstování rostlin existují různé systémy, jejichž použití mj. závisí na druhu rostliny, místním klimatu a finančních možnostech. Běžné systémy obsahují tyto prvky: zásobní, podpurné, rozvodné, pěstební (květináče, kbelíky či kanály) a odtokové (Texier 2022). Většina systémů obsahuje zásobní nádrž s živným roztokem a prvek pro zajištění vzduchování (Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Obecně je lze rozdělit na aktivní či pasivní a otevřené či uzavřené. Aktivní systém zahrnuje mechanická zařízení pro recirkulaci živného roztoku, zatímco pasivní systém se spoléhá na kapilární působení, absorpci a/nebo gravitační sílu k doplnění živin ke kořenům (Shrestha & Dunn 2010; George & George 2016). V otevřeném systému se část původního roztoku spotřebovává a zbytek odtéká pryč (Shrestha & Dunn 2010). Proces pomáhá zamezit usazování soli v substrátu, ale je škodlivý vůči životnímu prostředí (Texier 2022). Hlavní charakteristikou uzavřených systémů je cirkulace roztoku z nádrže k rostlinám a zpět (Shrestha & Dunn 2010). Díky tomu rostliny postupně absorbují veškerou vodu, jež se tak efektivně využívá (Texier 2022). Pěstební systémy lze rozdělit následovně:

*Knotový (pasivní) systém* (Wick System): K zavlažování v systému slouží knoty (např. z polyesteru, flanelu či nylonu), využívající kapilární (vlásečnicový) efekt: jedním koncem jsou ponořeny do zásobníku, odkud se živný roztok samovolně nasává do druhého konce v kořenové zóně (viz obr. 1) (George & George 2016; Sharma et al. 2018; Dubey & Nain 2020; Harahap et al. 2020; Texier 2022). Mezi výhody knotové metody patří její jednoduchost a nízké náklady, snadná údržba, a navíc nevyžaduje elektřinu (Bennett 2020; Harahap et al. 2020). Tato metoda nicméně není zcela vhodná pro větší rostliny nebo rostliny s vysokými nároky na množství vody, jelikož knot nemusí být schopen zajistit dostatek vody pro jejich růst (Dubey & Nain 2020). Navíc se může časem ucpat, což může ovlivnit přísun živin k rostlinám. Celkově je knotová metoda jednoduchým a nákladově efektivním způsobem hydroponického pěstování rostlin, jež nicméně nemusí být vhodná pro všechny typy rostlin (Bennett 2020).

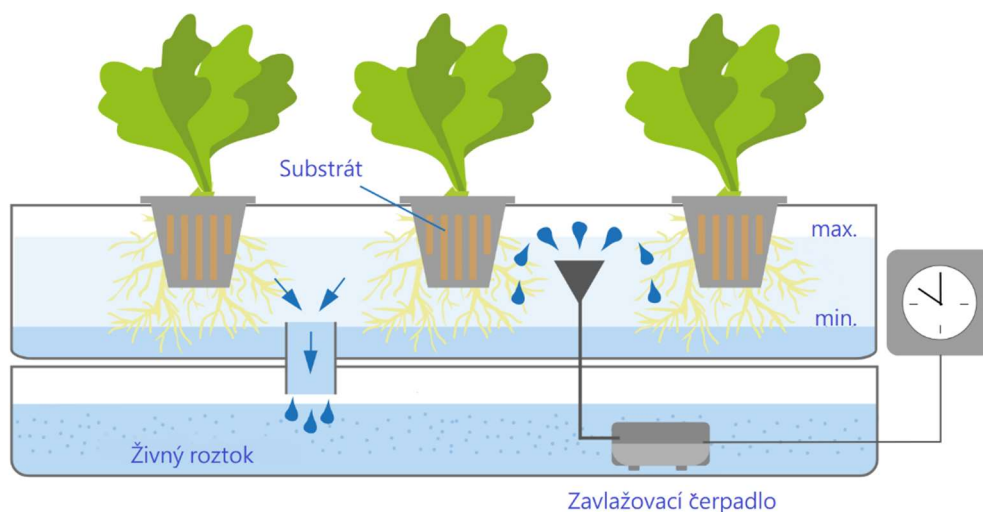
*Systém typu příliv a odliv* (Flood and Drain): Tato metoda využívá čerpadlo, jež posílá živný roztok z nádrže do zásobníku s rostlinami. Toto čerpadlo se zapne a plní pěstební lůžko roztokem. Po dosažení určité hladiny se vypne a roztok se vypustí potrubím zpět do nádrže (viz obr. 2) (Daud et al. 2018; Sharma et al. 2018; Bennett 2020; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Tehdy mohou kořeny rostlin prosychat a přijímat vzdušný kyslík (Dubey & Nain 2020).

Opakovaný proces napouštění a vypouštění je třeba správně načasovat, aby rostliny dostávaly správné množství vody a živin. Jinak rostliny nemusí mít dostatek vody nebo naopak mohou být zaplaveny, což může vést k problémům s jejich růstem (Bennett 2020). I přes nízké náklady na sestavení a údržbu i možnost automatizace (George & George 2016) se v dnešní době tato technika při komerčním pěstování již prakticky nevyužívá, jelikož ji nahradily efektivnější metody (Texier 2022).



Obr. 1. Pasivní (knotový) hydroponický systém

(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)



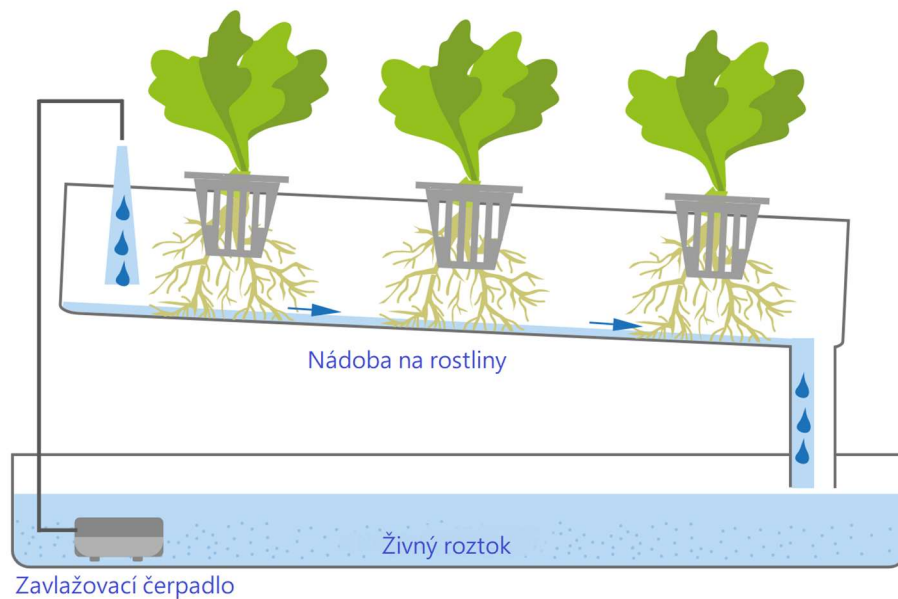
Obr. 2. Hydroponický systém typu *přiliv a odliv*

(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)

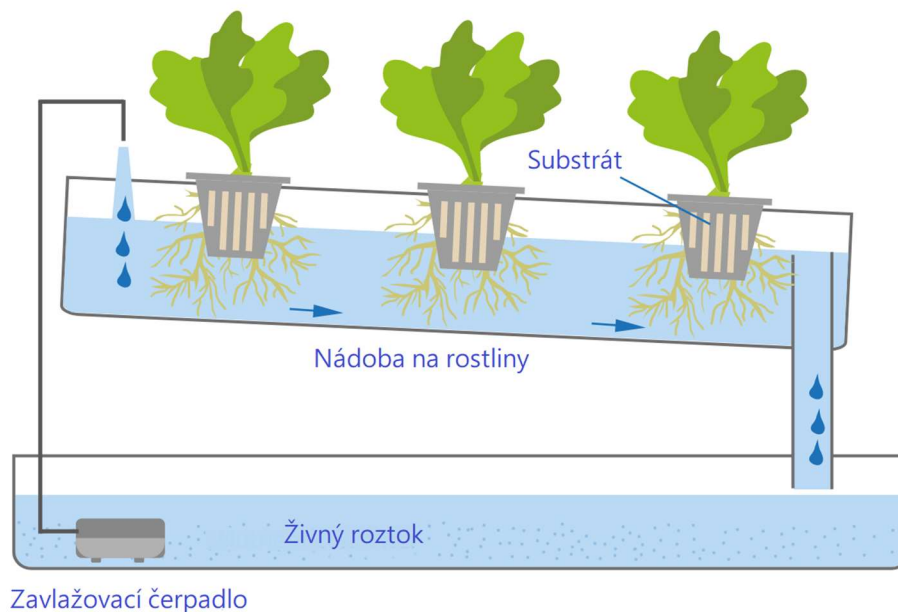
*Metoda živné vrstvy* (Nutrient Film Technique = NFT): Velmi oblíbená pěstební metoda obvykle využívá dlouhého potrubí v mírném sklonu pro pomalé stékání kapaliny v důsledku působení gravitace. V otvorech v horní části trubky jsou umístěny rostliny pěstované v malých koších nebo síťových květináčích (Bennett 2020). Živný roztok se čerpá z nádrže do horní části trubky a pak proudí dolů v tenké vrstvě, přičemž kořeny rostlin v ní nejsou zcela ponořeny. Přebytečný roztok odtéká zpět do nádrže (viz obr. 3) (Sharma et al. 2018; Bennett 2020; Nursyahid et al. 2021; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Tloušťka vrstvy (filmu) se udává okolo 0,5 mm (Hasan et al. 2018). Jde o vysoce účinnou metodu s dokonalým okysličením: kořeny

rostlin mají přístup ke vzdušnému kyslíku (Dubey & Nain 2020), navíc zde dochází k reakci vody se vzduchem na celé ploše dna trubky a vzdušný kyslík se dostává do vody přirozeným kontaktem s protékajícím roztokem (Texier 2022).

*Metoda tekoucího roztoku* (Deep Flow Technique = DFT): Jde o alternativu k systémům využívajícím metodu NFT, kdy se spodní strana trubky či kanálu přehradí tak, aby se uvnitř zvedla hladina roztoku (viz obr. 4) (Texier 2022). Běžně se udává hloubka 2–3 cm (Hussain et al. 2014; Hasan et al. 2018). Cirkulace roztoku z nádrže do pěstební nádoby a zpět probíhá v podstatě stejně, ale kanály mohou být postaveny v rovině a roztok je přiváděn hadičkou do vyvýšeného otvoru na jedné straně a odváděn na druhém konci kanálu. Větší množství vody zvyšuje stabilitu a pufrací kapacitu roztoku (Texier 2022).



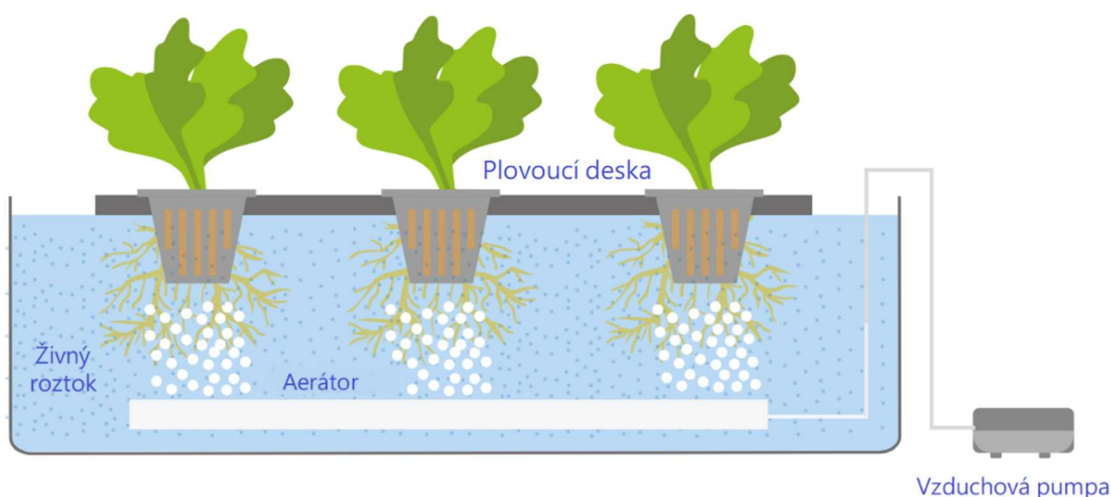
Obr. 3 Hydroponický systém využívající *metodu živné vrstvy*  
(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)



Obr. 4. Hydroponický systém využívající *metodu tekoucího roztoku*  
(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)



*Hlubokovodní pěstování* (Deep Water Culture = DWC): Tato hydroponická metoda je založena na ponoření kořenů rostlin přímo do živného roztoku, což umožňuje nepřetržitý přístup k vodě, kyslíku a živinám. Využívá se zde vzduchové čerpadlo a vzduchový kámen, zajišťující dostatečný přísun kyslíku ke kořenům (viz obr. 5) (Shrestha & Dunn 2010; Sharma et al. 2018; Bennett 2020; Dubey & Nain 2020; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). V systému DWC se rostliny umísťují do síťových květináčů a ty jsou buď zavěšeny nad nádrží s živným roztokem (Sharma et al. 2018), nebo zasazeny do desky plovoucí na hladině roztoku (Shrestha & Dunn 2010; Hamza et al. 2022; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Hladina bývá ve výšce 20 a více cm (Dubey & Nain 2020). Mezi hlavní výhody patří jednoduchost a účinnost, poměrně snadná údržba a vysoce okysličené prostředí pro podporu růstu rostlin (Bennett 2020). Systém DWC nicméně vyžaduje pečlivé sledování množství kyslíku v živném roztoku a rovnováhy pH (Domingues et al. 2012) kvůli prevenci růstu řas a plísní (Sharma et al. 2018). Větší rostliny mohou navíc vyžadovat dodatečnou oporu, aby se zabránilo jejich převrácení. Celkově tato metoda nabízí jednoduchý a efektivní způsob hydroponického pěstování, široce používaný pro pěstování různých typů rostlin (Bennett 2020).

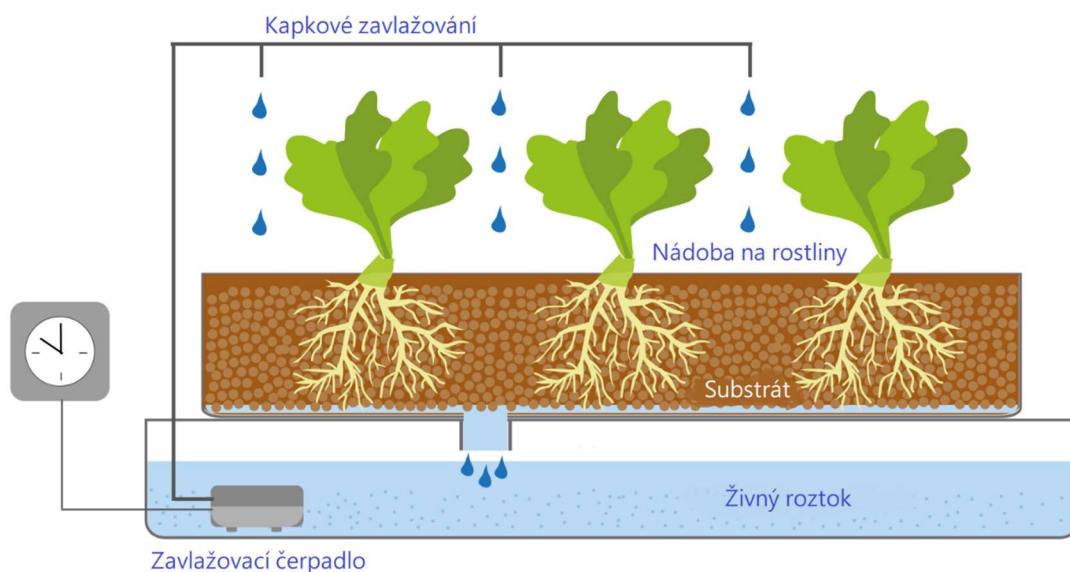


Obr. 5. Hydroponický systém využívající metodu *hlubokovodního pěstování*  
(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)

*Kapková závlaha* (Drip System): Kapkový závlahový systém je patrně nejpoužívanější typ hydroponického systému na světě (Shrestha & Dunn 2010), zajišťující kontrolovaný a stálý přísun živného roztoku k rostlinám. Tato metoda využívá síť trubek a kapačů, jež dodávají roztok přímo ke kořenům rostlin (Bennett 2020; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Každá rostlina dostane přesné množství vody a živin, potřebné pro optimální růst (Bennett 2020). Systém může být navržen buď jako otevřený, nebo uzavřený (viz obr. 6) (Dubey & Nain 2020). Hlavní výhodou je schopnost poskytovat individuální péči každé rostlině, což umožňuje efektivní využití vody a živin (Hasan et al. 2018; Sharma et al. 2018; Bennett 2020). Navíc se hodí pro širokou škálu typů rostlin a jde o univerzální volbu pro malé i velké hydroponické sestavy. Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že kapkový systém může být náchylný k ucpávání, což vyžaduje pravidelnou údržbu a kontrolu zajištění nepřetržitého přísunu živin



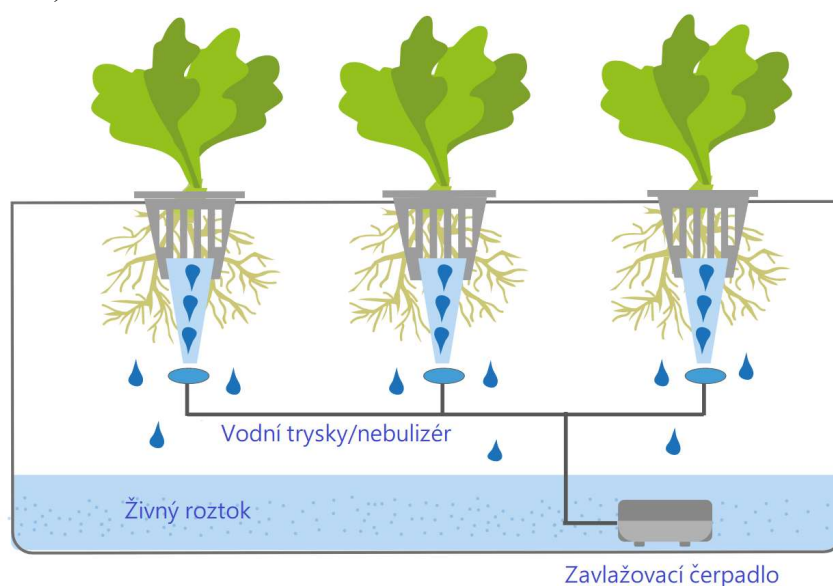
k rostlinám. Celkově kapková metoda nabízí přesnou kontrolu nad prostředím rostlin a je hojně využívána pro svou účinnost a přizpůsobivost (Bennett 2020).



Obr. 6. Hydroponický kapkový závlahový systém

(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)

*Aeroponie:* Principem této metody je přeměna živného roztoku na mlhu prostřednictvím ultrazvukové membrány o průměrné frekvenci 1,6–2 MHz, kdy vzniká hustá mlhovina tvořená kapičkami o velikosti menší než 5  $\mu\text{m}$ . Kapičky měří v průměru 2,5  $\mu\text{m}$ , takže jsou dostatečně malé na to, aby mohly být přímo vstřebávány kořeny rostlin (Texier 2022), volně visícími v prostoru nad nádrží s roztokem (Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Proces mlžení se opakuje v krátkých intervalech (Shrestha & Dunn 2010; Hussain et al. 2014; Hasan et al. 2018; Dubey & Nain 2020), přičemž rostliny přijímají vodu a živiny doslova ze vzduchu, a navíc je zajištěno i maximální okysličení kořenů (viz obr. 7) (George & George 2016; Velazquez-Gonzalez et al. 2022; Texier 2022).

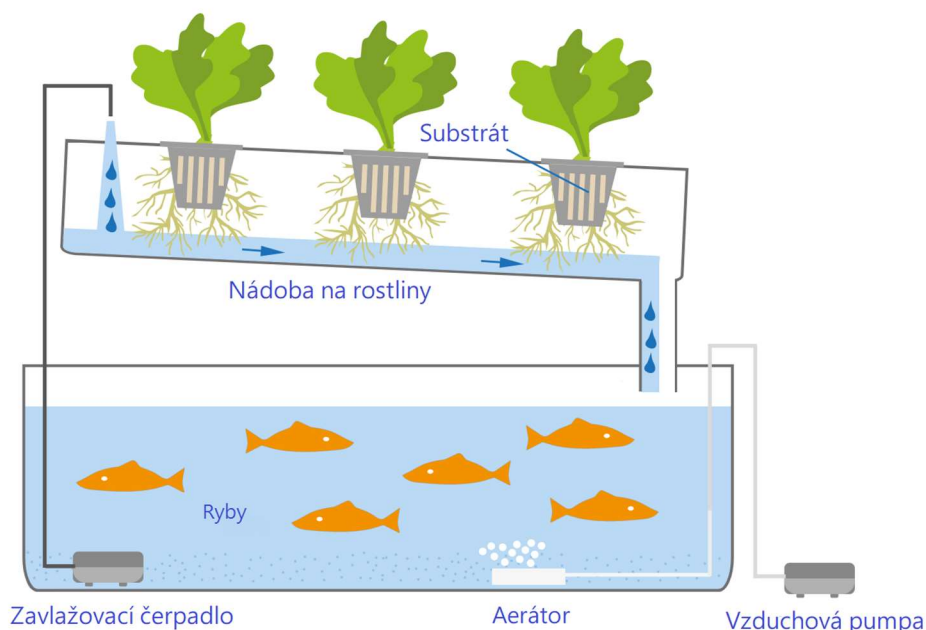


Obr. 7. Aeroponický systém

(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)

*Vertikální pěstování* (Vertical Farming System = VFS): V tomto případě se sice nejedná o samostatnou metodu, nicméně zásadním vylepšením je využití celého pěstebního prostoru. Hlavní cíl představuje zefektivnění a zvýšení počtu pěstovaných rostlin na daném prostoru. Toho přitom může být dosaženo různými konstrukcemi s využitím již uvedených pěstebních metod (Morgan 2021). Tento princip se nejčastěji používá pro pěstování metodou NFT (Texier 2022). Konstrukce může mít běžně podobu vertikálních sloupců. Ze srovnání výsledků hydroponického pěstování ve vertikálním a horizontálním systému plyne, že prvně jmenovaný způsob může představovat životaschopnou alternativu pro konvenční pěstební systémy. Nicméně je třeba dále zkoumat vliv gradientů parametrů, jako jsou teplota a koncentrace živin (více viz Touliatos et al. 2016 a další reference tamtéž). Používané konstrukce mohou být také modifikovány, a to např. do tvaru písmene A, nebo obráceného V. Rostliny jsou zde umístěny v trubkách jednotlivých řad a rostou nad sebou. Vzájemně si tak nestíní, neboť jednotlivé řady s rostlinami jsou mezi sebou posunuty odshora dolů (Texier 2022).

*Akvaponie*: Tato pěstební technika je založena na kombinovaném chovu ryb a pěstování rostlin v recirkulačním systému. Voda z nádrží obsahující odpadní produkty (a nestrávené zbytky potravy) ryb slouží jako primární zdroj živin pro rostliny v hydroponickém pěstebním lůžku, přičemž přečištěná voda se vrací zpět do rybochovných nádrží (viz obr. 8) (Rakocy & Hargreaves 1993; Roosta & Hamidpour 2011; George & George 2016; Verma et al. 2023). Více o této metodě viz kap. 3.5.



Obr. 8. Akvaponický systém

(zdroj: <https://www.hydroponic-urban-gardening.com/rubriken/various-hydroponics-systems/>)

### 3.2.6 Pěstované plodiny

V hydroponických systémech lze úspěšně pěstovat široké rozpětí plodin, jejichž základní přehled je uveden v tab. 1.

Nejnovější souhrnný přehled studií za posledních 20 let, zaměřených na různé přístupy k bioponickému pěstování plodin, lze nalézt v tab. 2.

Tab. 1. Hydroponicky pěstované plodiny (Kim et al. 2015; George & George 2016; Sharma et al. 2018; Sunaryo et al. 2018; Tikasz et al. 2019; Atzori et al. 2020; Li et al. 2020; Deepthi et al. 2021; Loera-Muro et al. 2021; González-Hernández et al. 2022; Jiang et al. 2023)

<b>Obilniny</b>	Rýže, kukuřice, ječmen
<b>Okopaniny</b>	Brambor
<b>Olejniny</b>	Hořčice, řepka olejka
<b>Luštěniny</b>	Sója, hrách, fazole
<b>Ovocné plodiny</b>	Jahodník, ostružiník, brusnice, citrusy, banánovník
<b>Plodová zelenina</b>	Rajče, lilek, paprika, okurka, meloun, cuketa
<b>Listová zelenina</b>	Salát, špenát, řapíkatý celer, laskavec, kadeřavá kapusta, čínské zelí
<b>Chuťové přísady</b>	Koriandr, pískavice, petržel, máta, rozmarýn, bazalka, oregano
<b>Okrasné rostliny</b>	Aksamitník, růže, hvozdík, chryzantéma, africká fialka, fikus
<b>Léčivé rostliny</b>	Aloe, kopřiva
<b>Krmné plodiny</b>	Čirok, vojtěška, různé trávy

Tab. 2. Studie zabývající se využitím organických hnojiv jako zdrojů živin v hydroponických pěstebních systémech (více viz Park & Williams 2024)

<b>Organické hnojivo</b>	<b>Plodina</b>	<b>Reference</b>
Hněj	Hořčice Rajče Salát  Špenát Kadeřavá kapusta	Sunaryo et al. 2018 Mowa et al. 2018 Sunaryo et al. 2018; Tikasz et al. 2019; Wongkiew et al. 2022 Sunaryo et al. 2018 Tikasz et al. 2019
Vedlejší produkty chovu ryb	Rajče Salát	Shinohara et al. 2011 Shinohara et al. 2011; Ahmed et al. 2021; Lau & Mattson 2021
Vedlejší produkty z cukrovaru/lihovaru	Řepka Salát	Li et al. 2020 Hooks et al. 2022
Vedlejší produkty mlýnského zpracování kukuřice	Rajče Čínské zelí	Shinohara et al. 2011 Kano et al. 2021
(Vermi-)kompostový čaj	Kukuřice Brambor Sója Hrách Rajče  Meloun Salát  Laskavec Čínské zelí Máta Rozmarýn	Kim et al. 2015 González-Hernández et al. 2022 Kim et al. 2015 Jiang et al. 2023 Morales-Corts et al. 2018; Arancon et al. 2019; Mejía et al. 2022 Mejía et al. 2022 Kim et al. 2015; Arancon et al. 2019; Giménez et al. 2020 Deepthi et al. 2021 Pant et al. 2012; Churilova & Midmore 2019 Loera-Muro et al. 2021 Loera-Muro et al. 2021
Řasy	Ječmen Salát	Atzori et al. 2020 Miceli et al. 2021
Fugát (produkt anaerobní digesce)	Rajče Salát Čínské zelí	Mupambwa et al. 2019 Ronga et al. 2019; Wang et al. 2019 Bergstrand et al. 2020; Pelayo Lind et al. 2021

### 3.2.7 Souhrnné hodnocení

#### Výhody

Hydroponie má menší ekologický dopad než tradiční pěstování v půdě, kdy spotřebovává menší množství vody a hnojiv (Shrestha & Dunn 2010; George & George 2016; Hasan et al. 2018; Sharma et al. 2018; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Hydroponické systémy lze použít k pěstování rostlin v oblastech s nedostatečným zastoupením orné půdy či méně příznivými až nepříznivými klimatickými podmínkami, resp. na území měst s omezeným přístupem k lokální produkci čerstvých potravin (Shrestha & Dunn 2010; George & George 2016; Park & Williams 2024). Technika pěstování umožňuje přesnou kontrolu nad prostředím rostliny (vč. množství živin, úrovně pH a přívodu vody), a tudíž podporuje rychlý růst a vyšší výnosy (Shrestha & Dunn 2010; Hasan et al. 2018; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Na rozdíl od pěstování v půdě je kořenový systém rostlin vystaven přímému přístupu vody a živin (George & George 2016; Sharma et al. 2018; Texier 2022), a tak rostlina nemusí vynakládat žádnou energii na svou obživu a může ji přeměřovat na zrání. Hydroponicky vypěstované plodiny mají vyšší nutriční hodnotu a lepší chuť oproti těm pěstovaným v půdě (Sharma et al. 2018). Kontrola přístupných kořenových systémů navíc umožňuje hodnocení zdraví rostliny a jejího budoucího vývoje (Texier 2022).

Bioponie představuje velmi úsporný druh pěstování, kombinující výhody hydroponie a organického pěstování v půdě. Velké množství mikroorganismů v systému slouží mj. jako vysoce účinná obrana před patogeny (Chinta et al. 2015; Texier 2022).

#### Nevýhody

Hydroponie vyžaduje značné počáteční investice a může být náročnější na práci než tradiční pěstování v půdě (Shrestha & Dunn 2010; Hasan et al. 2018; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Velký význam má jak udržování pH, EC a koncentrace živin v roztoku, tak zajištění dostatku světla a dodávky energie (Sharma et al. 2018). Kromě toho je třeba získat dostatečné znalosti např. o fyziologii rostlin či chemii (Velazquez-Gonzalez et al. 2022), neboť jakýkoli přehmat může vést k záhubě rostlin, a pěstitelé musí bedlivě sledovat, zda jejich rostliny nevykazují známky nedostatku živin nebo onemocnění. Další omezení představuje taktéž teplota (boj s přídavným teplem vznikajícím při umělém osvětlení) nebo rozsah typů plodin vhodných pro hydroponické pěstování (např. brambory jen za použití speciálních technologií) (Texier 2022).

Provoz hydroponického systému s organickými živinami vyžaduje ještě více pozornosti než klasické systémy s minerálním živným roztokem. Není taktéž vhodný pro všechny pěstební technologie, jelikož hlavním omezením je obsah kyslíku (potřebný jak pro kořeny rostlin, tak houby a bakterie) (Texier 2022).

### 3.3 (Vermi-)kompost

#### 3.3.1 Základní definice a procesy

##### Kompost

Kompost je konečným produktem aerobního rozkladu organických materiálů (jak rostlinného, tak živočišného odpadu) za účasti mikroorganismů (Roman et al. 2015; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Proces jeho vzniku se označuje jako kompostování. Jedná se o jeden z nejlevnějších způsobů stabilizace odpadního materiálu (Illera-Vives et al. 2015) a zároveň nejpopulárnějších způsobů tradičního zpracování biologického odpadu (Patidar et al. 2014; Zhou et al. 2022).

Proces kompostování je možno interpretovat jako souhrn komplexních metabolických pochodů široké škály mikroorganismů, jež za přítomnosti kyslíku využívají dostupný C a N k produkci vlastní biomasy. V tomto procesu při dostatečné vlhkosti a teplotě vytvářejí mikroorganismy také teplo a zejména pevný substrát (Roman et al. 2015) v podobě humifikovaného organického hnojiva bohatého na živiny (Campbell 1998). Vstupní materiál se většinou hromadí na zemi do podoby útvaru s lichoběžníkovým průřezem a pravidelně se obrací tak, aby došlo k lepšímu provzdušnění, redukci vzniku tepla a urychlení míry mikrobiální dekompozice (Enebe & Erasmus 2023). Různá mikrobiální společenstva, zejména bakterie, houby a prvoci, se postupně do kompostování aktivně zapojují s různou intenzitou v závislosti na teplotě, obsahu vlhkosti a poměru C:N. V jeho průběhu dochází ke změnám v charakteru vstupního materiálu a k vývoji struktury vznikajícího kompostu (Tuomela et al. 2000; Hassen et al. 2001).

Celý proces je podobný přírodním procesům mineralizace a humifikace, k nimž dochází po zpracování zbytků organické hmoty do půdy (Roman et al. 2015), přičemž lze rozlišit dvě hlavní fáze. První z nich je charakteristická mikrobiální aktivitou, jež vede k rozkladu většiny biologicky rozložitelných materiálů a stabilitě zbytku organické hmoty, zatímco ta druhá spočívá v přeměně tohoto zbytku na huminové látky (Adani et al. 1999). Právě humifikace je označována za hlavní faktor zlepšování kvality výsledného kompostu, neboť huminové látky mají velký význam pro kvalitu půdy a růst rostlin (Chen & Aviad 1990). De Corato (2020) popisuje průběh kompostování z pohledu teploty. Počáteční termofilní fáze (zvýšení teploty nad úroveň 60 °C, max. 75-78 °C) zajišťuje inaktivaci až eliminaci semen a patogenních mikrobů. Poté nastupuje mezofilní fáze s postupným poklesem teploty a postupně dochází ke zrání kompostu (kompletní stabilizace a humifikace organické hmoty).

Kompostování organických odpadů se stalo hlavní metodou snižování množství odpadů, jejich likvidace a opětovného využití. Odpady jsou odkloněny ze skládek, což přispívá k nižším emisím skleníkových plynů vzhledem k omezenému množství skládkovaného materiálu podléhajícímu rozkladu a produkci methanu (CH<sub>4</sub>) (USEPA 2020). Nicméně i tak dochází k produkci tohoto i dalších skleníkových plynů, což brání využití kompostování v globálním měřítku (Ddiba et al. 2022). Kompostování jako primárně termofilní proces totiž potlačuje růst nitrifikačních organismů, což vede k větší míře vypouštění N<sub>2</sub>O. Pokud proces probíhá za zvýšeného obsahu vlhkosti, mohou začít převažovat anaerobní podmínky související s rozvojem kapes CH<sub>4</sub> a následnými emisemi plynu. Vyšší míra vlhkosti navíc podporuje růst methanogenních a denitrifikačních organismů, což má za následek větší míru vypouštění CH<sub>4</sub> a N<sub>2</sub>O (Pan et al. 2018).

## Vermikompost

Vermikompost je konečným produktem aerobního rozkladu organických materiálů (jak rostlinného, tak živočišného odpadu z kuchyní, trhů a farem, kalu z akvakultury atd.) (Adhikary 2012; Kouba et al. 2018; Arancon et al. 2019; Park & Williams 2024) za synergického působení makroorganismů (žížal) a mikroorganismů (přítomných jak v odpadu, tak v tělech žížal) (Enebe & Erasmus 2023; Chowdhury et al. 2023). Proces vzniku tohoto produktu se nazývá vermikompostování nebo také žížalí kompostování.

Vermikompostování představuje jednoduchý biotechnologický proces kompostování, při němž žížaly jakožto ekosystémoví inženýři přijímají organický materiál, redukuje jeho objem až o 40–60 %, a následně jej přeměňují na humifikované organické hnojivo bohaté na živiny (Adhikary 2012; Yadav & Madan 2013; Enebe & Erasmus 2023). Na celém světě je známo více než 4000 druhů žížal náležejících do tří ekologických skupin dle hloubkového výskytu v půdě (epigeické: 3–10 cm, endogeické: 10–30 cm, anektické: 30–90 cm), nicméně jen několik epigeických skupin se využívá pro účely vermikompostování (Samal et al. 2019; D'Hervilly et al. 2021). Všechny žížaly vylučují granulovanou hmotu ve formě pelet, nicméně v případě endogeických a anektických druhů může mít hmota i kompaktní strukturu. Pouze epigeické žížaly ji dokážou zpracovat tak, aby došlo k uvolnění a zpřístupnění živin pro rostliny (Samal et al. 2019). Mezi typické zástupce patří žížala hnojní (*Eisenia fetida* Savigny, 1826), žížala kalifornská (*Eisenia andrei* Bouché, 1972), „africká dešťovka“ (*Eudrilus eugeniae* Kinberg, 1867) a další druhy (*Lumbricus rubellus* Hoffmeister, 1843 či *Perionyx excavatus* Perrier, 1872) (Bajsa et al. 2003).

Pro vermikompostování se využívají tzv. vermireaktory rozličných velikostí, tvarů a materiálů, v nichž je potřeba udržovat pH v rozmezí 5–9 (Taeporamaysamai & Ratanatamskul 2016), vlhkost 50–90 % (Suthar et al. 2017; Samal et al. 2019) a teplotu 10–35 °C (Samal et al. 2019). Existují dva základní typy těchto reaktorů: *dávkovací* a *kontinuální*. Zatímco dávkovací reaktory pracují po předem stanovenou dobu za relativně stabilních podmínek (obvykle s jednorázovou vstupní dávkou), kontinuální reaktory lze charakterizovat dynamickými provozními podmínkami s možností nepřetržitého vstupu odpadu a výstupu vermikompostu. Obecně se doporučuje do reaktoru opakovaně či nepřetržitě přidávat malé množství čerstvého odpadu pro omezení vzniku tepla a vývoje anaerobních podmínek, přičemž dochází i ke stimulaci pohybu žížal a opouštění již rozloženého materiálu (Enebe & Erasmus 2023). Kontinuální vermireaktory mají většinou vertikální uspořádání. Spodní část tvoří „miska“ s vermikompostem obsahujícím žížaly, jenž slouží jako počáteční habitat makroorganismů a má také za úkol omezit jakékoli negativní vlivy změn prostředí na žížaly (Hanč & Chadimová 2014). Na něj se umístí druhá (horní) miska s čerstvým odpadem, kdy žížaly mohou migrovat mezi miskami díky jejich perforované konstrukci. Třetí a každou další misku s odpadem lze přidat v určitých intervalech (30 až 60 dní v závislosti na účinnosti jeho konzumace a degradace žížalami) (García-Sánchez et al. 2017; Enebe & Erasmus 2023). (Pozn.: Dávkovací reaktory mají obvykle pouze dvě misky: jednu spodní a druhou horní.) Z hlediska času pro proces vermikompostování a zrání vermikompostu (viz str. 31) jsou zřejmé gradienty v jednotlivých miskách (horní mladé vrstvy, spodní staré vrstvy), přičemž odstraňovat z reaktoru a dále využít lze vermikompost různého stáří. Alternativu k tomuto systému představují vermireaktory bez perforovaných misek, kde jsou postupně přidávány jak vrstvy odpadu, tak žížaly (nová vrstva

→ nová biomasa žížal) (Enebe & Erasmus 2023). Každá vrstva má své specifické stáří, přičemž dohromady podléhají procesu vermikompostování až do konce jeho trvání (Hřebečková et al. 2019; Hanč et al. 2020).

Produkce vermikompostu zahrnuje několik fází. Mikroorganismy přítomné v samotném odpadu zahajují proces rozkladu organického substrátu, jenž současně pokračuje po pozření biomasy odpadu žížalami (Enebe & Erasmus 2023). Střevo žížal funguje jako miniaturní kompostovací „trubice“ (Abbott & Parker 1981). Vstupní substrát se zastoupením organické složky rostlinného, živočišného a/nebo mikrobiálního původu se nejprve rozmělní ve svalnatém žaludku (Scheu 1987) tak, aby se vytvořily menší částice s větším povrchem pro podporu mikrobiální degradace. Materiál dále zpracovává střevní mikrobiální společenstvo (např. gramnegativní a fakultativně anaerobní bakterie; Rajendran et al. 2008), přičemž žížaly v přední části střeva produkují sekret se symbiotickými mikroorganismy a různými trávicími enzymy pro podporu rozkladu celulózy, ligninu a dalších komplexních organických látek za současného uvolnění živin (Suthar 2008; Vig et al. 2011; Samal et al. 2019; Enebe & Erasmus 2023). Tento sekret je bohatý na dusíkaté sloučeniny, přičemž ty spolu s dalšími podobnými látkami ve vstupním materiálu podléhají mineralizaci při vermikompostování a zvyšuje se dostupnost N pro rostliny (Singh et al. 2017). Pouze 5–10 % materiálu se absorbuje do těla žížal a zbytek je vyloučen v podobě jemně granulovaných agregátů pokrytých sekretem (tzv. žížalí hnojivo), bohatých na NPK, mikroživiny, regulátory růstu rostlin a prospěšné mikroorganismy (Scheu 1987; Adhikary 2012; Enebe & Erasmus 2023). Ochranná vrstva včetně sekretu na povrchu agregátů zabraňuje ztrátě živin (Adhikary 2012). Kromě již uvedených fyzikálních a biochemických mechanismů žížaly svým hrabáním přispívají k rovnoměrnému promíchání materiálu (Yadav & Garg 2011) a rozložení vzduchu, vody a mikroorganismů napříč rozkládaným odpadem (Santana et al. 2020). Po přesunu žížal do čerstvě přidaných vrstev odpadu (v kontinuálních vermireaktorech) podléhá opuštěná hmota vermikompostu stejně jako nestrávená část biomasy odpadu další mikrobiální degradaci – tento proces se nazývá *stárnutí* či *zrání* vermikompostu (Fierer et al. 2010; Enebe & Erasmus 2023).

Vermikompostování je preferovanou technologií zpracování odpadu ve srovnání jak s kompostováním, tak pyrolýzou (tepelným rozkladem v anaerobním prostředí za teploty  $\geq 450$  °C) (Enebe & Erasmus 2023). Od tradičního kompostování se liší v několika ohledech. Celý proces je rychlejší, jelikož organický odpad prochází střevy žížal, v nichž probíhá významná transformace celého materiálu (Adhikary 2012; Enebe & Erasmus 2023). Výsledné žížalí hnojivo může obsahovat až dvojnásobnou koncentraci makro- a mikroživin ve srovnání se zahradním kompostem (Nagavallemma et al. 2004). Vermikompost oproti běžnému kompostu disponuje větší homogenitou a jemnější strukturou (Hanč & Dreslová 2016), má vyšší míru provzdušnění a lépe zadržuje vodu (Suhane 2007), a má také početnější prospěšnou mikrobiální populaci (Haynes & Zhou 2016), přičemž škodlivé patogenní mikroorganismy ve vstupním materiálu jsou eliminovány při trvání procesu vermikompostování déle než 50 dní (Arancon et al. 2007). Žížaly pomáhají udržovat uvnitř vermikompostu aerobní podmínky mj. pro růst mikrobů, a tak eliminují potřebu vnější dodávky energie (Samal et al. 2019; Chowdhury et al. 2022). Navíc ve srovnání s tradičním kompostováním se při procesu vermikompostování značně snižuje produkce skleníkových plynů (Nigussie et al. 2016; Panda et al. 2022), a proto jej lze označit jako zelenou technologii pro biozpracování organického odpadu (Chowdhury et al. 2023). Vermikompostování je tedy jednou z nejlepších možností recyklace organické hmoty,

protože nabízí ekologicky a ekonomicky vhodnou strategii k získání produktu prvotřídní hodnoty obohaceného o všechny druhy bioaktivních látek (Hazarika & Khwairakpam 2022). Přeměna odpadu (s negativní ekonomickou hodnotou) na žížalí kompost (s pozitivní ekonomickou hodnotou) podporuje koncept cirkulární bioekonomiky (Bandyopadhyay et al. 2023).

### 3.3.2 Charakteristické vlastnosti

#### Kompost

Klíčovou výhodou kompostování je tvorba konečného stabilního produktu plného živin, jenž neobsahuje patogeny ani semena rostlin a může být prospěšně aplikován do půdy (Haug & Haug 1993), kdy oživuje její kvalitu/strukturu (Campbell 1998). Vzhledem k dlouhodobému zlepšení kvality půdy při používání kompostu není nutné každoročně nakupovat anorganická hnojiva, což znamená úsporu nákladů. Lepší struktura půdy snižuje riziko eroze vlivem vody a větru (menší ztráty půdy a odtok vody) a schopnost zadržovat vlhkost vede k efektivnější hydrataci pěstovaných plodin. Rozmanitost mikroorganismů v kompostu, jako např. sít'oviny hub, též přispívá k lepší fixaci půdy, zlepšuje její provzdušnění a umožňuje kořenům snazší přístup ke kyslíku. Zvýšená dostupnost živin pro rostliny pak vede k jejich celkově zdravějšímu růstu a odolnosti vůči vnějším (a-)biotickým faktorům, tedy i k vyšším výnosům (Chen & Wu 2005). Toto zmiňují také Yao et al. (2023) a doplňují ještě schopnost kompostu absorbovat a omezit pohyb pesticidů v půdě či obdobně snižovat kontaminaci těžkými kovy.

Navzdory řadě uvedených výhod přináší kompostování i určité nevýhody. Mezi ně patří relativně pomalý proces přeměny organické hmoty do podoby kompostu a riziko kontaminace vodního prostředí (Enebe & Erasmus 2023). Při opakovaných aplikacích některých kompostů do půdy se v ní mohou akumulovat těžké kovy (He et al. 1992) s negativním dopadem na pěstované plodiny, půdní mikroorganismy a nutriční hodnotu půdy. Dalším problémem je i tvorba substrátu z organických materiálů s vysokým obsahem soli, jež může mít vliv na strukturu půdy a nerovnováhu živin, tedy i na růst rostlin (Cerdeja et al. 2018).

Většina kompostovacích hromad používá pravidlo udržování poměru C:N v rozmezí 25 až 30:1. Za takových podmínek se vytváří příznivé prostředí pro mikroorganismy, přičemž tento poměr lze upravit přidáním zeleného odpadu (vysoký obsah N; př. posekaná tráva) či hnědého odpadu (vysoký obsah C; př. dřevní štěpky) (Smith 2009). V závislosti na kombinaci těchto materiálů lze organický odpad rozličného charakteru přeměnit na využitelný a ekologicky prospěšný substrát (Keller 2019) – sice s menším množstvím C a N, zato stabilnější ve srovnání se vstupním materiálem (Antizar-Ladislao et al. 2006; Roman et al. 2015). Obecně platí, že většina kompostů má pH v neutrálním rozmezí, obsah organické hmoty max. 30–60 %, vlhkost v rozmezí 30 až 50 % a vyšší koncentrace N, P a K a také solí oproti typickým zemědělským půdám. Některé komposty mají vyšší obsah stopových prvků, zejména Cu, Zn a Pb (He et al. 1992).

#### Vermikompost

Vermikompost je bohatým zdrojem všech základních rostlinných živin. Obsah živin ve vermikompostu se pohybuje v průměrném rozmezí 1,5–2,2 % N, 1,8–2,2 % P a 1,0–1,5 % K (Adhikary 2012). Obsahuje také cenné hormony pro podporu růstu (auxin, cytokinin) a kvetení (giberelin) rostlin (Tomati et al. 1987; Tomati et al. 1988; Suhane 2007), a enzymy (celuláza,



fosfatáza a další) napomáhající uvolňování živin pro jejich kořeny (Chaoui et al. 2003). Mimo to je bohatý na prospěšnou mikroflóru včetně bakterií (podporujících fixaci N či rozpouštění P) a mykorrhizních hub. Biologickou odolnost plodin pěstovaných s využitím vermikompostu vůči škůdcům a chorobám zvyšuje přítomnost různých antibiotik a aktinobakterií v hnojivu (Adhikary 2012). Vermikompost po procesu zrání lze charakterizovat vysokým obsahem živin, méně početnou mikrobiální populací a sníženou aktivitou enzymů (Hanč et al. 2020). Poměr C:N pro vermikompost v obecném slova smyslu spadá do rozmezí 12 až 25:1, přičemž hodnota < 15:1 indikuje zralý vermikompost (Jiménez & Garcia 1989; Huang et al. 2012; Boruah et al. 2019).

Žížalí hnojivo obsahuje až 5x více živin dostupných pro rostliny než běžné půdní směsi do květináčů (Adhikary 2012). Chemické analýzy prokázaly, že obsahuje pětinasobné množství dostupného N, sedminásobné množství K a cca 1,5x více Ca ve srovnání se svrchní vrstvou (15 cm) kvalitní půdy (Ruz-Jerez et al. 1992; Parkin & Berry 1994). Po průchodu střevy žížal se též významně zvyšuje dostupnost P (obvykle limitující prvek pro růst rostlin) (Reinecke et al. 1992). Huminové kyseliny přítomné v humusu poskytují vazebná místa pro živiny, jako jsou K, Ca, P, S či Fe, přičemž tyto živiny jsou dostupné pro rostliny (uvolňují se, když je rostliny potřebují). Vermikompost oproti půdním směsím do květináčů dostupným na trhu má taktéž vlastní populaci mikrobiálních organismů. Kombinace živin a mikrobiálních organismů je zásadní pro růst a zdraví pěstovaných rostlin. Výsledné žížalí hnojivo s těmito charakteristiky představuje skutečné „organické zlato“ (Adhikary 2012).

Vermikompost podporuje celkový růst a výnosy (Atiyeh et al. 2000; Arancon et al. 2004; Lee et al. 2004; Arancon et al. 2007), stejně jako zlepšuje kvalitu a trvanlivost vypěstovaných produktů. Vermikompost je sypký, snadno se s ním manipuluje, aplikuje a skladuje. Navíc neobsahuje škodlivé patogeny, toxické prvky či semena plevelů (Yadav et al. 2023). Při tradičním pěstování v půdě vermikompost zlepšuje její strukturu, schopnost zadržet vodu a odolnost vůči erozi (Adhikary 2012; Chowdhury et al. 2023). Minimalizuje výskyt chorob, parazitických hlístic a škodlivých členovců (Arancon et al. 2007), a zvyšuje rozklad organické hmoty v půdě (Yadav et al. 2023). Navíc pokud se tradiční hnojiva nahradí vermikompostem, lze dosáhnout značného snížení nákladů produkce plodin (Sinha et al. 2009). Je však třeba také zmínit některé nevýhody, jako např. vysoký obsah solí a těžkých kovů v některých vermikompostech (Vambe et al. 2023).

### 3.3.3 (Vermi-)kompostový čaj

(Vermi-)kompostový čaj je vodný extrakt z (vermi-)kompostu, získaný máčením ve vodě po stanovenou dobu za kontrolovaných podmínek (Pane et al. 2012; Arancon et al. 2019; Eudoxie & Martin 2019; Bali et al. 2021; Yattoo et al. 2021). Klíčovým vysvětlením pro výrobu čaje je přeměna mikrobiální biomasy, organických mikročástic a rozpustných chemických složek ve (vermi-)kompostu do podoby kapalného roztoku, jenž lze aplikovat přímo na rostlinu jako postřik či přidat do půdy (tradiční pěstování) nebo do vody (živný roztok pro hydroponické pěstování) (Arancon et al. 2004; Ingham 2005). Obsahuje jak rostlinné makro- a mikroživiny (např. NPK či Cu, Zn, Fe, Mn), tak bioaktivní sloučeniny (huminové kyseliny, fytohormony aj.), rozpuštěné těžké kovy a mikroorganismy (Morales-Corts et al. 2018; Zaccardelli et al. 2018; Eudoxie & Martin 2019; Churilova & Midmore 2019; Abdel Salam & Roshdy 2022).

Mikrobiální společenstva tvoří bakterie, houby, prvoci, hlístice, mykorrhizní houby a patogeny (jak houbové, tak lidské) (Ingham 2005). Bakteriální kmeny izolované z čajů lze klasifikovat jako PGPR (*plant growth-promoting rhizobacteria*) (Samet et al. 2022). Tyto bakterie (např. fixující N nebo oxidující amoniakální N; Hussain et al. 2016; Tao et al. 2017) podporují růst rostlin a zvyšují odolnost vůči (a-)biotickým stresům (De Corato 2020; Hamid et al. 2021). Pokud se týká patogenů, tak nejsou-li přítomny ve (vermi-)kompostu a neprospívají při produkci čajů, pak je riziko patogenů v čaji velice nízké. Navíc prospěšné mikroorganismy okupují potenciální infekční místa pro houbové patogeny (Ingham 2005).

Zde je třeba upozornit na nejednoznačnou definici používaných termínů v zahraniční anglicky psané literatuře. Zatímco „leachate“ označuje produkt pasivního pohybu vody skrz kompost během procesu kompostování (Ingham 2005), „tea/extract“ je získáván z již zralého kompostu. Extrakt (výluh) se od čaje („tea“) v užším slova smyslu liší v tom, že k jeho získání je třeba poměrně kratší doby trvání (Eudoxie & Martin 2019). Nicméně pro zjednodušení se v této práci používají zaměnitelně oba pojmy.

Pro produkci čajů se využívají dva základní typy metod: *neaerované* (bez provzdušnění) a *aerované* (s provzdušněním) (Litterick et al. 2004; Ingham 2005; Litterick & Wood 2009). Celý proces trvá několik hodin až tři týdny (Arancon et al. 2019; De Corato 2020). Kvalita čaje závisí na poměru množství (vermi-)kompostu a vody, typu použitého (vermi-)kompostu, stejně jako na provzdušňování a doplňování živin/mikroorganismů během procesu přípravy čaje (Ingham 1990; Mengesha et al. 2017; De Corato 2020; Yattoo et al. 2021). Aerované čaje mají vyšší mikrobiální diverzitu, redukovanou fytotoxicitu a zvýšenou odolnost vůči některým patogenům (např. *E. coli*) ve srovnání s neaerovanými čaji (Ingham & Alms 2003), přičemž pěstované plodiny mohou mít také větší výšku a listovou plochu (Arancon et al. 2007). Nicméně někteří autoři (Scheurell & Mahaffee 2002; Welke 2005; Koné et al. 2010) uvádějí, že účinek potlačení chorob působením obou typů čajů je srovnatelný. Při extrakci provzdušňovaných čajů se často přidávají další produkty (např. cukry, obilí, čaj z mořských řas či huminové kyseliny), aby se zvýšila mikrobiální aktivita konečného produktu (Ingham 2005; Pant et al. 2009). Nejlepší podmínky pro produkci kvalitních kompostových čajů jsou: poměr kompost:voda 1:5; kompost dobré kvality (zejména z rostlinných zbytků bohatých na aromatické molekuly, např. artyčoku či fenyklu), teplota 28 °C během výrobního procesu, oxygenace od 5 minut každé 3 hodiny nebo 15 minut každých 6 hodin, a extrakce po dobu 7 dnů (Zaccardelli et al. 2012). Při přípravě čaje je důležité omezit zhutňování (vermi-)kompostu, jež může mít za následek nedostatečnou extrakci živin a mikroorganismů, a používat čisté vybavení pro zabránění tvorby biofilmů s potenciálním negativním vlivem na kvalitu čaje (Ingham 2005; Scheuerell & Mahaffee 2006).

Kompostový čaj má na rostliny stimulační efekt (výška, listová plocha, biomasa výhonků a kořenů; mikroorganismy a příjem živin/tvorba bioaktivních sloučenin aj.), pozitivně ovlivňuje také jejich zdraví (dochází k potlačení škůdců a chorob) (více viz Eudoxie & Martin 2019; De Corato 2020; Pilla et al. 2023 a další reference tamtéž). Podílí se i na lepší nutriční kvalitě rostlinné produkce (Ingham 2005; Eudoxie & Martin 2019). Obecně platí, že takový čaj (podobně jako pevný kompost) zlepšuje kvalitu půdy skrz změny jejich fyzikálně-chemických vlastností, zadržování vody, biodiverzitu a obsah makro- a mikroživin (Scheuerell & Mahaffee 2004; Ingham 2005; Siddiqui et al. 2009). Obdobně pro vermikompostový čaj bylo prokázáno, že jeho aplikace zlepšuje výnosy, zdravotní stav a nutriční kvalitu rostlin (Gamaley et al. 2001;

Pant et al. 2009). Předpokládá se, že rozpuštěné minerální živiny, huminové kyseliny a ve vodě rozpustné regulátory růstu rostlin extrahované v čaji mají pozitivní účinky na počáteční vývoj kořenů a růst rostlin (Edwards et al. 2006; Arancon et al. 2007; Pant et al. 2011; Eudoxie & Martin 2019; Jiang et al. 2023). Živé mikroorganismy přítomné v čaji zajišťují rovněž odolnost vůči chorobám a stimulují příjem živin (Scheuerell & Mahaffee 2002; Ingham 2005; Hargreaves et al. 2008). Vermikompostový čaj též umožňuje efektivní rozklad organopesticidů a reziduí produktů farmaceutického průmyslu (jako např. diklofenak, triklosan či ibuprofen) v kontaminovaném půdním prostředí (Delgado-Moreno et al. 2019; Sanchez-Hernandez et al. 2019). Dále zmírňuje účinky tepelného a vodního stresu (Chinsamy et al. 2014), stejně jako zasažení prostředí (Alamer et al. 2022).

Je třeba dbát na konzistentní procesy extrakce a filtrace zahrnuté v produkci čajů, neboť se mohou objevit značné rozdíly v mikrobiálních populacích mezi (vermi-)komposty a jejich výslednými extrakty (Fritz et al. 2012), přičemž Arancon et al. (2007) uvádí, že v čaji může být zjištěna jen 1/3 mikrobiální aktivity a diverzity původního vermikompostu (autoři doporučují doplnit např. prášek z řas pro zvýšení aktivity mikroorganismů). Kvalitu čaje může v některých případech také ohrozit dlouhodobé skladování (Edwards et al. 2007). Co se týče aplikovaného množství, je nutné se zabývat i mírou ředění čaje: relativně nízké množství obsažených regulátorů růstu obvykle podporuje růst rostlin, zatímco větší množství již může mít až nepříznivé účinky (Edwards et al. 2006).

### 3.3.4 Využití v hydroponii

(Vermi-)kompostový čaj je označován jako vhodné organické hnojivo pro hydroponické pěstování rostlin (Velazquez-Gonzalez et al. 2022; Enebe & Erasmus 2023). Nedávné studie (viz tab. 2) uvádí možnosti pěstování kukuřice, sóji, rajčat, salátu a čínského zelí pro oba typy čajů. Hrách, meloun, laskavec, máta či rozmarýn se pak objevily ve studiích zabývajících se využitím vermikompostového čaje.

Rostliny pěstované s využitím čajů mohou vykazovat obdobné či dokonce lepší (např. Ansari et al. 2015; Churilova & Midmore 2019; Loera-Muro et al. 2021) růstové parametry než ty pěstované za použití komerčních hydroponických roztoků. Svoji pozitivní roli hraje přítomnost prospěšných bakterií zlepšující nutriční charakteristiky (vermi-)kompostu (Loera-Muro et al. 2021), stejně tak jako fungicidní a insekticidní vlastnosti sekretu žízal pro potlačení škůdců a chorob (Gudeta et al. 2022). Výnosy mohou být navýšeny při doplnění dalších mikroorganismů pro podporu růstu rostlin (Mejía et al. 2022). PGPR v čaji stimuluje růst postranních kořenů pro podporu absorpce a využití živin v prostředí hydroponických systémů, stejně tak jako aktivitu kořenů vyúsťující ve zvýšenou akumulaci biomasy a vyšší výnosy plodin. Taktéž zlepšují obsah chlorofylu v rostlinách a podporují nutriční kvalitu produktů (Wang et al. 2023). Aplikace čaje může snížit množství dusičnanů v pěstovaných plodinách, a naopak zvýšit obsah látek (jako např. flavonoidy) a antioxidační kapacitu pro zlepšení jejich kvality a podporu zdraví (Giménez et al. 2020).

Jednou z překážek při aplikaci výluhů z (vermi-)kompostu může být snížená koncentrace kyslíku v organickém roztoku (viz kap. 3.2.3) oproti komerčním hnojivům, kdy dochází v hypoxických podmínkách k tvorbě toxických vedlejších produktů a úhynu rostlin (Arancon et al. 2019). Pro maximální růst rostlin pěstovaných v roztocích typu (vermi-)kompostového

čaje v hydroponických systémech je třeba se též zabývat ředěním čaje, úpravou (obecně snížením) pH, doplněním některých živin, a dokonce i odsolením (Capulin-Grande et al. 2005; Jarecki et al. 2005; Gutiérrez-Miceli et al. 2008; Churilova & Midmore 2019). Výhodné je používat i organické doplňky (např. růstové hormony, huminové kyseliny). Vždy se však musí postupovat obezřetně, jelikož jejich vysoké koncentrace již nemusí podporovat další růst, ale naopak jej mohou zpomalovat (Arancon et al. 2019). Aplikace kompostového čaje může také představovat potenciální riziko z hlediska patogenů (*E. coli*, *Salmonella* aj.) či chemické kontaminace plodin (polychlorované bifenyly, pesticidy aj.), jak již bylo popsáno pro tradiční půdní pěstování v pracích Ingram & Milner (2007) a Brändli et al. (2007). Nicméně Giménez et al. (2020) nepotvrdili mikrobiální zatížení výsledného produktu hydroponického pěstování.

### 3.4 Digestát a fugát

#### 3.4.1 Základní definice a procesy

Fugát je kapalnou složkou digestátu, produktu vznikajícího při anaerobním rozkladu organických materiálů (odpadů ze živočišné či rostlinné výroby nebo kalů z čistíren odpadních vod) za účasti mikroorganismů (různých skupin bakterií a methanogenních archebakterií). Samotný proces se nazývá anaerobní digesce (AD) (Möller & Müller 2012; Jančula et al. 2017; Laiq Ur Rehman et al. 2019; Lamolinara et al. 2022). Po kompostování (viz kap. 3.3.1) se jedná o další z populárních přístupů ke zpracování biologického odpadu (Vyas et al. 2022).

AD je atraktivním a vůči životnímu prostředí šetrným (mikro-)biologickým procesem zpracování organické hmoty do podoby energeticky bohatého bioplynu (Laiq Ur Rehman et al. 2019). Komplexní organické sloučeniny jsou rozkládány do jednodušších forem, přičemž se zvyšuje rozpouštění živin (Park & Williams 2024). Takový proces se přirozeně vyskytuje např. v kravském žaludku, avšak v bioplynové stanici jej lze řídit a optimalizovat pro maximalizaci množství methanu (Al Seadi & Lukehurst 2012). Přeměna vstupního substrátu probíhá ve čtyřech fázích: *hydrolyza* (přeměna makromolekul organické hmoty na jednodušší monomery a oligomery), *acidogeneze* (přeměna monomerů na řadu organických kyselin), *acetogeneze* (přeměna řady organických kyselin na kyselinu octovou a vodík) a *methanogeneze* (přeměna kyseliny octové a vodíku na methan a další plyny) (Wang et al. 2018). Jako aditiva jsou během procesu AD přidávány stopové prvky s významnou rolí z hlediska mikrobiálního růstu. Bioplyn jako hlavní produkt tvoří směs CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> s menším zastoupením H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> a H<sub>2</sub> (Möller & Müller 2012; Jančula et al. 2017; Laiq Ur Rehman et al. 2019; Weimers et al. 2022). Zbývající materiál po procesu AD je označován jako digestát. Tento vedlejší produkt je bohatý na živiny a skládá se z kapalné fáze (fugát) a pevné fáze (separát, někdy též digestát), jež se oddělují za použití nejrůznějších typů separátorů (Ditl et al. 2017; Jančula et al. 2017; Slepitiene et al. 2023).

Na základě různých teplotních podmínek lze rozlišit tři typy procesu AD: psychofilní (T 10–20 °C), mezofilní (T 30–40 °C) a termofilní (T 50–60 °C) (Hupfauf et al. 2018; Liu et al. 2018). Pro produkci bioplynu se běžně používá buď mezofilní, nebo termofilní AD. Vzhledem k vysoké provozní teplotě má termofilní proces řadu výhod, jako např. vysokou produkci plynu či deaktivaci patogenů, nicméně většina methanogenních mikroorganismů preferuje mezofilní

podmínky (Laiq Ur Rehman et al. 2019). Termofilní methanogenní mikroorganismy jsou mnohem citlivější na náhlé změny teploty než jejich mezofilní protějšky (Wang et al. 2018).

Vysoké náklady k uvedení do provozuschopného stavu, pronikavý zápach či citlivost na fluktuace provozních podmínek patří mezi stinné stránky spojené s procesem AD (Ddiba et al. 2022).

### 3.4.2 Charakteristické vlastnosti

Použití digestátu jako hnojiva v zemědělství vede k navrácení životně důležitých živin (N, P) do půdy, a může tak přispět k vyrovnání ztrát způsobených půdní erozí (Pivato et al. 2016; Slepitiene et al. 2020). Digestát je vynikající alternativou ke snížení aplikace chemických hnojiv, protože zlepšuje dostupnost živin rostlinám vzhledem k vysokému obsahu makro- a mikroživin (Weimers et al. 2022). Jeho kvalitu navíc zvyšuje eliminace či redukce škodlivých mikroorganismů a patogenů při procesu AD (Park & Williams 2024). Na druhou stranu při nesprávné aplikaci může digestát nepříznivě působit na rostliny a okolní prostředí (Rigby & Smith 2013), přičemž jeho aplikaci je též třeba načasovat v souladu s růstovými fázemi rostlin (Slepitiene et al. 2023). Mimo to vysoký obsah amoniakálního N a s ním související toxické účinky mohou negativně ovlivnit růst a produkci biomasy (Weimers et al. 2022). Digestát také obsahuje potenciální toxikanty, zejména těžké kovy (Stefaniuk et al. 2015; Jančula et al. 2017).

Z hlediska složení oproti běžnému vstupnímu substrátu živočišného původu má digestát vyšší poměr amoniakálního a celkového N, nižší obsah organické hmoty a C, zvýšené pH a snížený poměr C:N (více viz Möller & Müller 2012 a další reference tamtéž). Významnou roli však hraje složení digestátu, jež závisí na řadě aspektů, jako jsou např. živinové složení vstupního substrátu, provozní podmínky bioplynové stanice či způsob ukládání digestátu (Zirkler et al. 2014; Stefaniuk et al. 2015; Slepitiene et al. 2023). Kapalnou fázi (fugát) lze charakterizovat sníženým obsahem celkového P, a naopak zvýšeným obsahem N a K oproti pevné fázi (více viz Möller & Müller 2012 a další reference tamtéž). Nicméně jak vyplývá z nedávno publikovaných prací (Stefaniuk et al. 2015; Jančula et al. 2017; Slepitiene et al. 2023), složení obou fází může být odlišné, přičemž meziroční rozdíly byly zaznamenány i pro stejnou bioplynovou stanici (Slepitiene et al. 2023). Protichůdné výsledky fytotoxického hodnocení působení pevné/kapalné fáze taktéž ukazují, že nejistoty při využití digestátu jako biologického hnojiva je třeba dále snižovat vyššími počty provedených ekotoxikologických testů (Pivato et al. 2016).

### 3.4.3 Využití v hydroponii

Fugát je označován jako vhodné organické hnojivo pro hydroponické pěstování rostlin (Ronga et al. 2019). Nedávné studie (viz tab. 2) uvádí možnosti jeho využití při pěstování rajčat, salátu a čínské zeli.

Fugát má charakter výrazně naředěné koloidní stabilní disperze (Ditl et al. 2017), přičemž právě koloidní částice mají svůj význam v hydroponii: pozvolna se totiž rozpouští a rostliny je mohou vstřebávat (Texier 2022). Dostupnost živin je obecně vysoká a fugát tedy může nahradit minerální hnojiva (Stoknes et al. 2018; Ronga et al. 2019; Pelayo Lind et al. 2021; Weimers et al. 2022), přičemž s menším doplněním vybraných prvků mohou rostliny prosperovat dokonce lépe než při použití tradičních živných roztoků. Pozitivní vliv na jejich růst mají také různé

biostimulanty obsažené ve fugátu (Weimers et al. 2022), jako např. sloučeniny na bázi auxinu (Scaglia et al. 2017) či huminové látky (Guilayn et al. 2020).

Vyšší obsah rozpustných solí (např. NaCl) v organickém roztoku může představovat jednu z hlavních překážek v produktivitě hydroponického systému založeném na využití fugátu (Stefaniuk et al. 2015; Bergstrand et al. 2020). Řada studií (např. Lošák et al. 2014; Stoknes et al. 2018; Pokhrel et al. 2019) také dokazuje, že limitujícím faktorem pro růst rostlin může být nízká úroveň dostupného fosforu, tzn. pro dosažení vyšších výnosů je třeba P doplnit do roztoku (Liu et al. 2011; Lošák et al. 2014). Obdobný problém se v případě produktů AD týká i síry (Weimers et al. 2022). Naopak v nadlimitním množství může ve fugátu být obsažen toxický amoniakální N, přičemž se doporučuje využít nitrifikačních procesů např. v bioreaktorech či biofiltrech (Stoknes et al. 2018; Pokhrel et al. 2019; Bergstrand et al. 2020; Pelayo Lind et al. 2021; Švehla et al. 2023).

## 3.5 Akvakultura a akvaponie

### 3.5.1 Akvakulturní kal

Akvakultura využívá různé druhy produkčních systémů a jedná se o nejrychleji rostoucí odvětví produkce potravin na světě (FAO 2019). Kal jako pevný odpad uvnitř (rybo-)chovných nádrží vzniká v důsledku nadměrného množství dodávaného krmiva a rozkládajících se organických látek. Mezi jeho hlavní složky patří kromě nesežraného krmiva také živočišné odpady, fytoplankton, prvoci, bakterie a houby, ale i minerální sedimenty či vzdušné nečistoty. Obsahuje dusíkaté sloučeniny, P a rozpuštěný organický C (Mirzoyan et al. 2012).

Akvakulturní kal se může vyskytovat v podobě suspendovaných nebo usazených částic. První z nich reprezentují jemné částice rozptýlené ve vodním sloupci, jež se obtížně z vody odstraňují (Cripps & Bergheim 2000), zatímco ty druhé mají větší velikost a mohou se usadit na dně během krátkého časového období (jsou následně i jednodušeji odstranitelné) (Ebeling & Timmons 2012). Nicméně oba typy jsou v akvakultuře potenciálně nebezpečné: ovlivňují jak dostupnost biotopů chovaných živočichů, tak v případě obsahu některých škodlivých látek taktéž jejich životy. Podílejí se na zhoršení kvality vody (Latt 2002), jelikož obsahují vysoké koncentrace sloučenin N, zvyšující aerobní bakteriální aktivitu a následně vedoucí ke snížení množství kyslíku ve vodě chovných nádrží (Akinwole et al. 2016). Proto je třeba se snažit kaly z nádrží pravidelně odstraňovat a před vypouštěním do recipientů i řádně upravovat (Hopkins & Villalón 1992; Amirkolaie 2008). Bez řádného zpracování by totiž mohly mít za následek rozvoj řas a vznik chorob ve vodním prostředí (Rubert 2008).

V současné době se používají různé postupy zpracování kalů, přičemž závisí jak na typu a vlastnostech kalu, tak na místních ekonomických, sociálních a klimatických podmínkách. Rozhodujícími faktory mohou být stavební a provozní náklady, udržitelnost a jednoduchost zpracování kalů (Mirzoyan et al. 2012). Výzkum související s kalovým hospodářstvím se dosud většinou zaměřuje na nakládání s krmivem pro akvakulturu s cílem optimalizovat spotřebu krmiva a jeho stravitelnost, čímž by se snížila produkce kalu (Turcios & Papenbrock 2014). Tato metoda je však závislá na druhu a velikosti chovaných vodních živočichů, potenciálu překrmování a vlastnostech krmiva (Westers 1995). Druhá metoda hospodaření se zaměřuje na

zlepšení recyklace vody v recirkulačních akvakulturních systémech včetně jejich využití v akvaponii (Monsees et al. 2017).

### 3.5.2 Recirkulační akvakulturní systémy a akvaponie

Recirkulační akvakulturní systémy (RAS) jsou určeny především k chovu velkého množství ryb v relativně malém objemu vody, přičemž voda se upravuje tak, aby se z ní odstranily toxické odpadní produkty, a znovu se využívá pro chov ryb (Rakocy & Hargreaves 1993; Timmons & Ebeling 2010; Verdegem 2013). Nitrifikační bakterie přeměňují toxický amoniak a dusitany na méně toxické dusičnany ve specializovaných biofiltrech: pokud však dojde k narušení biofiltru nebo produkci amoniaku přesahující jeho kapacitu, mohou se nahromadit na úroveň, jež je pro ryby škodlivá (Rakocy & Hargreaves 1993; Yildiz et al. 2017). Nitrifikační bakterie navíc nejsou schopny odstraňovat dusičnany, což může vést k postupné akumulaci této sloučeniny na takovou úroveň, jež může vyžadovat výměnu vody ke zmírnění negativních účinků (Konschel 2009). Právě zde se stává důležitou integrace s hydroponií (Okomoda et al. 2023).

Akvaponie (též označovaná jako integrovaný zemědělsko-akvakulturní systém) spojuje RAS s hydroponickým systémem (Krastanova et al. 2022; Verma et al. 2023) a je považována za jednu z nejefektivnějších a ekologicky nejudržitelnějších metod potravinové produkce 21. století (Somerville et al. 2014; Oladimeji et al. 2020). Využívá přitom symbiózy flóry a fauny k dosažení účinného systému, v němž odpadní produkty ryb zajišťují nutriční požadavky rostlin (obsahují významné množství N, P a Ca; Illera-Vives et al. 2015; Estevez et al. 2022). Absorpce živin rostlinami spolu s mikrobiálním procesem (de-)nitrifikace umožňuje recyklaci vody z nádrže s rybami, a tak se vytváří vyvážený mikroekosystém (Krastanova et al. 2022; Velazquez-Gonzalez et al. 2022). Při jeho použití se ze systému odstraňují dusičnany, ale také se přeměňuje jinak toxický dusíkatý odpad na formy využitelné rostlinami, jejichž prodejem může získat zemědělec další příjem (Pantanella et al. 2012). Hydroponická složka systému se časem osídlí vhodnou mikrobiotou, jež pomáhá při biofiltraci. Tím se zvyšuje účinnost čištění vody nad rámec toho, čeho by mohl dosáhnout samostatný biofiltr v běžných recirkulačních systémech (Rakocy & Hargreaves 1993).

Klíčem k optimalizaci využití zdrojů a produktivity systému je rovnováha mezi živinami získanými z rybochovných nádrží s požadavky hydroponicky pěstovaných rostlin (Rakocy et al. 2006). To již bylo prokázáno v mnoha studiích s cílem zlepšit funkčnost systému (např. Castro et al. 2006; Endut et al. 2010; Oladimeji et al. 2020). Endut et al. (2010) vypočítali poměr produkce ryb a rostlin na 15–42 g krmiva pro ryby/m<sup>2</sup> pěstební plochy rostlin. Díky tomu je množství živin vyprodukovaných rybami a živin odebraných rostlinami dokonale vyvážené, přičemž při překročení/snížení tohoto poměru je výkonnost rostlin značně negativně ovlivněna.

### 3.5.3 Úpravy akvakulturního kalu

V akvaponii lze rozlišit dva typy zpracování akvakulturního kalu: aerobní a anaerobní. *Aerobní* zpracování spočívá ve zvýšení oxidace kalu podporou jeho kontaktu s kyslíkem. V aerobních reaktorech se do směsi kalu a vody přivádí vzduch pomocí dmychadel pro podporu oxidace organických látek (jako vedlejší produkt se uvolňuje CO<sub>2</sub>) a zajištění promíchání kalu. Významně se snižuje obsah nerozpuštěných látek, CHSK a BSK, a zároveň se z kalu uvolňují

živiny pro opětovné použití v akvaponickém systému. *Anaerobní* zpracování je založeno na principu AD využívané ke stabilizaci a snížení hmotnosti kalu, a produkci methanu (viz kap. 3.4.1). Také v tomto případě se rozkladem organických látek mohou uvolnit živiny zpět do akvaponického systému (Delaide et al. 2019). Bylo zjištěno, že akvakulturní kal lze účinně využít též jako ko-substrát v bioplynových stanicích (mj. kvůli zvýšené produkci methanu či podpoře mikrobiální činnosti při AD; Estevez et al. 2022).

Pokud se odhlédne od tradičních (an-)aerobních reaktorů, lze pro úpravu kalu využít také proces vermikompostování. V předběžných šetřeních dříve někteří autoři (Rynk et al. 1998a,b; Büyüksönmez et al. 2005) pozorovali vysokou mortalitu žížal druhu *Eisenia fetida* při jejich umístění do nádob s čerstvými odpadními produkty z chovu pstruhů. To bylo pravděpodobně způsobeno vysokým obsahem amoniaku v rybím odpadu, přičemž žížalám se již dařilo lépe při nasazení do „zestárlého“ odpadu. Z toho autoři vyvodili, že za daných podmínek by mohly být odpady z akvakultury vhodným materiálem pro vermikompostování. Marsh et al. (2005) dále tuto možnost zkoumali a provedli experimenty se žížalami stejného druhu, krmnými směsí akvakulturního kalu a drcené kartonáže. Vyšší koncentrace kalu vedly k rychlejšímu růstu žížal. Kombinace kalu z RAS a odpadu z lepenky tak může představovat životaschopnou variantu vstupních surovin pro vermikompostování. Kouba et al. (2018) se zaměřili na 18-týdenní experimentální vermikompostování různých typů kalů a uvádí několik klíčových zjištění, podtrhujících potenciál metody nakládání s akvakulturními kaly při produkci cenných konečných produktů pro zemědělské využití:

- vysoká míra přežití žížal přesahující 90 % až do 6. týdne experimentů;
- kaly bohatší na živiny měly pozitivní vliv na hmotnost žížal a ukazatele jejich reprodukce;
- jak původní kaly, tak výsledné vermikomposty byly shledány jako vhodné pro použití v zemědělství (splňovaly limity pro těžké kovy podle běžně používaných předpisů);
- žížaly byly shledány jako obecně bezpečné krmivo pro ryby (z hlediska obsahu těžkých kovů);
- vermikompostování bylo doporučeno jako čistá a udržitelná technologie pro přeměnu kalů z akvakultury na hodnotný vermikompost a biomasu žížal.

### 3.5.4 Využití akvaponie

Akvaponické systémy se využívají pro pěstování řady plodin, přičemž jako nejslibnější druhy se jeví salát a špenát (Sharma et al. 2018). Dále se tímto způsobem úspěšně pěstují i hořčice, rajče, okurka, tykev, celer, koriandr či máta (více viz Okomoda et al. 2023). Vlastnosti rybího odpadu jako zdroje živin se přitom mohou značně lišit v závislosti na chovaném druhu ryb (Timmons & Ebeling 2010): do nádrží se obvykle nasazují pstruzi, kapři, parmy, tilapie nebo sumečci (více viz Okomoda et al. 2023).



## 4 Materiál a metody

Experimentální část této práce byla zaměřena na využití výluhu z vermikompostů (vyprodukovaných z akvakulturního kalu) jako živného roztoku při hydroponickém pěstování rostlin. Pro účely experimentu probíhajícího včetně přípravných prací od července do září 2023 byl využit pěstební prostor („indoor“ pěstírna) v podzemním podlaží budovy FAPPZ-B ČZU v Praze. Tato pěstírna o celkové ploše 85 m<sup>2</sup> se skládá ze 4 samostatných pěstebních místností, centrální chodby a skladu.

### 4.1 Pěstební prostor

#### 4.1.1 Uspořádání

Rozloha jedné využití pěstební místnosti činila 3 x 5 m (15 m<sup>2</sup>), přičemž prostor pro samotnou kultivaci byl vymezen 4 pěstebními stoly o rozměrech 1 x 2 m (2 m<sup>2</sup>) (tj. celkem 8 m<sup>2</sup>). Každý stůl tak definoval specifickou výživovou variantu experimentu s vlastní nádrží na živný roztok o maximálním objemu 100 l. Všechny nádrže byly vyrobeny z plastu vhodného pro potravinářský průmysl.

#### 4.1.2 Mikroklimatické podmínky

Mikroklima v pěstební místnosti bylo zajištěno vzduchotechnickou jednotkou, udržující a zaznamenávající nastavené parametry (relativní vzdušná vlhkost, teplota a koncentrace CO<sub>2</sub>). Relativní vzdušná vlhkost při kultivaci byla průměrně udržována na úrovni 60 % a koncentrace CO<sub>2</sub> na 420 ppm (tj. 756 mg/m<sup>3</sup>), přičemž CO<sub>2</sub> se do atmosféry místnosti neustále doplňoval pomocí generátoru na bázi spalování methanu. Teplota byla udržována na úrovni 20 °C během denní (světelné) fáze a při noční (temné) fázi se snižovala na hodnotu 15 °C.

#### 4.1.3 Osvětlení

Světelný režim v pěstební místnosti byl zajištěn pomocí šesti vysokotlakých sodíkových výbojek o výkonu 1000 W, jež mohou rostlinám poskytovat plné světelné spektrum. Počáteční světelná intenzita v místnosti byla na úrovni 60 % kvůli světelnému šoku při přesunu vyklíčených rostlin pěstovaných pod LED světly (viz kap. 4.2) do prostředí s HPS světly, přičemž zde svítila pouze polovina světel. Následně se výkon světel v průběhu čtyřtýdenního experimentu postupně zvyšoval tak, že v posledním týdnu dosahoval 80 %. Pro kontrolu světelného režimu byl k dispozici data logger a příslušný flash disk.

## 4.2 Rostlinný materiál

Pro experimentální účely byla použita semena těchto rostlin: salát římský (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), bazalka pravá (*Ocimum basilicum* L.), kozlíček polníček (*Valerianella locusta* (L.) Laterr.) a kopr vonný (*Anethum graveolens* L.) od firmy SEMO a.s.

Semena byla pěstována v sadbovacích kostkách z rockwoolu o rozměrech 4 x 4 x 4 cm. Pro každý druh rostliny bylo připraveno 50 kostek – na jednu z nich připadala buď tři semena

salátu či bazalky, nebo pět semen polníčku či kopru (viz obr. 9). Semena byla ponechána klíčení pod LED světly při teplotě 25 °C po dobu tří týdnů, přičemž v jeho průběhu došlo k postupnému snížení vlhkosti v místnosti (1. týden 90 %, 2. týden 80 %, 3. týden 70 %). Následně bylo z celkových 50 kostek pro daný druh vybráno vždy 32 kusů s relativně vysokým vzrůstem rostlin. U nich došlo k redukci počtu rostlin tak, že na jednu kostku připadala jedna rostlina salátu či bazalky, resp. tři rostliny polníčku či kopru. Nakonec byly rostliny v sadbovacích kostkách přemístěny do květináčů o objemu 0,5 l, částečně naplněných inertním substrátem z kokosových vláken (předem ošetřených propařením kvůli larvám hmyzích škůdců).



Obr. 9. Klíčení semen pod LED světly (salát vlevo, polníček vpravo)

### 4.3 Hydroponický experiment

#### 4.3.1 Stručný popis

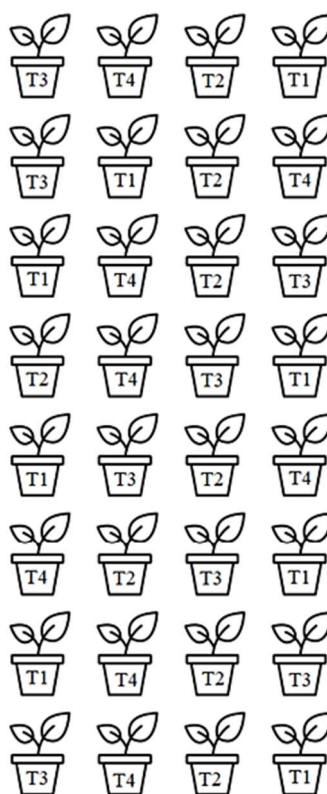
Pro experiment prováděný v jedné z pěstebních místností byl použit uzavřený recirkulační bezpůdní pěstební systém s kapkovou závlahou (bližší popis viz kap. 3.2.5) s recirkulací živných roztoků. Roztok z nádrže pomocí čerpadla vstupoval do rozvodných plastových trubic, připevněných po obvodu každého pěstebního stolu. K těmto trubicím pak byly připojeny kapiláry pro přívod roztoku k jednotlivým květináčům. Stoly měly mřížkovitou strukturu povrchu s mírným sklonem pro zajištění odtoku nevstřebaného množství roztoku přes mechanický filtr zpět do nádrže. Objem roztoku v každé nádrži dosahoval 90 l.

Rostliny všech čtyř druhů byly v rovnoměrných počtech rozmístěny na 4 stolech po 32 květináčích (viz obr. 10) s uspořádáním dle obr. 11. Dodávka živných roztoků (bližší popis viz kap. 4.3.2) byla obstarávána při denní fázi pomocí kapilár umístěných do jednotlivých květináčů. S využitím automatické závlahy bylo k rostlinám každý den jednorázově dodáno 94 ml živného roztoku (v délce 60 sekund). Z technických důvodů (kvůli ucpávání hadiček v systému) byly rostliny v květináčích s organickými výživovými variantami zalévány ručně (po úpravě pH, denně mezi jednou a třetí hodinou odpoledne). Ruční zalévání bylo prováděno s obdobným množstvím dodávaného objemu roztoku jako v případě automatické závlahy.

Vegetační fáze s fotoperiodou „dlouhého dne“ (18 hod. světla a 6 hod. tmy) byla udržována po dobu 4 týdnů.



Obr. 10. Uspořádání stolů v pěstební místnosti



Obr. 11. Rozmístění rostlin na stole (T1: salát, T2: bazalka, T3: polníček, T4: kopr)

### 4.3.2 Výživové varianty

Experiment byl koncipován pro čtyři výživové varianty: (a) anorganický roztok NPK (kontrola), (b) výluh z vermikompostu, (c) fugát (varianta 100 %), (d) fugát (varianta 50 %). Jeden stůl sloužil jako jedna výživová varianta. Ve všech variantách se k přípravě živných roztoků využívala po předchozí dohodě pouze kohoutková voda. Roztoky se připravovaly v den zahájení čtyřtýdenního experimentu (jen varianta (b) den předem). Předpokládaná koncentrace celkového N ve výživových variantách (a) až (c) se pohybovala v rozmezí 145-150 mg/l (v případě varianty (d) na poloviční hodnotě, tj. 70-75 mg/l).

(a) K tvorbě minerálního roztoku byla využita hnojiva YaraTera© pro kapkovou závlahu: *Kristalon Hnědý 3-11-38+4MgO+micro* v kombinaci s produktem *CALCINIT*.

YaraTera Kristalon Hnědý je krystalické, ve vodě rozpustné NPK hnojivo s hořčíkem a sírou, jenž bylo speciálně vyvinuto pro hydroponické pěstování rostlin. Dusík obsažený v tomto hnojivu je pouze ve formě dusičnanů. Složení: N 3 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 11 %, K<sub>2</sub>O 38 %, MgO 4 %, SO<sub>3</sub> 27,5 %, Fe 0,07 %, Mn 0,04 %, B 0,025 %, Zn 0,025 %, Cu 0,01 %, Mo 0,004 % (<https://www.yaraagri.cz/vyziva-rostlin/hnojiva/yaratera/yaratera-kristalon-hnedý-3-11-38-4-brown/>). YaraTera CALCINIT je sypké, taktéž ve vodě rozpustné dusíkaté hnojivo s vápníkem, jenž neobsahuje chlór ani sodík. Složení: N 15 % (NO<sub>3</sub>-N 13,5 %, NH<sub>4</sub>-N 1,5 %), CaO 26,5 % (<https://www.yaraagri.cz/vyziva-rostlin/hnojiva/yaratera/yaratera-calcinit/>).

Po namíchání 10 % roztoku a jeho 100x zředění lze na základě údajů na etiketách hnojiv předpokládat množství 190 mg N/l. Pro dosažení koncentrace 150 mg N/l bylo třeba vyšší míry ředění (cca 126,7x). V tom případě připadá 0,71 l roztoku Kristalon/Calcinit (v rovnoměrném zastoupení obou hnojiv) na 90 l výsledného živného roztoku.

(b) Vermikompost pocházel z předchozího experimentu se zaměřením na zpracování akvakulturního kalu s využitím procesu vermikompostování (Kolářová 2023). Odvodněný kal z akvakultury pocházel od firmy Tilapia s.r.o. (Hroby, okr. Tábor). Tato firma se zaměřuje na chov teplomilných sladkovodních ryb, jako tilapie nilská (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) či sumeček africký (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822), a přitom využívá moderní recirkulační systém pro transformaci nadbytečného akvakulturního kalu na odpadní teplo v bioplynové stanici. Veškeré vstupní suroviny (souhrnná hmotnost 7 kg) byly po smíchání a homogenizaci dávkovány do vermikompostérů, jejichž lože (množství 3 l) tvořila matolina (pevné zbytky po lisování šťávy z vinných hroznů) spolu s jablečnými výlisky a dřevěné piliny (v poměru 3:1), a s žížalami druhu *Eisenia andrei*. Celý proces vermikompostování trval od března do září 2022.

Výluh z vermikompostu byl připravován přímo v pěstební místnosti v nádrži s vodou. K přípravě 90 l živného roztoku posloužily dvě varianty vermikompostu (var. 1: kal 100 % hmot., var. 2: kal 95 % hmot. + vaječné skořápky 5 % hmot.) v poměru 45:55 % a souhrnné hmotnosti 2 kg, jež byly vyluhovány ve vodě po dobu 24 hodin za konstantního míchání elektrickým míchačem. Vše přitom probíhalo při pokojové teplotě ve zhasnuté pěstební místnosti. Následně došlo k filtraci výluhu přes síťovinu (velikost oka cca 1 mm) kvůli omezení ucpávání závlahového systému (Kim et al. 2015), přičemž v průběhu čtyřtýdenního hydroponického pěstebního cyklu bylo zajištěno jeho provzdušňování pomocí vzduchovacích kamenů.

(c) Fugát pocházel ze zemědělské bioplynové stanice provozované firmou Agro Podlesí a.s. v obci Červené Janovice na Kutnohorsku. V této bioplynové stanici dochází k anaerobní fermentaci za mezofilních podmínek. Hlavní surovinou používanou ke zpracování je kravský hnůj, jenž tvoří 70 % vlhké hmoty, dále kukuřičná siláž (20 %) a také travní hmota. K separaci fermentačního zbytku na separát a fugát se využívá mechanický šnekový separátor, přičemž fugát se poté zpracovává v poloprovozním nitrifikačním reaktoru (téměř veškerý amoniakální dusík se převádí na dusičnanový dusík) (Švehla et al. 2023). V době odběru fugátu (27.4.2023) bylo pH v reaktoru 7,83 a koncentrace kyslíku na úrovni 1,5 mg/l.

K přípravě experimentálního živného roztoku bylo na základě užití šarže (koncentrace  $1155 \pm 55$  mg N/l) aplikováno 4,82 l fugátu do nádrže s vodou (doplněno na výsledný objem 90 l). Procesy filtrace a aerace byly shodné jako při tvorbě výluhu z vermikompostu.

(d) Viz výživová varianta (c) s rozdílnou dodávkou 2,41 l fugátu do nádrže s vodou (opět doplněno na výsledný objem 90 l).

### 4.3.3 Vzorkování roztoků

Každodenní měření parametrů živných roztoků zahrnovala stanovení EC a teploty. Od konce prvního týdne experimentu bylo sledováno pH před úpravou ( $\text{pH}_1$ ) a po úpravě ( $\text{pH}_2$  co nejbližší hodnotě 6,5) včetně spotřebovaného objemu látek pro úpravu pH. Pro snížení pH byla použita kyselina octová, naopak pro jeho zvýšení roztok KOH. Fyzikálně-chemické parametry (pH, EC a teplota) byly zjišťovány pomocí vodotěsného multimetru GroLine (Hanna Instruments model HI9814) pro zemědělství a hydroponii.

Jednorázově se během prvních dvou týdnů experimentu zjišťovalo provzdušnění živných roztoků pomocí oxymetru, ve zbývajícím čase pak probíhalo každodenní měření. Jednou týdně se odebíraly vzorky (35 ml/varianta) do falkonek, jež se zamrazily pro pozdější analýzy (jeden z odběrů neproběhl na začátku čtvrtého týdne, ale až na jeho konci). Roztok v nádrži byl řádně promíchán kvůli homogenizaci a následně proběhl vlastní odběr vzorku přibližně uprostřed nádrže s roztokem.

### 4.3.4 Vzorkování, skladování a homogenizace biomasy

Po 4 týdnech proběhla jediná a konečná sklizeň všech variant (stolů). Nadzemní biomasa rostlin byla ustřižena, zvážena v čerstvém stavu na analytických vahách (typ Sartorius Entris II Essential 0,01 g) a poté označena výživovou variantou, druhem rostliny, číslem opakování a datem zpracování. Následně byly vzorky zabaleny do tvrdého alobalu a ponořeny do Dewarovy nádoby s tekutým dusíkem. Pak se uskladnily v mrazáku při teplotě  $-80$  °C pro pozdější analýzy enzymové aktivity, obsahu vitamínu C atd., jež dosud nebyly provedeny a v této diplomové práci nejsou zahrnuty.

Pro stanovení obsahu sušiny byly lyofilizované vzorky po vyjmutí z mrazáku převáženy a jednotlivě zabaleny do papírových sáčků. Následně byly uloženy do sušárny a tam ponechány při teplotě  $105$  °C po dobu 24 hodin. Poté proběhlo další vážení a po zjištění hmotnosti sušených vzorků byly vzorky drceny v mixéru a poté v třecí misce s tloučkem. Jelikož u některých vzorků bylo zjištěno nedostatečné množství sušiny pro další laboratorní analýzy, všech 8 vzorků jednoho druhu rostliny pro jednu výživovou variantu bylo zhomogenizováno do podoby jednoho velkého vzorku.

## 4.4 Laboratorní analýzy

### 4.4.1 Prvkové složení nadzemní biomasy rostlin

Rozdrcené vzorky byly po homogenizaci (viz kap. 4.3.4.) rozděleny na pět podvzorků a analyzovány v laboratořích Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin na FAPPZ ČZU v Praze. Součástí analýz bylo stanovení zastoupení C, N, H a S a celkový obsah dalších 15 prvků.

Pro stanovení C, N, H a S se navázilo 20 mg homogenizovaného podvzorku do Al kalíšků určených ke spalování. Tato metoda je velmi citlivá, a proto bylo nezbytné zajistit čistotu a bezprašnost pracoviště. Navážený materiál byl opatrně zabalen do fólie pomocí pinzety, aby nedošlo ke ztrátě či kontaminaci. Připravený vzorek byl následně analyzován prostřednictvím kvantitativního rozkladu za vysokých teplot technologií „Advanced Purge and Trap“ (APT). Analýza probíhala v elementárním analyzátoru *CHNS vario MACRO cube* s vysokoteplotní spalovací jednotkou. Materiál byl po dávkách vstřikován kyslíkem a spalován při teplotách až 1200 °C, což způsobilo oxidaci uhlíku, dusíku, síry a vodíku za vzniku plyných reakčních produktů (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O). Tyto plyny procházely spalovací trubicí, jež zabráňovala tvorbě netěkavého SO<sub>3</sub> a vázala prvky II. A skupiny periodické soustavy prvků (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra). Následně byly SO<sub>3</sub> a NO<sub>x</sub> redukovány a těkavé halogenové sloučeniny zachyceny v redukční trubici. Jednotlivé složky plynů byly absorbovány a separovány v kolonách s výjimkou N<sub>2</sub>. Plyny poté byly transportovány nosným plynem k detektoru tepelné vodivosti, generujícím elektrický signál v závislosti na přítomnosti CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> nebo H<sub>2</sub>O v analyzované směsi. Druh a koncentrace měřené látky byly vypočteny na základě tvaru píku.

Pro stanovení dalších prvků (Al, As, B, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Zn) byl využit proces suchého rozkladu (zpopelnění). Nejprve se navázilo 0,5 g homogenizovaného podvzorku do kádinky z křemenného skla o objemu 50 ml. Kádinka se přikryla hodinovým sklíčkem a umístila na topnou desku, kde došlo za postupného zvyšování teplot (každých 60 min.) k rozkladu vzorků (teplota 160, 220, 280 a 350 °C). V další fázi byly kádinky se vzorky přemístěny do muflové pece (viz obr. 12), kde při teplotách 450 až 500 °C setrvaly do druhého dne (12 hod.). Po vychladnutí a přidání 1 ml HNO<sub>3</sub> (65%) byly umístěny na topnou desku o teplotě 120 °C (60 min.), následně žihány v peci při teplotě 500 °C (90 min.) a vzorky byly za míchání v ultrazvukové lázni převedeny do vodného 1,5% roztoku HNO<sub>3</sub>. Vlastní měření koncentrace sledovaných prvků bylo provedeno pomocí atomové absorpční spektrometrie (AAS) a optické emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP-OES) (Hoenig 2003).

### 4.4.2 Prvkové složení živných roztoků

V odebraných vzorcích živných roztoků pro všechny zkoumané výživové varianty došlo po ukončení pěstebního cyklu ke stanovení koncentrace jednotlivých prvků obdobně jako u suchého rozkladu (viz kap. 4.4.1.) (15 prvků + Na, S) pomocí atomové absorpční spektrometrie (AAS) a optické emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP-OES) (Hoenig 2003).





Obr. 12. Topná deska a muflová pec

Celkový dusík (TN) a jeho jednotlivé anorganické formy (N-amon,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) byly stanoveny pomocí spektrofotometrického měření prostřednictvím spektrofotometru HACH DR 3900. V případě potřeby se vzorky ředily 10x.

*TN*: Stanovení bylo provedeno metodou HACH 10071 (*Persulfate Digestion Method*).

*N-amon*: Zjištění koncentrace amoniakálního dusíku proběhlo za použití indofenolové metody, jejíž princip je založen na reakci amonných iontů s chlornanovými ionty a salicylanem sodným za přítomnosti katalyzátoru nitroprussidu sodného. Ionty chlornanu se tvořily pomocí alkalické hydrolyzy dichlorisokyanuratanu sodného. Při hodnotě pH 12,6 vznikající chloramin reagoval se salicylanem sodným za přítomnosti nitroprussidu sodného, kdy vznikla intenzivně modrá sloučenina typu indofenolové modři (Horáková 2007). Samotné spektrofotometrické stanovení bylo provedeno při vlnové délce 655 nm.

*NO<sub>2</sub>-N*: Ke zjištění koncentrace dusitanového dusíku docházelo v prostředí okyseleném kyselinou fosforečnou. Zde se disociovaný dusitan přeměnil na formu nedisociované kyseliny dusité. Poté se amid kyseliny sulfanilové přeměnil na formu diazoniové soli. Následně vzniklo reakcí diazoniové soli s *N*-(1-naftyl)-1,2-ethylendiamin-dihydrochloridem červené azobarvivo. Čím více byla barva směsi sytější, tím větší koncentrace dusitanového dusíku se ve vzorku nacházela (Horáková 2007). Samotné spektrofotometrické stanovení bylo provedeno při vlnové délce 540 nm.

*NO<sub>3</sub>-N*: Zjištění koncentrace dusičnanového dusíku proběhlo za použití 2,6-dimethylfenolu. Použitá metoda spočívala v reakci 2,6-dimethylfenolu smíchaného se směsí kyseliny sírové a fosforečné. Výsledkem reakce byla červeně zbarvená směs s názvem 4-nitro-2,6-dimethylfenol. Čím více byla barva směsi sytější, tím větší koncentrace dusičnanového dusíku se v ní nacházela (Horáková 2007). Samotné spektrofotometrické stanovení bylo provedeno při vlnové délce 324 nm.

## 4.5 Statistické analýzy dat

Ve své diplomové práci se po předchozí dohodě zaměřuji na analýzy a vyhodnocení dat získaných při pěstování salátu a polníčku. Ostatní pěstované rostliny (tj. kopr a bazalka) jsou zahrnuty v současně zpracovávané DP (Petra Franců).

Experimentální data jsou většinou prezentována jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka (SD), popř. se jedná o jednorázově naměřené hodnoty nebo průměry dvou hodnot (bez možnosti stanovení SD). Tato data byla graficky zpracována s využitím programu Microsoft Excel.

Statisticky významné rozdíly mezi výnosy pěstovaných rostlin, zastoupením prvků v biomase těchto rostlin a roztocích a fyzikálně-chemickými parametry roztoků pro jednotlivé výživové varianty byly přednostně testovány pomocí analýzy rozptylu jednoduchého třídění. K ověření předpokladu o normálním rozdělení dat došlo za použití Shapirova-Wilkova testu (pro každou variantu), shoda rozptylů se pak zjišťovala pomocí Bartlettova testu. V případě zpochybnění normality posloužil Kruskalův-Wallisův test jako náhrada analýzy rozptylu jednoduchého třídění.

Statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými výživovými variantami byly přijaty při hodnotě pravděpodobnosti  $p < 0,05$ . Pokud byly shledány jako významné, byla aplikována vybraná metoda mnohonásobného porovnání (Tukeyova metoda HSD, resp. Dunnův test s Bonferroniho korekcí). Písmenná označení pro hodnocení podobných/odlišných variant byla získána za použití funkce *multcompLetters*.

Vývoj prokysličených roztoků pro jednotlivé výživové varianty v průběhu hydroponického experimentu byl hodnocen pomocí regresního modelu (funkce *lm*, *summary*, *anova*). Počáteční měření nebyla do analýz zahrnuta vzhledem k jejich odlehlosti a vlivu na hodnocení výsledků. Lineární závislost byla prokázána při hodnotě pravděpodobnosti  $p < 0,05$ . Síla vzájemné závislosti koncentrace O<sub>2</sub> a času byla popsána pomocí korelačního koeficientu *r* (zjednodušeně stanoven jako odmocnina koeficientu determinace R<sup>2</sup>).

Veškeré analýzy byly provedeny ve statistickém programu R verze 3.6.0 (R Core Team 2020) v souladu se základní statistickou literaturou (Zvára 2013).



## 5 Výsledky

Přehled výsledků, tj. výnosů rostlin (salát a polníček), koncentrací vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) v biomase rostlin a živných roztocích, a fyzikálně-chemických parametrů roztoků pro jednotlivé výživové varianty, lze nalézt v tab. 3 (pokud není uvedeno jinak).

### 5.1 Výnosy

Výnosy salátu a polníčku vyjádřené jako hmotnost nadzemní biomasy se významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami (salát sklizeň:  $F = 193,2$ , salát sušina:  $F = 258,7$ , polníček sklizeň:  $F = 79,2$ , polníček sušina:  $F = 89,0$ ; pro všechna  $p < 0,001$ ). Nejvyšší průměrné hodnoty byly zjištěny pro rostliny zásobované roztokem NPK a byly významně vyšší ve srovnání se všemi organickými variantami. V případě sklizené biomasy byly výnosy pro organické varianty obdobně nízké, což však již neplatilo při srovnání biomasy sušiny. Z podrobnějšího hodnocení organických roztoků vyplývá, že nejnižších výnosů bylo dosaženo při využití výluhu z vermikompostu, zatímco relativně nejvyšších výnosů při dodání živin z fugátu (varianta 100 %). Výnosy pro fugát 50 % se pohybovaly mezi těmito průměry: v případě salátu se od nich statisticky významně lišily, kdežto v případě polníčku již nikoliv.

### 5.2 Prvkové složení nadzemní biomasy

#### 5.2.1 Salát

Koncentrace vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) v biomase salátu se významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $F = 16\ 003$ ,  $F = 72,9$ ,  $\chi^2 = 17,3$ ,  $F = 612,7$ ; pro všechna  $p < 0,001$ ). Nejvíce celkového dusíku, draslíku, fosforu a vápníku v salátu bylo v průměru zjištěno u kontrolní varianty NPK, zatímco nejnižších hodnot bylo dosaženo při pěstování s fugátem. Rostliny pěstované s využitím výluhu z vermikompostu měly relativně nejvyšší koncentrace těchto prvků v biomase v rámci hodnocení všech organických roztoků. Ovšem ze statistického hlediska se významně lišily od obou variant fugátu pouze v případě TN a Ca. Doplnkově stanovené poměry C:N se také významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $F = 4\ 002$ ,  $p < 0,001$ ). Nejnižší hodnoty byly v průměru naměřeny pro roztok NPK ( $9,9 \pm 0,1$ ), významně vyšší (navzájem odlišné) hodnoty byly zjištěny pro organické varianty ( $49,3 \pm 0,9$  pro výluh z vermikompostu,  $54,4 \pm 1,4$  pro fugát 50 %, a  $61,4 \pm 4,1$  pro fugát 100 %).

Z detailní analýzy dalších prvků vyplývá, že v salátu pěstovaném s využitím organických roztoků bylo v průměru relativně nejvíce Al, B, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, S a Zn při využití výluhu z vermikompostu. Ze statistického hlediska se významně lišily od jedné či obou variant fugátu v případě B a Mg, resp. Al, Cu, Mn a Zn. V řadě případů (Al, B, Fe, Mn, Ni, Zn) byly jejich koncentrace dokonce absolutně nejvyšší v rámci všech výživových variant. Navíc As a Cr byly zjištěny v biomase rostlin pouze při pěstování s výluhem z vermikompostu. Naopak v případě Mg a S byly tyto prvky nejvíce zastoupeny v salátu zásobovaném anorganickým roztokem NPK (viz přílohy, str. I).

## 5.2.2 Polníček

Koncentrace vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) v biomase polníčku se významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $F = 3771$ ,  $\chi^2 = 14,5$ ,  $F = 1247$ ,  $\chi^2 = 16,1$ ;  $p < 0,01$  pro K a Ca,  $p < 0,001$  pro TN a P). Nejvíce celkového dusíku v polníčku bylo v průměru zjištěno u kontrolní varianty NPK, kdežto významně nižší (navzájem odlišné) hodnoty byly dosaženy při pěstování v organických roztocích (sestupně v tomto pořadí: fugát 100 %, fugát 50 % a výluh z vermikompostu). Také v případě draslíku a vápníku byly nejvyšší koncentrace prvku naměřeny u polníčku zásobovaného roztokem NPK. Významně nižší hodnoty K byly zjištěny pro výluh z vermikompostu, obě varianty fugátu se od ostatních variant statisticky významně nelišily. Co se týče Ca, tak to bylo obráceně (tzn. významně nižší hodnoty pro fugát a statisticky nevýznamně odlišné hodnoty pro výluh z vermikompostu). Předchozím srovnáním se naopak vymyká fosfor, jelikož nejvíce byl zastoupen v biomase polníčku zásobovaného živinami právě z tohoto výluhu. Rostliny pěstované s využitím NPK již na tom byly hůře, ovšem nejnižší koncentrace byly zaznamenány při pěstování s fugátem. Doplnkově stanovené poměry C:N se také významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $F = 1\,124$ ,  $p < 0,001$ ). Nejnižší hodnoty byly v průměru naměřeny pro roztok NPK ( $10,3 \pm 0,1$ ), významně vyšší (navzájem odlišné) hodnoty byly zjištěny pro organické varianty ( $16,6 \pm 0,4$  pro fugát 100 %,  $19,0 \pm 0,3$  pro fugát 50 %, a  $21,3 \pm 0,3$  pro výluh z vermikompostu).

Co se týká dalších prvků, v polníčku pěstovaném s využitím organických roztoků bylo v průměru relativně nejvíce Al, B, Cr, Cu, Fe, Ni, S a Zn při využití výluhu z vermikompostu a/nebo fugátu 100 %. Ze statistického hlediska byly jejich koncentrace (kromě síry) dokonce absolutně nejvyšší ze všech výživových variant, As zjištěn jen v biomase rostlin zásobovaných výluhem z vermikompostu. V případě Mg, Mn a S byly naopak tyto prvky nejvíce zastoupeny v polníčku pěstovaném s anorganickým roztokem NPK (viz přílohy, str. II).

## 5.3 Prvkové složení živných roztoků

Koncentrace TN a Ca v roztocích se významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $F = 29,2$ ,  $p < 0,01$ ;  $\chi^2 = 9,4$ ;  $p < 0,05$ ), což již neplatí v případě K a P ( $\chi^2 = 7,5$ ,  $p > 0,05$ ;  $\chi^2 = 7,7$ ,  $p > 0,05$ ). Nejvíce celkového dusíku bylo zjištěno u kontrolní varianty NPK a průměrná hodnota byla významně vyšší ve srovnání se všemi organickými variantami (totéž platilo i pro amoniakální ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) a dusičnanový dusík ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ); viz přílohy, str. III). Také v případě vápníku byly nejvyšší koncentrace prvku naměřeny v anorganickém roztoku NPK. Významně nižší hodnoty byly zjištěny ve výluhu z vermikompostu, obě varianty fugátu se od těchto variant statisticky významně nelišily. Ačkoli významné rozdíly v koncentraci draslíku a fosforu nebyly zjištěny, i pro tyto prvky byly nejvyšší průměrné hodnoty zaznamenány v roztoku NPK. Nejméně (resp. nejvíce) K bylo v průběhu experimentu naměřeno pro výluh z vermikompostu (resp. fugát 100 %), kdežto minimální (resp. maximální) koncentrace P v fugátu s variantou 50 % (resp. 100 %).

Zde je třeba zdůraznit, že prvkové složení živných roztoků se v průběhu experimentu vyvíjelo a obecně docházelo k nárůstu koncentrace vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) v čase. To platilo jak pro kontrolní anorganickou variantu NPK (TN, K, Ca), tak i pro výluh z vermikompostu a fugát (varianta 50 %) (K, P, Ca). Co se týká TN, je zřejmé, že původní

předpoklad srovnání koncentrace celkového dusíku na úroveň 145–150 mg/l (resp. 70–75 mg/l pro fugát s variantou 50 %) nebyl splněn. Počáteční měření TN tomu odpovídalo pouze v případě NPK, kdežto ve výluhu z vermikompostu bylo dosaženo pouze 6 %, ve fugátu pak 45, resp. 52 % předpokládané úrovně (varianta 100 %, resp. 50 %). Z podrobnějšího hodnocení vyplývá, že procentuální zastoupení anorganických forem dusíku (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) se též měnilo v průběhu experimentu. Obecně vysoké hodnoty (min. 76 %, s převahou NO<sub>3</sub>-N) byly zjištěny v anorganickém roztoku NPK, nízké hodnoty (19–30 %, s převahou NH<sub>4</sub>-N) naopak ve výluhu z vermikompostu. U obou variant fugátu bylo zastoupení velmi variabilní s tím, že na začátku dosahovalo vysokých hodnot (min. 83 %, s převahou NO<sub>3</sub>-N a NO<sub>2</sub>-N) a na konci experimentu již nízkých hodnot (31 %, s převahou NO<sub>3</sub>-N a NH<sub>4</sub>-N).

Koncentrace dalších prvků dosahovaly nejvyšších průměrných hodnot v anorganickém roztoku NPK (B, Cu, Mg, S, Zn), resp. ve fugátu 100 % (Al, Fe, Mn, Na, Ni, Pb). Sodík obecně převažoval u obou variant fugátu. Nicméně vzhledem k variabilitě naměřených hodnot nebyly až na B a Zn zjištěny statisticky významné rozdíly mezi jejich koncentracemi napříč všemi variantami (viz přílohy, str. IV). Hodnoty Mg, Na a S v roztocích se během experimentu zvyšovaly, navíc u fugátu 100 % při posledním měření byly hodnoty jak Fe, tak Mn dokonce řádově vyšší ve srovnání s předchozími měřeními.

#### 5.4 Doplnkové měření fyzikálně-chemických parametrů roztoků

Hodnoty pH<sub>1</sub>, EC, teploty a koncentrace kyslíku v roztocích se významně lišily mezi jednotlivými výživovými variantami ( $\chi^2 = 62,1$ ,  $\chi^2 = 81,0$ ,  $\chi^2 = 37,0$ ,  $\chi^2 = 32,1$ ; pro všechna  $p < 0,001$ ).

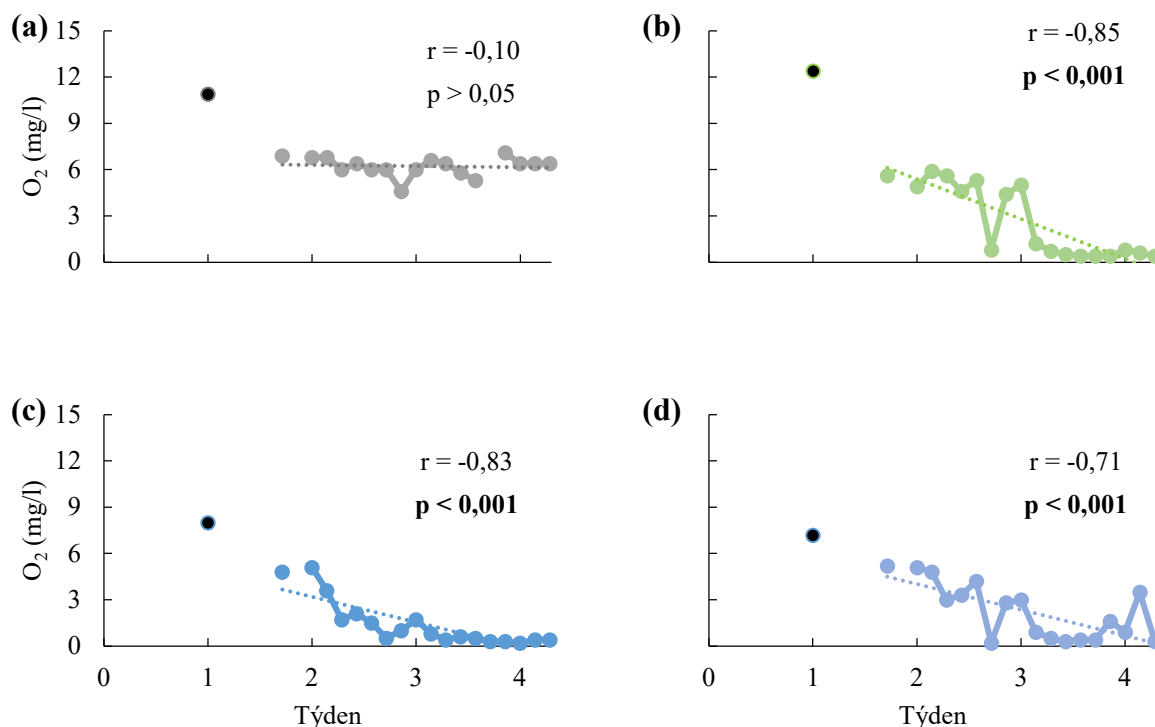
Hodnoty pH<sub>1</sub> živných roztoků v průběhu hydroponického experimentu byly vždy vyšší v nádržích pro organické výživové varianty oproti kontrolní variantě NPK. Při detailní analýze lze obdobně hodnotit (až na několik ojedinělých odlišných měření) také oba roztoky fugátu při srovnání s výluhem z vermikompostu. Během prvních dvou týdnů experimentu byly naměřené hodnoty pH<sub>1</sub> relativně stabilní pro všechny výživové varianty. Ve třetím a čtvrtém týdnu již došlo k jejich rozkolísání, přičemž s blížícím se koncem experimentu se výkyvy stávaly stále častějšími a výraznějšími. Tehdy byly také zaznamenány nejvyšší dosažené hodnoty: 7,12 pro anorganický roztok NPK, 8,40 pro výluh z vermikompostu, a 8,92 (resp. 8,97) pro fugát (varianta 100, resp. 50 %). Pro úpravu pH (pH<sub>1</sub> → pH<sub>2</sub>) se převážně využívala kyselina octová, neboť naměřené hodnoty většinou překračovaly cílové pH<sub>2</sub> na úrovni 6,5. To přitom platilo pro anorganický i organický typ hnojiva. V případě kontrolní varianty NPK se pH<sub>1</sub> pohybovalo kolem hodnoty 6,5, tudíž celkové spotřebované množství kyseliny bylo nízké (17,7 ml). Organické výživové varianty byly mnohem náročnější na aplikaci této látky, přičemž největší souhrnný objem byl zjištěn pro živné roztoky s fugátem (365,3 ml pro výluh z vermikompostu, 486,5 ml pro fugát 50 %, resp. 615,5 ml pro fugát 100 %). Denní maxima spotřeby kyseliny octové dosahovala až 54 ml.

Nejvyšší hodnoty EC byly v průměru naměřeny v roztoku NPK, zatímco významně nižší (navzájem odlišné) hodnoty byly zjištěny v organických výživových variantách (sestupně v tomto pořadí: fugát 100 %, fugát 50 % a výluh z vermikompostu). Během prvních dvou týdnů experimentu byly naměřené hodnoty EC relativně stabilní pro všechny výživové varianty. Ve třetím a čtvrtém týdnu již došlo k jejich pozvolnému nárůstu, jenž se zvýraznil s blížícím se

koncem experimentu (vyjma měření ve výluhu z vermikompostu). Tehdy byly zaznamenány nejvyšší dosažené hodnoty (dS/m): 1,89 pro výluh z vermikompostu, 2,90 (resp. 5,70) pro fugát (varianta 50, resp. 100 %), a 5,76 pro anorganický roztok NPK.

Teplota živných roztoků v průběhu hydroponického experimentu byla vždy vyšší v nádržích pro organické výživové varianty oproti kontrolní variantě NPK. Při detailní analýze lze obdobně hodnotit (až na počáteční měření) také roztok fugátu ve variantě 50 % při srovnání s výluhem z vermikompostu. Hodnoty pro fugát 100 % se od obou variant statisticky významně nelišily. Během prvních dvou týdnů experimentu byly naměřené teploty relativně stabilní pro všechny výživové varianty. Ve třetím a čtvrtém týdnu již došlo k jejich pozvolnému nárůstu a opětovné stabilizaci, přičemž byly zaznamenány následující nejvyšší dosažené hodnoty (°C): 23,8 pro anorganický roztok NPK, 24,6 pro výluh z vermikompostu, a 25,3 (resp. 27,1) pro fugát (varianta 100, resp. 50 %).

Nejvyšší průměrné koncentrace O<sub>2</sub> byly zjištěny v roztoku NPK a byly významně vyšší ve srovnání se všemi organickými variantami (ty se vzájemně statisticky nelišily). V průběhu experimentu se prokysličení roztoku NPK v průměru neměnilo ( $r = -0,10$ ,  $p > 0,05$ ), u všech organických variant naopak došlo k významnému poklesu koncentrace O<sub>2</sub> ( $r = -0,71$  až  $-0,85$ , pro všechna  $p < 0,001$ ) (viz obr. 13). Ve druhé polovině trvání experimentu byly zaznamenány nejnižší dosažené hodnoty (mg/l): 0,2 pro fugát, a 0,4 pro výluh z vermikompostu. Na obdobně nízké úrovni přitom setrvaly po celý čtvrtý týden prakticky bez výjimky. Zde uvedené výsledky platí také v případě hodnocení % nasycení roztoků kyslíkem, kdy byla v organických roztocích dosažena minima 2 % (pro fugát), resp. 5 % (pro výluh z vermikompostu).



Obr. 13. Vývoj koncentrace kyslíku v živných roztocích v průběhu experimentu: (a) NPK, (b) výluh z vermikompostu, (c) fugát 100 %, (d) fugát 50 %. Černé body označují počáteční měření na konci prvního týdne experimentu.

Tab. 3. Výnosy rostlin (salát a polníček), koncentrace vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) v biomase rostlin a živných roztocích, a fyzikálně-chemické parametry roztoků pro jednotlivé výživové varianty (NPK, VCT = výluh z vermikompostu, FUG100 = fugát 100 %, FUG50 = fugát 50 %). Hodnoty EXP. vyjádřené jako průměr ± SD na konci experimentu.

		Hmotnost nadzemní biomasy (g)		Koncentrace prvků (mg/g sušiny)			
<b>SALÁT</b>		<b>Skližeň</b>	<b>Sušina</b>	<b>TN</b>	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>Ca</b>
NPK	EXP.	101,97 <i>b</i> ±20,25	8,14 <i>d</i> ±0,92	40,06 <i>d</i> ±0,21	69,69 <i>b</i> ±5,22	6,86 <i>b</i> ±0,31	9,81 <i>d</i> ±0,46
VCT	EXP.	4,71 <i>a</i> ±0,68	0,94 <i>a</i> ±0,15	8,36 <i>c</i> ±0,17	38,04 <i>a</i> ±1,07	4,55 <i>ab</i> ±0,08	5,75 <i>c</i> ±0,26
FUG 100	EXP.	14,58 <i>a</i> ±1,13	3,12 <i>c</i> ±0,25	6,78 <i>a</i> ±0,47	33,99 <i>a</i> ±1,06	2,68 <i>a</i> ±0,06	2,20 <i>a</i> ±0,08
FUG 50	EXP.	9,20 <i>a</i> ±1,37	1,74 <i>b</i> ±0,28	7,62 <i>b</i> ±0,19	34,39 <i>a</i> ±1,28	2,83 <i>a</i> ±0,12	3,03 <i>b</i> ±0,10
<b>POLNÍČEK</b>		<b>Skližeň</b>	<b>Sušina</b>	<b>TN</b>	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>Ca</b>
NPK	EXP.	27,09 <i>b</i> ±4,52	3,80 <i>c</i> ±0,63	40,16 <i>d</i> ±0,30	61,94 <i>b</i> ±0,88	10,90 <i>b</i> ±0,24	10,00 <i>b</i> ±0,33
VCT	EXP.	1,33 <i>a</i> ±0,53	0,33 <i>a</i> ±0,07	19,68 <i>a</i> ±0,30	51,13 <i>a</i> ±2,50	11,60 <i>c</i> ±0,14	6,18 <i>ab</i> ±0,60
FUG 100	EXP.	2,68 <i>a</i> ±1,78	1,03 <i>b</i> ±0,27	25,80 <i>c</i> ±1,24	57,69 <i>ab</i> ±1,67	6,25 <i>a</i> ±0,14	3,84 <i>a</i> ±0,29
FUG 50	EXP.	2,77 <i>a</i> ±1,32	0,71 <i>ab</i> ±0,20	21,96 <i>b</i> ±0,44	57,96 <i>ab</i> ±3,84	6,10 <i>a</i> ±0,21	3,87 <i>a</i> ±0,10
				Koncentrace prvků v živném roztoku (mg/l)			
				<b>TN</b>	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>Ca</b>
NPK	1.týden			145,20	317,13	37,88	181,43
	2.týden			189,20	354,17	43,53	192,86
	3.týden			190,55	399,65	59,82	264,29
	4.týden			231,40	631,76	46,30	290,00
	EXP.			189,09 <i>b</i> ±35,21	425,68 <i>a</i> ±141,47	46,88 <i>a</i> ±9,31	232,14 <i>b</i> ±53,22
VCT	1.týden			9,35	54,72	20,64	22,86
	2.týden			4,20	60,38	22,11	25,43
	3.týden			7,20	75,89	25,06	26,00
	4.týden			11,18	243,06	39,80	54,86
	EXP.			7,98 <i>a</i> ±3,00	108,51 <i>a</i> ±90,14	26,90 <i>a</i> ±8,79	32,29 <i>a</i> ±15,11
FUG 100	1.týden			64,94	193,29	10,33	40,71
	2.týden			21,95	263,89	13,63	55,43
	3.týden			13,10	145,28	8,62	29,71
	4.týden			38,93	968,59	61,67	228,57
	EXP.			34,73 <i>a</i> ±22,81	392,76 <i>a</i> ±386,96	23,56 <i>a</i> ±25,49	88,61 <i>ab</i> ±93,90
FUG 50	1.týden			36,54	91,80	5,68	40,57
	2.týden			0,00	109,18	5,83	44,57
	3.týden			0,35	148,05	6,72	54,57
	4.týden			24,66	631,76	26,04	121,14
	EXP.			15,39 <i>a</i> ±18,22	245,20 <i>a</i> ±258,78	11,07 <i>a</i> ±9,99	65,21 <i>ab</i> ±37,75

(pokračování na str. 54)

			Fyzikálně-chemické parametry živného roztoku			
			pH <sub>1</sub>	EC (dS/m)	T (°C)	O <sub>2</sub> (mg/l)
NPK	1.týden		6,67	2,40 ±0,10	20,5 ±1,3	10,9
	2.týden		6,51 ±0,12	2,82 ±0,16	21,0 ±0,2	6,9
	3.týden		6,45 ±0,13	3,38 ±0,28	22,4 ±0,6	6,0 ±0,7
	4.týden		6,82 ±0,27	4,00 ±0,97	22,5 ±1,5	6,3 ±0,5
	EXP.		6,61 <i>a</i> ±0,25	3,19 <i>d</i> ±0,82	21,6 <i>a</i> ±1,3	6,5 <i>b</i> ±1,3
VCT	1.týden		7,74	0,66 ±0,03	22,0 ±0,3	12,4
	2.týden		7,81 ±0,07	0,93 ±0,47	22,3 ±0,5	5,3
	3.týden		7,77 ±0,32	0,91 ±0,07	23,1 ±0,6	4,5 ±1,7
	4.týden		7,71 ±0,59	1,22 ±0,13	24,1 ±0,3	0,6 ±0,3
	EXP.		7,76 <i>b</i> ±0,40	0,95 <i>a</i> ±0,30	23,0 <i>b</i> ±1,0	3,2 <i>a</i> ±3,2
FUG 100	1.týden		8,19	1,70 ±0,04	21,4 ±1,0	8,0
	2.týden		8,23 ±0,09	1,66 ±0,27	22,5 ±0,8	5,0
	3.týden		8,13 ±0,13	2,05 ±0,17	24,2 ±0,7	1,7 ±1,0
	4.týden		8,35 ±0,39	3,36 ±0,98	24,6 ±0,4	0,4 ±0,2
	EXP.		8,24 <i>c</i> ±0,27	2,29 <i>c</i> ±0,92	23,3 <i>bc</i> ±1,5	1,8 <i>a</i> ±2,1
FUG 50	1.týden		8,09	1,08 ±0,02	22,0 ±1,9	7,2
	2.týden		8,18 ±0,05	1,11 ±0,02	23,4 ±0,5	5,2
	3.týden		8,12 ±0,16	1,34 ±0,11	25,5 ±0,7	3,0 ±1,5
	4.týden		8,45 ±0,45	2,21 ±0,52	26,1 ±0,9	1,0 ±1,0
	EXP.		8,26 <i>c</i> ±0,32	1,50 <i>b</i> ±0,57	24,4 <i>c</i> ±2,0	2,5 <i>a</i> ±2,1

Pozn. Různá písmenka (a-d) reprezentují signifikantní rozdíly mezi výživovými variantami.

## 6 Diskuze

### 6.1 Výnosy a prvky v nadzemní biomase

#### 6.1.1 Salát

Celkově nejvyšší průměrné výnosy salátu dosažené při využití NPK odpovídaly nejvyšší průměrné koncentraci všech vybraných hlavních prvků (TN, K, P, Ca) i dalších prvků (Mg, S) v biomase sušiny. Šlo přitom o všechny makroživiny potřebné pro rostliny (viz kap. 3.1.3). Obdobné výsledky pro čínské zelí byly již dříve publikovány (Pant et al. 2012). Hodnocení organických výživových variant však nebylo jednoznačné. Ačkoli pro výluh z vermikompostu byly ze statistického hlediska zjištěny relativně nejvyšší koncentrace TN a Ca (resp. absolutně nejvyšší koncentrace Al, B, Fe, Mn, Ni, Zn), tak nevedly k nárůstu hmotnosti nadzemní biomasy salátu, a výnosy byly dokonce nejnižší. Naopak výnosy salátu pěstovaného za použití fugátu byly nejvyšší z organických variant, přestože jak TN a Ca, tak B, Mg a Mn v biomase dosahovaly nejnižší úrovně (viz přílohy, str. V). Výsledky předchozích studií zaměřených na hydroponické pěstování salátu jsou přitom protichůdné. Někdy se uvádí, že výnosy pro organické živné roztoky mohou být srovnatelné či spíše nižší (Wang et al. 2019; Ahmed et al. 2021; Hooks et al. 2022), jindy však byly zjištěny dokonce i vyšší (Ronga et al. 2019; Tikasz et al. 2019). Ani kombinace organických a anorganických zdrojů živin nepřinesla jasnější výsledky (Sunaryo et al. 2018; Giménez et al. 2020; Miceli et al. 2021), ale významně vyšších výnosů oproti kontrolnímu roztoku přeci jen dosáhli Arancon et al. (2019). Vysvětlení lze hledat např. v charakteristikách pěstovaných odrůd salátu či použitých variantách hnojiv pro přípravu roztoků, stejně tak jako přítomnosti prospěšných bioaktivních látek (viz kap. 6.4).

Výše uvedeným zjištěním hydroponického experimentu odpovídaly také hodnoty poměru C:N, jež byly zjištěny jako nejnižší pro NPK s nejvyššími výnosy. Naopak nejvyšší hodnoty náležely fugátu s relativně vysokými výnosy a relativně nízké hodnoty výluhu z vermikompostu s nejnižšími výnosy. Určujícím prvkem v poměru C:N byl již výše popsán dusík, jelikož vykazoval větší rozsah hodnot než uhlík (N: 6,2-40,4 mg/g; C: 396,2-416,6 mg/g). Nicméně se ukázalo, že i uhlík mohl přispět k uvedeným zjištěním, neboť nejnižší úrovně dosahoval u salátu pro variantu NPK.

Výnosy salátu pro výluh z vermikompostu mohly být negativně ovlivněny přítomností As a Cr v biomase sušiny, neboť tyto rizikové prvky (představující riziko pro rostliny; Neilson & Rajakaruna 2015) byly zaznamenány nad mezí detekce pouze v dané výživové variantě.

#### 6.1.2 Polníček

Na základě srovnání celkových výsledků výnosů a zastoupení prvků v biomase sušiny lze konstatovat, že zásadní vliv při pěstování polníčku napříč výživovými variantami měl obsah celkového dusíku. Vliv dusíku na růst rostlin byl opakovaně popsán řadou autorů (např. Pant et al. 2009; Pant et al. 2012; Texier 2022). Nejvyšší průměrné výnosy pro NPK byly získány při nejvyšší průměrné koncentraci TN (K, Ca, resp. Mg, Mn, S) (viz Pant et al. 2012). I zde se jednalo prakticky o všechny makroživiny potřebné pro rostliny (viz kap. 3.1.3). Nejnižší výnosy pro výluh z vermikompostu naopak odpovídaly nejnižší koncentraci TN (resp. K). Snížený

obsah TN (resp. K a S) v biomase rostlin při využití organických živných roztoků zaznamenali Bergstrand et al. (2020) a dávali jej do souvislosti s možným poškozením kořenů vyčerpáním O<sub>2</sub> (viz kap. 6.3) či útoky mikrobiálních organismů. Mírně vyšší výnosy v případě použití fugátu mohly být pozitivně ovlivněny mírně vyššími koncentracemi TN (resp. absolutně nejvyššími koncentracemi Fe), ale negativní vliv mohly mít nejnižší průměrné koncentrace P a Ca. Vysoké koncentrace P (resp. B, Ni) nevedly ke zvýšení výnosů polníčku (viz přílohy, str. VI), přičemž potenciální nadbytek fosforu mohl omezovat příjem draslíku (Uchida 2000). Polníček se sice neřadí k základním hydroponicky pěstovaným plodinám, ale je známo, že i v případě čínského zelí jako běžně využívaného druhu listové zeleniny nevedlo použití ani výluhu z vermikompostu, ani fugátu k udržení produkce plodin (Churilova & Midmore 2019; Bergstrand et al. 2020; Pelayo Lind et al. 2021). Nicméně jak upozornili Churilova & Midmore (2019), výsledky byly slibnější oproti většině předchozích prací (celková hmotnost po sklizni při aplikaci výluhu s úpravou pH totiž dosahovala v některých případech 75-98 % kontrolních hodnot). Obdobné výsledky nebyly ve zde hodnoceném experimentu zaznamenány.

Zjištěným výnosům polníčku neodporoval ani hodnoty poměru C:N: nejvyšší pro výluh z vermikompostu s nejnižšími výnosy, mírně nižší pro fugát s mírně vyššími výnosy, a nejnižší pro NPK s nejvyššími výnosy. Stejně jako u salátu (viz kap. 6.1.1), i zde byl určujícím prvkem v poměru C:N již výše popsany dusík (N: 19,3-40,6 mg/g; C: 410,8-420,4 mg/g (bez odlehlé hodnoty)).

Nakonec ještě bylo obdobně jako u salátu (viz kap. 6.1.1) zjištěno, že výnosy polníčku pro výluh z vermikompostu mohly být negativně ovlivněny přítomností As a Cr v biomase sušiny. Prvně jmenovaný prvek byl zaznamenán nad mezí detekce pouze v dané výživové variantě. Pro Cr pak byly naměřeny nejvyšší koncentrace pro výluh z vermikompostu, naopak veškerá měření pod mezí detekce náležela variantě NPK.

## 6.2 Role prvků v roztoku

Zaznamenané zvyšování koncentrace většiny prvků v roztocích v průběhu experimentu lze přičíst vyšší míře příjmu vody rostlinami, což již bylo zachyceno např. v práci Samarakoon et al. (2006). Nejvyšší průměrné koncentrace dvou vybraných hlavních prvků (TN, Ca) i dalších prvků (B, Cu, Mg, S, Zn) byly naměřeny v anorganickém roztoku NPK. Tento roztok obsahoval nejvíce dusíku v přístupné iontové formě NO<sub>3</sub>-N a NH<sub>4</sub>-N: s převahou dusičnanového N, rychle vstřebatelného kořeny rostlin a ukládaného bez výraznějších toxických účinků (Maucieri et al. 2019). Uvedená zjištění odpovídala popisu hnojiv použitých pro jeho přípravu (dusíkaté s Ca + Mg a S) (viz kap. 4.3.2). Dusík, vápník, hořčík a síra se také objevily v nejvyšších průměrných koncentracích v biomase salátu (viz kap. 6.1.1) i polníčku (viz kap. 6.1.2) s nejvyššími výnosy pro NPK. Nejméně vápníku bylo naměřeno ve výluhu z vermikompostu, nicméně koncentrace tohoto prvku v biomase sušiny byly buď vyšší ve srovnání s fugátem (salát), nebo se dokonce ze statistického hlediska nelišily od NPK (polníček) (viz přílohy, str. VII-VIII). To se však neprojevilo ve výnosech obou pěstovaných druhů rostlin. Co se týče zbývajících vybraných hlavních prvků (K, P), nejnižší absolutní koncentrace draslíku, resp. fosforu byly zjištěny pro výluh z vermikompostu, resp. fugát s variantou 50 %. To odpovídalo nízkému zastoupení K v biomase polníčku, resp. P v biomase polníčku i salátu, a mohlo ovlivnit jejich (relativně) nízké výnosy. Omezená dostupnost K v organickém roztoku se promítla negativně do jeho



zastoupení v biomase a následně i do výnosů salátu již v práci Ahmed et al. (2021). To platilo navíc i pro P také v případě nedávných experimentů s využitím fugátu (Wang et al. 2019).

Při detailním pohledu na další prvky platilo, že nejvyšší průměrné koncentrace Al, Fe, Mn, Na, Ni, a Pb byly naměřeny ve fugátu s variantou 100 % (navzdory velké variabilitě měření). To sice bylo v rozporu s nízkou koncentrací Mn v biomase salátu, ale naopak to odpovídalo vysoké koncentraci Fe v biomase polníčku s relativně vysokými výnosy. Vyšší zastoupení železa (a sodíku) ve fugátu popsali již Bergstrand et al. (2020) a Pelayo Lind et al. (2021). Množství Na obecně dosahovalo vysokých, ale kolísavých hodnot u obou variant roztoků fugátu. Sodík má toxický potenciál, také se podílí na snížení příjmu Ca rostlinami (viz kap. 6.1) (Volkmar et al. 1998). Může být přítomen ve vstupním odpadovém materiálu a/nebo vodě použité při jeho zpracování (Churilova & Midmore 2019). Na problematiku NaCl v hydroponických pěstebních systémech upozornili Stefaniuk et al. (2015) či Bergstrand et al. (2020). Pouze u fugátu 100 % bylo zjištěno i měřitelné množství Pb, na druhou stranu v biomase žádné rostliny se nenašlo jakékoli jeho množství nad mezí detekce.

Zajímavé výsledky hodnocení experimentu přinesly relativní údaje koncentrace prvků (TN, K, P, Ca) jak v roztoku, tak v biomase pěstovaných rostlin (procentuálně vyjádřené pro organické varianty ve srovnání s NPK). V biomase salátu (resp. polníčku) pěstovaného s využitím výluhu z vermikompostu bylo zjištěno 5x (11,7x) více N, 2,1x (3,2x) více K, 1,2x (1,9x) více P, a 4,2x (4,4x) více Ca oproti % zastoupení prvků v roztoku. Taková násobná zastoupení uvedených prvků byla nejvyšší (kromě P) pro tuto výživovou variantu. Naopak u fugátu byly násobky nižší, když se pohybovaly jen mezi hodnotami 0,5 a 6,8.

A jak se to projevilo na výnosech? Procentuální srovnání výnosů salátu (resp. polníčku) a základních charakteristik roztoku (ve srovnání s NPK) vedla ke zjištění, že výnosy byly 2,7x (resp. 2,1x) vyšší oproti % N ve výluhu, a takové násobky byly jedny z nejvyšších mezi organickými roztoky. Výnosy ve vztahu K a Ca byly pro oba pěstované druhy obdobné. Naopak u P nebylo dosaženo potenciálních výnosů, jelikož násobky dosahovaly nejnižší hodnoty 0,2. Účinný příjem fosforu při hydroponickém pěstování (obilnin) s využitím organických živných roztoků, jenž se však nepromítl do vyšších výnosů, zaznamenali již Atzori et al. (2020).

Rostliny salátu a polníčku byly schopny přijímat dusík z výluhu z vermikompostu, přičemž i procentuální výnosy dosahovaly mírně vyšších hodnot oproti očekávání. Přesto při hodnocení výsledků v absolutních číslech vycházely výnosy pro výluh nejnižší ze všech organických variant. Vysvětlení lze částečně najít při hodnocení jednotlivých forem N. Ve výluhu totiž bylo detekováno relativně nízké zastoupení anorganických forem dusíku, navíc s převahou  $\text{NH}_4\text{-N}$ : rostliny přitom mohou amoniak absorbovat pouze v malém množství, jinak může mít negativní vliv na prospívání rostlin (Maucieri et al. 2019). Naopak koncentrace prospěšných dusičnanů (viz výše) byly na nízké úrovni. Pozitivní vliv dusičnanů, a naopak negativní vliv amoniaku na výnosy salátu (resp. kapusty a čínské zeli) popsali již dříve Tikasz et al. (2019) a Kano et al. (2021), nicméně např. u hrachu byly zjištěny vyšší výnosy při vyšší koncentraci amoniaku (Jiang et al. 2023). Při pěstování salátu a polníčku s fugátem byly dosaženy mírně vyšší výnosy oproti variantě s výluhem z vermikompostu. Kvantitativní i kvalitativní zastoupení anorganických forem dusíku bylo variabilní, avšak vyšší hodnoty na počátku experimentu mohly přispět k lepším výnosům.

### 6.3 Role fyzikálně-chemických parametrů roztoku

Pokud se odhlédne od prvkového složení roztoků, taktéž jejich fyzikálně-chemické parametry (konkrétně EC a koncentrace O<sub>2</sub>) poskytly některá vysvětlení pro získané výsledky.

EC jako parametr množství iontů v živném roztoku, jež určují růst, vývoj a produkci rostlin (viz kap. 3.2.3), dosahoval nejvyšších hodnot pro roztok NPK, již nižších pro fugát a úplně nejnižších pro výluh z vermikompostu. To přitom jasně odpovídalo výnosům salátu i polničku (viz přílohy, str. IX). Obvykle se uvádí, že v případě organických roztoků je EC nepřesným parametrem, jelikož organické živiny nemají elektrický náboj, a proto jejich množství v roztoku nezměříme. Po přípravě roztoku se jen zlomek přemění na ionty a i přesto, že se v roztoku nachází dostatek živin „v rezervě“, výsledná vodivost bude velmi nízká (Texier 2022). Přesto je zřejmé, že nízké výnosy souvisely s nízkými hodnotami EC, kdy živiny absorbovatelné v iontové formě nebyly patrně k dispozici v dostatečném množství. Kim et al. (2015) zjistili při srovnání několika druhů výluhů max. hodnoty EC pro výluh ze směsi vermikompostu a dvou druhů kompostů, přičemž při růstových experimentech se salátem byly dosaženy příznivé výsledky právě pro tuto variantu. Hosseini et al. (2021) zaznamenali, že při zvyšujících se hodnotách EC dochází nejprve ke zvyšování výnosů, ale po dosažení optimální hodnoty (0,9 dS/m) se naopak výnosy snižují. Další autoři se shodují na max. hodnotě EC 1,4 dS/m pro pěstování salátu (Jensen & Collins 1985; Tanji 1990; Samarakoon et al. 2006; Bennet 2020). Tato úroveň byla v hydroponickém experimentu překročena zejména v roztoku NPK, přesto právě pro tuto variantu byly zjištěny nejvyšší výnosy. Nicméně třeba Giménez et al. (2020) prováděli pěstební experimenty se salátem při EC v rozsahu 2,5-3,6 dS/m. Zvýšená EC obecně brání příjmu živin, zatímco snížená EC může nepříznivě ovlivnit výnosy a zdraví rostlin (Samarakoon et al. 2006). Nicméně pokud v roztoku převažují ionty s příznivým vlivem na vývoj rostlin, pak se to může projevit v lepších výnosech (a naopak) (viz např. NaCl; Bergstrand et al. 2020). Detailní iontové složení živných roztoků v hydroponickém experimentu nebylo bohužel známo.

Koncentrace kyslíku byly zachyceny na nejvyšší úrovni (7-12 mg/l) u všech výživových variant jen v prvním týdnu experimentu a poté již byly při opakovaných měřeních vždy nižší. Zatímco u anorganické varianty NPK s nejvyššími dosaženými výnosy rostlin prakticky setrvaly na stejné úrovni okolo 6 mg/l, u všech organických roztoků se sníženými výnosy došlo k rapidnímu poklesu množství O<sub>2</sub> až prakticky k jeho vyčerpání (viz přílohy, str. X). Pro salát by koncentrace neměly klesat pod 7,8 mg/l (platí pro teplotní podmínky hydroponického experimentu), ale tyto hodnoty byly zjištěny při využití odlišného pěstebního systému (DWC; Berninger 2020). Zaznamenaný pokles lze vysvětlit větší poptávkou všeho živého v systému (kořeny rostlin, houby, bakterie apod.) po kyslíku. Taktéž v minerálním roztoku se nacházejí některé prospěšné mikroorganismy, ale řádově jich tam bude vždy méně než v organickém roztoku (Texier 2022). Je známo, že vzhledem k rozkladným procesům organické hmoty může dojít k poklesu úrovně prokysličenosti (Kano et al. 2021). Arancon et al. (2019) zjistili, že roztoky s vermikompostovým výluhem mají nižší koncentraci kyslíku oproti roztokům bez výluhu, přičemž pokles pokračuje v čase. Snížené koncentrace O<sub>2</sub> v takových živných roztocích mohou vést dokonce až k úhynu hydroponicky pěstovaných plodin, což autoři dokumentovali pro experimenty s rajčaty. Zlepšení kyslíkových podmínek pomocí H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zkoumali Lau & Mattson (2021), kdy výnosy salátu po přidání této látky byly pro organické roztoky srovnatelné či

dokonce ještě lepší oproti anorganickým roztokům. Je třeba ještě zmínit možný efekt teploty, neboť vyšší teploty vedou k vyšší spotřebě kyslíku (Churilova & Midmore 2019). Teplota vzduchu v pěstební místnosti měla být udržována na 20 °C během dne, přesto byly v organických roztocích naměřeny hodnoty až 27 °C. Pro salát se uvádí nejzazší vhodná teplota 21 °C (Bennet 2020), pro polníček pak byly zaznamenány příznivé podmínky při obdobných hodnotách ve srovnání s nižší/vyšší teplotou (Costa et al. 2011). Nicméně vzhledem k tomu, že i procentuální nasycení kyslíkem dosahovalo s blížícím se koncem experimentu velmi nízkých hodnot (tj. 2-5 %), lze hledat příčinu poklesu úrovně O<sub>2</sub> spíše v biotické (zjm. mikrobiální) složce organických roztoků.

## 6.4 Limity při realizaci experimentu

Veškeré již zhodnocené výsledky hydroponického experimentu zaměřeného na pěstování salátu a polníčku s využitím čtyř různých živných roztoků včetně výluhu z vermikompostu je třeba dát do souvislosti s některými metodickými omezeními.

V této práci byly porovnávány výnosy jednotlivých druhů rostlin napříč výživovými variantami. Jednalo se o hmotnosti nadzemní biomasy (v sušině) na konci experimentu s dobou trvání 4 týdnů, nicméně obdobné údaje na začátku experimentu nebyly k dispozici (na rozdíl např. od práce Loera-Muro et al. 2021). Ačkoli došlo k primárnímu výběru vyklíčených rostlin s relativně podobným vzrůstem, je stále možné, že nešlo o stejně vitální jedince. To mohlo mít potenciální vliv zejména u salátu, kdy v každém květináči byla umístěna vždy jen jedna rostlina (ve srovnání s polníčkem se třemi rostlinami). Květináče byly naplněny inertním substrátem z kokosových vláken, ovšem pravděpodobně by bylo lepší hustotu/množství takového substrátu standardizovat, protože má vliv na míru vstřebávání živného roztoku při závlaze, a tím by byly zajištěny srovnatelné podmínky pro vývoj rostlin.

Obecně nízké výnosy při využití organických roztoků měly za následek nedostatečné množství sušiny pro plánované analýzy prvků v biomase. Nepříznivá situace se tedy vyřešila vytvořením jednoho homogenního vzorku z osmi rostlin pro jednu výživovou variantu a z něj se analyzovalo pět podvzorků, přičemž rozdíly výsledků analýz mezi podvzorky byly většinou minimální. To přitom mohlo také ovlivnit hodnocení výsledků hydroponického experimentu.

Při hodnocení výnosů bylo zjištěno, že zastoupení dusíku v biomase a připravených roztocích, stejně jako prokysličení roztoků, hrálo významnou roli (viz kap. 6.1 až 6.3). Nejvyšší výnosy pro variantu NPK byly vysvětleny vysokými koncentracemi N, naopak organické varianty dopadly v obou ohledech již hůře. Přestože se počáteční koncentrace celkového N ve všech základních variantách předpokládala na stejné úrovni (kromě fugátu 50 % s poloviční hodnotou), výsledná měření tomu zdaleka neodpovídala (zejména u výluhu z vermikompostu). Jak vyplynulo z provedených analýz před/po filtraci výluhu a fugátu, k výraznému poklesu množství (nejen) N v roztoku došlo právě při filtraci. Je třeba zdůraznit, že v případě příliš jemného filtru může docházet k výluhu pouze rozpuštěných látek (Ingham 2005), stejně tak mohou být odstraněny některé prospěšné mikroorganismy vázané na pevné částice (Pant et al. 2009). Obdobně koncentrace O<sub>2</sub> v organických roztocích byly nižší než v anorganické varianě NPK, přestože nádrže byly v průběhu experimentu provzdušňovány pomocí vzduchovacích kamenů (což by mělo zlepšit kvalitu prostředí v hydroponických systémech; Jiang et al. 2023). To jistě také přispělo k rozdílným výsledkům hydroponického experimentu.

Pro úpravu pH v roztocích se převážně používala kyselina octová, přičemž výrazné množství bylo aplikováno právě u organických roztoků. Texier (2022) ji přitom označuje jako potenciálně toxickou pro rostliny. Wongkiew et al. (2022) sice zjistili, že při pěstování salátu nedošlo po aplikaci kyseliny octové k ovlivnění kyslíkového režimu (díky rychlé recirkulaci vody přes biofiltr), nicméně výnosy byly negativně ovlivněny týdenním dávkováním látky. To by odpovídalo i výsledkům experimentu představeného v této práci, kdy byla tato kyselina dodávána do nádrží s živnými roztoky dokonce denně. Alternativní organické látky pro snížení pH nejsou příliš početné, a tak by se nabízelo použít jiné kyseliny typu k. dusičné nebo ortofosforečné (Churilova & Midmore 2019). To by však odporovalo striktnímu pojetí bioponie – Park & Williams (2024) upozorňují, že pokud mají být pěstované plodiny certifikovány jako organické, kyseliny bez přírodního původu nelze používat (např. v USA).

Nakonec je třeba ještě upozornit na význam zkoumání mikrobiální populace a přítomnosti fytohormonů/enzymů ve výluhu z vermikompostu a dalších variantách organických roztoků. Vědci se pokouší blíže porozumět, jak mikroorganismy ovlivňují růst a zdraví rostlin a jak lze tyto poznatky využít k optimalizaci hydroponického pěstování plodin (Jiang et al. 2023). Lepší výnosy salátu byly získány při dodání mikrobiálních inokulantů (kultur) napomáhajících lepšímu příjmu živin (Hooks et al. 2022), přičemž podobný pozitivní vliv má i přítomnost bioaktivních látek (např. fytohormonů a huminových kyselin; Kim et al. 2015). Někdy zase výnosy při použití organických roztoků mohou být nižší oproti očekávání, ale vypěstované produkty mohou mít vyšší kvalitu (karoten v salátu: Ahmed et al. 2021; kyselina askorbová v čínském zelí: Kano et al. 2021). V rámci zde představeného experimentu nebyly zařazeny např. DNA analýzy, podle nichž by bylo možné hodnotit přítomnost či složení mikroorganismů v roztocích, či analýzy enzymové aktivity, a tak nelze všechny výsledky spolehlivě vysvětlit.

## 6.5 Hypotézy

(1a) „Využití vodných výluhů (z vermikompostů) v hydroponii je *možné*.“

POTVRZENO (bez analýz, dle vizuálního hodnocení): Po ukončení hydroponického experimentu byly úspěšně sklizeny všechny pěstované rostliny. Nebyl zaznamenán žádný úhyn, ačkoli koncentrace některých prvků a hodnoty některých fyzikálně-chemických parametrů výluhu z vermikompostu poukazovaly na nepříznivé podmínky pro vývoj rostlin.

(1b) „Využití vodných výluhů (z vermikompostů) v hydroponii je *efektivní*.“

POTVRZENO (bez analýz, dle výpočtů): Na základě srovnání relativních koncentrací vybraných hlavních prvků (TN, P, K, Ca) bylo zjištěno několikanásobné (1,2-11,7x) množství v biomase salátu a polníčku oproti výluhu z vermikompostu. Ze všech výživových variant byly takové násobky nejvyšší (kromě P), což ukazuje na schopnost rostlin maximálně využít živiny navzdory obecně nízkým koncentracím ve výluhu.

(2) „Vodné výluhy z vermikompostů zvyšují výnosy plodin.“

NEPOTVRZENO (dle analýz): Výnosy salátu a polníčku (hmotnost nadzemní biomasy po sklizni) byly statisticky významně nižší pro organické roztoky ve srovnání s anorganickým roztokem NPK. V případě sušiny byly výnosy statisticky významně nejnižší pro výluh z vermikompostu. Navzdory tomu nelze učinit jednoznačné hodnocení výsledků, jelikož bylo zjištěno,

že významnou roli hrály množství dusíku a úroveň prokysličení živných roztoků. Oproti původním předpokladům a snahám o zlepšení podmínek na tom byly organické roztoky vždy hůře, což platilo i pro výluh z vermikompostu (hlavně co se týká dusíku v sušině polníčku).

## 7 Závěr

- Cílem této práce bylo popsat přednosti a nedostatky použití vodných výluhů připravených z (vermi-)kompostů (jinak též žížalích kompostů) při hydroponickém pěstování rostlin. Teoretická část se zabývala významem hydroponie, hydroponickým pěstováním plodin a využitím hnojiv v této pěstivelské technologii. Praktická část byla věnována využití výluhu z vermikompostů vyprodukovaných z akvakulturního kalu při pěstování zemědělských plodin.
- Na základě literární rešerše byly zjištěny srovnatelné či dokonce lepší výnosy rostlin pěstovaných s využitím (vermi-)kompostových výluhů ve srovnání s komerčními hydroponickými roztoky. Ovšem poznatky o výluhu z vermikompostovaného kalu z akvakultury lze označit za nedostatečné. Aplikace podobných výluhů by mohla zlepšit i kvalitu výsledných produktů, avšak se zohledněním některých faktorů (např. ředění výluhů, úpravy jejich fyzikálně-chemických parametrů, doplnění některých živin či potenciální kontaminace pěstovaných plodin).
- V rámci hydroponického laboratorního experimentu byly vyhodnoceny výnosy salátu a polníčku ve vztahu k prvkovému složení biomasy a živných roztoků včetně výluhu z vermikompostovaného kalu z akvakultury. Bylo potvrzeno, že tento vodný výluh lze (efektivně) využít jako organické hnojivo pro aplikaci v hydroponických pěstebních systémech. Naopak nebylo potvrzeno, že může vést ke zvýšení výnosů pěstovaných plodin. Svoji negativní roli přitom hrály dva klíčové faktory: množství dusíku a úroveň prokysličení roztoků.
- Stanovené cíle práce tedy byly splněny jak v teoretické, tak praktické části práce. Pro potvrzení hypotézy zvýšení výnosů při aplikaci (vermi-)kompostových výluhů by bylo třeba více pěstebních cyklů (více sklizní) a více variant výluhů z hlediska stupně ředění a/nebo původu (vermi-)kompostu.
- Zjištěné výsledky rozšířily poznatky o využití organických hnojiv při hydroponickém pěstování rostlin (v laboratorních podmínkách). Bylo přitom poukázáno na možnosti, stejně jako na limity, aplikace produktů zpracování organického odpadu z hlediska možného uzavření cyklu živin. Tyto výsledky poukázaly na fakt, že výběr a příprava výživy může mít významný dopad na růst a vývoj rostlin, a poskytly další informace pro optimalizaci pěstebních postupů v oblasti hydroponie.
- Další výzkum lze směřovat na využití (vermi-)kompostu jako ko-substrátu pro hydroponické systémy, kdy by nedocházelo ke ztrátě živin při procesu filtrace výluhu. Pro zajištění celého spektra potřebných makroživin by mohlo být třeba využít více druhů organických hnojiv, nebo najít „optimální“ kombinaci i s anorganickými zdroji živin. Taktéž by stálo za úvahu propojit ve větší míře data o kvantitě (výnosy plodin) a kvalitě (bioaktivní látky, vitamíny aj.) pro získání uceleného pohledu na využití pěstivelských technologií založených na principu hydroponie.

## 8 Terminologický slovníček

- **Aktinobakterie:** významný kmen grampozitivních bakterií
- **Amin:** organická sloučenina odvozená od amoniaku
- **Aminokyselina:** základní stavební složka proteinů (bílkovin)
- **Auxin:** rostlinný hormon, ovlivňující dlouhivý růst buněk
- **Celuláza:** enzym pro štěpení celulózy
- **Celulóza:** hlavní stavební látka rostlinných primárních buněčných stěn
- **Cirkulární bioekonomika:** část oběhového hospodářství využívající obnovitelné biologické zdroje
- **Cytokinin:** rostlinný hormon, podporující dělení buněk
- **Denitrifikace:** anaerobní proces přeměny dusičnanů přes dusitany a oxid dusný až na plyný dusík
- **Enzym:** bílkovina s katalytickou aktivitou (tzn. urychlující reakce)
- **Exsudát:** směs látek uvolněná kořeny rostlin do prostředí
- **Fakultativně anaerobní bakterie:** bakterie schopné žít v aerobním i anaerobním prostředí
- **Flavonoidy:** organické sloučeniny s antioxidačním efektem
- **Fosfatáza:** enzym pro uvolnění fosfátové skupiny z její vazby na jinou sloučeninu
- **Giberelin:** rostlinný hormon pro stimulaci růstu listů a indukci klíčení/kvetení
- **Gramnegativní bakterie:** bakterie mající stěnu tvořenou tenkou vrstvou peptidoglykanu a vrstvou lipopolysacharidů
- **Grampozitivní bakterie:** bakterie mající stěnu tvořenou peptidoglykanem a polysacharidy
- **Humifikace:** přeměna organických látek v humus (vznik rozkladem zbytků těl rostlin, hub a živočichů a také trusu živočichů)
- **Huminové látky:** organické sloučeniny vznikající biochemickým rozkladem organické hmoty (huminové kyseliny, fulvonové kyseliny, humin)
- **Hydrolyza:** rozklad solí vodou
- **Chelatační činidla:** organické sloučeniny používané k vyvazování a následnému vylučování některých kovů
- **Kationtová výměnná kapacita:** množství iontů, jež může daný systém poutat
- **Lignin:** hlavní stavební látka rostlinných sekundárních buněčných stěn
- **Lignifikace:** zdřevnatění
- **Mezofilní, termofilní:** vyžadující (středně) vysoké teploty
- **Mineralizace:** rozklad organické látky na jednoduché anorganické látky
- **Nitrifikace:** aerobní proces přeměny amoniaku přes dusitany na dusičnany
- **Nukleová kyselina:** makromolekulární látka pro uchování a přenášení zakódované genetické informace
- **Pufrační kapacita:** množství kyseliny přidané do roztoku k zajištění poklesu pH o jednotku
- **Pufrovací schopnost:** schopnost bránit se změnám pH

## 9 Seznam literatury

- Abbott I, Parker CA. 1981. Interactions between earthworms and their soil environment. *Soil Biology and Biochemistry* **13**:191-197.
- Abdel Salam MM, Roshdy NMK. 2022. The influence of different applications of vermicompost tea on the quality of pomegranate fruits. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences* **4**:107-118.
- Abou-El-Hassan S, Desoky AH. 2013. Effect of compost and compost tea on organic production of head lettuce. *Journal of Applied Sciences Research* **9**:5650-5655.
- Adams P, Ho LC. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *Journal of Horticultural Science* **67**:827-839.
- Adani F, Genevini PL, Gasperi F, Tambone F. 1999. Composting and humification. *Compost Science and Utilization* **7**:24-33.
- Adhikary S. 2012. Vermicompost, the story of organic gold: a review. *Agricultural Sciences* **3**:905-917.
- Aghajanian A. 2018. *Chinampas: their role in Aztec empire-building and expansion (an academic research)*. Indo-European Publishing, Los Angeles, CA, USA.
- Ahmed ZFR, Alnuaimi AKH, Askri A, Tzortzakis N. 2021. Evaluation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) production under hydroponic system: nutrient solution derived from fish waste vs. inorganic nutrient solution. *Horticulturae* **7** (e292) DOI: 10.3390/horticulturae7090292.
- Akinwale AO, Dauda AB, Ololade OA. 2016. Haematological response of *Clarias gariepinus* juveniles reared in treated wastewater after waste solids removal using alum or *Moringa oleifera* seed powder. *International Journal of Aquaculture* **6**:1-8.
- Alamer KH, Perveen S, Khaliq A, Zia Ul Haq M, Ibrahim MU, Ijaz B. 2022. Mitigation of salinity stress in maize seedlings by the application of vermicompost and sorghum water extracts. *Plants* **11** (e2548) DOI: 10.3390/plants11192548.
- Al Meselmani MA. 2022. *Recent research and advances in soilless culture. Nutrient solution for hydroponics*. Intech Open, London, United Kingdom.
- Al Seadi T, Lukehurst C. 2012. *Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser*. IEA Bioenergy, Paris, France.
- Amirkolaie AK. 2008. Environmental impact of nutrient discharged by aquaculture waste water on the Haraz River. *Journal of Fisheries and Aquatic Science* **3**:275-279.
- Ansari AA, Pereira M, Jaikishun S. 2015. Effect of vermiwash obtained from different sources (neem, rice straw and bagasse) and standardised hydroponics solution on the growth of *Colocasia esculenta* (Australian poi) in Guyana. *American Journal of Experimental Agriculture* **7**:275-283.



- Antizar-Ladislao B, Lopez-Real J, Beck AJ. 2006. Investigation of organic matter dynamics during in-vessel composting of an aged coal-tar contaminated soil using fluorescence excitation-emission spectroscopy. *Chemosphere* **64**:839-847.
- Arancon NQ, Edwards CA, Bierman P, Welch C, Metzger JD. 2004. Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology* **93**:145-153.
- 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.
- Atiyeh RM, Subler S, Edwards CA, Bachman G, Metzger JD, Shuster W. 2000. Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiologia* **44**:579-590.
- Atzori G, Nissim WG, Rodolfi L, Niccolai A, Biondi N, Mancuso S, Tredici MR. 2020. Algae and bioguno as promising source of organic fertilizers. *Journal of Applied Phycology* **32**:3971-3981.
- Bajsa O, Nair J, Mathew K, Ho GE. 2003. Vermiculture as a tool for domestic wastewater management. *Water Science and Technology* **48**:125-132.
- Bali R, Pineault J, Chagnon PL, Hijri M. 2021. Fresh compost tea application does not change rhizosphere soil bacterial community structure, and has no effects on soybean growth or yield. *Plants* 10 (e1638) DOI: 10.3390/plants10081638.
- Bandyopadhyay R, Chowdhury SD, Bhunia P, Surampalli R. 2023. Impact of the organic strength of dairy wastewater and vermibed depth on the performance of macrophyte-assisted vermifilters. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 27 (e4023012) DOI: 10.1061/jhtrbp.hzeng-1205.
- Bedrna Z. 1989. Substráty na pestovanie rastlín: základy pestovania. *Príroda*, Bratislava, ČSSR.
- Begon M, Townsend CR, Harper JL. 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. Blackwell Publishing, Oxford, United Kingdom.
- Bennett M. 2020. *Hydroponics: the essential guide to learn everything about a hydroponic gardening system and how to easily DIY to produce homegrown fresh and healthy vegetables, herbs, and fruits*. Mark Bennett, Columbus, OH, USA.
- Benton Jones J. 2014. *Complete guide for growing plants hydroponically*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Bergstrand KJ, Hultin S. 2014. Development of strategies for hydroponic cultivation in vertical systems. *Acta Horticulturae* **1034**:149-156.

- Bergstrand KJ, Asp H, Hultberg M. 2020. Utilizing anaerobic digestates as nutrient solutions in hydroponic production systems. *Sustainability* 12 (e10076) DOI: 10.3390/su122310076.
- Berninger M. 2020. Successful lettuce growing in deep water culture with pure oxygen. *Gemüse* 56:38-41.
- Blok C, de Kreijl C, Baas R, Wever G. 2008. Analytical methods used in soilless cultivation. Pages 245-290 in Raviv M, Lieth JH, editors. *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Boink A, Speijers G. 1999. Health effects of nitrates and nitrites: a review. *Acta Horticulturae* 563:29-36.
- Boruah T, Barman A, Kalita P, Lahkar J, Deka H. 2019. Vermicomposting of citronella bagasse and paper mill sludge mixture employing *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology* 294 (e122147) DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122147.
- Brändli RC, Kupper T, Bucheli TD, Zennegg M, Huber S, Ortelli D, Müller J, Schaffner C, Iozza S, Schmid P, Berger U, Edder P, Oehme M, Stadelmann FX, Tarradellas J. 2007. Organic pollutants in compost and digestate. Part 2. Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, and -furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, and other compounds. *Journal of Environmental Monitoring* 9:465-472.
- Briat JF, Dubos C, Gaymard F. 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science* 20:33-40.
- Büyüksönmez F, Rynk R, Hess TF, Fornshell G. 2005. Composting characteristics of trout manure. *Journal of Residuals Science and Technology* 2:149-157.
- Campbell S. 1998. *Let it rot: the gardener's guide to composting*. Storey Publishing, North Adams, MA, USA.
- Capulin-Grande J, Núñez-Escobar R, Sánchez-García P, Martínez-Garza A, Soto-Hernández M. 2005. Tomato production with liquid extract of cattle manure, acidulated with organic and inorganic acids. *Terra Latinoamericana* 23:241-247.
- Castro RS, Borges Azevedo CMS, Bezerra-Neto F. 2006. Increasing cherry tomato yield using fish effluent as irrigation water in Northeast Brazil. *Scientia Horticulturae* 110:44-50.
- Cavarianni RL, Cecílio Filho AB, Osvaldo JO, May A, Corradi MM. 2008 Nutrient contents and production of rocket as affected by nitrogen concentrations in the nutritive solution. *Scientia Agricola* 65:652-658.
- Cerda A, Artola A, Font X, Barrena R, Gea T, Sánchez A. 2018. Composting of food wastes: status and challenges. *Bioresource Technology* 248:57-67.
- Costa LD, Tomasi N, Gottardi S, Iacuzzo F, Cortella G, Manzocco L, Pinton R, Mimmo T, Cesco S. 2011. The effect of growth medium temperature on corn salad [*Valerianella locusta* (L.) Laterr.] baby leaf yield and quality. *HortScience* 46:1619-1625.

- Cripps SJ, Bergheim A. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* **22**:33-56.
- Dalton FN, Maggio A, Piccinni G. 1997. Effect of root temperature on plant response functions for tomato: comparison of static and dynamic salinity stress indices. *Plant and Soil* **192**:307-319.
- Daud M, Handika V, Bintoro A. 2018. Design and realization of fuzzy logic control for ebb and flow hydroponic system. *International Journal of Scientific and Technology Research* **7**:138-144.
- Ddiba D, Andersson K, Rosemarin A, Dickin S. 2022. The circular economy potential of urban organic waste streams in low- and middle-income countries. *Environment, Development and Sustainability* **24**:1116-1144.
- De Corato U. 2020. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: a review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment* 738 (e139840) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139840.
- Deepthi MP, Nivethitha S, Saminathan K, Narendhirakannan RT, Karmegam N, Kathireswari P. 2021. Effect of vermiwash prepared from livestock biowaste as vermiponics medium on the growth and biochemical indices of *Amaranthus viridis* L. *Environmental Technology and Innovation* 21 (e101300) DOI: 10.1016/j.eti.2020.101300.
- Delaide B, Monsees H, Gross A, Goddek S. 2019. Aerobic and anaerobic treatments for aquaponic sludge reduction and mineralisation. Pages 247-266 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM, editors. *Aquaponics food production systems*. Springer Nature, Cham, Switzerland.
- Delgado-Moreno L, Bazhari S, Nogales R, Romero E. 2019. Innovative application of biobed bioremediation systems to remove emerging contaminants: adsorption, degradation and bioaccessibility. *Science of the Total Environment* **651**:990-997.
- De Rijck G, Schrevens E. 1998. Cationic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of Plant Nutrition* **21**:861-870.
- De Rijck G, Schrevens E. 1999. Anion speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of Plant Nutrition* **22**:269-279.
- D'Hervilly C, Marsden C, Capowiez Y, Béral C, Delapré-Cosset L, Bertrand I. 2021. Trees and herbaceous vegetation strips both contribute to changes in soil fertility and soil organism communities in an agroforestry system. *Plant and Soil* **463**:537-553.
- Ditl P, Nápravník J, Šulc R. 2017. Chemical pre-treatment of fugate from biogas stations. *Biomass and Bioenergy* **96**:180-182.
- Domingues DS, Takahashi HW, Camara CAP, Nixdorf SL. 2012. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture* **84**:53-61.

- Dorais M, Ménard C, Bégin G. 2006. Risk of phytotoxicity of sawdust substrates for greenhouse vegetables. *Acta Horticulturae* **761**:589-595.
- Dubey N, Nain V. 2020. Hydroponic – the future of farming. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* **5**:857-864.
- Ebeling JM, Timmons MB. 2012. Recirculating aquaculture systems. Pages 245-277 in Tidwell JH, editor. *Aquaculture production systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Edwards CA, Arancon NQ, Greytak S. 2006. Effects of vermicompost teas on plant growth and disease. *BioCycle* **47**:28-31.
- Edwards CA, Arancon NQ, Emerson E, Pulliam R. 2007. Suppressing plant parasitic nematodes and arthropod pests with vermicompost teas. *BioCycle* **48**:38-39.
- Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB, Hassan A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponics system. *Bioresource Technology* **101**:1511-1517.
- Enebe MC, Erasmus M. 2023. Vermicomposting technology – a perspective on vermicompost production technologies, limitations and prospects. *Journal of Environmental Management* 345 (e118585) DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118585.
- Estevez MM, Tomczak-Wandzel R, Kvamme K. 2022. Fish sludge as a co-substrate in the anaerobic digestion of municipal sewage sludge – maximizing the utilization of available organic resources. *EFB Bioeconomy Journal* 2 (e100027) DOI: 10.1016/j.bioeco.2022.100027.
- Eudoxie G, Martin M. 2019. Organic fertilizers: history, production and applications. *Compost tea quality and fertility*. Intech Open, London, United Kingdom.
- Fageria NK, Baligar VC, Clark RB. 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy* **77**:185-268.
- Fang W, Chung H. 2018. Bioponics for lettuce production in a plant factory with artificial lighting. *Acta Horticulturae* **1227**:593-598.
- Fierer N, Nemergut D, Knight R, Craine JM. 2010. Changes through time: integrating microorganisms into the study of succession. *Research in Microbiology* **161**:635-642.
- Fleischer Z, Schütz B. 1978. *Pěstování kaktusů*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, ČSSR.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. 2019. Every drop counts. FAO, Rome. Available from <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1111580/> (accessed February 2024).
- Fritz J, Franke-Whittle I, Haindl S, Insam H, Braun R. 2012. Microbiological community analysis of vermicompost tea and its influence on the growth of vegetables and cereals. *Canadian Journal of Microbiology* **58**:836-847.
- Gamaley AV, Nadporozhskaya MA, Popov AI, Chertov OG, Kovsh NV, Gromova OA. 2001. Non-root nutrition with vermicompost extracts as the way of ecological optimisation. Pages 862-863 in Horst WJ, Schenk MK, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer WB,

- Goldbach H, Olf HW, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schubert S, Wirén N, Wittenmayer L, editors. Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Springer, Hannover, Germany.
- García-Sánchez M, Taušnerová H, Hanč A, Tlustoš P. 2017. Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuous-feeding system: changes in chemical and biological parameters. *Waste Management* **62**:33-42.
- George P, George N. 2016. Hydroponics (soilless cultivation of plants) for biodiversity conservation. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Science* **3**:97-104.
- Gibson JL, Pitchay DS, Williams-Rhodes AL, Whipker BE, Nelson PV, Dole JM. 2008. Nutrient deficiencies in bedding plants: a pictorial guide for identification and correction. Chicago Review Press, Chicago, IL, USA.
- Giménez A, Fernández JA, Pascual JA, Ros M, Egea-Gilabert C. 2020. Application of directly brewed compost extract improves yield and quality in baby leaf lettuce grown hydroponically. *Agronomy* **10** (e370) DOI: 10.3390/agronomy10030370.
- Gómez-Brandón M, Vela M, Martínez-Toledo MV, Insam H, Domínguez J. 2015. Effects of compost and vermicompost teas as organic fertilisers. Pages 301-318 in Sinha S, Pant KK, Bajpai S, editors. *Fertilizer technology I: synthesis*. Studium Press, New Delhi, India.
- González-Hernández AI, Pérez-Sánchez R, Plaza J, Morales-Corts MR. 2022. Compost tea as a sustainable alternative to promote plant growth and resistance against *Rhizoctonia solani* in potato plants. *Scientia Horticulturae* **300** (e111090) DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111090.
- Gudeta K, Bhagat A, Julka JM, Sinha R, Verma R, Kumar A, Kumari S, Ameen F, Bhat SA, Amarowicz R, Sharma M. 2022. Vermicompost and its derivatives against phytopathogenic fungi in the soil: a review. *Horticulturae* **8** (e311) DOI: 10.3390/horticulturae8040311.
- Guilayn F, Benbrahim M, Rouez M, Crest M, Patureau D, Jimenez J. 2020. Humic-like substances extracted from different digestates: first trials of lettuce biostimulation in hydroponic culture. *Waste Management* **104**:239-245.
- Gutiérrez-Miceli FA, García-Gómez RC, Rincón RR, Abud-Archila M, María Angela OL, Cruz MJG, Dendooven L. 2008. Formulation of a liquid fertilizer for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using vermicompost leachate. *Bioresource Technology* **99**:6174-6180.
- Hamid S, Ahmad I, Akhtar MJ, Iqbal MN, Shakir M, Tahir M, Rasool A, Sattar A, Khalid M, Ditta A, Zhu B. 2021. *Bacillus subtilis* Y16 and biogas slurry enhanced potassium to sodium ratio and physiology of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to mitigate salt stress. *Environmental Science and Pollution Research* **28**:38637-38647.
- Hamza A, Abdelraouf RE, Helmy YI, El-Sawy SMM. 2022. Using deep water culture as one of the important hydroponic systems for saving water, mineral fertilizers and improving the productivity of lettuce crop. *International Journal of Health Sciences* **6**:2311-2331.

- Hanč A, Dreslová M. 2016. Effect of composting and vermicomposting on properties of particle size fractions. *Bioresource Technology* **217**:186-189.
- Hanč A, Chadimová Z. 2014. Nutrient recovery from apple pomace waste by vermicomposting technology. *Bioresource Technology* **168**:240-244.
- Hanč A, Hřebečková T, Plíva P, Cajthaml T. 2020. Vermicomposting of sludge from a malt house. *Waste Management* **118**:232-240.
- Harahap MA, Harahap F, Gultom T. 2020. The effect of ab mix nutrient on growth and yield of Pak choi (*Brassica chinensis* l.) plants under hydroponic wick system condition. *Journal of Physics: Conference Series* 1485 (e012028) DOI: 10.1088/1742-6596/1485/1/012028.
- Hargreaves J, Sina Adl M, Warman PR, Vasantha Rupasinghe PV. 2008. The effects of organic amendments on mineral element uptake and fruit quality of raspberries. *Plant and Soil* **308**:213-226.
- Hasan M, Sabir N, Singh AK, Singh MC, Patel N, Khanna M, Rai T, Pragnya P. 2018. Hydroponics technology for horticultural crops. ICAR-Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India.
- Hassen A, Belguith K, Jedidi N, Cherif A, Cherif M, Boudabous A. 2001. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* **80**:217-225.
- Haug RT, Haug HT. 1993. *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Haynes RJ. 1990. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: a critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant and Soil* **126**:247-264.
- Haynes RJ, Zhou YF. 2016. Comparison of the chemical, physical and microbial properties of composts produced by conventional composting or vermicomposting using the same feedstocks. *Environmental Science and Pollution Research* **23**:10763-10772.
- Hazarika J, Khwairakpam M. 2022. Valorization of industrial solid waste through novel biological treatment methods – integrating different composting techniques. Pages 77-92 in Hussain CM, Hait S, editors. *Advanced organic waste management: sustainable practices and approaches*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- He XT, Traina SJ, Logan TJ. 1992. Chemical properties of municipal solid waste composts. *Journal of Environmental Quality* **21**:318-329.
- Heuvelink E, Kierkels T. 2016. Iron is essential for photosynthesis and respiration: iron deficiency. *Greenhouses* **5**:48-49.
- Hoagland DR, Arnon DI. 1938. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular* **347**:1-32.
- Hoening M. 2003. Dry ashing. Pages 235-255 in Mester Z, Sturgeon R, editors. *Sample preparation for trace element analysis*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Hooks T, Masabni J, Sun L, Niu G. 2022. Effects of organic fertilizer with or without a microbial inoculant on the growth and quality of lettuce in an NFT hydroponic system. *Technology in Horticulture* **2**:1-8.
- Hopkins JS, Villalón J. 1992. Synopsis of industrial panel input on shrimp pond management. Pages 138-143 in Wyban J, editor. *Proceedings of the special session on shrimp farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, USA.
- Horáková M. 2007. *Analytika vody*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha.
- Hosseini H, Mozafari V, Roosta HR, Shirani H, van de Vlasakker PCH, Farhangi M. 2021. Nutrient use in vertical farming: optimal electrical conductivity of nutrient solution for growth of lettuce and basil in hydroponic cultivation. *Horticulturae* **7** (e283) DOI: 10.3390/horticulturae7090283.
- Hrudová E. 2011. *Abionozologie pro rostlinolékaře*. Ústav pěstování, šlechtění rostlin a rostlinolékařství, Mendelova univerzita v Brně, Česká republika. Available from [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_sklad/frvs/hrudova/index.htm](http://web2.mendelu.cz/af_291_sklad/frvs/hrudova/index.htm) (accessed December 2023).
- Hřebečková T, Wiesnerová L, Hanč A. 2019. Changes of enzymatic activity during a large-scale vermicomposting process with continuous feeding. *Journal of Cleaner Production* **239** (e118127) DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118127.
- Huang K, Li F, Li J, Helard D, Hirooka K. 2012. Rapid vermicomposting of fresh fruit and vegetable wastes using earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Environmental Engineering Research* **68**:113-120.
- Hupfauf S, Plattner P, Wagner AO, Kaufmann R, Insam H, Podmirseg SM. 2018. Temperature shapes the microbiota in anaerobic digestion and drives efficiency to a maximum at 45°C. *Bioresource Technology* **269**:309-318.
- Hussain A, Iqbal K, Aziem S, Mahato P, Negi AK. 2014. A review on the science of growing crops without soil (soilless culture) – a novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* **7**:833-842.
- Hussain N, Singh A, Saha S, Kumar MVS, Bhattacharyya P, Bhattacharya SS. 2016. Excellent N-fixing and P-solubilizing traits in earthworm gut-isolated bacteria: a vermicompost based assessment with vegetable market waste and rice straw feed mixtures. *Bioresource Technology* **222**:165-174.
- Chaoui HI, Zibilske LM, Ohno T. 2003. Effects of earthworms' casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry* **35**:295-302.
- Chavan S, Yadav B, Atmakuri A, Tyagi RD, Wong JWC, Drogui P. 2022. Bioconversion of organic wastes into value-added products: a review. *Bioresource Technology* **344** (e126398) DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126398.
- Chen Y, Aviad T. 1990. Effects of humic substances on plant growth. Pages 161-186 in MacCarthy P, Clapp CE, Malcolm RL, Bloom PR, editors. *Humic substances in soil and crop sciences*. American Society of Agronomy and Soil Sciences, Madison, WI, USA.

- Chen JH, Wu JT. 2005. Benefits and drawbacks of composting. Pages 2-7 in Chen ZS, Bejosano-Gloria C, editors. Compost production: a manual for Asian farmers. Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region, Taipei, Taiwan.
- Chinsamy M, Kulkarni MG, Van Staden J. 2014. Vermicompost leachate reduces temperature and water stress effects in tomato seedlings. *HortScience* **49**:1183-1187.
- Chinta YD, Eguchi Y, Widiastuti A, Shinohara M, Sato T. 2015. Organic hydroponics induces systemic resistance against the air-borne pathogen, *Botrytis cinerea* (gray mould). *Journal of Plant Interactions* **10**:243-251.
- Chowdhury SD, Bhunia P, Surampalli RY. 2022. Vermifiltration: strategies and techniques to enhance the organic and nutrient removal performance from wastewater. *Water Environment Research* 94 (e10826) DOI: 10.1002/wer.10826.
- Chowdhury SD, Suhaib KH, Bhunia P, Surampalli RY. 2023. A critical review on the vermicomposting of organic wastes as a strategy in circular bioeconomy: mechanism, performance, and future perspectives. *Environmental Technology* (the article accepted for publication) DOI: 10.1080/09593330.2023.2215458.
- Churilova EV, Midmore DJ. 2019. Vermiliquer (vermicompost leachate) as a complete liquid fertilizer for hydroponically-grown pak choi (*Brassica chinensis* L.) in the tropics. *Horticulturae* 5 (e026) DOI: 10.3390/horticulturae5010026.
- Illera-Vives M, Seoane Labandeira S, Brito LM, Lopez-Fabal A, Lopez-Mosquera ME. 2015. Evaluation of compost from seaweed and fish waste as a fertilizer for horticultural use. *Scientia Horticulturae* **186**:101-107.
- Ingham ER. 1990. What is compost tea? Part I. *BioCycle* **40**:74-75.
- Ingham ER. 2005. The compost tea brewing manual: latest methods and research. Soil Foodweb Institute, Corvallis, OR, USA.
- Ingham ER, Alms M. 2003. The compost tea brewing manual. Soil Foodweb Institute, Corvallis, OR, USA.
- Ingram DT, Millner PD. 2007. Factors affecting compost tea as a potential source of *Escherichia coli* and *Salmonella* on fresh produce. *Journal of Food Protection* **70**:828-834.
- Jančula D, Zezulka Š, Došek M, Beklová M, Havelková B, Maršálek B. 2017. Digestate and fugate – fertilizers with ecotoxicological risks. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* **65**:1183-1188.
- Jarecki MK, Chong C, Voroney RP. 2005. Evaluation of compost leachates for plant growth in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition* **28**:651-667.
- Jensen MH, Collins WL. 1985. Hydroponic vegetable production. *Horticultural Reviews* **7**:483-558.
- Jiang X, Lu C, Hu R, Shi W, Zhou L, Wen P, Jiang Y, Lo YM. 2023. Nutritional and microbiological effects of vermicompost tea in hydroponic cultivation of maple peas (*Pisum sativum* var. *arvense* L.). *Food Science and Nutrition* **11**:3184-3202.



- Jiménez EI, Garcia VP. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes* **27**:115-142.
- Jordan RA, Ribeiro EF, de Oliveira FC, Geisenhoff LO, Martins EAS. 2018. Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **22**:525-529.
- Kano K, Kitazawa H, Suzuki K, Widiastuti A, Odani H, Zhou S, Chinta YD, Eguchi Y, Shinohara M, Sato T. 2021. Effects of organic fertilizer on bok choy growth and quality in hydroponic cultures. *Agronomy* 11 (e491) DOI: 10.3390/agronomy11030491.
- Karimaei MS, Massiha S, Mogaddam M. 2001. Comparison of two nutrient solutions' effect on growth and nutrient levels of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. *Acta Horticulturae* **644**:69-76.
- Keller K. 2019. 5 steps to quick compost. This Old House Ventures, Stamford, CT, USA. Available from <https://www.thisoldhouse.com/gardening/21015413/5-steps-to-quick-compost> (accessed February 2024).
- Kim MJ, Shim CK, Kim YK, Hong SJ, Park JH, Han EJ, Kim JH, Kim SC. 2015. Effect of aerated compost tea on the growth promotion of lettuce, soybean, and sweet corn in organic cultivation. *Plant Pathology Journal* **31**:259-268.
- Kolářová P. 2023. Aquaculture sludge treatment through vermicomposting [MSc. Thesis]. Czech University of Life Sciences Prague, Prague.
- Koné SB, Dionne A, Tweddell RJ, Antoun H, Avis TJ. 2010. Suppressive effect of non-aerated compost teas on foliar fungal pathogens of tomato. *Biological Control* **52**:167-173.
- Konschel K. 2009. Freshwater aquaculture and aquaponics systems and principles [Unpublished Report]. Empangeni, South Africa.
- Kouba A, Lunda R, Hlaváč D, Kuklina I, Hamáčková J, Randák T, Kozák P, Koubová A, Buřič M. 2018. Vermicomposting of sludge from recirculating aquaculture system using *Eisenia andrei*: technological feasibility and quality assessment of end-products. *Journal of Cleaner Production* **177**:665-673.
- Krastanova M, Sirakov I, Ivanova-Kirilova S, Yarkov D, Orozova P. 2022. Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology and Biotechnological Equipment* **36**:305-316.
- Laiq Ur Rehman M, Iqbal A, Chang CC, Li W, Ju M. 2019. Anaerobic digestion. *Water Environment Research* **91**:1253-1271.
- Lamolinara B, Pérez-Martínez A, Guardado-Yordi E, Guillén Fiallos C, Diéguez-Santana K, Ruiz-Mercado GJ. 2022. Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. *Waste Management* **140**:14-30.
- Landowne D. 2006. Cell physiology. McGraw-Hill Medical Publishing Division, Miami, FL, USA.

- Langenfeld NJ, Pinto DF, Faust JE, Heins R, Bugbee B. 2022. Principles of nutrient and water management for indoor agriculture. *Sustainability* 14 (e10204) DOI: 10.3390/su141610204.
- Latt UW. 2002. Shrimp pond waste management. *Aquaculture Asia* 7:11-16.
- Lau V, Mattson N. 2021. Effects of hydrogen peroxide on organically fertilized hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulturae* 7 (e106) DOI: 10.3390/horticulturae7050106.
- Le Bot J, Adamowicz S, Robin P. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:47-82.
- Lee JJ, Park RD, Kim YW, Shim JH, Chae DH, Rim YS, Sohn BK, Kim TH, Kim KY. 2004. Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth. *Bioresource Technology* 93:21-28.
- Lee E, Rout PR, Bae J. 2021. The applicability of anaerobically treated domestic wastewater as a nutrient medium in hydroponic lettuce cultivation: nitrogen toxicity and health risk assessment. *Science of the Total Environment* 780 (e146482) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146482.
- Li S, Zhao X, Ye X, Zhang L, Shi L, Xu F, Ding G. 2020. The effects of condensed molasses soluble on the growth and development of rapeseed through seed germination, hydroponics and field trials. *Agriculture* 10 (e260) DOI: 10.3390/agriculture10070260.
- Litterick A, Wood M. 2009. The use of composts and compost extracts in plant disease control. Pages 93-121 in Walters D, editor. *Disease control in crops: biological and environmentally friendly approaches*. Blackwell Publishing, Oxford, United Kingdom.
- Litterick A, Harrier L, Wallace P, Watson C, Wood M. 2004. The role of uncomposted materials, composts, manures, and compost extracts in reducing pest and disease incidence and severity in sustainable temperate agricultural and horticultural crop production – a review. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23:453-479.
- Liu WK, Yang QC, Du LF, Cheng RF, Zhou WL. 2011. Nutrient supplementation increased growth and nitrate concentration of lettuce cultivated hydroponically with biogas slurry. *Acta Agriculturae Scandinavica B – Soil and Plant Science* 61:391-394.
- Liu CM, Wachemo AC, Tong H, Shi SH, Zhang L, Yuan HR, Li XJ. 2018. Biogas production and microbial community properties during anaerobic digestion of corn stover at different temperatures. *Bioresource Technology* 261:93-103.
- Loera-Muro A, Troyo-Diéguez E, Murillo-Amador B, Barraza A, Caamal-Chan G, Lucero-Vega G, Nieto-Garibay A. 2021. Effects of vermicompost leachate versus inorganic fertilizer on morphology and microbial traits in the early development growth stage in mint (*Mentha spicata* L.) and rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) plants under closed hydroponic system. *Horticulturae* 7 (e100) DOI: 10.3390/horticulturae7050100.
- Lošák T, Hlušek J, Zatloukalová A, Musilová L, Vítězová M, Škarpa P, Zlámalová T, Fryč J, Vítěz T, Mareček J, Martensson A. 2014. Digestate from biogas plants is an attractive

- alternative to mineral fertilisation of kohlrabi. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* **2**:309-318.
- Lu N, Shimamura S. 2018. Protocols, issues and potential improvements of current cultivation systems. Pages 31-49 in Kozai T, editor. *Smart plant factory: the next generation indoor vertical farms*. Springer Nature, Singapore City, Singapore.
- Maher MJ, Prasad M, Raviv M. 2008. Organic soilless media components. Pages 459-504 in Raviv M, Lieth JH, editors. *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Machovec J. 1976. *Kvetiny v byte*. Příroda, Bratislava, ČSSR.
- Marsh L, Subler S, Mishra S, Marini M. 2005. Suitability of aquaculture effluent solids mixed with cardboard as a feedstock for vermicomposting. *Bioresource Technology* **96**:413-418.
- Marschner H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, New York, NY, USA.
- Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany* **105**:1141-1157.
- Mattson NS, Peters C. 2014. A recipe for hydroponic success. *Inside Grower* **2**:16-19.
- Maucieri C, Nicoletto C, van Os E, Anseeuw D, Van Havermaet R, Junge R. 2019. Hydroponic technologies. Pages 77-110 in Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM, editors. *Aquaponics food production systems*. Springer Nature, Cham, Switzerland.
- McCutchan Jr JH, Lewis Jr WM, Kendall C, McGrath CC. 2003. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos* **102**:378-390.
- Mejía PA, Ruíz-Zubiate JL, Correa-Bustos A, López-López MJ, Salas-Sanjuán MC. 2022. Effects of vermicompost substrates and coconut fibers used against the background of various biofertilizers on the yields of *Cucumis melo* L. and *Solanum lycopersicum* L. *Horticulturae* **8** (e445) DOI: 10.3390/horticulturae8050445.
- Mengesha WK, Gill WM, Powell SM, Evans KJ, Barry KM. 2017. A study of selected factors affecting efficacy of compost tea against several fungal pathogens of potato. *Journal of Applied Microbiology* **123**:732-747.
- Miceli A, Vetrano F, Moncada A. 2021. Influence of *Ecklonia maxima* extracts on growth, yield, and postharvest quality of hydroponic leaf lettuce. *Horticulturae* **7** (e440) DOI: 10.3390/horticulturae7110440.
- Midmore DJ. 2015. *Principles of tropical horticulture*. CABI, Wallingford, United Kingdom.
- Mirzoyan N, McDonald RC, Gross A. 2012. Anaerobic treatment of brackish water aquaculture sludge: an alternative to waste stabilization ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* **43**:238-248.
- Möller K, Müller T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Engineering in Life Sciences* **12**:242-257.

- Monsees H, Keitel J, Paul M, Kloas W, Wuertz S. 2017. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquaculture Environment Interactions* **9**:9-18.
- Morales-Corts MR, Pérez-Sánchez R, Gómez-Sánchez M.Á. 2018. Efficiency of garden waste compost teas on tomato growth and its suppressiveness against soilborne pathogens. *Scientia Agricola* **75**:400-409.
- Moran N. 2018. Why add dissolved oxygen? Produce Grower. Available from <https://www.producegrower.com/article/hydroponic-production-why-add-dissolved-oxygen> (accessed February 2024).
- Morgan L. 2021. *Hydroponics and protected cultivation: a practical guide*. CABI, Wallingford, United Kingdom.
- Mowa E, Kalili M, Akundabweni L, Chimwamurombe P. 2018. Impact of organic hydroponic nutrient solution on tomato fruit quality. *International Science and Technology Journal of Namibia* **12**:62-77.
- Muneer S, Lee BR, Kim KY, Park SH, Zhang Q, Kim TH. 2014. Involvement of sulphur nutrition in modulating iron deficiency responses in photosynthetic organelles of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Photosynthesis Research* **119**:319-329.
- Mupambwa HA, Namwoonde AS, Liswaniso GM, Hausiku MK, Ravindran B. 2019. Biogas digestates are not an effective nutrient solution for hydroponic tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) production under a deep-water culture system. *Heliyon* **5** (e02736) DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02736.
- Mupondi LT, Mnkeni PNS, Muchaonyerwa P. 2010. Effectiveness of combined thermophilic composting and vermicomposting on biodegradation and sanitization of mixtures of dairy manure and waste paper. *African Journal of Biotechnology* **9**:4754-4763.
- Nagavallema KP, Wani SP, Lacroix S, Padmaja VV, Vineela C, Babu Rao M, Sahrawat KL. 2004. Vermicomposting: recycling wastes into valuable organic fertilizer. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India.
- National Organic Standards Board [NOSB]. 2016. *The hydroponic and aquaponic task force report*. National Organic Standards Board, Washington, DC, USA.
- Neilson S, Rajakaruna N. 2015. Phytoremediation of agricultural soils: using plants to clean metal-contaminated arable land. Pages 159-168 in Ansari A, Gill S, Gill R, Lanza G, Newman L, editors. *Phytoremediation: management of environmental contaminants*. Springer, Cham, Switzerland.
- Nemali KS, van Iersel MW. 2004. Light intensity and fertilizer concentration: I. Estimating optimal fertilizer concentration from water-use efficiency of wax begonia. *HortScience* **39**:1287-1292.
- Nigussie A, Kuyper TW, Bruun S, de Neergaard A. 2016. Vermicomposting as a technology for reducing nitrogen losses and greenhouse gas emissions from small-scale composting. *Journal of Cleaner Production* **139**:429-439.

- Nursyahid A, Helmy H, Karimah AI, Setiawan TA. 2021. Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic nutrition controlling system using linear regression method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1108 (e012033) DOI: 10.1088/1757-899X/1108/1/012033.
- Okomoda VT, Oladimeji SA, Solomon SG, Olufeagba SO, Ogah SI, Ikhwanuddin M. 2023. Aquaponics production system: a review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. Food Science and Nutrition **11**:1157-1165.
- Oladimeji AS, Okomoda VT, Olufeagba SO, Solomon SG, Abol-Munafi AB, Alabi KI, Ikhwanuddin M, Martins CO, Umaru JA, Hassan A. 2020. Aquaponics production of catfish and pumpkin: comparison with conventional production systems. Food Science and Nutrition **8**:2307-2315.
- Page V, Feller U. 2013. Selection and hydroponic growth of bread wheat cultivars for bio-regenerative life support systems. Advance in Space Research **52**:536-546.
- Pan J, Cai H, Zhang Z, Liu H, Li R, Mao H, Awasthi MK, Wang Q, Zhai L. 2018. Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction. Bioresource Technology **270**:467-475.
- Panda AK, Mishra R, Dutta J, Wani ZA, Pant S, Siddiqui S, Alamri SA, Alrumman SA, Alkahtani MA, Bisht SS. 2022. Impact of vermicomposting on greenhouse gas emission: a short review. Sustainability 14 (e11306) DOI: 10.3390/su141811306.
- Pane C, Celano G, Vilecco D, Zaccardelli M. 2012. Control of *Botrytis cinerea*, *Alternaria alternata* and *Pyrenochaeta lycopersici* on tomato with whey compost-tea application. Crop Protection **38**:80-86.
- Pant A, Radovich TJK, Hue NV, Talcott ST, Krenek KA. 2009. Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in Pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, Chinensis group) grown under vermicompost and chemical fertiliser. Journal of the Science of Food and Agriculture **89**:2383-2392.
- Pant A, Radovich TJK, Hue NV, 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 NV, Paull RE. 2012. Biochemical properties of compost tea associated with compost quality and effects on pak choi growth. Scientia Horticulturae **148**:138-146.
- Pantanella E, Cardarelli M, Colla G, Rea E, Marcucci A. 2012. Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. Acta Horticulturae **927**:887-893.
- Park Y, Williams KA. 2024. Organic hydroponics: a review. Scientia Horticulturae 324 (e112604) DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112604.
- Parkin TB, Berry EC. 1994. Nitrogen transformations associated with earthworm casts. Soil Biology and Biochemistry **26**:1233-1238.

- Patidar A, Gupta R, Tiwari A. 2014. Integrated composting and vermicomposting: a boon to industry for waste clearance. *International Journal of Environment and Waste Management* **13**:274-290.
- Patterson S. 2019. *The hydroponic garden secret: how to grow more food faster all year long*. The Alternative Daily, Jupiter, FL, USA.
- Pelayo Lind O, Hultberg M, Bergstrand KJ, Larsson-Jonsson HE, Caspersen S, Asp H. 2021. Biogas digestate in vegetable hydroponic production: pH dynamics and pH management by controlled nitrification. *Waste and Biomass Valorization* **12**:123-133.
- Pilla N, Tranchida-Lombardo V, Gabrielli P, Aguzzi A, Caputo M, Lucarini M, Durazzo A, Zaccardelli M. 2023. Effect of compost tea in horticulture. *Horticulturae* **9** (e984) DOI: 10.3390/horticulturae9090984.
- Pivato A, Vanin S, Raga R, Lavagnolo MC, Barausse A, Rieple A, Laurent A, Cossu R. 2016. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: an ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management* **49**:378-389.
- Pokhrel B, Sorensen JN, Moller HB, Petersen KK. 2019. Processing methods of organic liquid fertilizers affect nutrient availability and yield of greenhouse grown parsley. *Renewable Agriculture and Food Systems* **34**:430-438.
- Pregitzer KS, King JS. 2005. Effects of soil temperature on nutrient uptake. Pages 277-310 in BassiriRad H, editor. *Nutrient acquisition by plants*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, Germany.
- Pulkrábek J. 2007. *Okopaniny*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, Česká republika. Available from <https://agrobiologie.cz/SMEP3/Okopaniny/okopaniny/php/skripta/index.html> (accessed December 2023).
- R Core Team. 2020. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available from <https://www.R-project.org/> (accessed February 2024).
- Rajendran P, Jayakumar E, Kandula S, Gunasekaran P. 2008. *Vermiculture and vermicomposting biotechnology for organic farming and rural economic development*. ECO Services International, Dietikon, Switzerland.
- Rakocy JE, Hargreaves JA. 1993. Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. Pages 112-136 in Wang JK, editor. *Techniques for modern aquaculture*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA.
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM. 2006. *Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics – integrating fish and plant culture*. Southern Regional Aquaculture Center, Stoneville, MS, USA.
- Raviv M, Lieth JH. 2008. Significance of soilless culture in agriculture. Pages 1-12 in Raviv M, Lieth JH, editors. *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Reinecke AJ, Viljoen SA, Saayman RJ. 1992. The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus* and *Eisenia fetida* (Oligochaeta) for vermicomposting in southern Africa in terms of their temperature requirements. *Soil Biology and Biochemistry* **24**:1295-1307.
- Rigby H, Smith SR. 2013. Nitrogen availability and indirect measurements of greenhouse gas emissions from aerobic and anaerobic biowaste digestates applied to agricultural soils. *Waste Management* **33**:2641-2652.
- Roberto K. 2003. How-to hydroponics. Future Garden, Chigwell, United Kingdom.
- Roman P, Martinez MM, Pantoja A. 2015. Farmer's compost handbook: experiences in Latin America. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Santiago, Chile.
- Ronga D, Setti L, Salvarani C, De Leo R, Bedin E, Pulvirenti A, Milc J, Pecchioni N, Francia E. 2019. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation. *Scientia Horticulturae* **244**:172-181.
- Rooney CP, Zhao FJ, McGrath SP. 2006. Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environmental Toxicology and Chemistry* **25**:726-732.
- Roosta HR, Hamidpour M. 2011. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* **129**:396-402.
- Rubert K.F. 2008. Tetracycline antibiotic distribution and transformation in aquatic systems [Ph.D. thesis]. University of Wisconsin, Madison, WI, USA.
- Ruz-Jerez BE, Ball PR, Tillman RW. 1992. Laboratory assessment of nutrient release from a pasture soil receiving grass or clover residues, in the presence or absence of *Lumbricus rubellus* or *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry* **24**:1529-1534.
- Rynk R, Fornshell G, Büyüksönmez F, Hess TF. 1998a. Composting and vermiculture: alternative practices for managing manure and mortalities on aquaculture farms. Page 464 in World Aquaculture Society [WAS], editor. Aquaculture '98. WAS, Las Vegas, NV, USA.
- Rynk R, Grabenstein K, Hess TF. 1998b. Aquaculture manure as a potential feedstock for vermicomposting. Page 465 in World Aquaculture Society [WAS], editor. Aquaculture '98. WAS, Las Vegas, NV, USA.
- Sajjai S, Ando A, Inukai R, Shinohara M, Ogawa J. 2016. Analysis of microbial community and nitrogen transition with enriched nitrifying soil microbes for organic hydroponics. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* **80**:2247-2254.
- Salisbury FB, Ross CW. 1992. Plant physiology. Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA, USA.
- Samal K, Mohan AR, Chaudhary N, Moulick S. 2019. Application of vermiculture technology in waste management: a review on mechanism and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **7** (e103392) DOI: 10.1016/j.jece.2019.103392.

- Samarakoon UC, Weerasinghe PA, Weerakkody WAP. 2006. Effect of electrical conductivity [EC] of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture. *Tropical Agricultural Research* **18**:13-21.
- Samet M, Ghazala I, Karray F, Abid C, Chiab N, Nouri-Ellouz O, Sayadi S, Gargouri-Bouزيد R. 2022. Isolation of bacterial strains from compost teas and screening of their PGPR properties on potato plants. *Environmental Science and Pollution Research* **29**:75365-75379.
- Sandoval-Villa M, Sánchez-García P, Alcántar-González GE. 2007. Principios de la hidroponía y del fertirriego. Pages 374-438 in Alcántar-González GE, Trejo-Téllez LI, editors. *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa, México DF, México.
- Sanchez-Hernandez JC, Cares XA, Domínguez J. 2019. Exploring the potential enzymatic bioremediation of vermicompost through pesticide-detoxifying carboxylesterases. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 183 (e109586) DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109586.
- Santana NA, Jacques RJS, Antonioli ZI, Martínez-Cordeiro H, Domínguez J. 2020. Changes in the chemical and biological characteristics of grape marc vermicompost during a two-year production period. *Applied Soil Ecology* 154 (e103587) DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103587.
- Scaglia B, Pognani M, Adani F. 2017. The anaerobic digestion process capability to produce biostimulant: the case study of the dissolved organic matter (DOM) vs. auxin-like property. *Science of the Total Environment* **589**:36-45.
- Shah AH, Shah SH. 2009. Cultivation of lettuce in different strengths of the two nutrients solution recipes in a non-circulating hydroponics system. *Sarhad Journal of Agriculture* **25**:419-428.
- Sharma K, Garg VK. 2018. Comparative analysis of vermicompost quality produced from rice straw and paper waste employing earthworm *Eisenia fetida* (Sav.). *Bioresource Technology* **250**:708-715.
- 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.
- Shinohara M, Aoyama C, Fujiwara K, Watanabe A, Ohmori H, Uehara Y, Takano M. 2011. Microbial mineralization of organic nitrogen into nitrate to allow the use of organic fertilizer in hydroponics. *Soil Science and Plant Nutrition* **57**:190-203.
- Shrestha A, Dunn B. 2010. *Hydroponics*. Oklahoma Cooperative Extension Service, Stillwater, OK, USA.
- Scheu S. 1987. Microbial activity and nutrient dynamics in earthworm casts (Lumbricidae). *Biology and Fertility of Soils* **5**:230-234.
- Scheuerell SJ, Mahaffee WF. 2002. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost Science and Utilization* **10**:313-338.



- Scheuerell SJ, Mahaffee WF. 2004. Compost tea as container medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology* **94**:1156-1163.
- Scheuerell SJ, Mahaffee WF. 2006. Variability associated with suppression of gray mold (*Botrytis cinerea*) on geranium by foliar applications of non-aerated and aerated compost teas. *Plant Disease* **90**:1201-1208.
- Schnug E, Haneklaus S. 2005. Sulphur deficiency symptoms in oilseed rape (*Brassica napus* L.) – the aesthetics of starvation. *Phyton* **45**:79-95.
- Schwarz M. 1995. Soilless culture management. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, Germany.
- Siddiqui Y, Meon S, Ismail MR, Rahmani M. 2009. Bio-potential of compost tea from agro-waste to suppress *Choanephora cucurbitarum* L. the causal pathogen of wet rot of okra. *Biological Control* **49**:38-44.
- Singh R, Bhunia P, Dash RR. 2017. A mechanistic review on vermifiltration of wastewater: design, operation and performance. *Journal of Environmental Management* **197**:656-672.
- Sinha RK, Herat S, Valani DB, Chauhan KA. 2009. Environmental-economics of crop production by vermiculture: economically viable & environmentally sustainable over chemical agriculture. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* **5**:42-55.
- Slepetiene A, Volungevicius J, Jurgutis L, Liaudanskiene I, Amaleviciute-Volunge K, Slepetys J, Ceseviciene J. 2020. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. *Waste Management* **102**:441-451.
- Slepetiene A, Ceseviciene J, Amaleviciute-Volunge K, Mankeviciene A, Parasotas I, Skersiene A, Jurgutis L, Volungevicius J, Veteikis D, Mockeviciene I. 2023. Solid and liquid phases of anaerobic digestate for sustainable use of agricultural soil. *Sustainability* **15** (e1345) DOI: 10.3390/su15021345.
- Smith K. 2009. How to build, maintain, and use a compost system: secrets and techniques you need to know to grow the best vegetables. Atlantic Publishing Group, Ocala, FL, USA.
- Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A. 2014. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Sonneveld C, Straver NB. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables, Naaldwijk, Netherlands.
- Sonneveld C, Voogt W. 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Stefaniuk M, Bartminski P, Rozylo K, Debicki R, Oleszczuk P. 2015. Ecotoxicological assessment of residues from different biogas production plants used as fertilizer for soil. *Journal of Hazardous Materials* **298**:195-202.

- Steiner AA. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* **15**:134-154.
- Stoknes K, Wojciechowska E, Jasinska A, Gulliksen A, Tesfamichael, AA. 2018. Growing vegetables in the circular economy; cultivation of tomatoes on green waste compost and food waste digestate. *Acta Horticulturae* **1215**:389-396.
- Suhane RK. 2007. Vermicompost. Rajendra Agriculture University, Pusa, India.
- Sunaryo Y, Purnomo D, Darini MT, Cahyani VR. 2018. Effects of goat manure liquid fertilizer combined with AB-MIX on foliage vegetables growth in hydroponic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 129 (e012003) DOI: 10.1088/1755-1315/129/1/012003.
- Sutar KA, Wadkar S, Gurav K, Jadhav S, Turambekar V. 2018. Study on use of waste water in hydroponic system instead of nutrient solution. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* **6**:2035-2039.
- Suthar S. 2008. Bioremediation of aerobically treated distillery sludge mixed with cow dung by using an epigeic earthworm *Eisenia fetida*. *Environmentalist* **28**:76-84.
- Suthar S, Pandey B, Gusain R, Gaur RZ, Kumar K. 2017. Nutrient changes and biodynamics of *Eisenia fetida* during vermicomposting of water lettuce (*Pistia* sp.) biomass: a noxious weed of aquatic system. *Environmental Science and Pollution Research* **24**:199-207.
- Švehla P, Míchal P, Benáková A, Hanč A, Tlustoš P. 2023. Nitrification of the liquid phase of digestate: the transfer of the process from laboratory to pilot plant and full scale conditions. *Environmental Technology and Innovation* 30 (e103084) DOI: 10.1016/j.eti.2023.103084.
- Taeporamaysamai O, Ratanatamskul C. 2016. Co-composting of various organic substrates from municipal solid waste using an on-site prototype vermicomposting reactor. *International Biodeterioration and Biodegradation* **113**:357-366.
- Taiz L, Zeiger E. 1998. *Plant physiology*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, USA.
- Tanji KK. 1990. *Agricultural salinity assessment and management*. American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Tao R, Wakelin SA, Liang YC, Chu GX. 2017. Response of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in calcareous soil to mineral and organic fertilizer application and their relative contribution to nitrification. *Soil Biology and Biochemistry* **114**:20-30.
- Texier W. 2022. *Hydroponics for everybody: all about home horticulture*. Mama Publishing, Paris, France.
- Tikasz P, MacPherson S, Adamchuk V, Lefsrud M. 2019. Aerated chicken, cow, and turkey manure extracts differentially affect lettuce and kale yield in hydroponics. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* **8**:241-252.
- Timmons MB, Ebeling JM. 2010. *Recirculating aquaculture*. Cayuga Aqua Ventures, LLC, New York, NY, USA.

- Tindall JA, Mills HA, Radcliffe DE. 1990. The effect of root zone temperature on nutrient uptake of tomato. *Journal of Plant Nutrition* **13**:939-956.
- Tomati U, Grappelli A, Galli E. 1987. The presence of growth regulators in earthworm-worked wastes. Pages 423-435 in Bonvicini Pagliai AM, Omodeo P, editors. *Selected symposia and monographs U.Z.I., 2*, Modena, Italy.
- Tomati U, Grappelli A, Galli E. 1988. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biology and Fertility of Soils* **5**:288-294.
- Touliatos D, Dodd IC, McAinsh M. 2016. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security* **5**:184-191.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González GE. 2007. Elementos Benéficos. Pages 49-91 in Alcántar-González GE, Trejo-Téllez LI, editors. *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa, México DF, México.
- Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, Itävaara M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* **72**:169-183.
- Turcios AE, Papenbrock J. 2014. Sustainable treatment of aquaculture effluents – what can we learn from the past for the future? *Sustainability* **6**:836-856.
- Uchida R. 2000. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. Pages 31-55 in Silva JA, Uchida R, editors. *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture*. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI, USA.
- USEPA [U.S. Environmental Protection Agency]. 2020. National overview: facts and figures about materials, wastes and recycling. USEPA, Office of Resource Conservation and Recovery, Washington, D.C., USA. Available from <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials> (accessed December 2023).
- Vaillant N, Monnet F, Sallanon H, Coudret A, Hitmi A. 2003. Treatment of domestic wastewater by a hydroponic NFT system. *Chemosphere* **50**:121-129.
- Vambe M, Cooposamy RM, Arthur G, Naidoo K. 2023. Potential role of vermicompost and its extracts in alleviating climatic impacts on crop production. *Journal of Agriculture and Food Research* **12** (e100585) DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100585.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non-renewable resource. *New Phytologist* **157**:423-447.
- Velazquez-Gonzalez RS, Garcia-Garcia AL, Ventura-Zapata E, Barceinas-Sanchez JDO, Sosa-Savedra JC. 2022. A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. *Agriculture* **12** (e646) DOI: 10.3390/agriculture12050646.
- Verdegem MCJ. 2013. Nutrient discharge from aquaculture operations in function of system design and production environment. *Reviews in Aquaculture* **5**:158-171.

- Verma AK, Chandrakant MH, John VC, Peter RM, John IE. 2023. Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change* 194 (e122709) DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122709.
- Verwer FLJA. 1978. Research and results with horticultural crops grown in rockwool and nutrient film. *Acta Horticulturae* **82**:141-148.
- Vig AP, Singh J, Wani SH, Dhaliwal SS. 2011. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny). *Bioresource Technology* **102**:7941-7945.
- Vinci G, Rapa M. 2019. Hydroponic cultivation: life cycle assessment of substrate choice. *British Food Journal* **121**:1801-1812.
- Volkmar KM, Hu Y, Steppuhn H. 1998. Physiological responses of plants to salinity: a review. *Canadian Journal of Plant Science* **78**:19-27.
- Vyas S, Prajapati P, Shah AV, Srivastava VK, Varjani S. 2022. Opportunities and knowledge gaps in biochemical interventions for mining of resources from solid waste: a special focus on anaerobic digestion. *Fuel* 311 (e122625) DOI: 10.1016/fuel.2021.122625.
- Wallach R. 2008. Physical characteristics of soilless media. Pages 41-116 in Raviv M, Lieth JH, editors. *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences* **14**:7370-7390.
- Wang P, Wang H, Qiu Y, Ren L, Jiang B. 2018. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production – a review. *Bioresource Technology* **248**:29-36.
- Wang L, Guo S, Wang Y, Yi D, Wang J. 2019. Poultry biogas slurry can partially substitute for mineral fertilizers in hydroponic lettuce production. *Environmental Science and Pollution Research* **26**:659-671.
- Wang QY, Zhao MR, Wang JQ, Hu BY, Chen QJ, Qin Y, Zhang GQ. 2023. Effects of microbial inoculants on agronomic characters, physicochemical properties and nutritional qualities of lettuce and celery in hydroponic cultivation. *Scientia Horticulturae* 320 (e112202) DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112202.
- Weimers K, Bergstrand KJ, Hultberg M, Asp H. 2022. Liquid anaerobic digestate as sole nutrient source in soilless horticulture – or spiked with mineral nutrients for improved plant growth. *Frontiers in Plant Science* 13 (e770179) DOI: 10.3389/fpls.2022.770179.
- Welke S. 2005. The effect of compost extract on the yield of strawberries and the severity of *Botrytis cinerea*. *Journal of Sustainable Agriculture* **25**:57-68.
- Westers H. 1995. Feed and feeding strategies to reduce aquaculture waste. Pages 365-376 in Timmons MB, editor. *Aquacultural engineering and waste management*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY, USA.

- Wheeler RM. 2010. Plants for human life support in space: from Myers to Mars. *Gravitational and Space Biology* **23**:25-35.
- Wiedenhoeft AC. 2006. *Plant nutrition*. Infobase Publishing, New York, NY, USA.
- Wongkiew S, Polprasert C, Koottatep T, Limpiyakorn T, Surendra KC, Khanal SK. 2022. Chicken manure-based bioponics: effects of acetic acid supplementation on nitrogen and phosphorus recoveries and microbial communities. *Waste Management* **137**:264-274.
- Yadav A, Garg VK. 2011. Vermicomposting – an effective tool for the management of invasive weed *Parthenium hysterophorus*. *Bioresource Technology* **102**:5891-5895.
- Yadav A, Madan S. 2013. Nutrient status of vermicompost of paper mill sludge with different wastes by using *Eisenia fetida*. *European Journal of Applied Science* **5**:62-66.
- Yadav SK, Babu S, Singh R, Yadav D, Rajanna GA. 2023. The role of organic and natural ecosystems in the food industry. Pages 115-128 in Accorsi R, Bhat R, editors. *Sustainable development and pathways for food ecosystems: integration and synergies*. Academic Press, Cambridge, MA, USA.
- Yao W, Cai D, Huang F, Mohamed TA, Li P, Qiao X, Wu J. 2023. Promoting lignin exploitability in compost: a cooperative microbial depolymerization mechanism. *Process Safety and Environmental Protection* **174**:856-868.
- Yatoo AM, Ali MN, Baba ZA, Hassan B. 2021. Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **41** (e007) DOI: 10.1007/s13593-020-00657-w.
- Yildiz HY, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G. 2017. Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces – a review. *Water* **9** (e013) DOI: 10.3390/w9010013.
- Zaccardelli M, Pane C, Scotti R, Palese AM, Celano G. 2012. Impiego di compost-tea come bioagrofarmaci e biostimolanti in ortofrutticoltura. *Italus Hortus* **19**:17-28.
- Zaccardelli M, Pane C, Villecco D, Palese AM, Celano G. 2018. Compost tea spraying increases yield performance of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in greenhouse under organic farming system. *Italian Journal of Agronomy* **13**:229-234.
- Zhou Y, Xiao R, Klammsteiner T, Kong X, Yan B, Mihai FC, Liu T, Zhang Z, Awasthi MK. 2022. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: a review. *Bioresource Technology* **360** (e127591) DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127591.
- Zirkler D, Peters A, Kaupenjohann M. 2014. Elemental composition of biogas residues: variability and alteration during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy* **67**:89-98.
- Zvára K. 2013. *Základy statistiky v prostředí R*. Karolinum, Praha