

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra kvality a bezpečnosti potravin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Kvalita a bezpečnost rostlinných produktů v kultivačních
bezpůdních systémech**

Bakalářská práce

Anna – Běla Sýkorová

Výživa a potraviny

doc. Ing. Pavel Klouček Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Kvalita a bezpečnost rostlinných produktů v kultivačních ezpůdních systémech jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 3. května 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Pavlovi Kloučkovi Ph. D za konzultace a podporu při psaní práce.

Kvalita a bezpečnost rostlinných produktů v kultivačních bezpůdních systémech

Souhrn

Bezpůdní systémy se dají rozdělit na dva hlavní směry: hydroponii a akvaponii. Přičemž akvaponie je spíše rozšířená hydroponie o akvakulturu, ze které se dodávají živiny z odpadních látek vodních živočichů. Základní myšlenkou bezpůdních systémů, konkrétně tedy hydroponie, je pěstování rostlin bez půdy, popřípadě v uzavřeném prostoru či se substrátem. Znamená to konstatní dodávání vody, roztoku s příslušnými živinami, kontrolu okolní teploty a vlhkosti a v případě úplně uzavřeného systému i náhradu slunečního světla. Hydroponické systémy se dají dělit na dva hlavní typy, jimiž jsou cirkulující a necirkulující hydroponické systémy. Zásadní rozdíl je v tom, že v cirkulujícím systému se recykluje voda v oběhu stále dokola. To má svá rizika, zejména v podobě náchylnosti k akumulaci určitých prvků, rozšíření chorob aj. Dále se pak dají dělit podle typů zavlažování jako jsou např. NFT, DFT systémy a aeroponie, které se všechny liší zejména způsobem distribuce vody ke kořenům.

Akvaponie je bezpůdní systém rozšířený o akvakulturu. Je to spojení akvakultury s hydroponií, fungující jako ekosystém. Podobně jako samotná hydroponie, existují dva hlavní typy akvaponie – jednosmyčková a dvojsmyčková. Jednosmyčková akvaponie je přímo spojená s rostlinou hydroponií a voda mezi těmito dvěma systémy koluje. Dvojsmyčková je pak oddělena a voda z akvakultury se dostane na hydroponické části externě. V akvaponii je důležité koloběh dusíku, jehož zdrojem jsou opadlá látka ryb a ty se pak dostávají k rostlinám. V procesu jsou zakomponované také mikroorganismy, které mění dusík na vhodnou formu pro přijetí rostlinami.

Nutriční kvalita produktů vypěstovaných bezpůdními systémy pravděpodobně nestrádá. Vzhledem k velké míře kontroly nad živinami a nad prostředím, lze kvalitu produktů určitými způsoby i zlepšit. K tomu může být nápomocný parametr elektrické vodivosti, který vypovídá o množství rozpuštěných iontů v roztoku. Bezpůdní systémy mají potenciál v možném osidlování jiných planet jako např. Marsu, který se zdá pro pěstování těmito způsoby nejvhodnější. Dalším využitím bezpůdních systémů je přesun pěstování produktů do měst, do uzavřených budov s myšlenkou ušetření orné půdy, jejíž plocha ubývá. Druhým možným pozitivním vlivem může být tímto navýšení množství vypěstovaných potravin a tím potenciální řešení problémů vycházejících přelidnatosti země.

Klíčová slova: bezpůdní kultivace, hydroponické, akvaponické, výživa, kvalita a bezpečnost,

Quality and safety of plant products in soilless cultivation systems

Summary

Soilless cultivation divides into two main directions: hydroponics and aquaponics. To be more specific, hydroponic system is included in more complex aquaponics, where there is a relation between fish and their disposal which produces valuable nutrients for hydroponic plants in a solution. The main idea of soilless cultivation is growing plants without soil and even can be applied indoor with more controlled environment. The controlled environment means constant supply of water, nutrient solution, temperature and humidity control and in the case of indoor system also a sufficient lightning. The nutrient solution might be circulating; which is a system where water with nutrient is recycled. However, this can cause particular issues: for example when certain elements accumulate there or it there can be caused a spread of disease. On the contrary, in non-recycled system, the nutrient solution is used only once. Another way how to divide hydroponics is according to an irrigation, for instance NFT, DFT and aeroponics system. They differ by way of water distribution to the roots.

Aquaponics is a system, where aquaculture is together with hydroponics. There also exist two main types of aquaponics: coupled and decoupled. Coupled aquaponic is directly connected with the hydroponic part. Decoupled one is completely separated from the hydroponic part and the nutrient solution from fish disposal is given externally. Another important part in an aquaponic system is nitrogen distribution between the two systems. Nitrogen is the main element given by fish to hydroponic plants, but there are also microorganisms which play an important role in transforming nitrogen into compounds more suitable for plants.

Nutritional quality of soilless products most probably does not deteriorate. That might be caused by strict and complex control over the nutrients solution and environment. What is more, the quality can be enhanced in certain conditions. For such enhancement of the quality an electrical conductivity parameter can be helpful, which interprets the amount of dissolved ions in the solution. Soilless systems have a possible potential while settling in other planets, such as the Mars which seems to be suitable for further research. Further use for soilless systems can be found in urban farming, meaning growing plants in cities and enclosed buildings. That also has a potential in saving an arable land and in the increase in the number of crops related to the issue of overpopulation.

Keywords: soilless, hydroponic, aquaponic, nutrition, quality and safety, exoplanetary,

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíl práce.....	13
3 Literární rešerše	14
3.1 Obecný princip bezpůdních metod.....	14
3.2 HYDROPONIE	15
3.2.1 PRINCIP	15
3.2.2 ZPŮSOBY ZAVLAŽOVÁNÍ	21
3.2.2.1 Nutrient Technique systém (NFT)	21
3.2.2.2 Deep Flow Technique systém (DFT)	21
3.2.2.3 Modified hybrid systém	22
3.2.2.4 Drip irrigation systém	22
3.2.2.5 Wicking systém.....	22
3.2.2.6 Aeroponie.....	22
3.3 AKVAPONIE.....	23
3.3.1 Princip akvaponie.....	23
3.3.2 Jednosmyčková a dvojsmyčková akvaponie.....	25
3.3.3 Výhody a nevýhody aquaponie	26
3.4 Potenciál bezpůdních systémů.....	27
3.4.1 Negativa a pozitiva.....	27
3.4.2 Nutriční analýza	29
3.4.2.1 Elektrická vodivost a způsoby zlepšení kvality produktů	32
3.4.3 Toxikologická rizika	34
3.4.3.1 Mikroorganismy	34
3.4.3.2 Mykotoxiny.....	35
3.4.3.3 Autotoxicita	35
3.4.3.4 Residua pesticidů a těžkých kovů.....	36
3.4.4 Budoucnost bezpůdních systémů	37
3.4.4.1 Pěstování na Marsu.....	37
3.4.4.2 Pěstování ve městech.....	39
3.4.4.3 Ekologické a ekonomické aspekty.....	41
4 Závěr	44
5 Literatura.....	45

1 Úvod

Z pohledu běžného konzumenta rostlinných produktů, je kultivace rostlinných produktů bez půdy stále někde daleko v budoucnosti. Opak je ale pravdou. Nedostatek vhodných půd, kontaminace nemocemi po opakovaném využití půdy a touha po dosažení optimálních podmínek pro růst rostlin, vede k celosvětovému trendu pěstování rostlin v bezpůdních systémech (Raviv and Lieth 2019). Příklady těchto systémů jsou systémy s názvy hydroponie, aeroponie nebo akvaponie. Tyto systémy se využívají samostatně nebo vzájemně kombinované. Dále jsou také prostředkem nových trendů zemědělství ve městech, či výzkumech budoucnosti. Ať už jako vertikální zemědělství, tj. pěstování v uzavřených prostorech, budovách za neustálé substituce slunečního světla, vody a půdy anebo méně známé studie o *kultivaci těmito systémy na Marsu či jiných planetách s potenciálem budoucího života*.

Tato práce se těmito produkčními systémy zabývá zejména z hlediska kvality a bezpečnosti vzniklých rostlinných produktů. Pomocí rešerše odborných článků bylo možné porovnat jednotlivé zmíněné systémy s klasickým zemědělstvím. Tato práce také pojednává o rizicích spojených s takovýmto zemědělstvím a v neposlední řadě i o tom, jestli tyto systémy mohou být odpovědí v nekonečné otázce udržitelnosti našich zdrojů. Je nesporným faktem, že počet lidí v populaci na zemi přibývá a místa, půdy i zdrojů hojně ubývá (Tilman et al. 2002). Hlavní výzvou budoucnosti pro globální zemědělství je tedy produkovat adekvátní množství dostupných potravin v méně rozvinutých zemích (Raviv and Lieth 2019). S tím se pojí i nevýhoda energetické náročnosti těchto systémů a otázka, jak tedy systémy mohou být ekologické při velké spotřebě energie (Benke and Tomkins 2017).

Cílem práce je zaměřit se zejména na kvalitu produktů z pohledu nutričních vlastností a sensoriky a vyhledat potenciální nebezpečí a rizika spojená s jejich pěstováním. Účelem této práce je vše zjištěné seřadit a sumarizovat do souvislého textu, aby informace v něm obsaženy mohly být snadno vyhledány a bylo tak patrné, jak daleko je výzkum v této problematice.

Tato oblast je v současné době předmětem mnoha výzkumů, ale i nadále skýtá řadu otazníků, což byl jeden z hlavních důvodů výběru tohoto tématu pro danou práci. Zároveň je daná problematika veřejnosti doposud méně známá, a proto má práce za cíl zvýšit povědomí o daném tématu napříč veřejností. Rešerše tedy může pomoci v dalším zkoumání, či se v problematice lépe zorientovat. V neposlední řadě je na tomto tématu zajímavá jeho rozmanitost. Dotýká se výživy a potravin, ekologického zemědělství i technologií budoucnosti.

Ač je toto téma zdánlivě moderní, výzkumy probíhají zejména v posledních dvaceti až třiceti letech. Existují doklady o tom, že nápady na pěstování bez půdy sahají až do dávného Egypta, ač samozřejmě ve velmi omezeném rozměru, oproti dnešním výzkumům. Malby nalezeny na zdech chrámu v Deir el Bahari dokazují první dokumentovaný případ rostlin pěstovaných v *květináči*. Egypťané znali principy bezpůdních systémů již před čtyřmi tisíci lety. Byli zvyklí přesunovat dospělé stromy z jejich země původu do paláců králů a pěstovali je dále s použitím vlastního substrátu. Není známo, které pěstební médium do *květináčů* používali, ale ve chvíli, kdy se ukázalo, že byly rostliny převáženy na velké vzdálenosti, je možné, že byly použity materiály lehčí, než je půda (Raviv et al. 1986).

Dnes, více než přesuny rostlin, řešíme ekologické a globální problémy, které nás sužují. Výroba potravin závisí na přístupnosti zdrojů jako je půda, voda, fosilní energie a živiny a aktuální konzumace a rozklad těchto zdrojů překračuje jejich globální regenerační schopnost (Goddek et al. 2019).

Proto se velká část výzkumu snaží přiblížit se kýženému výsledku a přijít na jednoduchý, nízkonákladový bezpůdní systém, který by mohl být částečným řešením problémů s nedostatkem úrodné půdy a “know-how” (Raviv and Lieth 2019). Zejména ušetření plochy pro pěstování je jedním z faktorů pro rozvoj bezpůdních systémů. A také fakt, že relativně malá oblast nutná pro pěstování, může poskytnout potraviny pro značnou část populace a zároveň může stimulovat tento rozvoj (Raviv and Lieth 2019).

2 Cíl práce

V relevantních literárních zdrojích vyhledat vliv kultivačních bezpůdních systémů jako je hydroponie, aeroponie a aquaponie na kvalitu a bezpečnost rostlinných produktů. Zaměřit se na kvalitu z pohledu nutričního obsahu a sensoriky a zjistit možné obsahy potenciálně škodlivých látek či mikroorganismů, jako jsou těžké kovy, toxické sloučeniny, mykotoxiny a bakterie.

3 Literární rešerše

3.1 Obecný princip bezpůdních metod

Bezpůdní metody nevznikly v jednu určitou chvíli, a zároveň jejich vývoj a výzkum stále postupuje. Byl to proces, který sahá do daleké historie, kdy bychom je ani nemohli nazývat jinými systémy. V té době totiž vznikaly ze zcela jiných příčin než dnes, kdy bezpůdní systémy nejprve byly nástrojem pro zkoumání rostlin a až v posledních dekadách se směřuje k produkci plodin bez půdy pro naši konzumaci.

Jak již bylo řečeno, z počátku byla celá produkce v zemi a půda byla pouze modifikována pro lepší zavodnění (Raviv and Lieth 2019). Také se začalo pěstovat ve sklenících, které umožňovaly modifikaci určitých parametrů pro potřeby pěstitele a určitých rostlin, které by v určitých podmínkách (zejména meteorologických) mimo skleník nepřežily. Poté přišly na řadu systémy již kompletně bez půdy. Hlavním důvodem pro odklon od použití půdy byla, mimo jiné, proliferace půdních patogenů v intenzivně pěstebních sklenících (Raviv and Lieth 2019).

Bezpůdní systémy by se daly označit pouze jako hydroponie. Tento systém lze buďto dále dělit na různé další systémy jako aeroponie, se substrátem, bez substrátu aj., nebo systémy, kterých je hydroponie součástí, jako např. aquaponie. Aquaponie je metoda, při které se využívá propojení akvakultury a hydroponie. Z počátku byly hydroponické systémy určeny zejména k vědeckému výzkumu specifických aspektů výživy rostlin a funkcí kořenů (Raviv and Lieth 2019). To se poté změnilo a systémy se začaly používat i pro čistě zemědělské účely. Dnes různé typy bezpůdních systémů existují pro pěstování zeleniny a okrasných rostlin ve sklenících i jinde (Raviv and Lieth 2019). Vývoji pomáhá i hledání alternativ k tradičnímu zemědělství z hlediska využití zdrojů. Světové zemědělství se dramaticky změnilo v průběhu poslední pár dekad a tato změna pokračuje díky tomu, že hybné síly těchto změn stále pokračují (Raviv and Lieth 2019). Dále také zvýšení světové populace a zlepšení životních standardů v mnoha státech tvoří silnou poptávku po vysoce kvalitních potravinách a okrasných rostlinách zejména mimo jejich sezónu (Raviv and Lieth 2019)

Obecná výhoda těchto systémů je kontrola nad určitými zdroji. V bezpůdních systémech je možné mít lepší kontrolu nad určitými zásadními faktory, které vedou k výraznému zlepšení pěstování rostlin (Raviv and Lieth 2019). Půda byla nahrazena různými substráty jako skelná vata, polyuretan, perlit, tun a dalšími. Tyto substráty byly vybrány proto, že jsou díky jejich výrobním procesům prakticky zbaveny škůdců a nemocí. Také mezi pěstováním jednotlivých plodin mohou být dezinfikovány a zbaveny jakýchkoli mikroorganismů (Raviv and Lieth 2019). Skleníková

produkce zeleniny v uzavřených hydroponických systémech je zdrojem efektivní techniky pro produkci vysoce kvalitních plodin s vysokým výnosem na jednotku plochy (Yannick et al. 2017). Ve všech rozvojových zemích se přikládá více pozornosti na snižování znečištění prostředí a v zemích kde existuje tento typ produkce, se rozvíjejí regulace pro posílení recirkulace, aby se minimalizovalo nebo eliminovalo unikání živin ze skleníkových sádek (Raviv and Lieth 2019). Zatímco tento typ systému pěstování umožňuje úspory z hlediska využití vody a živin, recirkulace vody zvyšuje riziko rozptýlení exudátů z kořenů (Yannick et al. 2017).

3.2 HYDROPONIE

3.2.1 PRINCIP

Principem hydroponie je koloběh vody, do které jsou rozpouštěny potřebné živiny pro určitou rostlinu. Voda se pomocí čerpadel a soustavy trubek dostává ke kořenům rostliny a dodává jí tak potřebné živiny. V zásobárně je voda probublávána a okysličována, např. pomocí vzduchového kamene. Je to tedy metoda založená na principech živných roztoků a přívodu vody (Kozai et al. 2019). Obecně se hydroponické systémy dají rozdělit na otevřené a uzavřené. V otevřených systémech, které nezahrnují žádná opatření pro znovuvyužití, roztok s živinami protéká systémem pouze jednou a následně je zlikvidován (Kwon et al. 2021). Uzavřené systémy naopak využívají recirkulaci roztoku s živinami, který se vrací do oběhu popř. s přidavkem dalším živin.

V tuto chvíli je hydroponie již další zemědělská metoda, která umožňuje růst rostlin bez užití půdy a se směsí vody a živinových solí, který obvykle nazýváme roztok s živinami (Yannick et al. 2017).

Hydroponický termín, míněno vodní systém bez využití substrátu, je momentálně využíván v širším rozměru. Mnoho názvů označuje hydroponii i jako systém, kde je použit typ substrátu, který má za účel ukotvit nebo stabilizovat rostlinu a poskytnout inertní matrix pro udržení vody (Raviv and Lieth 2019). Proto jsou k hydroponickým systémům, které výlučně využívají pouze roztok živin a vzduch (e.g. nutrient film technique (NFT), deep-flow technique (DFT), aeroponie) řazeny i koncepty založené na substrátu, přičemž substrát neobsahuje žádné živiny ani ionty k absorpci či výměně. O těchto produkčních systémech s inertními substráty jako skelná vata nebo štěrk se uvažuje také jako o hydroponických (Raviv and Lieth 2019).

SUBSTRÁTY

Substráty jsou důležitou složkou mnoha druhů hydroponických systémů. Hydroponické systémy existují i bez použití substrátů, ale jsou hojně využívány při potřebě produkt v inertním médiu zakotvit. Fyzikální, chemické a biologické vlastnosti substrátu musí korelovat s podávanou

vodou, hnojivem, klimatickými podmínkami a s potřebami rostliny (Gruda 2009). Zatímco pěnové materiály jsou použity ve většině případů, někdy, vzhledem k jiným metodám (jiná odrůda, rozvržení), jsou použita média jako skelná vata, perlit, mech, vermikulit, a to kvůli lepší podpoře kořenového systému (Lu and Shimamura 2018). Většinou se bezpůdní systémy osvědčily pro pěstování květin, kde se substrátová kultura stala pro květináře normální technikou (Gruda 2009).

Dalším důležitým faktorem u výběru substrátu je i mikrobiální aktivita, která může mít pozitivní i negativní vliv na rostliny v substrátu. Jeden z pozitivních vlivů je zdroj dusíků přímo ze substrátu, právě díky činnosti mikroorganismů. Aby si tyto mikroorganismy mohly vytvořit vlastní proteinové složky v těle, potřebují minerální dusík, který získávají z dostupného obsahu dusíku v substrátu. Následně by dusík nebyl pro rostliny snadno dostupný. Tento efekt je jedním z nejdůležitějších faktorů vedoucích k potenciálním ztrátám kvality (Gruda 2009).

Negativním vlivem může být zároveň přítomnost chorobotvorných mikroorganismů, které se snadno v hydroponickém systému rozšíří. Například ve srovnání rašeliny s jejími náhražkami, jako je kůra, dřevěná vlákna, papír a sláma, musí být kontrolována aktivita mikroorganismů (Gruda 2009). Přehled používaných substrátů dle (Olympios et al. 1999).

Tab č.1 (Olympios et al. 1999)

Pouze roztok	Substrát s roztokem	
	Anorganický	Organický
cirkulující roztok	písek	piliny
statický roztok	štěrk	kůra
aeroponický	skleněná vlna	rouno
	perlit	rašelina
	vermikulit	dřevěné štěpky
	pemza	kokosové vlákno
	zeolit	
	vulkanický tuf	
	sepiolit	
	pěnové matrace	
	plastová pěna	
	hydrogel	

SVĚTLO

Dobrý systém přísunu světla je základem pro zajištění dostatečného světla a efektivní energie spotřebované v systému. Základní aspekty osvětlení, které jsou pro něj důležité, zahrnuje dobře navržený zdroj světla (vysoká míra přeměny světla, zdroj světla, dlouhá životnost, široký úhel paprsku a vodotěsnost aj.), vhodné světlené spektrum, intenzita světla, uniformita, období světlo/tma, směr světla, distribuce světla. V neposlední řadě metodika, která kombinuje zmíněné

faktory pro získání kýženého výsledku maximálního výnosu za nejnižší energetický vstup (Lu and Shimamura 2018).

Další zdroje týkající se využití světla v hydroponických systémech: (Wong et al. 2020), (Kozai et al. 2019), (Son et al. 2019).

V dnešní době začíná být nejvyužívanějším a nejefektivnějším zdrojem LED světlo, proto o něm bude pojednáno detailněji. Ukázalo se, že LED svícení využitě jako zdroj světla v hydroponických systémech, může mít pozitivní důsledky. Odpověď rostliny na různou vlnovou délku světla z LED svícení může mít významnou roli na zlepšení produktivity (Benke and Tomkins 2017). Intenzita LED záření může být kontrolována v průběhu sezóny růstu a vydávat určité spektrum světla, které je optimální pro fotosyntézu různých odrůd. Spektrum, které LED nabízí, jako např. vlnová délka modrého světla typické pro LED svícení, může měnit koncentrace výživově hodnotných primárních a sekundárních metabolitů (Benke and Tomkins 2017).

ROZTOK Z ŽIVINAMI

Živiny jsou jedny ze základních parametrů potřeb v jakýchkoli hydroponických systémech. Aby bylo hnojivo vpraveno do hydroponických systémů, musí být rozpustné ve vodě (Lu and Shimamura 2018). Je to jeden ze základních parametrů pro fungování hydroponických systému. Typ a koncentrace hnojiva mohou být v hydroponických systémech snadno kontrolovány (Lu and Shimamura 2018). Všechny esenciální prvky jsou v hydroponických systémech přítomny ve formě rozpuštěných solí (Yannick et al. 2017).

Přesná kontrola a složení roztoků je pro fungování esenciální. Existuje přes 20 prvků, které jsou nutné pro optimální růst rostliny. Nepřiměřené nebo nadměrné množství živin může způsobit slabý výnos plodiny (Lu and Shimamura 2018). Jsou prvky esenciální a dále pak neesenciální, ač i tak velmi důležité. Záleží také na typu rostliny. Existuje 17 esenciálních prvků: uhlík (C), vodík (H), kyslík (O), fosfor (P), draslík (K), dusík (N), vápník (Ca), hořčík (Mg), síra (S), železo (Fe), bor (B), mangan (Mn), měď (Cu), zinek (Zn), molybden (Mo), chlor (Cl), nikl (Ni). C, H, O, které jsou absorbovány ze vzduchu a vody prostřednictvím fotosyntézy. Ostatní makronutrienty a mikronutrienty jsou dodány pomocí předem formulovaných komerčních hydroponických živin (N. Lu, 2018). V aquaponii do systému vstupuje další prvek a tím jsou vodní živočichové, konkrétně ryby, které v podobě svých výkalů poskytují v roztoku, který proudí dál k rostlinám živiny. (Schmautz et al. 2021)

VODA

Voda je jako základní parametr pro pěstování rostlin obecně nezbytně důležitá. Důležité je i její složení a zdroj. Kontroluje se množství určitých iontů, mikroorganismů, salinita. Dále všechny faktory, které by mohly negativně ovlivnit složení roztoku, a následně růst rostliny. Dle výzkumů, které se zabývaly použitím vody, se nejčastější úpravy a následné použití týkají vody podzemní, mořské, dešťové či vodovodní. Další možností je nevhodnou vodu určitým způsobem pozměnit a odstranit tak vyšší míru solí. Jsou dva základní typy pro odstranění solí z nevhodných vod : využitím membrán efektem reverzní osmózy a využitím iontoměničových pryskyřic (Lu and Shimamura 2018).

Je důležité u roztoků kontrolovat i míru salinity, protože je to faktor, který může negativně ovlivňovat růst rostliny. Nicméně dle výzkumu (Atzori et al. 2019) by bylo možné mořskou slanou vodu využívat i v hydroponii za určitých podmínek a kontrol, a to i přes dále popsané negativní dopady, které vyšší salinita může mít. Podzemní vody v pobřežních oblastech a odlehlých ostrovech obvykle obsahují velké množství sodných iontů. A protože Na^+ mohou nepříznivě ovlivňovat růst rostliny, je nezbytné jejich odstranění z podzemních vod před tvorbou roztoku živin (Lu and Shimamura 2018).

Dalšími cestami, jakými lze využít vodu, aniž by negativně ovlivnila složení roztoků a příjem živin do rostliny, mohou být následující. V prostředí výskytu mohutných dešťů, je také možné využít dešťovou vodu, protože neobsahuje Na^+ ionty a je to nízkonákladová metoda, která může zabránit poškození rostliny solemi (Lu and Shimamura 2018). Další možností může být využití klimatizační odtokové vody pro přípravu roztoku. Skoro všechna odtoková voda z klimatizace je voda transpirována rostlinami, z čehož vyplývá, že je čistá, bez přítomností solí (Lu and Shimamura 2018).

STERILIZACE ROZTOKU

Sterilizace roztoku, a nejenom roztoku, ale často i substrátu, je jedním z mnoha běžných úkonů při zavádění bezpůdního systému a zajištění jeho fungování. Roztok i substrát se sterilizují z důvodu možného výskytu mikroorganismů, které by se pak díky velkému systému snadno rozšířily k ostatním rostlinám, a mohl by tak zaniknout celý systém.

Je mnoho různých metod pro sterilizování roztoku živin. Metody jako UV, ozon, teplotní sterilizace, stříbro/titan oxid metoda, filtrace pískem mohou být v tomto ohledu slibné (Lu and Shimamura 2018).

ELEKTRICKÁ VODIVOST

Elektrická vodivost je parametr, který úzce souvisí s následným obsahem živin v produktu. Zároveň je to parametr snadno měřitelný, a proto se v bezpůdních systémech kontroluje. Udává zejména množství rozpuštěných solí tj. množství určitých iontů. To může mít pozitivní účinky na kvalitu produktu, ale také na velikost, růst a celkovou vitalitu. Na toto téma se zaměřuje již několik výzkumů. Například dle (Moya et al. 2019) byl měřen účinek výživných roztoků se středně vysokým EC na parametry plodnosti, emise živin do prostředí, celkovou produktivitu plodin, distribuci velikosti plodů a dietní a organoleptické vlastnosti. Roztoky živin se středně vysokou elektrickou vodivostí snížily celkové i komerční výtěžky s průměrným snížením z 5 % na 19 % a ze 3 % na 22 %. (Moya et al. 2019). Dalšími důsledky měření či vyrovnávání elektrické vodivosti se práce dál zabývá v oblasti nutričních hodnot produktů a jak je lze zlepšit.

TEPLOTA

Teplota je další parametr, který je důležité kontrolovat a měnit na základě požadavků určité rostliny. Jedná se tedy o teplotu vzduchu, a zejména pak v oblasti kořenů.

Je důležité udržet kořenovou zónu při určité teplotě, teplota mezi 18 a 22 °C je obvykle vhodná pro většinu plodin, které jsou pěstovány těmito systémy (Lu and Shimamura 2018). Pokud se tento parametr nehlídá, může způsobit znestabilnění systému a zejména u bezpůdních systémů to může znamenat nenávratné poškození (Rouphael et al. 2004). Rostliny, u kterých je teplota roztoku s živinami moc vysoká nebo moc nízká, mohou být tímto limitovány pro jiné faktory jako je vzrůst (Lu and Shimamura 2018). Každé teplotní limity s sebou nesou určité problémy, proto je potřeba najít kompromis mezi faktory benefitujícími a limitujícími. Příklady těchto limitů mohou být tyto: vyšší teploty zvyšují kořenové dýchání, nedostatek Ca, poškození z přesazování, riziko nemoci a snížení přísunu vody. Nižší teploty zvyšují syntézu antocyaninu, ale snižují růst rostliny a přísun Mg a P (Lu and Shimamura 2018).

pH

pH je parametr měřící aciditu či alkalitu roztoku. Kompozice roztoku s živinami determinuje základní rozložení kyselin a zásad a tímto ovlivňuje i výsledné pH. Není možné měnit pH bez změny složení roztoku (Yannick et al. 2017). Další důležitou zmínkou je, že rostliny mohou přijmout určité ionty jen ve specifickém rozhraní pH (Yannick et al. 2017). Záleží na tom, v jakém pH jsou zrovna specifické ionty nejvíce rozpustné a některé ionty mohou mít opravdu úzkou škálu rozpustnosti. Jejich rozpustnost také záleží na tom, v jakých solích jsou do roztoku vloženy. Specifické rozložení

prvků v určitém pH determinuje biologickou dostupnost přítomných iontů nebo způsob jakým kořeny reagují s roztokem a přijímají přítomné živiny (Yannick et al. 2017).

Růst rostlin může být ovlivněn, když je pH méně než 4.0 nebo výše než 7.0. Vyšší hodnoty pH mohou ovlivnit přístupnost železa, manganu, zinku a mědi, zatímco nízké pH může ovlivnit přístupnost draslíku, síry, vápníku a hořčíku (Lu and Shimamura 2018). Optimální pH rozpětí se tedy pohybuje mezi 5.0 až 7.5 (Yannick et al. 2017).

TYPY ROSTLIN

Obecně ne každá rostlina je vhodná pro účely hydroponického pěstování. Záleží na stavbě, kořenovém systému, ale i délce růstu. Z tohoto důvodu jsou například v rostlinných továrnách preferovány odrůdy rostlin, které mají krátký růstový cyklus, přidané hodnoty a nižší odpad. Jsou to listové saláty, bylinky, mikrozelenina a rostliny pro lékařské účely (Lu and Shimamura 2018). Již z principu jsou z hydroponického pěstování vyřazeny typy zelenin, u kterých je zásadní podzemní část rostliny, neboli u kterých je výtěžná hlavně kořenová část. Existují ale studie, které se zabývají např. pěstováním brambor v substrátu, simulující nehostinné prostředí pouště i jiné planety a těmito výzkumy se hojně zabývá International Potato Center. Obecně ale odrůdy s vyšším výnosem a nižšími ztrátami mají větší předpoklad být součástí takovýchto systémů (Ritter et al. 2001).

U nadzemních listových rostlin jako jsou saláty, bylinky, ale i bobule jako jahody a maliny, je velkou výhodou jejich relativně krátká vegetační doba. Proto se nejčastěji používají pro další výzkum hydroponických systémů, ale již i komerčně ve vertikálních farmách (Benke and Tomkins 2017).

DALŠÍ PARAMETRY

V hydroponických systémech je další nespočet parametrů, které se kontrolují a zajišťují optimální podmínky pro růst rostlin a udržení jejich kvality. Zejména proto, že jsou tyto systémy poměrně nestabilní oproti klasickému půdnímu zemědělství, u kterého základní stabilitu zajišťuje právě půda, je třeba zajistit důkladnou kontrolu nad všemi faktory. I menší vychýlení jednoho faktoru může způsobit kolaps celého systému. Takovými parametry je například proudění vzduchu a udržování teploty. Dále pak i klimatizace, jako součástí rostlinných hydroponických továren, je velmi důležitá. S tou souvisí kontrola teploty vzduchu rostlinného uzavřeného systému, která závisí skoro pouze na klimatizaci prostoru (Barbosa et al. 2015). S tím souvisí i optimalizace tepla, vycházejícího z osvětlovací soustavy, a proto je pak klimatizace, pro udržení stále teploty, stěžejní (Lu and Shimamura 2018). Dalším parametrem může být přítomnost aerace roztoku s živinami

(Yannick et al. 2017; Lu and Shimamura 2018; Kwon et al. 2021), kontrola elektrické vodivosti (Krauss et al. 2006; Asaduzzaman et al. 2012; Yannick et al. 2017; Lu and Shimamura 2018; Majid et al. 2021a), kontrola vlhkosti (RECAMALES et al. 2007; Gruda 2009), kontrola obsahu O₂ a CO₂ (Yannick et al. 2017; Shao et al. 2021).

3.2.2 ZPŮSOBY ZAVLAŽOVÁNÍ

Hydroponické systémy se dále dělí na dílčí způsoby provedení, zejména z hlediska systémů zavlažení, přívodu vody a roztoku s nutrienty. Existuje několik základních rozdílů. Voda a roztok je přiváděn v tenké vrstvě těsně pod kořeny, nebo jsou kořeny ponořeny v nádobce s vodou a roztokem. Dále se tyto dvě metody mohou i kombinovat. Dalším způsobem je přítomnost substrátu, který vodu zadržuje a upevňuje kořeny i s rostlinou, nebo je voda přiváděna ke kořenům pomocí látkové plachty či lan. Dalším speciálním typem je pak aeroponie, kdy je roztok na rostliny rozprašován. Podrobnější výčet jednotlivých metod je níže.

3.2.2.1 Nutrient Technique systém (NFT)

Princip tohoto systému spočívá v proudění tenkého filmu (2-3 mm) roztoku živin kolem kořenového systému tak, aby kořeny byly zavlažovány, ale ne úplně ponořeny. Horní část kořenů je tak vystavena vzduchu, aby rostlina měla přístup ke kyslíku (Kozai et al. 2019). Dalším specifickým NFT systému je, že potřebuje pumpu pro cirkulaci roztoku s živinami z rezervoáru na *kultivační postele* nebo kanály s dostatečným průtokem (Lu and Shimamura 2018). Zajímavostí tohoto systému je, že podle studie (Majid et al. 2021b), porovnávající půdní a bezpůdní systém pěstování salátu, bylo při použití NFT systému ušetřeno až o 64 % více vody, oproti dvou jiným technikám (DFT, půda). Toto zjištění by se mohlo z ekologického hlediska pokládat za důležitý faktor při rozhodování, který systém lze použít.

3.2.2.2 Deep Flow Technique systém (DFT)

V systému DFT jsou oproti tenké vrstvě filmu kořeny ponořeny celé v průtoku roztoku s živinami (Lu and Shimamura 2018). Základním parametrem DFT systému je kultivační postel, ve které jsou rostliny uchyceny. Dále je také potřebná nádrž na výživový roztok, vodní pumpu, filtr, trubky a někdy také vzduchovou pumpu, pro lepší okysličení kořenů ponořených ve vodě (Lu and Shimamura 2018). Tento systém také vyžaduje nepřetržitý koloběh roztoku s živinami, do kterého je přiváděn kyslík v průběhu celého rostoucího procesu pro zajištění dostatečně vysoké hladiny

kyslíku pro růst kořenů. Některé konstrukce mají z tohoto důvodu přídatnou vzduchovou pumpu pro přísun kyslíku (Lu and Shimamura 2018).

Podle (Majid et al. 2021a) se tento systém, v porovnání s NFT a půdním systémem, prokázal jako účinný a konkurenceschopný vůči klasickému půdnímu zemědělství, zejména z hlediska těchto parametrů: snadné zacházení, jednoduchost, vyšší výtěžnost, ekonomicky výhodné, a nutričně bohatý produkt.

3.2.2.3 Modified hybrid systém

Modifikovaný hybridní systém, jak název napovídá, je kombinací NFT a DFT systému. Tento systém sice nevyužívá trubky, které dělají instalaci rychlejší a příhodnější, ale zahrnuje nosníky o dvou různých výškách, které jsou integrovány do kultivační postele a několik stavidel pro upravení vodní hladiny. Umožňuje to jednoduché přepínání mezi systémem DFT a NFT vzhledem k momentálním cílům a potřebám kultivace. Systém je navržený bez potřeby sklonu a dá se jednoduše postavit v několika patrech pro ušetření místa (Lu and Shimamura 2018).

3.2.2.4 Drip irrigation systém

Tento systém již využívá inertní substráty jako základ pro rostliny, které jsou v něm uchyceny. Funguje tedy v přítomnosti růstového roztoku a substrátu a je ideální např. pro květináčové rostliny, květiny a jahody (Lu and Shimamura 2018).

3.2.2.5 Wicking systém

Základní koncept tohoto systému potřebuje nádrž s roztokem s živinami, růstové médium a knotové lano nebo látkovou plachtu. Nepotřebuje elektřinu, protože voda je absorbována knotovými lany nebo látkovými plachtami na spodu a tím je také rozváděna do systému. Ve chvíli, kdy je hladina roztoku pod minimální hodnotou je roztok přidán do rezervní nádrže. Z nádrže je roztok absorbován netkanou látkou, která jej absorbuje až ve chvíli, kdy je předchozí voda spotřebována rostlinami. Tento systém je vhodný pro mladé pokojové rostliny, sazenice a bylinky. (Lu and Shimamura 2018).

3.2.2.6 Aeroponie

Aeroponie (z lat. *aeros*, *vzduch*), jak již z názvu vyplývá, spočívá na podobném principu jako hydroponie. Rozdíl je v distribuci živin z vodního roztoku. Rozprašovací, neboli aeroponický, systém atomizuje roztok s živinami a následně rozprašuje na kořeny rostlin, které jsou přístupné vzduchu. V zájmu prevence vyschnutí rostliny je nezbytný kontinuální proces rozprašování. Tato

metoda udržuje kořeny rostlin ovlhčené, a zatímco je dobře provzdušněna, umožňuje vysokou respirační aktivitu kořenů (Lu and Shimamura 2018).

Výhodou tohoto systému je jeho celková váha. Kultivační postel je lehčí, protože množství roztoku s živinami je násobně nižší. Na druhou stranu, jsou tu i určitá rizika a nevýhody tohoto systému. Pokud by se pumpa z určitého důvodu zastavila, (např. výpadek elektřiny nebo porucha pumpy), kořeny by byly vystaveny stresu z vyschnutí v poměrně krátkém čase. Další nevýhodou je pak ucpaní postřikovací trysky, ke kterému může dojít v důsledku zbytků rostlin, krystalizace hnojiv a odumřelých mikroorganismu (Lu and Shimamura 2018).

3.3 AKVAPONIE

Akvaponie je ekologický systém pro produkci potravin s využitím zároveň akvakultury a hydroponie pro kultivaci ryb a odrůd rostlin bez půdy (Goddek et al. 2019). Je dalším systémem pěstování rostlin bez použití půdy. Tento systém je jedinečný tím, že zahrnuje do koloběhu i další živé organismy. V tomto případě ryby a mikrobiologickou část. Jedná se o způsob symbiotického kruhu mezi rybou a rostlinou (Goddek et al. 2019). Simuluje koloběh živin mezi živými systémy tak, jako v přírodě. Může to také simulovat symbiózu mezi organismy obecně a poukazovat na to, jak zdánlivě vzdálené organismy jsou pro sebe důležité.

Jak již bylo řečeno, součástí akvaponie je akvakultura, známá i jako “*aqua farming*” (*pozn. volný překlad vodní hospodářství/zemědělství*). Je to odvětví pěstování vodních organismů a v tuto chvíli je to nejrychleji rostoucí sektor ve světové potravinové ekonomice, s navýšením ročně až o 10 % (Goddek et al. 2019).

3.3.1 Princip akvaponie

Fungování akvaponie je komplexní, protože, jak již bylo řečeno, kombinuje dva systémy symbioticky propojené. Z tohoto důvodu je i její princip a celý systém o něco komplexnější než samotná hydroponie. V aquaponickém systému jsou odpadní látky ryb převedeny na rostlinnou hydroponickou část. Rostlina, která slouží jako biofiltr, si z nich vezme dusíkaté látky, které jsou pro růst rostliny esenciální. Zajištění vody po celou dobu je pak dosaženo kontinuální recirkulací mezi rybami a rostlinami (Goddek et al. 2019).

Další důležitou součástí, která provází celý aquaponický systém, je cyklus dusíku. Respektive princip koloběhu dusíku a jeho přeměny v systému. Pokud je cyklus dusíku fungující, rostliny přijmou dusík z dusičnanů a poskytnou čistou vodu dál do systému (pokud je systém

recirkulační) (Goddek et al. 2019). A s tím souvisí i úloha mikroorganismů, které jsou v systému esenciální pro přeměnu dusíku na formu přijatelnou pro rostliny.

Dále se pak aquaponie dá dělit na spojené a nespojené systémy. Principiálně se jedná o blízkost jednotlivých systémů – hydroponie a akvakultury. Pokud fungují na sebe přímo napojené a všechny procesy probíhají v prostoru mezi nimi, nebo zcela odděleně, nezávisle na sobě.

Dalším důležitým faktorem v aquaponii je využití a znovupoužití energie. Aquaponické systémy jsou energeticky náročné. Závisejí na přijaté solární radiaci, termálních zdrojích a desalinaci. To nemusí být ekonomicky výhodné, ale potenciálně mohou tyto faktory být všechny integrovány do aquaponického systému (Goddek et al. 2019).

Cyklus dusíku a role mikroorganismů

Oproti hydroponii, aquaponie mnohem více závisí na činnosti mikroorganismů, ostatně podobně jako je to tomu v přírodě. Mikroorganismy tedy hrají důležitou roli při přeměně dusíkatých sloučenin vyloučených rybami ve formách, které může přijmout rostlina. Díky této roli se do systémů přidávají biofiltry, přes které protéká roztok a kde mikroorganismy přeměňují odpadní látky ryb. Proto mikrobiální komunity hrají důležitou roli v denitrifikačních a mineralizačních procesech, a stejně tak hrají klíčovou roli v celkové produktivitě systému, zahrnující prospěch ryb i zdraví rostlin (Yang and Kim 2020).

Mikroby v aquaponických systémech, zahrnující bakterie, archea, houby, viry i protista, žijí ve společenstvích, které kolísají ve složení na základě toku živin a změn v podmínkách prostředí, jako je pH, světlo a kyslík (Goddek et al. 2019).

Nedávné studie jsou směřovány k bližšímu výzkumu mikrobiot, které by v aquaponických systémech mohly sehrát další roli, vedle nezbytné přeměny dusíku z odpadních látek ryb. Příkladem může být fosfor, jehož biologická dostupnost by se dala ovlivnit. Například když je přítomna v systému probiotická bakterie *Bacillus*, je vidět zlepšení biologické dostupnosti fosforu pro rostliny. Nicméně přidávání probiotik do rybí potravy nebo do přítoku vody k hydroponickým systémům, vyžaduje další experimentální výzkumy, protože mikrobiální společenstva mohou mít více modulačních a negativních účinků na rostlinnou fyziologii (Goddek et al. 2019).

Nejdůležitější je ale koloběh dusíku, který je v rámci aquaponie hlavní kolující živinou. Z potravy ryb se dostává přes jejich odpadní látky k rostlinám v podobě nitrátů, kde slouží jako hlavní živina pro rostliny.

Dle Shafahi and Woolston (2014) existují tři hlavní fáze cyklu dusíku v aquaponii:

1) počáteční fáze

Cyklus začíná, když jsou ryby umístěny do akvária/nádrže. Jejich výkaly, moč a jiné nestrávené látky jsou rychle rozděleny na ionizovanou či neionizovanou formu amoniaku. Ionizovaná forma amoniaku v podobě amonného iontu NH_4^+ je přítomna, když je pH pod hodnotou 7 a v této formě není pro ryby toxická. Neionizovaná forma amoniaku NH_3 je přítomna při pH vyšším než 7 a je velmi toxická pro ryby.

2) druhá fáze

V rámci této fáze, bakterie *Nitrosomas* oxidují amoniak a přeměňují ho na dusitan, který je také toxický pro ryby. Dusitany o koncentraci 1mg/l mohou být pro některé ryby letální. Dusitany většinou začínají stoupat ke konci prvního týdne po počátku procesu.

3) třetí fáze

Poslední fáze dusíkatého cyklu v aquaponii je konverze dusitanů na dusičnany prostřednictvím bakterie *Nitrobacter*. A dusičnany již nejsou pro ryby tolik toxické, ačkoli by se i tak jejich hladina měla sledovat.

pH

V hydroponiii i v akvaponii je velmi důležité rozpětí pH. Jak již bylo řečeno, zejména v tradičních spojených systémech, je potřeba dělat kompromisy v pH tak, aby bylo prostředí ideální pro ryby a stejně tak optimální pro příjem určitých živin rostlinami. Průzkumy navrhují, že pH pro nejvyšší dostupnost živin může být kompromisováno na hodnotu méně než 7,0 a ne méně než 5,5 (Goddek et al. 2019). V zájmu udržení tohoto dynamického systému musí být prostředí pro růst ryb i rostlin v rovnováze. Pro zajištění musí být teplota, pH a chemické komponenty přísně monitorovány (Rakocy et al. 2003).

3.3.2 Jednosmyčková a dvojsmyčková akvaponie

Dalšími z oblastí vývoje jsou jednosmyčkové a dvojsmyčkové aquaponické systémy (ang. *coupled/ decoupled*). Tradiční spojené systémy kompromitují oba systémy – akvakulturu i hydroponii a mezi nimi recirkuluje voda. V těchto systémech je třeba dělat kompromisy z hlediska podmínek, tímto je třeba hodnota pH, teplota, koncentrace živin (Goddek et al. 2019).

Naopak jednosmyčkové (*decoupled*) systémy naopak mohou snížit potřebu kompromisů díky rozdělení komponentů a tím mohou umožnit jednotlivým subsystémům optimalizaci podmínek. Také využitím odkalovačů je možné maximalizovat efektivitu prostřednictvím znovupoužití pevných odpadů (Goddek et al. 2019).

Dvojsmyčkové (*decoupled*) aquaponické systémy, u kterých se voda nevrací zpátky k rybám, mohou zlepšit tradiční konstrukci tím, že se přidají mineralizační komponenty a bioreaktory kalu. Ty obsahují mikroby, které pak přemění organický materiál v biologicky dostupné formy pro rostliny klíčových prvků, jako je fosfor, hořčík, železo, mangan a síra, které jsou typickým nedostatkem pro rostliny z vody od ryb (Goddek et al. 2019).

3.3.3 Výhody a nevýhody aquaponie

Aquaponie, přestože není úplně typickou metodou pěstování plodin, může významně obohatit směr zemědělství. Ale jako každá jiná metoda má své výhody i nevýhody a záleží pak zejména na cíli, s kterým aquaponii využíváme. Aquaponie poskytuje udržitelný systém potravinové produkce. To zejména díky sdíleným nákladům na komponenty, využívání odpadních látek jednoho systému v druhém pro snížení potřeby živinových suplementů, a také díky redukci celkové spotřeby vody (Goddek et al. 2019).

Velkou výhodou aquaponie je šetrné zacházení s vodou. Aquaponie spotřebovává pouze 10 % množství vody oproti klasickému zemědělství (Goddek et al. 2019). Může být označena za nejšetrnější metodu z hlediska využití vody v produkci potravin (Chen et al. 2020). Negativní aspekt související s hydroponií je poměrně vysoká poptávka po drahých živinách, nutných pro rostliny. Pravidelné proplachování systému a vznik odpadu může také vést k problémům s jejich následným nakládáním (Shafahi and Woolston 2014).

Nevýhodou pak může být určitý kompromis, který musíme mezi jednotlivými komponenty dělat. S tím souvisí i jakási nedokonalost ve složení živin v roztoku. Je to jeden z hlavních problémů aquaponie v konvekčních systémech, že živiny v odpadní vodě, produkované rybami, jsou jiné než optimální složení živin pro rostliny (Goddek et al. 2019).

Co se týče využití vody a typu vody, kterou lze v aquaponii využít, může být velkou výhodou i možnost využívání vody mořské, zahrnující také mořské rostliny a živočichy, Ačkoli slovo *akvaponie* přirozeně naznačuje systém se sladkovodní vodou, existuje probíhající výzkum v Izraeli a Austrálii, kde je využíváno slané mořské vody pro produkci mořských řas, chaluh v symbióze s mořskými rybami a živočichy jako jsou mořští koryši (krevety), měkkýši (mušle) a mořští ježci (Shafahi and Woolston 2014).

Dalšími tématy, která jsou z hlediska dalšího výzkumu nutná zkoumat, aby bylo dosaženo plného potenciálu těchto systémů, je koloběh dusíku, aerobní a anaerobní remineralizace, efektivní nakládání s vodou a živinami, krmivo ryb, rostlinné patogeny a kontrolní strategie (Goddek et al. 2019).

3.4 Potenciál bezpůdních systémů

3.4.1 Negativa a pozitiva

Z hlediska udržitelnosti i jiných globálních aspektů mají tyto systémy velký potenciál. Není náhoda, že zejména objevující se zásadní problémy v klasickém zemědělství a v zahradnických metodách jako je např. únik živin, nadměrné využití pesticidů, limitovaná dostupnost půdy, vedly k rozvoji hydroponie či aquaponie. (Kozai et al. 2019). Je zde možno recyklovat kolující vodu s obsahem živin, nejsou potřeba velké plochy půdy. To jsou dva nejdůležitější aspekty z hlediska ekologie, které vyplývají z principu pěstování rostlin bez půdy. Dalším důležitým faktorem je snížení nutnosti používání umělých hnojiv, která mohou ve větším množství negativně ovlivňovat životní prostředí. To je u bezpůdních systémů řešitelné, ale samozřejmě ne zcela vyřešené, zejména v systémech otevřených, kde odpadní vodu musíme následně zlikvidovat. Další významné výhody bezpůdních systémů zahrnují vyšší produkci na jednotku plochy, šetření energie, lepší kontrolu nad růstem a nezávislost vůči kvalitě půdy, redukci chorob, kontrolu hodnoty pH, udržování stálé teploty u kořenů (Olympios et al. 1999; Gruda 2009; Kozai et al. 2019). Zde je důležité zmínit, že půda s přirozenou vyrovnávací kapacitou “odpouští” chyby pěstitele s ohledem na přísun živin, ale malá chyba v kompozici živin, pH nebo EV, bude škodlivá rostlinám v bezpůdních systémech. A právě selhání zdroje energie či vody může znamenat celkovou ztrátu v relativně krátké době (Olympios et al. 1999).

Další faktor je, že dostupnost živin k rostlinným kořenům může být lépe manipulována a kontrolována v bezpůdních systémech oproti orným půdám (Raviv and Lieth 2019). Půdní systémy mají relativně vysokou přístupnost vody ihned po zavlažení. Fyzikální a hydraulické charakteristiky většiny bezpůdních substrátů jsou lepší než půdní. Makropóry jsou naplněny vodou i vzduchem a umožňují relativně pomalé zavlažení, které je doprovázeno přístupem vzduchu (Raviv and Lieth 2019). Co se týče uniformní velikosti, váhy a konzistence rajčat, mají bezpůdní systémy lepší výsledky než ty pěstované v půdě (Gruda 2009).

Jedna z hlavních důležitých výhod bezpůdních systémů si zaslouží zmínku v tomto kontextu a souvisí právě s globálními aspekty. Ve většině rozvojových zemí je voda vzácná a většinou nízké

kvality. Podle dat Organizace pro výživu a zemědělství (*Food and agricultural organization of United Nations, dále jen FAO*) je možné vyvozovat, že velká část populace zemí s vyšším indexem vyprahlosti půdy trpí hladem zejména kvůli vzácnosti vodních zdrojů. Ve chvíli, kdy je účinnost využívání vody v bezpůdních systémech vyšší než v systémech půdních, vyplývá z toho, že více potravin může být vyprodukováno za využití méně vody. (Raviv and Lieth 2019). Také pěstování rostlin v bezpůdních systémech může lépe pracovat s vyšší salinitou vody oproti klasickým půdním systémům (Raviv and Lieth 2019).

Bezpůdní systémy mají samozřejmě i řadu nevýhod. Jedním z hlavních negativních aspektů je určitá nestabilita a nutnost neustálé kontroly nad celým systémem. S tím pak souvisí i vysoká energetická náročnost a poměrně vysoká zřizovací cena a potřeba základního kapitálu pro výstavbu celého systému. Tedy velký počáteční investiční kapitál pro konstrukci a údržbu. Riziko chorob, infekcí zejména v cirkulačních systémech a v neposlední řadě často nutnost zajištění větší pracovní síly s vyššími nároky na technické schopnosti a vědomosti oproti klasickému půdnímu zemědělství (Olympios et al. 2019).

S neustálou nutnou kontrolou se pojí i riziko vypadnutí systému a tím například způsobený nedostatek přístupu vody, který způsobuje, že rozvinuté živinové dysbalance mohou způsobit zasychání listů (tzv. *blossom end-rot*). V bezpůdních systémech může pak nedostatečné zavlažení během noci v létě způsobit ztráty na kvalitě a potenciální úhyn rostliny (Gruda 2009). Hydroponický systém je na tyto náhlé výpadky náchylnější než produkce v půdě. Takový výpadek pak může znamenat uhynutí celého systému. Rostliny pěstované v půdě mají větší šanci na zotavení bez větších ztrát na kvalitě (Gruda 2009).

Další značnou nevýhodou kultivace bez půdy vs. kultivace na půdě je skutečnost, že v druhém případě je objem kořene neomezený, zatímco v kontejnerové kultuře je objem kořene omezen. Omezený objem kořene má několik důležitých efektů, jeden z těch hlavních je ale přístup živin (Raviv and Lieth 2019).

Jedněmi z dalších negativ při pěstování v bezpůdním prostředí, zejména v uzavřeném systému, je problém vyskytujících se chorob. Druhým jsou změny ve složení roztoku v recirkulovaném systému roztoku s živinami (Yannick et al. 2017). Dalším problémem může být i potřeba tvorby přesnějšího a požadovaného poměru živin bez interference organických látek nebo kationtové výměnné kapacity v půdě (Gruda 2009).

Co se týče nevýhod otevřených systémů, je zde velkou otázkou nakládání s odpady. Právě znečištění vzniklé z vypuštěných použitých hydroponických roztoků může způsobit určité problémy v okolí. Hydroponická odpadní voda vypuštěna do okolí činí potenciální riziko při prosakování do

půdy. Tím může kontaminovat spodní vody a negativně ovlivnit okolní ekosystémy a životní prostředí (Majid et al. 2021a).

V neposlední řadě, při pohledu na negativní argumenty vůči bezpůdním systémům, je také relativně malý počet druhů rostlin, které lze těmito systémy pěstovat. Je zatím známo jen několik rostlin, které lze takto pěstovat, a další jsou v procesu zkoumání. Nejznámějšími příklady těchto rostlin, které lze pěstovat bez půdy, jsou např. rajčata, různé druhy salátů, jahody, různé druhy bylinek a další rostliny využívané ve farmacii.

ORGANICKÉ PĚSTOVÁNÍ

Dle Evropské komise nelze produkty bezpůdního typu považovat za produkty ekologického zemědělství a označit je jako produkty s certifikací BIO. Je to z toho důvodu, že jedna z podmínek pro získání certifikace, je právě přítomnost půdy. Z teoretického hlediska by jinak produkty splňovaly spoustu dalších podmínek, například nepoužívání pesticidů, herbicidů, fungicidů apod. Otázkou je pak složení a původ roztoku s živinami, to může být považováno za další “neorganickou” složku. V případě aquaponie, kde jsou živiny dodávány odpadními látkami ryb, by se dalo více uvažovat o jejich organické a přírodní charakteristice. Další možností je použití substrátu. Pokud by se v produkci použil organický substrát, který by splňoval podmínky takové jako půda, dalo by se pak uvažovat o ekologickém bezpůdním zemědělství (Raviv and Lieth 2019). Oproti tomu v USA mohou být bezpůdní systémy považovány za ekologické a mohou získat certifikace organického zemědělství (např. *Rogers*)

3.4.2 Nutriční analýza

Jedním z hlavních témat této práce je právě nutriční analýza produktů vypěstovaných pomocí bezpůdních systémů. Na začátku je potřeba zmínit, že využívání bezpůdních systémů automaticky neznamená produkci více kvalitních plodin (Gruda 2009). Může to být právě i naopak, což záleží na mnoho faktorech. Zároveň četné studie potvrzují, že bezpůdní systémy umožňují pěstitelům pěstovat zeleninu bez ztráty kvality (Gruda 2009).

Výzkumy na toto téma se věnují zejména obsahu nutričně důležitých látek, jako jsou např. vitamíny a polyfenolické sloučeniny, velikosti a výnosu produktů, obsahu sušiny aj. Nutno dodat, že tyto výzkumy se snaží docílit jakéhosi ideálního poměru zvolených parametrů tak, aby byl produkt co nejhodnotnější, bez úbytku jiných proporcí. V tomto ohledu má pozitivní následek velká míra kontroly a možnost ovlivnění mnoha parametrů. Dalším z aspektů je poptávka z řad konzumentů. I přesto, že se zemědělství tradičně zaměřovalo zejména na výnos, světový zájem

konzumentů o vyšší kvalitu produktů zemědělských produktů v posledních letech vzrostl a bude hnací silou v budoucnosti (Gruda 2009). Vysoké výtěžky v zemědělství nemusí vždy automaticky znamenat zlepšení kvality produktu, proto musí být vytvořen kompromis pro rovnováhu obou stran – kvality i kvantity (Gruda 2009), což bezpůdní systémy díky všeobecné kontrole umožňují.

Parametry, které jsou z hlediska nutričního obsahu pozorovány, bývají shodné s více studii. V této práci je uvedeno několik výživových parametrů – látek, které jsou z hlediska lidské výživy důležité, a k nim přiřazeny studie, které o nich v souvislosti s hydroponií pojednávají.

Jako příklad je na úvod uvedena studie Treftz and Omaye (2015), kde byl sledován obsah nutričně významných látek jahod a malin v půdě a bez půdy. Byly sledovány zejména následující parametry: hmotnost sušiny, obsah kys. askorbové, tokoferol, celkové polyfenolické látky, glukóza, fruktóza a rozpustné pevné látky.

Obecně se dá říci, že kvalita produktů se dá v hydroponických podmínkách dobře kontrolovat a zlepšovat oproti půdě, kde se několik parametrů nedá tak snadno ovlivnit. Jen několik studií indikovalo, že lepší kvality vyprodukovaných rajčat, bylo dosaženo z rostlin pěstované v půdě (Gruda 2009).

CUKRY A KYSELINY

Prvním zmíněným parametrem je obsah cukrů, míněno redukované cukry jako je fruktóza a glukóza a pak jejich poměr cukr/kyselina. Poměr cukr/kyselina odráží zejména následné sensorické vlastnosti produktu. Studie se často liší, ale shodují se v tomto např. u rajčat, kde byl poměr cukr/kyselina významně vyšší v bezpůdní produkci rajčat oproti půdní (Gruda 2009). Znamenalo to více kyselin a méně redukovaných cukrů. Pak dle studie (Treftz and Omaye 2015), kde byly zkoumány jahody a maliny, byl obsah cukrů vyšší při pěstování v půdě. Dle zdrojů není jednoznačné, zda se v hydroponii obsah cukrů opravdu snižuje, či je to dáno odrůdou. Vliv na to také může mít delší “pobyt” v půdě, oproti růstu v hydroponických podmínkách a tím pádem kratší době vegetace.

VITAMÍN C A POLYFENOLICKÉ LÁTKY

Dalším parametrem je vitamín C a polyfenolické látky. Tyto dva parametry jsou spojovány z důvodu podobnosti výsledků ve studiích. Podobnost je ale i v jejich využití v organismu. Vitamín C, neboli kyselina askorbová, je významným antioxidantem a je to látka pro naše tělo velmi přínosná. Polyfenolické látky jsou již širší skupina, ale obecně by se dalo říci, že jsou to látky vyskytující se přirozeně v rostlinách a pro lidské tělo mohou mít benefiční antioxidační účinky. Jsou také jakousi přidanou nutriční hodnotou, kterou můžeme např. v zelenině nebo ovoci nalézt.

Co se týče zkoumání těchto látek v hydroponických systémech, bylo např. u obsahu vitamínu C zjištěno, že rajčata produkovaná v NFT systémech byla pevnější a bohatší na vitamín C než ta pěstovaná v půdě (Gruda 2009). Dále pak, že obsah vitamínu C, tokoferolu a celkových polyfenolických látek byl vyšší v bezpůdních podmínkách pro jahody, oproti vyšším hodnotám těchto látek u malin, pěstovaných v půdě (Treftz and Omaye 2015). Tato studie je příkladem rozdílů mezi odrůdami, může to být způsobeno tím, že jahody jsou vhodnějším produktem pro bezpůdní zemědělství a více z tohoto systému benefitují. Dále i zelený a červený salát vykazoval v bezpůdních podmínkách vyšší obsahy fytochemikálií, zahrnující vitamín C a fenoly (Selma et al. 2012). Co se týče salátu, rozdílů i mezi jednotlivými hydroponickými systémy ukazuje studie (Majid et al. 2021a), která sledovala rozdíly v pěstování salátu v různými hydroponickými systémy a jejich porovnání s půdním pěstováním. Dvěma sledovanými hydroponickými systémy byly – NTF a deep water culture systém. Oba hydroponické systémy vykazaly vyšší výtěžek a nutričně bohatší obsah v závislosti na kratším čase pěstování než v systému závislého na půdě.

I v této studii se zvyšující se elektrickou vodivostí v rajčatech zvyšoval i obsah vitamínu C, lycopenu a B-karotenu v čerstvém ovoci až o 35 %. Také koncentrace fenolických látek se postupně zvyšovala a antioxidační kapacita fenolů a karotenoidů se zvýšila (Gruda 2009). Studie Fanasca et al. (2006) potvrdila zvýšení koncentrace a antioxidační kapacitu fenolů a karotenoidů na základně čerstvé hmotnosti díky zvýšení elektrické vodivosti. Dále také vyšší elektrická vodivost ovlivnila množství celkových rozpustných pevných látek a organických kyselin, což jsou parametry ovlivňující zejména výslednou chuť produktu (Krauss et al. 2006).

SUŠINA

Obsah sušiny je parametr, který odráží hmotnost produktu bez vody. Tedy udává pevný podíl. Jak u hydroponie bývá velmi časté, menší podíl sušiny může znamenat kratší vegetační období, nebo také menší vzrůst. Vliv na to může mít také nepřetržitý přísun vody.

Podle studií Treftz and Omaye (2015) bylo zjištěno, že nebyl zaznamenán žádný rozdíl v hmotnosti sušiny u jahod ani u malin při porovnání NFT, deep water culture a půdy. Naopak dle Majid et al. (2021a), byl sledován významný pokles sušiny pod hydroponickými podmínkami.

Dalšími údaji, kterými se lze zabývat v oblastní nutričních specifik produktů, jsou například vlivy různých substrátů na kvalitu produktu. Studie Thybo et al. (2006) uvádí, že u většiny sensorických charakteristik plodů rajčat, byly největší rozdíly způsobeny odlišnostmi v odrůdě, následovanými zralostí, dobou sklizně a elektrickou vodivostí, zatímco typ růstového média měl malý nebo žádný účinek. Dále podle Gruda (2009) nejsou nalezeny v literatuře významné rozdíly

ani pro další produkty: salát (Siomos et al. 2001), paprika (Lăcătus et al. 1995), meloun (Guzmán, 2006), nebo jahody (Akhatou et al. 2014). To znamená, že výběr substrátu má pravděpodobně minimální účinky na kvalitu produktu z hlediska nutričních vlastností. Může mít však jiný vliv z hlediska efektivity produkce aj.

Ve studii RECAMALES et al.(2007) se uvádí i příklad komplexního výzkumu použití různých druhů substrátu. Kde naopak různé substráty vykazovaly rozdíly a byl následně vybrán jeden nejvíce vhodný substrát pro pěstování určité odrůdy v hydroponických systémech. Výzkum spočíval v porovnání nutriční kvality jahod pěstovaných v půdním i bezpůdním systému (otevřeném i zavřeném) s použitím různých substrátů: rašelina, kompostovaný korek a kokosové vlákno. Byly sledovány tyto parametry: popeloviny, vlhkost, titrační kyselost, pH, obsah škrobu, redukovatelné cukry, celkové rozpustné pevné látky a minerály (Ca, K, Na, Mg, P, N, Cu, Fe, Zn a Mn). Hlavní rozdíly byly pozorovány mezi otevřenými a zavřenými systémy na korku a kokosovém vlákně pro celkové rozpustné pevné látky, redukovatelné cukry a titrační kyselost. Jahody pěstované v půdě vykazovaly vyšší hodnoty pH, Ca, Zn, Fe, P, N, redukovatelné cukry a celkové rozpustné pevné látky. Jahody pěstované na kokosovém vlákně vykazovaly nejnižší rozdíly od těch, co byly pěstované v půdě, a proto v závěru této studie bylo kokosové vlákno vyhodnoceno jako vhodné pro pěstování jahod v bezpůdních podmínkách (RECAMALES et al. 2007).

3.4.2.1 Elektrická vodivost a způsoby zlepšení kvality produktů

ELEKTRICKÁ VODIVOST

Elektrická vodivost je jedním z měřených parametrů, které lze snadno v hydroponických systémech měřit. Získané hodnoty následně odpovídají množství rozpuštěných solí. To znamená vyšší počet iontů, které přenáší elektrický proud vodou. Elektrická vodivost jako taková přímo vliv na kvalitu produktu nemá, ale právě množství iontů a jejich lepší absorpce rostlinou, které se tímto dá porovnat, již pravděpodobně ano. Udává se pouze jako elektrická vodivost, protože lze podle toho i určit míru, při které je kvalita produktu nejvyšší a zároveň nemá negativní dopad na růst rostliny nebo jiné aspekty, které by pak naopak produkci bránily.

Elektrická vodivost je tedy dobrým měrným údajem a dá se snadno zvýšit, například přidáním některých solí a tím zvýšit počet iontů a zvýšit elektrickou vodivost daného roztoku. Dle (Moya et al. 2019) byla nejdůležitějším faktorem pro kontrolu výnosu produktu právě procenta odtokového objemu, elektrická vodivost roztoku a pH. Maximální výnosy pro bezpůdně pěstovaná rajčata byly získány při elektrické vodivosti od 2.5 do 2.9 dS.m⁻¹ (Moya et al. 2019). Mnoho komerčních skleníků je nuceno k používání méně kvalitní vody s obsahem iontových residuí jako

Cl⁻, Na²⁺, SO₄²⁻, Mg²⁺, ale některé roztoky mohou naopak dosáhnout středně vysoké elektrické vodivosti přidáním sloučeniny NaCl nebo majoritních živin a tím dosáhnout kýžených výsledků v lepší kvalitě produktu (Moya et al. 2019).

Ač se kvalita produktů zvýšením elektrické vodivosti zlepšuje, má to i svá negativa. Je mnoho parametrů, které naopak ztrácejí na efektivitě, a jejich funkce se zhoršuje. Při vysoké elektrické vodivosti může být plodina nepříznivě ovlivněna nedostatkem vody bez ohledu na metodu modifikace elektrické vodivosti (Moya et al. 2019). Může to zapříčinit i to, že absorpce vody dramaticky klesne se zvýšením elektrické vodivosti roztoku (Moya et al. 2019). Dalo by se tedy říci, že zatímco celkový výtěžek produktu se vyšším obsahem solí snižuje, vnitřní kvalita, jako je chuť a obsah zdraví prospěšných látek, se může zlepšovat (Krauss et al. 2006).

ZLEPŠENÍ KVALITY PRODUKTŮ

Jak již bylo řečeno, konzumenti mají čím dál větší zájem o kvalitnější potraviny. A nejenom o kvalitu samotnou, ale i o látky v potravině obsažené. Zájem konzumentů týkající se zdraví podporujících součástí a vlastností produktů, jako je antioxidační kapacita, a výživová hodnota zeleniny, se v posledních letech zvýšil (Gruda 2009) To motivuje pěstitele ke zlepšování a kontrole kvality svých produktů. Kvalitu ovlivňuje mnoho faktorů. V první řadě mají klimatické podmínky velký podíl na ovlivnění kvality produktů čerstvé zeleniny (Gruda 2009). Ovlivňují také fyziologické procesy, což vede k rozdílnostem ve vzhledu zeleniny, ale také ovlivňují vnitřní kvalitativní znaky jako jsou cukry, kyseliny, chuťové substance a také vitamíny (Gruda 2009).

Existují pak dva hlavní způsoby, kterými lze kvalitativní vlastnosti ovlivnit.

A) Pečlivý management koncentrace solí v roztoku živin může zlepšit kvalitu zeleniny. Mnoho výzkumů potvrdilo, že použitím roztoků se střední mírou elektrické vodivosti, které se dá dosáhnout přidáním NaCl, je možné zlepšit kvalitu rajčat, zejména v oblasti obsahu organických kyselin a rozpustné sušiny (Moya et al. 2019; De Pascale et al. 2001; Gruda 2009). Tento způsob zvýšení elektrické vodivosti v roztoku může poskytnout vynikající možnosti pro dosažení vysokých výživových a organoleptických vlastností produktu (Moya et al. 2019). Zvýšení elektrické vodivosti přidáním NaCl může dále způsobit zvýšení množství rozpustných pevných látek a organických kyselin, které determinují chuť rajčat (Gruda 2009). Podobné výsledky byly také získány pro papriku a okurku (Trajkova et al. 2006), lilek (Savvas et al. 2002), celer (Pardossi et al. 1999), meloun (Yam et al. 2020) a tykve, u které, když se zvýší elektrická vodivost solí ze 2.0 na 4.1 dS.m⁻¹, se zlepšila kvalita produktu s ohledem na vyšší obsah sušiny, snížené cukry, obsahu škrobu, celkové sacharidy a vitamin C (Rouphael et al. 2018).

Druhý způsob zlepšení kvality produktu:

B) Efekt kationtových proporcí (K/Ca/Mg) v roztoku živin a jejich vliv na kvalitu produktů. Dle Fanasca et al. (2006) bylo demonstrováno na pěstování rajčat v bezpůdních systémech, že vyšší koncentrace K v roztoku zvyšuje obsah antioxidantů (zejména lycopenu). Zatímco zvýšené podíl hořčíku (Mg) zlepšuje celkovou antioxidační aktivitu rajčete (Moya et al. 2019).

Dalším potenciálem může být mořská voda. Zavlažování mořskou vodou představuje zejména kontrolované využívání bezplatného alternativního zdroje, což umožňuje v bezpůdních systémech velká míra kontroly. (Atzori et al. 2019). Kromě toho je potenciál takové techniky zesílen reakcí plodin na stres solí a následnou možnou produkcí sekundárních metabolitů a akumulací minerálních prvků, které mají příznivé účinky na výživu člověka (Atzori et al. 2019). Oproti tomu ale stres ze solného roztoku může způsobit akumulaci iontů Cl⁻ a Na⁺, a to může vést k mnoha poškozením v produkci plodin (Atzori et al. 2019).

3.4.3 Toxikologická rizika

3.4.3.1 Mikroorganismy

ŘASY

Řasy mohou být častým problémem v hydroponických systémech, protože systémy pro ně mohou tvořit ideální podmínky. Je to pravděpodobně problém pro všechny typy bezpůdních systémů. Řasy potřebují světlo, vodu a živiny. Kdekoliv tyto tři základní potřeby koexistují, řasy z toho těží (Lu and Shimamura 2018). Takové rozšíření může způsobit kontaminaci produktů, a to urychluje hnití v rostlinných tkáních (Lu and Shimamura 2018).

CHOROBY, VIRY, BAKTERIE

Celkově můžeme říct, že díky přísné kontrole všech parametrů v bezpůdních podmínkách, je pěstování z hlediska nebezpečných patogenů bezpečnější. I počet mikroorganismů se dá lépe kontrolovat. Bezpůdní systém byl efektivnější také v kontrole mikrobiální aktivity a kontaminace. Studie ukazuje, že salát pěstovaný v bezpůdních podmínkách, a podávaný jako čerstvý, může být bezpečnější z hlediska rizika obsahu potenciálně patogeních bakteriích oproti salátu pěstovaného v půdě. Salát pěstovaný v půdě obsahoval vyšší množství bakterií mléčného kvašení a koliformních bakterií. Záleží ale také na genotypu a sezóně pěstování (Selma et al. 2012). Díky neustálemu monitorování může být proces striktně kontrolován, dezinfikován (Lu and Shimamura 2018), aby nedocházelo ke kontaminaci. V extrémních případech rozšíření škůdce nebo nemoci se může celý systém zavřít, a to může vést k velkým produkčním i finančním ztrátám (Lu and Shimamura 2018). Díky dobré kontrole, a možnosti celý systém průběžně dezinfikovat, je problém nemocí,

mikroorganismů a hmyzu, problémem pocházejícím spíše ze špatné manipulace v rostlinných továrnách (Lu and Shimamura 2018).

3.4.3.2 Mykotoxiny

Mykotoxiny jsou toxiny produkované houbami. Nejznámější mykotoxin, zejména ve vztahu k potravinám, je aflatoxin A. Ten se také nejčastěji kontroluje při kontrole kvality potravin. Hydroponické systémy jsou spíše nenáchylné vůči hrozbám v podobě mykotoxinů. Je to pravděpodobně z toho důvodu, že houby, ze kterých mykotoxiny pocházejí, nemají tolik prostoru a času se uchytit, a následně mykotoxiny produkovat. Také jsou hydroponické systémy velmi kontrolovány a substráty sterilizovány (pokud jsou použity), tím se riziko snižuje.

3.4.3.3 Autotoxicita

Autotoxicita (alelopatie) je fenomén, který se objevuje ve chvíli, kdy rostlinná odrůda uvolňuje chemické substance, které inhibuje či oddaluje klíčení a růst té stejné odrůdy (Asaduzzaman et al. 2012). Autotoxicita je u hydroponických systémů poměrně častá. Je to kvůli akumulaci nebezpečných kořenových exsudátů z roztoku živin (Yannick et al. 2017). Zejména u cirkulačních uzavřených systémů, kde se roztok vrací a nese s sebou i odpadní látky z kořenů, se nedostávají pryč a tyto látky se kumulují v kořenové zóně. Organické kyseliny, cukry, proteiny, enzymy, alifatické a aromatické uhlovodíky jsou příklady látek nalezených rhizosféře (Yannick et al. 2017). Kromě samotné kumulace může mít autotoxicita vliv i na celý systém. Autotoxicita může kromě sousedních rostlin ovlivnit i přístupnost živin a může být ku prospěchu parazitických rostlin (Yannick et al. 2017). Také kořenové exsudáty, jako jsou již pro příklad zmíněné organické kyseliny, mohou reagovat s ionty těžkých kovů a ovlivnit rozpustnost, mobilitu a přístupnost těchto kovů.

Organické vyžadují kyseliny značnou pozornost pro jejich roli v mikrobiálním metabolismu a inhibiční aktivitě vůči rostlinnému růstu. Takovým příkladem organické kyseliny může být třeba kyselina benzoová. Kyselina benzoová je organická kyselina potenciálně zodpovědná za nižší růst a výnos u mnoha odrůd, jako například u jahod a listnaté zeleniny (Yannick et al. 2017). Ne každá rostlina produkuje stejné organické kyseliny, nebo je akumuluje, pokud vůbec. Množství a kvalita kořenových výměšků závisí na odrůdě rostliny, vývojovém stádium a faktorech prostředí.

K odstranění těchto fytotoxických látek z recirkulovaného roztoku živin existuje mnoho metod. Například využití aktivního uhlí (Lee et al. 2006; Asaduzzaman et al. 2012; Yannick et al.

2017), elektrodegradační ošetření (Asaduzzaman et al. 2012; Yannick et al. 2017; Talukder et al. 2018), pomalá filtrace pískem, membránová filtrace (Yannick et al. 2017).

3.4.3.4 Residua pesticidů a těžkých kovů

Residua pesticidů a těžkých kovů se u zemědělských produktů, zejména u potravin pro naši potřebu, běžně zjišťují. Jsou to tedy látky, které většinou nejsou zdraví prospěšné a často se jedná o látky, které se mohou v lidském těle akumulovat, způsobit ve vyšších koncentracích intoxikaci, nebo zhoršovat kvalitu produktu.

Již z hlediska pohledu na bezpůdní systémy by se dalo říci, že nejen pesticidy, ale i herbicidy, insekticidy a fungicidy nebudou těmito problémy tolik zasaženy. Bezpůdní systémy jsou natolik kontrolovány, že při pěstování neprobíhá interakce s okolním prostředím, tím pádem se tyto látky používat nemusí. Jsou situace, při kterých se mohou objevit residua pesticidů i v bezpůdních systémech.

Co se týče těžkých kovů, je důležité nejprve stanovit, jak se do rostliny mohou těžké kovy dostat. To demonstruje studie hydroponických systémů, u kterých přidávali do roztoku různé koncentrace těžkých kovů.

Suchá hmotnost rostlin fazole významně poklesla se zvyšující se koncentrací těžkých kovů ve vnějším roztoku. Sušina rostlin pěstovaných s vysokými koncentracemi těžkých kovů byla o 49,5 % nižší než u kontrolních rostlin. Koncentrace Fe, Mn, Zn, Cd a Ni v listech, stoncích a kořenech, byly přímo úměrné vnější koncentraci. Při všech ošetřeních, obsahovaly kořeny největší množství těžkých kovů. Při vyšším absorbovaném množství, se ionty těžkých kovů objevily i v květech či semenech, což je jev, který může být nebezpečný pro lidské zdraví (Sánchez et al. 1999).

Těžkými kovy může být půda kontaminována, pokud se nachází v určité blízkosti potenciálního zdroje těžkých kovů. Také se udává určitá míra znečištění z atmosféry a ta souvisí zejména s pěstováním ve městech.

Zatímco se běžně uznává, že kontaminace potravin pěstovaných ve městech pochází ze znečišťujících látek ve vzduchu, o možné kontaminaci půdou ve městech je známo jen málo. Výsledky této studie ukázaly, že plodiny pěstované v systému bez půdy mají nižší obsah kovů – 70 % pro Cr, - 61 % pro Cu, - 45 % pro Cd a – 81 % pro Ni, ve srovnání s kulturami pěstovanými v půdě. Toto zjištění ukazuje, že hlavní riziko kontaminace v městské oblasti neočekávaně souvisí se znečištěním půdy (Pennisi et al. 2016).

Dalším aspektem, kterým lze zmírnit kontaminaci půdy těžkými kovy, je výběr hydroponických systémů se substráty místo půdy. Rostliny pěstované v rašelině ve zjednodušených půdních systémech, vykazovaly snížený obsah Cr, Cu, Pb a Ni ve srovnání s rostlinami pěstovanými

v půdě (Pennisi et al. 2016). Podle výsledků této studie může být zavedení bezpůdných systémů s rašelinovým substrátem, proveditelnou strategií pro zvládnutí rizika kontaminace stopovými kovy v městské přidělené zahradě (Pennisi et al. 2016).

3.4.4 Budoucnost bezpůdných systémů

3.4.4.1 Pěstování na Marsu

Jedna z oblastí výzkumu, která se v souvislosti s hydroponií objevuje, je pěstování ve vesmíru. Jedná se o pěstování v extrémních podmínkách (například na Marsu), pro nás neslučitelnými se životem. V tomto ohledu má hydroponie velký potenciál, protože nepotřebuje půdu, která v těchto podmínkách samozřejmě není. Existují výzkumy, které zkoumají pěstování v těchto podmínkách a v inertním substrátu, podobném materiálu jako na jiné planetě, nebo třeba Měsíci nebo i jiných planetách.

Vznikla dokonce oblast výzkumu týkající se pouze pěstování rostlin ve vesmíru s názvem *Space Horticulture* neboli v překladu *Vesmírné zahradnictví*. Zabývá se pěstováním plodin pro produkci potravin a další materiály v pozemských nebo mimozemských vesmírných objektech podobnými způsoby zemědělství jako na Zemi (Chaudhari, 2020). Substrát je ale to nejmenší, co je v těchto výzkumech předmětem diskuze. Jedním dalších aspektů je nižší gravitace, která se ve již výzkumech dá simulovat, a pak také rozsáhlejší problémy, kterými jsou zdroj energie, tepla, dostatečné záření a také dostatek vody.

Hydroponické systémy a celkově pěstování rostlin v extrémních podmínkách jsou předměty studií o osidlování jiných planet právě z důvodu jejich nezaměnitelné důležitosti při jakýchkoli přesunech na jinou planetu. Dalo by se říci, že právě rostliny si musíme vzít s sebou, abychom dlouhodobě přežili. Jsou pro nás esenciální nejenom výživově, ale i pro svoji produkci kyslíku. V rámci těchto studií se také často opakuje tvrzení, že výzkum směřuje k vytvoření systému, díky kterému bychom mohli přežít alespoň 24 hodin na jiné planetě.

Studie Oluwafemi et al. (2018) se zabývala rozsáhlým výzkumem výživy astronautů, kteří se hypoteticky vydají na jednosměrnou misi. V rámci započatí života na jiné planetě je právě vývoj zemědělství základním kamenem. Byly zkoumány tři teoretické povrchy, kde by se tato mise dala uskutečnit. Jedná se o Měsíc, Venuši a Mars. A právě prostřednictvím hydroponických systémů, které by se pro tento účel daly použít, byly vyzkoušeny různé typy substrátu, zdroje energie, atmosféra, míra gravitace tak, aby podmínky co nejvíce odpovídaly těm již zjištěným na zmíněných planetách. Studie měla docela překvapivé výsledky zejména z hlediska vhodnosti planety Mars.

Venuše a Měsíc se ukázaly jako spíše méně vhodné planety pro pěstování rostlin, zejména vzhledem ke složení jejich půdy a atmosféry.

Zkoumání složení půdy pomohlo vědcům ukázat, že pravděpodobně byl Mars vlhčí a teplejší než momentálně je. V rámci výzkumů byly nalezeny stopy hořčíku sodíku, draslíku a chlóru a data také odhalila, že půda byla pravděpodobně alkalická (8 - 9 pH) (Oluwafemi et al. 2018). Červená barva Marsu pochází z oxidu železitého a jeho půda má pH 8. Na Měsíci je vrstva pevné horniny pokryta vrstvou uvolněných úlomků (Oluwafemi et al. 2018).

Není pochyb, že půda (regolit) Marsu může poskytnout dobrou mechanickou podporu a pravděpodobně může být dostatečně provzdušněn, nicméně je mnohem složitější odhadnout složení nutrientů a schopnost zadržení vody (Schuerger et al. 2002). Vědci, kteří analyzovali data z Marsu, byli překvapeni, že se prostředí na Marsu ukázalo jako vhodnější pro udržitelný život, než předpokládali (Oluwafemi et al. 2018). Podle studií se zdá být povrch Měsíce, Venuše a Marsu nejvíce vhodný pro zemědělství. Venuše má ale hustou atmosféru o tlaku 91x vyšším než lze nalézt u hladiny moře na Zemi a její atmosféra je tvořena zejména oxidem uhličitým s kapkami kyseliny sírové a malého množství vody a kyslíku. Na Marsu oproti tomu v současnosti dominuje fyzické zvětrávání způsobené dopady meteoritů a teplotními změnami spíše, než chemickými procesy (Oluwafemi et al. 2018). Růst a kvetení na simulovaném regolitu Marsu bylo mnohem lepší než na simulovaném regolitu Měsíce, a dokonce o něco lepší než na kontrole v podobě říční půdy chudé na živiny (Schuerger et al. 2002).

Využití regolitu z Marsu jako substrát může mít několik výhod v hydroponických systémech. Příkladem může být pravděpodobná biologická dostupnost esenciálních prvků pro rostliny, mechanická podpora. Půda, neboli regolit Marsu, podle kterého byl vytvořen substrát s co nejpodobnějšími vlastnostmi, byl pak následně použit v hydroponických systémech. Podle výzkumu se zdá, že regolit Marsu prošel oxidačním zvětráváním a změnami ve vodě. Tyto procesy by pravděpodobně na Marsu vytvořily půdy, které jsou podobné zvětralým zemským půdám (Schuerger et al.). Při výzkumech různých plodin bylo prokázáno, že rostliny jako chřest, brambory a měsíček lékařský v těchto půdách rostou. Bylo pozorováno, že semena ředkvičky, vojtěšky a fazole mungo rostou v atmosféře bohaté na CO₂, která je na Marsu (Oluwafemi et al. 2018).

Souvisejícím tématem jsou programy na podporu dlouhodobé mise člověka na Mars, jsou to například bioregenerativní ALS systémy (Advanced Life Support), které byly navrženy pro využití vyšších rostlin jako primárních kandidátů pro fotosyntézu a hydroponické metody, byly navrženy jako primární metoda rostlinné produkce v ALS systémech (Schuerger et al. 2002). Významným problémem souvisejícím s pěstováním mimo naši Zemi jsou prostředky, kterými by bylo možné

jednotku pro pěstování rostlin zcela uzavřít od vnějšího prostředí (Chaudhari, 2020). Druhým vážným problémem je vybudování osvětlovacích systémů tak, aby poskytovaly dostatečné záření s minimální silou. Studie pokračují s cílem zlepšit a upravit světelnou diodu (LED) a mikrovlnná světla pro použití v raketových systémech pro rostliny (Chaudhari, 2020). Skladování solární energie je velmi neefektivní proces. Větší část energie se ztrácí teplem dlouho předtím, než je k dispozici jako světelná energie pro růst rostlin (Oluwafemi et al. 2019). Důležité je však podotknout, že pokud by byly nalezeny v regolitu Marsu vysoké úrovně peroxidů, těžkých kovů nebo dalších fyto toxických faktorů, užití lokálních zdrojů substrátu pro ALS systémy by nebylo možné (Schuenger et al.).

Dalšími významnými výzkumy jsou výzkumy *International Potatoe Center* (CIP), které zahájilo sérii experimentů, jejichž cílem bylo zjistit, zda brambory mohou růst za atmosférických podmínek Marsu, a tím dokázat, že jsou schopné růst i v extrémních klimatických podmínkách na Zemi (Oluwafemi et al. 2018).

Další komplikací na Marsu je, že teplota sahá až k -70°C a tím pádem veškerá voda, kterou Mars obsahuje je sice 60 % vody, ale z toho je 1 % v atmosféře a zbytek v podobě ledu (Oluwafemi et al. 2019). Na Venuši je problém opačný, je tam naopak moc horko. Tímto tedy není překvapivý výstup ze studií vykládající o tom, že pěstování rostlin na povrchu Marsu, Měsíce, či Venuše bez jakékoli další výpomoci jako jsou skleníky, půdní obměna apod., pravděpodobně není vědecky možné z důvodu jejich nehostinného prostředí (Oluwafemi et al. 2019). Existují ale způsoby, i výše popsané, jak by se velká část nehostinnosti prostředí dala řešit. Vše je zatím stále na úrovni vědeckého výstupu.

3.4.4.2 Pěstování ve městech

S hydroponickými systémy je často spojováno spojení tzv. „urban farming“, které by v doslovném překladu mohlo znamenat „farmaření ve městě“. Je to ustálené slovní spojení, které vychází z trendu přesouvat část zemědělství do měst. Ať už jsou to městské zahrady, pěstování na střeších kancelářských budov, anebo, intenzivní pěstování plodin přímo uvnitř budovy pomocí hydroponie. A protože poprvé v historii žije více než polovina světové populace ve městech (Orsini et al. 2013), je toto označení velmi aktuální.

Tím, že hydroponické systémy nemají půdu, je možné je vystavět například v prostorách budovy a využít tak nevyužitého prostoru. Hydroponické systémy se také dají stavět do výšky, tomu se pak říká *vertical farming*, v překladu vertikální farmaření. Je to často používané a populární slovní spojení při tvorbě nových hydroponických farem, či vymýšlení nových inovací s tím spojených. Pěstování rostlin a zeleniny v hydroponickém vertikálním systému představuje řešení

pro zvýšení produkce potravin a snížení dopadu na životní prostředí. Tento druh systémů pěstování rostlin a zeleniny představuje čisté, bezpečné a ekologické zásobování měst potravinami (Puccinelli et al.; Grigore et al. 2016; Benke and Tomkins 2017). Také zavedení vertikálního pěstování do budov je jedním z posledních směrů v ekologickém designu, který se rozmohl pro zlepšení kvality ovzduší v uzavřených kancelářských budovách. Tento systém může na základě fotosyntézy rostlin absorbovat CO₂ a uvolnit kyslík, a tím zlepšovat kvalitu vzduchu. Současná studie dospěla k závěru, že míra absorpce CO₂ u vertikálně pěstované zeleniny může být až 9,2krát vyšší než u rostlin v horizontálním systému, díky vyšší čisté fotosyntetické rychlosti (Shao et al. 2021). Dalším využitím tohoto spojení hydroponie a vertikálního rozměru by mohlo být pěstování aromatických rostlin v inovativním hydroponickém vertikálním systému, který je díky svým principům vhodný také pro farmaceutický, kosmetický průmysl a lze je také úspěšně použít v potravinářském průmyslu (Neocleous et al.).

Oba dva pojmy – *urban a vertical farming*, spolu mohou souviset. Aspekt, který je spojuje, může být snaha o navázání na již zmíněné globální problémy. Navazují na to, jak šetřit ornou půdu a další přírodní prostory obecněataké na již vícekrát zmíněný problém přelidněnosti, který souvisí s výzvou boje s hladomorem. To vše by se dle propagátorů těchto způsobů dalo částečně řešit právě zmíněným přesunutím produkce do měst, do nepoužívaných budov a vystavěním systémů do výšky. Má to ale i negativní aspekty, kterými jsou zejména zdroje energie, přívod vody a manipulace. Dále také relativně vysoká hodnota počáteční investice pro celou výstavbu.

Urban farming má svůj smysl také v rozvojových zemích, kde je zvyšující se míra urbanizace, a to s sebou nese i určité problémy. V rozvojových zemích jde proces urbanizace rovnoměrně se zvyšující se chudobou ve městech a znečištěným prostředím a zvyšující se nezaměstnaností (Orsini et al. 2020). Pěstování plodin ve městech pak může tyto určité problémy řešit. Zemědělství ve městech, neboli *urban farming* reprezentuje dohromady příležitost pro zlepšení dodávek potravin, lokální ekonomiky, sociální integrace a udržitelnosti životního prostředí (Orsini et al. 2013). Zároveň pak produkce čerstvého ovoce a zeleniny, která je k dispozici i pro nejchudší populaci. Následné zlepšení z hlediska zabezpečení potravin, i z hlediska zdravotního stavu, je jedním z hlavních cílů městského zahradnictví (Orsini et al. 2013).

Urban farming má také pozitivní dopady na životní prostředí. Pěstování ve městě má značné ekologické výhody tím, že snižuje městský odpad, zlepšuje městskou biodiverzitu a kvalitu ovzduší a celkově snižuje dopad na životní prostředí související s přepravou i skladováním potravin (Orsini et al. 2013). Šíření zjednodušených hydroponických systémů je silně podporováno FAO prostřednictvím *microgardens* (volný překlad *mikrozahrady*) a dnes se takovéto systémy nacházejí v několika zemích Afriky, Asie a Latinské Ameriky (Orsini et al. 2013).

3.4.4.3 Ekologické a ekonomické aspekty

S bezpůdními systémy, ostatně jako s veškerou produkcí potravin, nevyhnutelně souvisí ekonomická stránka. Již bylo řečeno, počáteční investice mohou být poměrně vysoké (Olympios, Benke). To znamená, že pro vybudování takového systému je nutný počáteční kapitál. To pravděpodobně bude bránit tvořit hydroponické farmy malým farmářům. Nejnáročnějšími položkami na vystavění těchto systémů by mohl být zdroj energie a světla, konstrukce, udržování stálé teploty, proudění vzduchu, vlhkosti. Na druhou stranu, dle výzkumu (Majid et al. 2021a) hydroponické systémy (NFT a DFT) obstály i v ekonomické analýze v porovnání s půdními systémy. Poměr příjmů a výdajů byl větší než 2. Dalším aspektem je i nestabilita těchto systémů. Jak již bylo zmíněno, u několika potenciálních rizik toxikologických, mikrobiologických nebo technologických, pokud by byla narušena jedna část systému, pravděpodobně se to dotkne celé části. Celý systém tak může zkolabovat a tím pádem je to ztráta veškerých příjmů.

Z ekologického hlediska mají bezpůdní systémy velký potenciál. Otázkou zůstává, jestli je opravdu možné daný potenciál naplnit. Zemědělská půda aktuálně pokrývá asi třetinu rozlohy světa, přesto méně, než třetinu, tvoří orná půda (World Bank 2018). Prvním potenciálem je tedy ušetření půdy a snaha o návrat přirozených ekosystémů, přirozeně obnovených po zemědělské degeneraci. Orání vede ke ztrátě vrchní vrstvy půdy větrnou a vodní erozí, což má za následek sníženou úrodnost půdy, zvýšené používání hnojiv a nakonec degradaci půdy. Ztráty půdy ze země pak mohou skončit v rybnících, přehradách, jezerech a řekách a způsobit poškození těchto stanovišť (Goddek et al.). Stává se z toho poté koloběh, protože touto ztrátou půdy pak máme tendenci nacházet nové prostory pro vytvoření zemědělské půdy a dopouštíme se tím dalšího úbytku a degenerace. Za poslední tři desetiletí dostupnost zemědělské půdy pomalu klesá, což dokazuje pokles o více než 50 % od roku 1970 do roku 2013. Účinky ztráty orné půdy nelze napravit přeměnou přírodních oblastí na zemědělskou půdu, protože to často vede k erozi i ke ztrátě stanovišť (Goddek et al.).

Důvodem, proč nelze zemědělskou půdu zachránit organickým zemědělstvím, je pak další související problém, a to je vysoká míra poptávky po potravinách a v mnoha zemích již rozsáhlé problémy s nedostatkem potravin. Ekologické zemědělství by výnos ještě snížilo. Proto je snaha o nalezení způsobu, jak zvýšit výnos, produkci potravin, a zároveň šetřit půdu. Produkce potravin bude nevyhnutelně čelit dalším výzvám, jako je klimatická změna, znečištění, ztráta biodiverzity, ztráta opylovačů, degradace orné půdy. Tyto podmínky vyžadují přijetí rychlých technologických zlepšení, efektivnější a udržitelnější produkční metody a také efektivnější a udržitelnější potravinové řetězce. Hlavně s ohledem na to, že již teď přibližně 1 miliarda lidí trpí malnutricí, zatímco zemědělství dále pokračuje v ničení půdy, plýtvání vody a degradaci biodiverzity v

globálním měřítku (Goddek et al.). Proto by se bezpůdní systémy zdály velmi vhodné. Není to ale jednoduchá cesta. K zajištění globální potravinové bezpečnosti by veškerá produkce musela stoupnout o více než 70 % v následujících dekádách, aby pokryla “*Millenium Development Goals* (FAO 2009), které obsahují “*vymýcení extrémní chudoby a hladu*” a “*zajištění enviromentální udržitelnosti*”. Proto Agenda 2030 pro udržitelný rozvoj zdůrazňuje potřebu řešit globální výzvy, v rozsahu od klimatických změn k chudobě, s velkou prioritou vůči udržitelnosti produkce potravin (Goddek et al.). Otázkou tedy zůstává, zda by bezpůdní systémy obstály v tomto směru vývoje. Bepůdní systémy jsou aplikovány ve velkém měřítku i ve velice vyprahlých oblastech Jižního Izraele, Austrálie, Jižní Afriky a Saudské Arábie a v žádné z těchto zemí není hlad problémem (Raviv and Lieth 2019). Toto tvrzení samozřejmě nemusí znamenat přímý pozitivní dopad bezpůdních systémů na nedostatek potravin v jiných zemích. Spíše je to nástin toho, že, zejména v extrémních podmínkách, by mohly mít tyto systémy využití.

4 Závěr

Není pochyb o tom, že jsou hydroponické i aquaponické systémy komplexně rozvinuté. Technické i technologické postupy jsou popsány a aplikovány ve výzkumné praxi, ale i v komerčních hydroponických farmách, kterých vzniká stále více.

Hydroponické a s tím i související aquaponické systémy vyžadují velkou míru kontroly nad veškerými faktory. Je to poměrně nestabilní systém, který vyžaduje optimalizaci každého parametru, který je do systému zanášen a kontrolován. Když se bezpůdní systémy uvedou do kontrastu s půdou, půda je oproti nim velmi stabilní prostředí. Na první pohled by se mohlo zdát, že bezpůdní systémy tomuto nemohou konkurovat, jak v kvalitě, tak ve výnosu. Podle uvedených studií jsou ale určité oblasti, ve kterých mají naopak bezpůdní systémy výhody, které půda nemůže nabídnout. Jedním z takových výhod je snadná kontrola nad obsahem určitých látek a kontrola celého procesu růstu plodin. Také se k tomu pojí snadnější předcházení rostlinných chorob, problémy s plevelem a napadení škůdci. To vše jsou běžné potíže klasického pěstování rostlin. Na druhou stranu manipulace a technologické postupy jsou v bezpůdních systémech mnohem složitější a méně stabilní. Celý systém spolu souvisí a jakmile se vychýlí jeden parametr, může to znamenat kolaps celého systému.

Hledisko, které bylo v této práci nejvíce zkoumáno, byla kvalita a bezpečnost produktů vypěstovaných bezpůdními systémy. V tomto ohledu se zdají být bezpůdní systémy velmi úspěšné při zlepšování kvality a modifikování výnosu pouze změnami podmínek, či upravováním přidávaných roztoků. Celkově kvalita produktů neklesá, pokud jsou všechny parametry optimalizované a co víc, kvalita se mnohdy dá i zlepšit. Co se týče bezpečnosti, produkty bezpůdního zemědělství jsou méně náchylné vůči chorobám, škůdcům, mikroorganismům a opět se těmito potenciálními hrozbám dá lépe předcházet. Více tedy než o samotné kvalitě produktu, je to opravdu o kontrole systému jako celku. Je možnost celý systém pěstování neustále ovlivňovat a tím přesně vědět, které kvalitativní či kvantitativní znaky měníme. A tam také začíná i bezpečnost: vědět, kterou vodu použít, kontrolovat složení roztoků, světelný a tepelný zdroj a tím předcházet většině problémům spojených například s pěstováním v půdě, kde mnoho faktorů nejsme schopni ovlivnit. Nicméně to, že v půdě je nedokážeme ovlivnit není nic negativního, je to jen odraz toho, jak stabilní prostředí půda dodává a jak dokonalý systém sám o sobě v přírodě existuje. Bepůdní systémy se konec konců se všemi parametry snaží jen přiblížit tomu, jak to funguje přirozeně v přírodě a tak ta nestabilita pak vychází z balancování parametrů a faktorů, které se musí kompenzovat a mnohdy nahrazovat všechny nám přirozené a základní parametry pro život na Zemi.

5 Literatura

- Akhatou I, Fern´ F, Recamales F (2014) Influence Of Cultivar And Culture System On Nutritional And Organoleptic Quality Of Strawberry. Influence of cultivar and culture system on nutritional and organoleptic quality of strawberry. *Artic J Sci Food Agric* 94:866–875. doi: 10.1002/jsfa.6313
- Asaduzzaman M, Asaduzzaman M, Kobayashi Y, Isogami K, Tokura M, Tokumasa K, Asao T (2012) Growth and Yield Recovery in Strawberry Plants under Autotoxicity through Electrodegradation Production of quality vegetable crops through hydroponics providing human health benefits View project Soilless Culture-Use of Substrate for the Production of Quality Horticultural Crops View project Growth and Yield Recovery in Strawberry Plants under Autotoxicity through Electrodegradation.
- Atzori G, Mancuso S, Masi E (2019) Seawater potential use in soilless culture: A review. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 249:199–207.
- Barbosa GL, Almeida Gadelha FD, Kublik N, Proctor A, Reichelm L, Weissinger E, Wohlleb GM, Halden RU (2015) Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *Int J Environ Res Public Health* 12:6879–6891. doi: 10.3390/ijerph120606879
- Benke K, Tomkins B (2017) Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustain Sci Pract Policy* 13:13–26. doi: 10.1080/15487733.2017.1394054
- Chaudhari, G.N., Phuke, R.M. and Bhojer, P.I. 2020. Space Horticulture. *Vigyan Varta* 1 (1): 50-52
- Chen P, Zhu G, Kim HJ, Brown PB, Huang JY (2020) Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. *J Clean Prod* 275:122888. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122888
- De Pascale S, Maggio A, Fogliano V, Ambrosino P, Ritieni A (2001) Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *J Hortic Sci Biotechnol* 76:447–453. doi: 10.1080/14620316.2001.11511392
- Fanasca S, Colla G, Maiani G, Venneria E, Roupheal Y, Azzini E, Saccardo F (2006) Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *J Agric Food Chem* 54:4319–4325. doi: 10.1021/jf0602572
- Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell Editors GM Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future.
- Grigore A, Pirvu L, Bubueanu C, Colceru-Mihul S, Ionita C, Ionita L (2016) MEDICINAL PLANT CROPS-IMPORTANT SOURCE OF HIGH VALUE-ADDED PRODUCTS.
- Gruda N (2009) Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? Guzmán M Postharvest Quality of Melon Fruits in Soil and Soilless Crops Substrates for cut flower crops. Improvement fertigation in Carnation Crops View project Nutritive efficiencies in horticultural crops View project. *researchgate.net*. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.843.27
- Kozai T, Niu G, Takagaki M (2019) Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production.
- Krauss S, Schnitzler WH, Grassmann J, Voitke M (2006) The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *J Agric Food Chem* 54:441–448. doi: 10.1021/jf051930a
- Kwon MJ, Hwang Y, Lee J, Ham B, Rahman A, Azam H, Yang JS (2021) Waste nutrient solutions from full-scale open hydroponic cultivation: Dynamics of effluent quality and removal of nitrogen and phosphorus using a pilot-scale sequencing batch reactor. *J Environ Manage* 281:111893. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111893

- Lacatus V, Botez C, Popescu N, Symposium VV-II, 1995 undefined Chemical composition of tomato and sweet pepper fruits cultivated on active substrates.
- Lee JW, Choi SP, Thiruvenkatachari R, Shim WG, Moon H (2006) Submerged microfiltration membrane coupled with alum coagulation/powdered activated carbon adsorption for complete decolorization of reactive dyes. *Water Res* 40:435–444. doi: 10.1016/j.watres.2005.11.034
- Leiva JA, Wilson PC, Albano JP, Nkedi-Kizza P, O'Connor GA (2019) Pesticide Sorption to Soilless Media Components Used for Ornamental Plant Production and Aluminum Water Treatment Residuals. *ACS Omega* 4:17782–17790. doi: 10.1021/acsomega.9b02296
- Lu N, Shimamura S (2018) Protocols, Issues and Potential Improvements of Current Cultivation Systems. In: *Smart Plant Factory*. Springer Singapore, pp 31–49
- Majid M, Khan JN, Ahmad Shah QM, Masoodi KZ, Afroza B, Parvaze S (2021a) Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agric Water Manag* 245:106572. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106572
- Majid M, Khan JN, Ahmad Shah QM, Masoodi KZ, Afroza B, Parvaze S (2021b) Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agric Water Manag*. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106572
- Moral R, Gomez I, Pedreno JN, Mataix J (1994) Effects of cadmium on nutrient distribution, yield, and growth of tomato grown in soilless culture. *J Plant Nutr* 17:953–962. doi: 10.1080/01904169409364780
- Moya C, Oyanedel E, Verdugo G, ... MF-, 2017 undefined Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato.
- Neocleous D, Horticulturae GN-S, 2018 undefined Seasonal variations of antioxidants and other agronomic features in soilless production of selected fresh aromatic herbs.
- Oluwafemi FA, De La Torre A, Afolayan EM, Olalekan-Ajayi BM, Dhital B, Mora-Almanza JG, Rivolta A, Neduncheran A (2018) Space food and nutrition in a long term manned mission. In: *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. International Astronautical Federation, IAF,
- Oluwafemi FA, Neduncheran A, Andrews S, Wu D (2019) Methods of seeds planting in space: Soilless or not. In: *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. International Astronautical Federation, IAF,
- Olympios C, the RC-A-P cultivation in, 1999 undefined USE C.
- Orsini F, Kahane R, Nono-Womdim R, Gianquinto G (2013) Urban agriculture in the developing world: A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33:695–720.
- Orsini F, Pennisi G, Zulfiqar F, Gianquinto G (2020) Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *Eur J Hortic Sci* 85:297–309. doi: 10.17660/ejhs.2020/85.5.1
- Pardossi A, Malorgio F, Tognoni F (1999) Salt tolerance and mineral relations for celery. *J Plant Nutr* 22:151–161. doi: 10.1080/01904169909365614
- Pennisi G, Orsini F, Gasperi D, Mancarella S, Sanoubar R, Vittori Antisari L, Vianello G, Gianquinto G (2016) Soilless system on peat reduce trace metals in urban-grown food: unexpected evidence for a soil origin of plant contamination. *Agron Sustain Dev* 36:1–11. doi: 10.1007/s13593-016-0391-9
- Puccinelli M, Malorgio F, Rosellini I, Horticulturae BP-S, 2017 undefined Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics.
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture*.

- Raviv M, Lieth JH (2019) SOILLESS CULTURE THEORY AND PRACTICE EDITED BY. Raviv M, Chen Y, Inbar Y (1986) Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants. In: *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Springer Netherlands, pp 257–287
- RECAMALES ÁF, MEDINA JL, HERNANZ D (2007) PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND MINERAL CONTENT OF STRAWBERRIES GROWN IN SOIL AND SOILLESS SYSTEM. *J Food Qual* 30:837–853. doi: 10.1111/j.1745-4557.2007.00154.x
- Ritter E, Angulo B, Riga P, Herrán C, Relloso J, San Jose M (2001) Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Res* 44:127–135. doi: 10.1007/BF02410099
- Rouphael Y, Cardarelli M, Rea E, ... AB-A water, 2006 undefined Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions.
- Rouphael Y, Colla G, Battistelli A, Moscatello S, Proietti S, Rea E (2004) Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *J Hortic Sci Biotechnol* 79:423–430. doi: 10.1080/14620316.2004.11511784
- Sánchez PG, Fernández LP, Trejo LT, Alcántar GG, Cruz JD (1999) Heavy metal accumulation in beans and its impact on growth and yield under soilless culture. *Acta Hortic* 481:617–621. doi: 10.17660/actahortic.1999.481.73
- Savvas D, botanik FL-A, 1994 undefined Influence of salinity on the incidence of the physiological disorder internal fruit rot' in hydroponically-grown eggplants.
- Schmautz Z, Espinal CA, Smits THM, Frossard E, Junge R (2021) Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. *Aquac Eng* 92:102145. doi: 10.1016/j.aquaeng.2021.102145
- Schuerger AC, Ming DW, Newsom HE, Ferl RJ, McKay CP NEAR-TERM LANDER EXPERIMENTS FOR GROWING PLANTS ON MARS: REQUIREMENTS FOR INFORMATION ON CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MARS REGOLITH.
- Selma M V., Luna MC, Martínez-Sánchez A, Tudela JA, Beltrán D, Baixauli C, Gil MI (2012) Sensory quality, bioactive constituents and microbiological quality of green and red fresh-cut lettuces (*Lactuca sativa* L.) are influenced by soil and soilless agricultural production systems. *Postharvest Biol Technol* 63:16–24. doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.08.002
- Shafahi M, Woolston D (2014) *Aquaponics: A Sustainable Food Production System*. ASME International,
- Shao Y, Li J, Zhou Z, Hu Z, Zhang F, Cui Y, Chen H (2021) The effects of vertical farming on indoor carbon dioxide concentration and fresh air energy consumption in office buildings. *Build Environ*. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107766
- Siomos A, Beis G, Papadopoulou P, Nasi P (2001) Quality and composition of lettuce (cv. 'Plenty') grown in soil and soilless culture.
- Son JE, Kim HJ, Ahn TI (2019) Hydroponic systems. In: *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition*. Elsevier Inc., pp 273–283
- Talukder M, Asaduzzaman M, Tanaka H, Horticulturae TA-S, 2019 undefined Electro-degradation of culture solution improves growth, yield and quality of strawberry plants grown in closed hydroponics.
- Thybo A, Edelenbos M, ... LC-L-FS and, 2006 undefined Effect of organic growing systems on sensory quality and chemical composition of tomatoes.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671–677.

- Trajkova F, Papadantonakis N, Savvas D (2006) Comparative Effects of NaCl and CaCl₂ Salinity on Cucumber Grown in a Closed Hydroponic System.
- Treftz C, Omaye ST (2015) Nutrient Analysis of Soil and Soilless Strawberries and Raspberries Grown in a Greenhouse. *Food Nutr Sci* 06:805–815. doi: 10.4236/fns.2015.69084
- Wong CE, Teo ZWN, Shen L, Yu H (2020) Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming. *Trends Food Sci. Technol.* 106:48–63.
- Yam RSW, Fan YT, Lin JT, Fan C, Lo HF (2020) Quality improvement of netted melon (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus*) through precise nitrogen and potassium management in a hydroponic system. *Agronomy*. doi: 10.3390/agronomy10060816
- Yang T, Kim HJ (2020) Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *J Clean Prod* 274:122619. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122619
- Yannick SH, Guglielmo V, Stijn B, Hulle V, Hosseinzadeh S, Verheust Y, Bonarrigo ÁG, Van Hulle ÁS, Bonarrigo G (2017) Closed hydroponic systems: operational parameters, root exudates occurrence and related water treatment. *Rev Environ Sci Bio/Technology* 16:59–79. doi: 10.1007/s11157-016-9418-6

