

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra kvality a bezpečnosti potravin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Porovnání produkce listové zeleniny v bezpůdních
systémech**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Martin Liška

**Obor studia: Kvalita potravin a zpracování zemědělských
produktů**

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Klouček, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Porovnání produkce listové zeleniny v bezpůdních systémech" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 26. 4. 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Pavlovi Kloučkovi, Ph.D., za profesionální vedení práce a vstřícný přístup a konzultantce Ing. Veronice Tůmové za cenné rady a přátelskou atmosféru, která byla přítomna po celou dobu spolupráce.

Porovnání produkce listové zeleniny v bezpůdních systémech

Souhrn

Diplomová práce byla zaměřena na rekonstrukci aeroponického systému, ve kterém je možná kultivace listové zeleniny. Dva aeroponické systémy, v nichž probíhala kultivace salátu (*Lactuca sativa* L.), využívaly různé druhy výživy. Rostliny v prvním systému byly živeny komerčním hydroponickým roztokem, kdežto v druhém systému byly rostliny kultivovány za využití vody z akvakulturního systému. Zatímco rozdíl v kultivaci bezpůdních systémů, jako je aeroponie, hydroponie a akvaponie, je v literatuře dobře popsán, u využití různých druhů výživy v aeroponii tomu tak není. V rámci experimentu bylo nutné seznámit se s problematikou předpěstování sazenic v substrátu, péče o živinový roztok a o rostliny samotné. Po úspěšné kultivaci v aeroponickém systému byly zjišťovány kvalitativní a kvantitativní rozdíly, které byly zapříčiněny různým druhem výživy. V této práci byl zjištěn rozdíl v nárůstu listové plochy za 35 dní kultivace, nárůstu hmotnosti a počtu listů po sklizni, shoot root ratio, a v obsahu sušiny v salátech z obou systémů. Součástí byl laboratorní rozbor kvalitativních parametrů, kdy byl zjišťován obsah chlorofylu a, chlorofylu b, celkového obsahu karotenoidů a celkového obsahu polyfenolů. Na základě analýzy jednotlivých živinových roztoků bylo zjištěno, že akvakulturní živný roztok nevyhovoval hned v několika aspektech. Nejzásadnějším nedostatkem byl minimální obsah prvků N, P a K, který zapříčinil stres rostliny a odrazil se tak na nedostatečném růstu, nižším výnosu a větším výskytu nekrotických salátů. Ve prospěch systému s komerční hydroponickou výživou vypovídá i senzorická analýza, která byla hodnocena 10 respondenty. Oba způsoby výživy se vyznačují minimální spotřebou vody, která je ve srovnání s kultivací v půdě až 16krát menší.

Klíčová slova: aeroponie, hydroponie, akvaponie, živný roztok, SR ratio, antioxidanty, locika setá

Comparision of leafy vegetable production in soilless systems

Summary

The master thesis was focused on the reconstruction of the aeroponic system, in which it is possible to cultivate leafy vegetables. The two aeroponic systems in which lettuce (*Lactuca sativa* L.) was cultivated used different types of nutrition. The plants in the first system were irrigated with a commercial hydroponic solution, while in the second system the plants were cultivated using water from an aquaculture system. While the difference in the cultivation of soilless systems, such as aeroponics, hydroponics and aquaponics, is well described in the literature this is not the case with the use of different types of nutrition in aeroponics. During the experiment, it was necessary to get acquainted with the problems of pre-growing seedlings in the substrate, care for the nutrient solution and the plants themselves. After successful cultivation in the aeroponic system, qualitative and quantitative differences were found, which were caused by different types of nutrition. In this work, a difference was found in the increase in leaf area over 35 days of cultivation, weight and number of leaves after harvest, shoot root ratio, and dry matter content in salads from both systems. It included a laboratory analysis of qualitative parameters, which determined the content of chlorophyll a, chlorophyll b, the total content of carotenoids and the total content of polyphenols. Based on the analysis of individual nutrient solutions, it was found that the aquaculture nutrient solution was unsatisfactory in several respects. The most fundamental shortcoming was the minimum content of elements N, P and K, which caused the stress of the plant and was reflected in the lack of growth, lower yield and a higher incidence of salad necrosis that were caused. The sensory analysis, which was evaluated by 10 respondents, also speaks in favor of the system with commercial hydroponic nutrition. Both methods of nutrition are characterized by minimal water consumption, which is up to 16 times less compared to cultivation in the soil.

Keywords: aeroponics, hydroponics, aquaponics, nutrient solution, SR ratio, lettuce

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Druhy bezpůdní kultivace	11
3.1.1	Otevřené bezpůdní systémy	11
3.1.2	Uzavřené bezpůdní systémy	12
3.1.2.1	Hydroponický systém	12
3.1.2.2	Akvaponický systém	17
3.1.2.3	Aerponický systém	19
3.1.3	Kultivační média	23
3.2	Kvalita produktů v bezpůdních systémech	26
3.3	Vliv živného roztoku na kvalitu rostlin	27
3.4	Nejpěstovanější plodiny	29
4	Metodika	33
4.1	Návrh aerponické jednotky	34
4.1.1	Technologický návrh	34
4.1.2	Technologický systém	37
4.2	Pěstování, údržba a péče	38
4.2.1	Předpěstování sazeniček	38
4.2.2	Management živného roztoku	40
4.2.2.1	Hydroponický roztok	40
4.2.2.2	Akvaponický roztok	41
4.2.3	Péče o vsazené rostliny	42
4.3	Vyhodnocovací metody	44
4.3.1	Růstové parametry	44
4.3.2	Počítačová analýza obrazu	44
4.3.3	Kvalitativní hodnocení	45
4.3.4	Senzorická analýza	46
4.3.5	Živinové složení roztoků	48
5	Výsledky	49
5.1	Ztráty a spotřeba	49
5.2	Růstové parametry	49
5.3	Počítačová analýza obrazu	50
5.4	Chlorofyl, karotenoidy a polyfenoly	51
5.5	Senzorická analýza	52
5.6	Živinové složení roztoků	53

6	Diskuze.....	56
6.1	Živinový roztok.....	56
6.2	Kvalita a kvantita.....	57
7	Závěr	59
8	Literatura	60

1 Úvod

Půda je obvykle nejdostupnější pěstebním médiem pro rostliny. Rostlinám poskytuje ukotvení, živiny, vzduch a vodu. Avšak půda růst rostlin někdy vážně omezuje. V některých půdách mohou být přítomné choroboplodné mikroorganismy a hlístice. Dále mohou růst rostlin negativně ovlivnit nevhodné půdní reakce, nežádoucí zhutnění půdy, špatná drenáž nebo degradace půdy v důsledku eroze. Kromě toho je zemědělství na otevřeném poli obtížné, protože je k němu potřeba relativně velká plocha, zahrnuje mnoho manuální práce a velkou spotřebu vody. Ve většině městských a průmyslových oblastech je půda pro pěstování rostlin méně dostupná, jiné oblasti mohou trpět na nedostatek úrodných obdělávatelných orných půd, kvůli jejich nepříznivým geografickým a topografickým podmínkám.

Jelikož lidská populace stále narůstá a moderní civilizace se stále rozšiřuje, plocha orné půdy je každým dnem redukována. Aby se taková situace vyřešila, nabízí se zde nové technologie bezpůdního pěstování rostlin, jako je hydroponie, akvaponie a aeroponie. Při těchto technikách pěstování jsou kořeny rostlin ponořeny nebo obštrikovány živným roztokem. Když se minerální živiny rozpustí ve vodě, kořeny rostlin jsou schopny je absorbovat. Když jsou potřebné minerální živiny zavedeny do přívodu vody rostlině uměle, půda už je naprosto nepotřebná k tomu, aby se rostlině dařilo. Bepůdní pěstování dokáže pokrýt požadavky na růst rostlin se stejnými výsledky růstu a výnosu, jako pěstování v půdě.

Tímto způsobem pěstování se může vyřešit produkce čerstvé zeleniny v zemích s omezenou ornou půdou, i v malých zemích s velkým počtem obyvatel. Může být zajištěn dostatek zeleniny pro domorodé obyvatelstvo i pro turisty v zemích, kde cestovní ruch hraje v jejich ekonomice zásadní roli. Typickými příklady takových oblastí jsou západní Indie a Havaj. Kvůli obrovskému turistickému průmyslu je plocha zemědělské půdy pro pěstování rostlin velice malá.

Tyto systémy pěstování rostlin tak pomohou čelit změnám klimatu a uplatní se při zmírnění podvýživy stále narůstající lidské populace. Také v budoucnosti budou mít tyto technologie pěstování zásadní význam v souvislosti s vesmírným programem. Bepůdní pěstování je přínosem pro současný i budoucí vesmírný průzkum, pro kolonizaci Měsíce nebo pro dlouhodobou kolonizaci Marsu. Z dosavadních poznatků víme, že ve vesmíru není půda, která by podporovala kultivaci rostlin a transport půdy raketoplány ze Země je příliš obtížný. Bepůdní systémy pěstování rostlin by mohly být klíčem pro zajištění rostlinné produkce při budoucí kolonizaci vesmíru.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Cílem diplomové práce je porovnání růstu a kvality produkce salátu – lociky seté (*Lactuca sativa*L.) pěstované v bezpůdních systémech za využití dvou různých druhů výživy – komerční hydroponické výživy a vody odebrané z reálného akvaponického provozu, která obsahuje pouze živiny pocházející z rybí části akvaponické produkce.

Hypotézy:

- 1) Sestavený aeroponický systém bude vyhovovat pro kultivaci salátu.
- 2) Mezi testovanými druhy výživy budou existovat rozdíly v objemu produkce salátu i v parametrech jeho kvality.

3 Literární rešerše

Bezpůdní kultivace zahrnuje všechny metody a systémy pěstování rostlin bez použití půdy, jako je vodní, písečná, štěrková, keramzitová kultivace, aeroponie, trubkové systémy a podobně (Schwarz 1995). Resh 2013 uvádí, že bezpůdní systémy mohou být definovány jako „jakýkoli způsob pěstování rostlin bez použití půdy jako kořenového média, ve kterém jsou anorganické látky absorbované kořeny dodávány zavlažovací vodou“. Funkce bezpůdní kultivační metody je stimulace růstu rostliny za stálé kontroly množství přivedené vody, minerálů, soli a rozpuštěného kyslíku. Základní koncept je jednoduchý. Kořeny rostlin rychle absorbují živiny a kyslík, jsou-li drženy v tekoucí vodě. Pokud je obsah rozpuštěného kyslíku ve vodě nedostatečný, růst rostliny je pomalý. Naopak je-li voda bohatá na rozpuštěný kyslík, růst rostliny se zrychlí. Proto úkolem pěstitele zůstává snaha vyvážit kombinaci potřebné vody, živin a kyslíku podle potřeb rostliny, aby došlo k maximalizaci výnosu a kvality. Pro dosažení nejlepších výsledků je třeba vzít v úvahu několik důležitých parametrů, jako je teplota, vlhkost, hladina CO₂, intenzita světla, ventilace, pH a genetika rostliny. Nepotřebují tedy půdu, potřebují ale dodávat minerální látky, jako je dusík, draslík, fosfor, vápník, hořčík, síra, železo, mangan, měď, zinek, molybden, bór, chlor a vitaminy (El-Kazzaz 2017).

Téměř každá rostlina může být pěstována v bezpůdních systémech. Tyto techniky se doposud používaly hlavně při pěstování zeleniny a zahradních rostlin, lze je ale použít i pro kultivaci ostatních rostlin. Níže v tabulce 1 je uveden seznam konkrétních plodin, které byly úspěšně pěstovány v podmínkách bez půdy (Hussain et al. 2014).

Tabulka 1: Seznam plodin, které lze pěstovat na komerční úrovni v bezpůdních systémech; zdroj: Hussain et al. 2014

Druh plodin	Název plodin
Cereálie	<i>Oryza sativa</i> (rýže), <i>Zea mays</i> (kukuřice)
Ovoce	<i>Fragaria ananassa</i> (jahoda)
Zelenina	<i>Lycopersicon esculentum</i> (rajče), <i>Capsicum frutescent</i> (chilli), <i>Solanum melongena</i> (lilek), <i>Phaseolus vulgaris</i> (fazole), <i>Beta vulgaris</i> (řepa), <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> (Fazole Goa), <i>Capsicum annum</i> (paprika), <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> (zelí), <i>Brassica oleracea</i> var. <i>botrytis</i> (květák), <i>Cucumis sativus</i> (okurka setá), <i>Cucumis melo</i> (meloun), <i>Raphanus sativus</i> (ředkvička), <i>Allium cepa</i> (cibule)
Listová zelenina	<i>Lactuca sativa</i> (salát), <i>Ipomoea aquatica</i> (povíjnice vodní)
Bylinky	<i>Petroselinum crispum</i> (petržel), <i>Mentha spicata</i> (máta), <i>Ocimum basilicum</i> (bazalka), <i>Origanum vulgare</i> (oregano)
Květiny	<i>Tagetes patula</i> (aksamitník), <i>Rosa berberifolia</i> (růže), <i>Dianthus caryophyllus</i> (karafiát), <i>Chrysanthemum indicum</i> (chryzantéma)
Léčivé rostliny	<i>Aloe vera</i> (aloe), <i>Solenostemon scutellarioides</i> (koleus)
Pícniny	<i>Sorghum bicolor</i> (čirok), <i>Medicago sativa</i> (vojtěška), <i>Hordeum vulgare</i> (ječmen), <i>Cynodon dactylon</i> (troskut), <i>Axonopus compressus</i>

3.1 Druhy bezpůdní kultivace

Existují dva hlavní typy bezpůdní kultivace. Je to otevřená bezpůdní kultura a uzavřená bezpůdní kultura (El-Kazzaz 2017).

3.1.1 Otevřené bezpůdní systémy

V otevřených bezpůdních systémech jsou živiny i voda dodávány rostlinám kapkovou závlahou podobnou jako u konvenčního pěstování rostlin, kdy je živný roztok volně vypuštěn ze systému (Resh 2013). V těchto systémech musí být dodržen dostatečný přítok, aby se do kořenového systému rostliny dostal dostatek živin. Dodávaný živný roztok je determinován jako loužení, tj. objemový poměr výluhu aplikovaného živného roztoku. Zpravidla bývá používán pouze substrát a kapková závlaha (Maya Waiba et al. 2020). Výluh může být shromažďován a znovu použit k hnojení půdy, ale ve většině případů dojde k volnému vypuštění roztoku a následnému možnému poškození životního prostředí (Resh 2013). (Maya Waiba et al. 2020) dále dělí otevřené bezpůdní systémy na typy popsané níže. Názvy technik nejsou v češtině používány, proto jsou uvedeny v angličtině.

1) Root dipping technique

V této technice je zelenina pěstována v květináčích, které mají na dně malé otvory a jsou naplněny substrátovým médiem, jako je např. kokosová rašelina, a jsou umístěny do nádoby s živným roztokem. Spodní část květináčů (minimálně 1-3 cm) zůstává v těsném kontaktu s živným roztokem (Hayden et al. 2004). Kořeny rostlin jsou z části ponořeny hluboko v živném médiu a některé z nich pouze visí ve vzduchu. Jedná se o snadný, avšak ekonomicky efektivní systém pro pěstování malé listové zeleniny, jako je koriandr nebo celer (Maksymiec 1998).

2) Hanging bag technique

Tato technika využívá asi 1 m dlouhé, válcové, bílé (uvnitř černé), UV ošetřené, polyethylenové vaky, naplněné sterilizovaným kokosovým vláknem. Tyto „tašky“ jsou na spodním konci uzavřeny a nahoře připevněny k malé PVC trubce. Vaky jsou zavěšeny svisle a jsou umístěny nad kanálem určeným pro sběr živného roztoku. Proto je tato technika známa jako „verti-grow“. Sazenice nebo jiný sadbový materiál vypěstovaný v síťových květináčích jsou vtlačovány do otvorů po stranách zavěšených vaků. Živný roztok je čerpán do horní část každého zavěšeného vaku pomocí mikro mlžiče. Tyto mikro zavlažovače rovnoměrně distribuují živný roztok uvnitř vaku. Přebytný roztok se shromažďuje v kanálu, do kterého odtéká otvory vytvořenými ve spodní části vaků, a odtéká zpět do zásobní nádrže pro živný roztok (Hussain et al. 2014). Díky této technice dnes můžeme úspěšně pěstovat zeleninu, jako; salát, hořčice, koriandr, celer nebo jahody (Maya Waiba et al. 2020).

3) Trench technique

V této technice je zelenina pěstována nad zemí – v příkopech postavených pomocí betonových bloků. Aby se zabránilo přímému kontaktu růstového média

s půdou, jsou vnitřní obklady příkopů pokryty silnými polyethylenovými deskami, odolnými proti UV záření (Maya Waiba et al. 2020). Širší příkopy umožní růst dvou řad rostlin. Jejich hloubka se liší v závislosti na rostoucích rostlinách, minimálně je však zapotřebí 30 cm. Jako médium lze pro tuto techniku použít starý kokosový prach, písek, šterk, rašelinu, vermikulit, perlit, staré piliny nebo směs těchto materiálů (Hussain et al. 2014). Všechny potřebné živiny s vodou cirkulují kapkovým systémem poháněným vodním čerpadlem, nebo je – podle dostupnosti pracovní síly – možná i ruční aplikace živného roztoku (Maya Waiba et al. 2020). K cirkulaci roztoku může být použita perforovaná trubka o průměru 2,5 cm, kterou je následně živný roztok vypuštěn. Dnes touto metodou můžeme úspěšně vypěstovat salát, koriandr, špenát, ale i vysoké rostoucí rostliny, jako vinná réva, okurky, rajčata apod., které však k udržení váhy svých plodů potřebují další oporu (Hussain et al. 2014).

3.1.2 Uzavřené bezpůdní systémy

Ve srovnání s otevřeným bezpůdním systémem pěstování, vyžaduje uzavřený bezpůdní systém častější a přesnější kontrolu živného roztoku, technické know-how a zároveň je systém citlivější na provozní chyby, zejména během jara a léta, kdy důsledkem zvyšující se teploty může dojít ke zvýšení koncentrace živin v roztoku (Resh 2013). V uzavřených bezpůdních systémech jsou rozpuštěné živiny recyklovány, stanovovány a následně doplňovány na požadovanou koncentraci. Udržování živin v těchto systémech je velice důležité, jejich obsah musí být za všech okolností měřen minimálně každý týden. Pokud takový dohled chybí, může se množství živin velice snadno vychýlit z požadovaného obsahu živin v roztoku, což často zapříčiní usmrcení rostliny (El-Kazzaz 2017). Vrácený živný roztok musí být ošetřen tak, aby bylo obnoveno jeho původní složení, a aby z něj byly odstraněny jakékoliv cizí látky. V neposlední řadě může dojít k šíření nemocí přenášených kořeny, musí být tedy zajištěna i sterilizace roztoku (Resh 2013).

3.1.2.1 Hydroponický systém

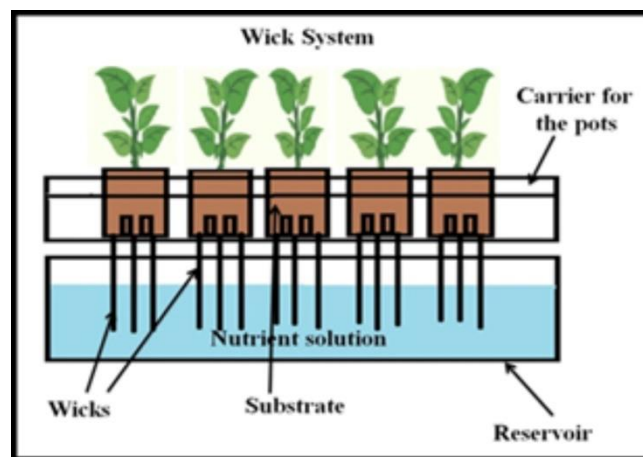
Hydroponie je jednoduše definována jako pěstování rostlin ve vodě, bez půdy. Rostliny nepotřebují půdu, ale živiny, které jim půda může poskytnout. Dalšími nutnými faktory jsou světlo, voda, oxid uhličitý a kyslík v kořenové zóně. V hydroponii jsou rostliny pěstovány v inertním médiu, jako jsou kamínky nebo kokosové vlákno a jsou živeny roztokem, obsahujícím primární i sekundární nutrienty. Téměř každý druh rostlin je možné pěstovat hydroponicky, počínaje zeleninou, bylinkami, ovocem a konče květinami (El-Kazzaz 2017). Oproti pěstování v půdě poskytuje hned několik výhod. Jelikož pěstování probíhá ve většině případů ve sklenících, v nichž můžeme regulovat, lze rostliny pěstovat celoročně. Protože se kořeny rostlin pro dosažení živin nemusí rozpínat tak, jako je tomu v půdě, mohou být umístěny blíže k sobě. Tím je zvýšen výnos z menší plochy (Maya Waiba et al. 2020). Živný roztok v hydroponii udržuje stejné množství živin po celou dobu pěstování, zatímco půda má tendenci se „opotřebovávat“. Kombinací těchto faktorů je zajištěna větší produkce rostlin z hydroponie,

než z pěstování v půdě (Chapman & Chapman 1980). Tato metoda je zároveň řešením celosvětově obávaného nedostatku vody. Při hydroponii je použito pouze 12,5 % vody v porovnání s konvenčním pěstováním rostlin. To je další důvod, proč je hydroponie pro zemědělce stále populárnější, výrazně totiž šetří vodu (Maya Waiba et al. 2020).

Následuje přehled využívaných systémů, avšak nenáročnost a vysoká variabilita této metody nabízí možnost sestrojení vlastního systému, který bude vyhovovat samotnému pěstiteli i rostlině.

1) Knotový systém

Je to ten nejjednodušší, ze všech typů hydroponických systémů. Tradičně nemá žádné pohyblivé části, nevyužívá žádná vodní oběhová čerpadla ani elektřinu. To může být užitečné v místech, kde je přívod elektřiny problémem (Maya Waiba et al. 2020). Wick (knot) je spojující částí mezi rostlinou v květináči a zásobníkem se živným roztokem a pomáhá tak s cirkulací roztoku do kořenové zóny rostliny (El-Kazzaz 2017). Princip knotového systému je zobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Knotový systém; zdroj: El-Kazzaz (2017)

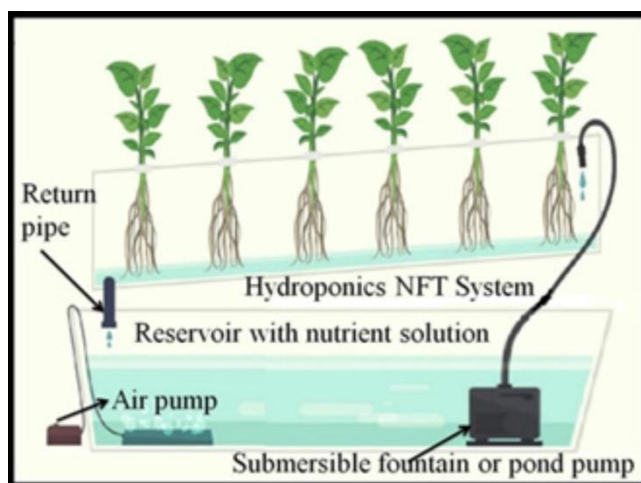
2) Nutrient film technique (NFT)

NFT je hydroponická technika, při níž velmi tenká vrstva (film) živného roztoku protéká vodotěsnými kanály (vpusti, žlaby), ve kterých leží holé kořeny rostlin. Kanálky jsou v 1,2 – 3 % sklonu, na vyšším místě je aplikován živný roztok, který volně stéká dolů kanálky a udržuje kořeny mokré. Tenká vrstva vody (1 – 2 mm) zajišťuje dostatečné okysličení kořenů. Spodní část kanálků je napojena na potrubí, kterým je živný roztok recirkulován zpět do sběrné nádrže. Je důležité vyhnout se tomu, aby byly kanálky bez sklonu, protože může dojít k situaci, že by voda stála na místě, čímž dojde k vyčerpání kyslíku a následnému zpomalení růstu rostlin (Resh 2013).

Kanálky jsou zpravidla vyrobeny z různých druhů plastových materiálů, jako je polyethylen, polyvinylchlorid (PVC) a polypropylen. Základna kanálku musí být rovná, aby udržovala rovnoměrný a mělký proud kapaliny (Pradhan & Deo 2019). V závislosti na plodině a velikosti kanálků se vstupní průtok pohybuje mezi 1 – 3 litry za minutu. U plodin jako je salát se doporučuje menší průtok vody, u plodové zeleniny se doporučuje

průtok větší. Dále musíme vzít v potaz stáří rostliny. Pro mladé rostliny je lepší průtok menší, pro starší plodiny větší (Sheikh 2006).

Přísun živného roztoku může být kontinuální ve 24hodinovém cyklu, nebo přerušovaný (aby se zlepšilo okysličení kořenového systému). Další možností je kompromis mezi těmito přístupy – kontinuální recirkulace živného roztoku během dne (od úsvitu do soumraku) a automatické vypínání na noc. Nicméně pokud je recirkulace živného roztoku přerušovaná, objemová kapacita sběrné nádrže musí být dostatečně velká, aby dokázala pojmout veškerý živný roztok obsažený v systému, když je recirkulace vypnutá. Před přesazením jsou obvykle kanálky pokryty polyethylenovou fólií černé barvy na bílé (tloušťka 0,15 – 0,25 mm) tak, aby bílá strana směřovala ven (aby odrazila světlo a zabránila nadměrnému zahřátí kořenového a živného roztoku) a černá strana dovnitř (aby se zabránilo přenosu světla a následnému vývoji řas) (Resh 2013). Princip NFT je zobrazen na obrázku 2.



Obrázek 2: Nutrient film technique; zdroj: El-Kazzaz (2017)

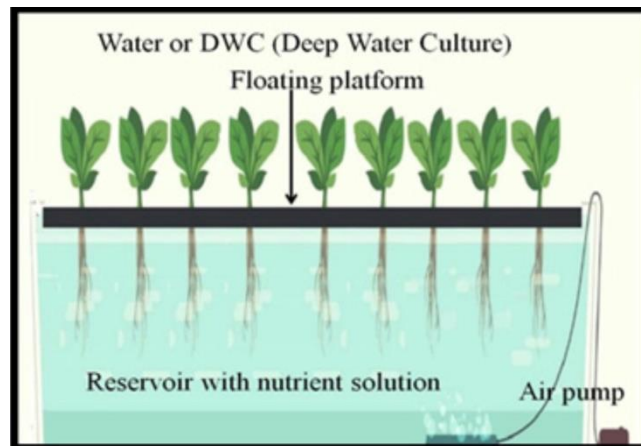
3) Deep flow technique (DFT)

DFT je další metoda, při které jsou kořeny trvale vystaveny pohybujiící se vodě s živinami. Zatímco u NFT je vodní proud co nejtenčí, u DFT má nepřetržitě proudící živný roztok hloubku 50 – 150 mm (Resh 2013). Roztok protéká PVC trubkami o průměru 10 cm a spádem do sběrné nádrže je roztok provzdušněn, není tedy potřeba vzduchovacích kamenů (Hussain et al. 2014). Rostliny jsou pěstovány na polystyrenových vaničkách, které plavou na vodě (Resh 2013). Zakládají se v plastových síťových květináčích a následně jsou připevňovány k otvorům v PVC trubkách, ve kterých proudí živný roztok. Jako materiál pro výsadbu k naplnění síťových nádob lze použít např. starý kokosový prach, karbonizované rýžové slupky nebo směs obojího (Hussain et al. 2014).

4) Deep water culture (DWC)

V této technice hydroponického systému jsou rostliny umístěny na plovoucí plošině v lázni s živným roztokem. Kyslík je do kořenové zóny rostliny dodáván vzduchovým čerpadlem, které běží nepřetržitě (El-Kazzaz 2017). Tento systém může

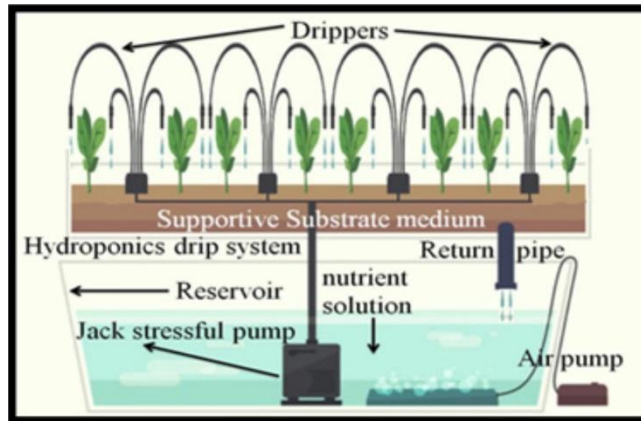
být jednoduše sestaven pomocí skleněných nádob, akvárií, plastových boxů nebo betonových nádob pokrytých polypropylenovými deskami (Resh 2013). Vzhledem k tomu, že rostliny plavou v živném roztoku a jsou s ním v neustálém kontaktu, není zde žádné riziko poškození rostlin v případě krátkodobého výpadku proudu nebo úplného zastavení vzduchového čerpadla. Nejběžnější zeleninou pěstovanou v tomto systému je salát, čínské zelí nebo špenát, ale daří se v něm i jahodám a bylinkám (Maya Waiba et al. 2020). Princip DWC je zobrazen na obrázku 3.



Obrázek 3: Deep water culture; zdroj: El-Kazzaz (2017)

5) Drip system

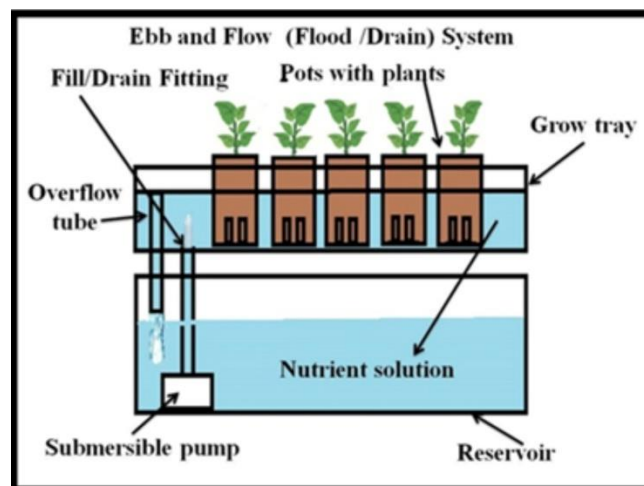
Tento systém je sestaven ze dvou kontejnerů, z nichž jeden je umístěn výš než ten druhý. V horním kontejneru je pěstována zelenina, zatímco ve spodním je živný roztok. K cirkulaci živného roztoku je používáno vodní čerpadlo, k okysličování vody pak akvarijní vzduchový kámen a obě jednotky běží nepřetržitě (Maya Waiba et al. 2020). Čerpadlo řízené časovačem načerpává živný roztok do rozstřikovačů, které jsou umístěné u stonku každé rostliny. Živný roztok je dále filtrován dolů ke kořenům rostliny přes podpůrný substrát a odváděn zpět do sběrné nádrže (El-Kazzaz 2017). Mlžení je obvykle prováděno v pravidelných intervalech, aby kořeny byly stále vlhké. Pokud je cyklus mlžení narušen, kořeny rychle vyschnou (Pradhan & Deo 2019). Téměř jakákoliv plodina v tomto systému poroste dobře, vhodné jsou obzvláště rostliny s velkými kořenovými baly, jako jsou např. brambory (El-Kazzaz 2017). Princip drip systému je zobrazen na obrázku 4.



Obrázek 4: Drip system; zdroj: EI-Kazzaz (2017)

6) Ebb and flow systém

Ebb and flow systém je další levný typ hydroponického pěstování. Jeho princip je podobný drip systému, kdy jsou zapotřebí dva kontejnery, jeden obsahující rostliny se substrátem nahoře a druhý naplněný živným roztokem dole. V tom případě však živný roztok není do horního kontejneru přiváděn mlžením, je čerpán ve velkých objemech, dokud nedojde k zaplavení nádoby (Pradhan & Deo 2019). Aby nedošlo k úplnému zaplavení rostlin, je v kontejneru umístěna přepadová trubice, jejíž otvor je obvykle umístěn ve stejné úrovni spodní části stonku, kde začínají růst kořeny rostlin a veškerá přebytečná kapalina je recirkulována do spodního kontejneru. V tomto systému je čerpadlo zapnuto přerušovaně (přibližně 30 minut zapnuto, 15 minut vypnuto), aby se odpovídajícím způsobem zaplavila růstová nádoba (El-Kazzaz 2017). U této techniky není vyžadován vzduchový kámen, k okysličení živného roztoku dochází během nečinnosti čerpadla, kdy jsou z růstové nádoby živiny odsávány potrubím čerpadla (Maya Waiba et al. 2020). Princip systému ebb and flow je zobrazen na obrázku 5.



Obrázek 5: Ebb and flow system; zdroj: EI-Kazzaz (2017)

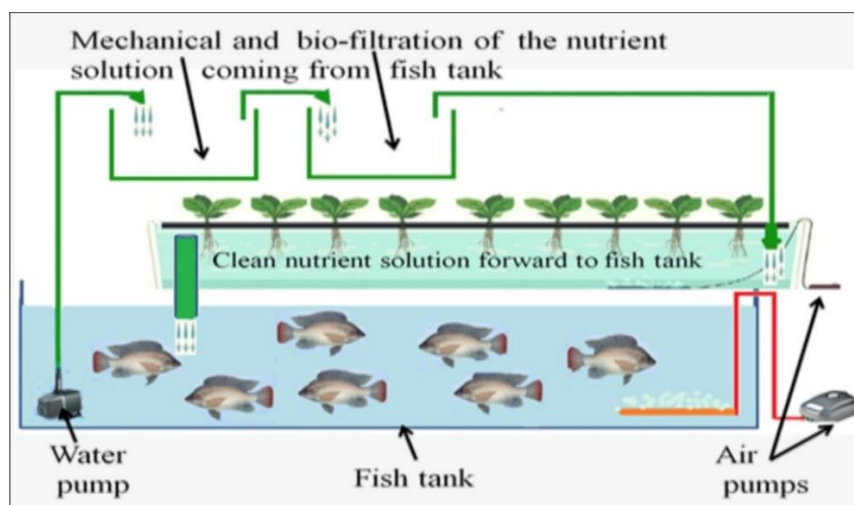
3.1.2.2 Akvaponický systém

Akvaponie je systém akvakultury, ve kterém jsou vodní živočichové, jako jsou hlemýždi, ryby, raci nebo krevety, chovány v nádržích, ve kterých společně s pěstovanými rostlinami žijí v symbiotickém prostředí. Akvakultura je kombinována s hydroponií a společně tak vytváří model udržitelné produkce potravin (El-Kazzaz 2017). Podle Tilman & Clark (2014) je tato forma pěstování považována za jeden z neúčinnějších a neudržitelnějších systémů produkce živočišných bílkovin, protože ryby obecně vyžadují méně krmiva na kilogram váhového přírůstku než všechny ostatní zemědělské živočišné produkty, jako je hovězí, skopové a kozí maso. V akvaponii lze navíc ztráty krmiva a rybí odpad opětovně použít a přeměnit ho na cennou rostlinnou biomasu. Pokud jde o efektivitu využití vody, akvaponie je potencionálně účinnější než současné samostatné systémy konvenčních recirkulačních akvakulturních systémů (RAS) a hydroponie (Palm et al. 2018).

Základní uspořádání akvaponického systému je jednoduché a zahrnuje pouze tři druhy živých organismů: ryby, prospěšné bakterie a rostliny. Jejich vzájemné vztahy jsou však velmi složité a vzájemně závislé. Systém navíc obsahuje neodmyslitelnou složku, kterou je amoniak vylučovaný rybami (Konig et al. 2016). Dalším problémem jsou poněkud kontrastní požadavky na ryby, rostliny a bakterie, které tak ztěžují dosažení maximálního potencionálního výnosu (Kloas et al. 2015).

Výběr rostlinného materiálu v akvaponických systémech souvisí s hustotou osazení nádrží a následnou koncentrací živin v akvakulturním proudu. Zelenina jako salát, špenát, pažitka, bazalka a řeřicha mají nízké až střední nutriční požadavky a v akvaponických systémech jsou přizpůsobivé. Plodící rostliny, jako jsou rajčata, papriky a okurky mají vyšší nutriční požadavky, akvakulturní voda tedy musí být silně zásobena (Diver 2006).

Recirkulačním akvakulturním systémům je přizpůsobeno několik druhů teplovodních a studenovodních druhů ryb, např. tilapie, pstruh, okoun, treska nebo siven arktický. Většina komerčních akvaponických systémů však využívá tilapii (Diver 2006). Vodní organismy lze chovat v monokultuře i v polykultuře (polyponika = použití více druhů ryb v akvaponii) (Knaus & Palm 2017).



Obrázek 6: Akvaponický systém; zdroj: El-Kazzaz (2017)

V akvaponii je k hnojení hydroponicky pěstovaných rostlin využívána odpadní voda z rybích nádrží, která je bohatá na živiny. To je dobré pro ryby, protože živiny generované z rybích výkalů, řas a rozkládajících se krmiv, by se časem mohly nahromadit až do toxické úrovně (Diver 2006). Nejnebezpečnějším produktem je amoniak, který je rybami vylučován výkaly. Aby byla voda v akváriích od tohoto toxického materiálu očištěna, je pomocí čerpadla přepouštěna do hydroponických systémů, kde je amoniak rozložen na dusitany a následně na dusičnany vlivem nitrifikačních bakterií, které žijí na povrchu růstových loží (Maya Waiba et al. 2020). Takto upravené živiny jsou vstřebány kořeny rostlin a vyčištěná voda je odváděna zpět do akvakultury (EI-Kazzaz 2017). Obrázek 6 objasňuje základní části akvakultury s hydroponií.

Do vody nemusí být přidávány žádné živiny, jejich obsah je v odpadní vodě z nádrží dostatečný (Maya Waiba et al. 2020). Podle Palm et al. (2018) je alespoň 80 % živin potřebných pro optimální růst rostlin poskytnuto pouze z rybiho odpadu. Moderní akvaponie často používá další hnojiva k doplnění živin, které voda z akvakultury nedokáže poskytnout. Proto akvaponie zahrnuje širokou škálu systémů, od kompletních recirkulačních jednotek, jež používají jako zdroj živin pouze krmivo (jednosmyčková a dvousmyčková akvaponie), až po oddělené akvakulturní a hydroponické jednotky s významným přídatkem živin a kontrolou vody.

Hlavní slabinou ve vývoji rozsáhlejších akvaponických systémů je jejich ekonomická udržitelnost ve srovnání se samostatnými systémy (RAS, hydroponie) a různé faktory (např. spotřeba energie), které ovlivňují ekonomický úspěch a neúspěch. Podle studie Vermeulen & Kamstra (2013), je výsledek negativní z hlediska vynaložených nákladů. Love et al. (2015), kteří shrnuli akvaponické systémy, se zvláštním zřetelem na USA, diskutovali o široké škále výrobních systémů, kde jich přibližně 31 % mělo potencionální schopnost dosáhnout ziskovosti nebo ekonomické udržitelnosti. Společnosti, které měly nejlepší prognózy, byly ty, které disponovaly speciálními materiály (systémové komponenty) a vlastním know-how. Podobně jako u technologie RAS mohou být investiční náklady, např. do nejmodernějších skleníkových technologií, vysoké, což může mít za následek možná ekonomická omezení nebo dokonce ztrátu investovaného kapitálu.

Pěstitelé na akvaponii nahlíží jako na způsob zavádění ekologických hydroponických produktů na trh, protože jedinými vstupními živinami do rostliny je rybí krmivo a výkaly, které prochází biologickým procesem. Pro pěstitele je akvaponie přirozeně atraktivní v oblasti specializovaného marketingu, jelikož vytváří dva produkty pocházející z jedné výrobní jednotky. Tento systém bezpůdního pěstování navíc může kromě produkce čerstvé zeleniny poskytnout i přísun rybích bílkovin v oblastech s omezeným množstvím půdy a vody (Diver 2006).

3.1.2.3 Aeroponický systém

Aeroponie je systém pěstování rostlin bez začlenění půdy nebo substrátu, při němž rostlina roste ve vzduchu za pomoci umělé podpory (Osvald et al. 2001). V podstatě je to systém pěstování, kde jsou kořeny rostlin zavěšeny uvnitř zakryté nádoby ve tmě a jsou otevřeně vystaveny vzduchu, aby mohly absorbovat vodní postřík s živinami, který je zajišťován tryskami. Nadzemní části rostliny jsou od kořenů odděleny uměle vytvořenou strukturou s otvory (Barak et al. 1996). Jelikož jsou kořeny vystaveny vzduchu, rychle vysychají, a proto musí být roseny pravidelně (Resh 2013). Aby bylo dosaženo naprosté tmy, musí být kořenová nádoba vyrobena ze světlo nepropustných materiálů. Kořeny tak mohou dobře fungovat a zároveň je potlačen růst řas, které rostliny omezují v růstu a znečišťují systém (EI-Kazzaz 2017).

K mlžení kořenů je využíváno čerpadlo řízené časovačem, stejně jako u podobných hydroponických systémů. Systém aeroponie ale potřebuje časovač na krátké cykly, aby spustil čerpadlo pouze na několik sekund každé 2–3 minuty (Lakhari et al. 2018). Frekvence ostřikování se ale liší podle druhu rostliny, její růstové fáze, vegetačního období a denní doby (Resh 2013).

Po každém ostřiku je nevstřebaná voda shromažďována ve spodní nádrži, trubkami odváděna pryč a znovu recirkulována. Aeroponicky pěstované rostliny však mohou zažít silný tepelný stres, obzvláště v létě. Další nevýhodou je neschopnost rostliny vypořádat se s přerušením toku živného roztoku (např. při výpadku proudu) (Resh 2013).

Oteng-Darko et al. (2017) uvádějí, že kořenový systém je v aeroponickém systému vyživován rychle a za kontrolovatelných podmínek. Řízené podmínky zahrnují jednotnou koncentraci živin, hodnoty EC a pH, teplotu, vlhkost, intenzitu světla, frekvenci atomizace, čas atomizačního postříku, čas atomizačního intervalu a dostupnost kyslíku. Rostlina však v systému roste rychle díky sterilnímu prostředí a dobré dostupnosti kyslíku v růstové komoře. Bylo také zjištěno, že v aeroponii jsou v kořenové zóně zvýšeny účinky hladiny CO₂ a teploty vzduchu. Při fotosyntetických výměnách plynů, je zvýšen příjem dusičnanů v kořenech a snížen celkový obsah dusíku v listech. Podle studií obecně platí, že rostliny pěstované tímto způsobem měly větší výnosy a srovnatelný obsah fenolických látek, flavonoidů a antioxidantů, než rostliny pěstované v půdě (Chandra et al. 2014).

Kultivace rostlin ve vzduchu snižuje mechanická poškození a s nimi spojený výrazný růst, ve srovnání s půdou, pískem a dokonce s provzdušněnou hydroponií. Naprostá kontrola intervalu a doby trvání atomizačního postříku umožňuje dávkovat příjem živin a jejich koncentraci v rostlině v čase za různých podmínek (Lakhari et al. 2018).

Systém živinové mlhy a používání minimálního množství vody poskytuje vynikající prostředí pro růst rostlin (Buer et al. 1996). Clawson et al. (2019) zkoumali užitečnost aeroponického systému pro vesmírné lety a ukázalo se, že přispívá k pokroku v několika oblastech studií kořenů rostlin. Studie zahrnují kořenové mikroorganismy, reakce kořenů na sucho, účinky koncentrace kyslíku na růst kořenů, produkci arbuskulárních mykorhizních hub a rozdíly v růstu kořenů u různých kultivarů rostlin. Systém dosáhl výsledku redukce spotřeby vody o 99 %, živin o 50 % a o 45 % méně času, než pěstování v půdě (NASA 2006). Přizpůsobivost systému by vědcům mohla pomoci s budoucí kultivací rostlin ve vesmíru.

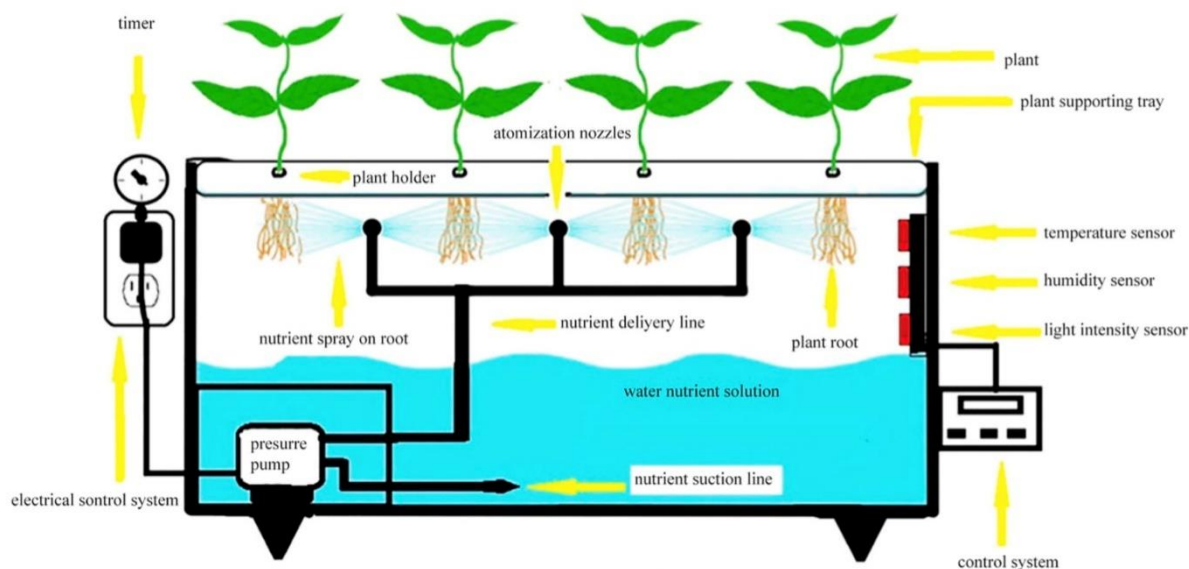
Aeroponický systém má tedy potenciál zvýšit výnosy a snížit náklady na produkci rostlin a tím je tak přístupnější pěstitelům v rozvojových zemích (Lakhiar et al. 2018).

3.1.2.3.1 Druhy aeroponických systémů

Dle El-Kazzaz (2017) existují tři druhy systémů aeroponie. První je vysokotlaký aeroponický rámec, který obecně nevyužívá vodní čerpadlo, kvůli rozdílným zavlažovacím cyklům a jejich časům. Zpravidla se skládá ze dvou částí, které jsou odděleny elastickou přepážkou. Živinový roztok je na jedné straně, vzduch na druhé. Důležitým mechanismem je vzduchový kompresor, kterým je živinová nádrž natlakována a živný roztok je hnán trubkami do nádrže se vzduchem. Trubky musí být opatřeny solenoidem, který se díky časovači ve správnou chvíli otevře a roztok je tak rozprašován na kořeny ve vzduchové nádrži. Aeroponické systémy využívají vysoký tlak (60–90 psi).

Druhý je nízkotlaký aeroponický rámec, který je nejtypičtější. Nízkotlaké systémy využívají ponorná vodní čerpadla, která ovšem musí být dostatečně výkonná, aby voda po zapnutí jen volně nevytekla z trysky. Čím více trysek je použito, tím musí být čerpadlo výkonnější. Nejběžnější aeroponický systém fungující na principu vodního čerpadla je zobrazen na obrázku 7.

Třetím rámcem jsou ultrazvukové mlhovače, které v aeroponických systémech vytvářejí mlhu. I přes to, že mlhu vytvářejí, v kořenových systémech je vlhkost malá. Mlha má navíc tendenci klesat k základně nádrže, proto musí být mlhovače neustále spuštěné.



Obrázek 7: Aeroponický systém; zdroj: Lakhiar et al. (2018)

I aeroponie je technologií, která se v nedávné době připojila k inteligentnímu zemědělství. Internet of Things (IoT) je rozvíjející se technologie, která poskytuje připojení k internetu a výkonné analytické funkce k vytvoření systému, v němž mohou být objekty ve fyzickém světě připojeny k internetu pomocí senzorů. Kerns & Lee (2017) navrhli automatizovaný systém aeroponie využívající systém IoT, který pomáhá zemědělcům zvýšit jejich produkci.

System IoT funguje na třech hlavních komponentech, tj. mobilní zařízení, servisní platforma a senzory s IoT zařízením. Kerns & Lee (2017) také navrhli mobilní rozhraní, díky kterému může uživatel prostřednictvím servisní platformy snadno kontrolovat hodnoty každého senzoru v aeroponickém systému. Tato platforma ukládá ze senzorů data, jako je teplota, vlhkost, rovnováha pH, hladina živin, intenzita LED osvětlení a hladina vody.

Dále pomocí IoT implementovali modul shromažďující data ke každému senzoru. Kerns & Lee (2017) dále použili zařízení Raspberry PI Zero, které shromažďuje informace ze senzorů (rovnováha pH, teplota, vlhkost) a ovládá vodní a dávkovací čerpadlo pro připuštění živin do vody. Jestliže zařízení zaznamená pokles úrovně výživy pod určitou prahovou hodnotu, spustí relé a připojená dávkovací čerpadla začnou pracovat na přidání výživy do roztoku. Pokud úroveň živin překročí prahovou hodnotu, zařízení čerpadlo vypne. Proces ponorného čerpadla funguje stejně jako proces dávkovacího čerpadla. Obdobně může uživatel regulovat i pH, teplotu, intenzitu osvětlení a vlhkost. Očekává se, že takto navržený systém bude slibnou aplikací, která pomůže farmářům zvýšit produkci plodin v inteligentním zemědělském systému.

3.1.2.3.2 Hlavní kultivační faktory

1) Trysky a velikost kapek

Kořenům rostlin jsou živiny dodávány mlhou z atomizačních trysek. Atomizace je metoda rozpadu molekul kapaliny na jemné kapičky (Avvaru et al. 2006). Nejběžnější systémy aeroponie využívají natlakovanou vodu, která je na kořeny stříkána pomocí jednoduchých zahradních postřikovacích trysek. Vyvíjí se ale stále nové rozprašovače, které poskytují menší kapičky až do velikosti 1 mikronu. Atomizační trysky s malými otvory však mohou způsobit problémy, jako je ucpání trysek nežádoucími nečistotami, čímž se zastaví přísun živin. Jako prevence jsou používány síťové filtry (Lu et al. 2009). Zatímco větší trysky s větší mírou pokrytí ostřikem snižují riziko ucpání trysky, potřebují ke své funkčnosti vysoký tlak. Vysokotlaké atomizační trysky dokáží vytvořit jemnou mlhu o velikosti 10 až 100 mikronů. V systému aeroponie je ideální rozsah velikosti kapiček pro většinu druhů rostlin mezi 30 a 100 mikrony. V tomto rozsahu aerosol nasycuje vzduch a udržuje hladinu vlhkosti v růstové komoře. Kapičky pod 30 mikronů mají tendenci zůstat ve vzduchu jako mlha a rostlina tak nedokáže dosáhnout požadovaného růstu. Kapičky větší než 100 mikronů mají na druhou stranu tendenci rychle klesat dolů k základně nádrže a nemusí se tak včas dostat ke kořenům rostlin (Lakhiar et al. 2018).

2) pH a elektrická vodivost

Hodnota pH je definována jako měřítko stupně kyselosti nebo alkality kapalného roztoku. Elektrická vodivost (EC) je měřítkem všech solí rozpuštěných ve vodě, včetně solí přidaných hnojivem (jednotkou EC je dS/m). Ke stanovení hodnoty pH a EC se používají různé metody. Nejběžnější a jednoduchý způsob pro měření těchto hodnot je pH a EC metr. V aeroponických systémech je voda s živinami opakovaně recyklována, proto je důležité tyto parametry měřit pravidelně, aby rostlina mohla úspěšně růst. Pokud se tyto hodnoty vychýlí z předem určené hranice, musí být

pěstitelem upraveny. Ideální rozsah pH a EC pro každý druh či odrůdu závisí na dostupných podmínkách prostředí, ve kterých je rostlina (Sonneveld & Voogt 2009). Hodnoty pH a EC v připraveném živném roztoku nesmí překročit 7 a 2,5 dS/m v uvedeném pořadí. Optimální hodnoty pH a EC živného roztoku se pohybují mezi 5,5–6,5 (u některých rostlin až 5) a 1,5–2,5 dS/m. Doporučené pH a EC u vybraných rostlin je zobrazeno v tabulce 2 (Lakhiar et al. 2018).

Tabulka 2: Doporučené hodnoty pH a EC pro některé rostliny; zdroj: Lakhiar et al. (2018)

Rostlina	pH	EC (dS/m)
Cibule	6,0 – 7,0	1,4 – 1,8
Okurka	5,8 – 6,0	1,7 – 2,2
Mrkev	5,8 – 6,4	1,6 – 2,0
Špenát	5,5 – 6,6	1,8 – 2,3
Salát	5,5 – 6,5	0,8 – 1,2
Rajče	5,5 – 6,5	2,0 – 5,0
Brambory	5,0 – 6,0	2,0 – 2,5

3) Světlo a teplota

Teplota je primárním faktorem prostředí, který ovlivňuje růst a vývoj rostlin. Má vliv jak na počáteční fázi růstu, tak i na další průběh až po sklizeň (Hatfield & Prueger 2015). Aby rostliny v aeroponickém systému rychle zrály, musí být kontrolována teplota vzduchu i živného roztoku. Když teplota stoupá, chemické procesy probíhají rychleji a dochází ke zhoršení enzymatické aktivity. Optimální teplotní rozsah pro všechny rostliny je 15–25 °C. Nicméně teplota růstové komory by neměla být vyšší než 30 °C a nižší než 4 °C (Otazú 2010). Urrestarazu et al. (2016) uvedli, že v řízené kultivaci je světelná energie významný ekologický faktor ovlivňující rostlinu. Intenzita a kvalita světla nejen dodává energii, ale také zprostředkovává také četné morfogeneze a fyziologické odpovědi rostliny (Li & Kubota 2009). Jako zdroj světla v aeroponickém systému se nejčastěji využívají LED světla – jsou pro tento systém nejlepší. Poskytují více světla o jedné vlnové délce, menší hmotnost, objem, delší životnost a úsporu energie. Mori et al. (2002) uvádějí, že při použití LED světel byly pozorovány vysoké fotosyntetické činnosti a větší rychlost růstu rostlin.

4) Vlhkost a koncentrace rozpuštěného kyslíku

Aeroponický systém je založen na 100% vlhkosti kořenové části růstové komory. V tomto systému je vlhkost hlavní komponenta potřebná pro úspěšný růst a vývoj rostlin (Schüssler 1992), jelikož působí na fyziologické funkce rostliny a ovlivňuje její problémy s chorobami (Gislerød & Mortensen 2019). Proto je důležité požadovanou koncentraci vlhkosti růstové komory udržovat a kontrolovat. Aeroponie rostlině poskytuje nejlepší možné okysličení pro růst. Umožňuje kořenům rostlin růst ve vzduchu s automatickým dostatečným přísunem kyslíku, proto žádný další mechanismus není požadován (Lakhiar et al. 2018).

5) Frekvence mlžení a živinový zásobník

Doba rozprašování a intervalový čas jsou dalšími základními faktory pro úspěšnou kultivaci rostlin. Špatný časový plán by mohl způsobit vážné problémy růstu rostliny, protože v systému není žádné médium, které by rostlinu podporovalo. Mnoho studií se zabývalo pěstování rostlin za různých rozprašovacích časů, ale obecně platí, že doba postřiku trvá několik sekund a doba vypnutí několik minut. V aeroponickém systému se úspěšně podařilo kultivovat např. brambor (20 s zapnuto a 5 min vypnuto, 3 s zapnuto a 10 min vypnuto, 15 min zapnuto a 15 min vypnuto), rajče (3 s zapnuto a 10 min vypnuto, 60 s zapnuto a 5 min vypnuto), okurka (7 s zapnuto a 10 min vypnuto), salát (90 s zapnuto a 5 min vypnuto), cibule (7 s zapnuto a 90 s vypnuto) nebo hrách setý (3 s zapnuto a 10 min vypnuto) (Lakhari et al. 2018).

3.1.3 Kultivační média

Kultivační média neboli „substráty“ jsou definovány jako všechny pevné materiály, jiné než půda, které mohou samotné nebo ve směsích zaručit lepší kvalitu růstových podmínek rostlin než půda (Savvas & Gruda 2018).

Substráty se obecně dělí na organické a anorganické materiály. Anorganické substráty mohou pocházet z přírodních zdrojů i ze zpracovaných materiálů. Organická pěstební média mohou být syntetická (např. polyurethan) nebo přírodní (např. rašelina). Substráty mohou být také klasifikovány jako vláknité (např. kokosová vlákna) a zrnité (např. perlit). Důležitou vlastností je chemická aktivita, podle které je můžeme klasifikovat na aktivní (např. rašelina) nebo inertní (např. písek) (Resh 2013).

V bezpůdních systémech pěstování slouží kultivační média jako náhrada půdy. Fungují jako podpora pro rostliny, kořenům poskytují kyslík, dostatek vody a rozpuštěné živiny prostřednictvím zavlažovacího systému (EI-Kazzaz 2017) a díky své pórovitosti disponují dobrou schopností zadržovat vodu (Maya Waiba et al. 2020).

Pro správnou volbu pěstebního média je třeba vzít v úvahu některé žádoucí vlastnosti, avšak je náročné najít správný substrát, který by disponoval všemi požadovanými vlastnostmi. Aby došlo ke korekci pH a bylo dosaženo požadovaných vlastností substrátu, je před použitím doporučena jeho desinfekce nebo promíchání (Resh 2013).

Výběr materiálu, který by měl být použit jako pěstební médium nebo jako komponent, závisí na typu pěstované plodiny – musí splňovat potřebu rostlinné produkce (Savvas & Gruda 2018). Intenzivně plodící rostliny nutně nevyžadují růstové médium s vysokou kapacitou výměny kationtů, rostliny v květináčích a kontejnerech však ano. U uzavřených systémů (ve srovnání s otevřenými systémy) nepředstavuje nízká kapacita zadržování vody problém, jelikož díky častému zavlažování nedochází k vyluhování živného roztoku, který je recyklován. Nízká zadržovací schopnost substrátu může být problémem i v případě nedostatku vody nebo dlouhodobého výpadku elektrického proudu (Resh 2013). Je třeba vzít v úvahu i dopad na životní prostředí a finanční náklady média (Sabatino 2020).

1) Perlit

Perlit je nejběžnějším typem média používaného v kontejnerových systémech bezpůdní kultivace (Hussain et al. 2014). Zajišťuje lepší provzdušnění, odvodnění, retenci optimální vlhkosti a dostupnost živin. Perlit není obchodní název, ale používaný termín pro přirozeně vyskytující se křemičitý vulkanický materiál (Resh 2013), jehož částice mají velikost 0,05–2,0 mm (Savvas & Gruda 2018). Přírodní částice jsou prosívány a zahřívány na 1000 °C. Při těchto teplotách expandují na 4–20 násobek svého původního objemu za přítomnosti 2–6 % vody v perlitové hornině, čímž vznikne lehký materiál s vysokou pórovitostí (Resh 2013). Výhodou těchto přírodních částic o velikosti 0,05–2,0 mm, je dobrá odvodňovací schopnost a nízká pořizovací cena. Ovšem kvůli malé porézní kapacitě (40–50 %) mají nízkou schopnost zadržování živin a vody a oproti ostatním kultivačním médiím mají poměrně velkou objemovou hmotnost (1400–1600 kg/m³) (Savvas & Gruda 2018). Kvůli svým vlastnostem nemůže být perlit použit v systémech na principu přílivu a odlivu, protože během cyklu zaplavení odpluje nebo se pohybuje (Maya Waiba et al. 2020).

2) Kokosové vlákno

Je zcela organické médium vyrobené z drcených kokosových slupek, jejichž vlákna jsou jemně rozdrčena a sterilizována párou. Nabízí rostlinám ideální kořenové médium, které mimo jiné poskytuje ochranu proti chorobám kořenů a plísním (Hussain et al. 2014). Výhodou je jeho fyzikální stabilita, nízká hmotnost (65–110 kg/m³), dobré provzdušňovací vlastnosti, vysoká porézní kapacita (94–96 %), dobrá zadržovací kapacita a neutrální pH (5–6,8) a je zcela obnovitelným zdrojem (Savvas & Gruda 2018). Obsahuje vysoké množství fosforu (6–60 ppm) a draslíku (170–600 ppm), a jelikož obsahuje více ligninu a méně celulózy než rašelina, je odolnější vůči mikrobiálnímu rozkladu a po vysušení je snazší ho znovu namočit. Jeho velkou výhodou je však to, že se po několika použitích rozpadá a může obsahovat vysokou hladinu rozpustných solí, sodíku a chloridů (Resh 2013).

3) Vermikulit

Podobně jako perlit se vermikulit vyrábí proséváním a zahříváním zeminy při teplotě 700–1000 °C. Vermikulit obsahuje kladně nabité ionty draslíku, hořčíku a vápníku. Je sterilní, lehký, má vysokou porézní kapacitu (70–80 % a nízkou objemovou hmotnost (80–120 kg/m³) (Savvas & Gruda 2018). Zatímco perlit je ve směsi médií využíván hlavně ke zlepšení odvodňovacích vlastností, vermikulitem je zvýšena schopnost rostliny zadržovat vodu a živiny. Dokáže pojmou 3–4 násobek své hmotnosti (Resh 2013), má dobrou vyrovnávací kapacitu pH a dobré provzdušňovací schopnosti. Nevýhodou je zhoršení jeho fyzikálních vlastností při přílišné vlhkosti, protože částice v něm obsažené mají sklon se zhušťovat. Výroba vermikulitu je energeticky náročná a pořizovací cena výsledného produktu je vysoká (Savvas & Gruda 2018).

4) Rašelina

Rašelina je nejpoužívanějším pěstebním médiem a složkou substrátu v zahradnictví. Je výsledkem částečného rozkladu rašeliníku, ostřice a jiných mechů.

V anaerobních podmínkách pod chladnou vodou jsou sacharidy a celulóza rozkládány a zanechávají za sebou lignifikované buněčné stěny a humus (Resh 2013). Rašelina je velmi porézní substrát (58–90 %) s vynikající schopností zadržovat vodu. Její výhodou je nízká mikrobiální aktivita, malá objemová hmotnost (60–200 kg/m³), nízký obsah živin a pH, které je snadno upravovatelné (Savvas & Gruda 2018). Potenciálním omezením je nestabilita, občasná silná kyselost a smršťování rašeliny, ke kterému může dojít v nádobě pěstební kultury (Resh 2013), což může vést k silné hydroodpudivosti substrátu. Uvolňováním CO₂ do ovzduší neprospívá životnímu prostředí. Rašelinné zdroje jsou navíc vyčerpatelné (Savvas & Gruda 2018).

5) Písek

K dispozici je mnoho druhů písku, které lze za účelem zlepšení odtokových vlastností použít jako pěstební médium nebo jako složku do různých substrátů. Čistý písek je široce používán v pouštích a na pobřežních pláních, protože je to místní, přírodní a levný zdroj (Resh 2013). Objemová hmotnost písku je 1400–1600 kg/m³, má relativně nízkou porézní kapacitu (40–50 %) a tudíž nízkou schopnost zadržovat vodu a živiny (Savvas & Gruda 2018). Použití písečné mulčovací půdy u skleníkových plodin snižuje ztráty odpařováním a umožňuje použití koncentrovanějšího solného roztoku bez redukce sklizně (Resh 2013). Je vhodný jako pěstební médium pro rostliny, které vyžadují suché prostředí s volnou půdou. Přebytková voda z písku odteče a nenasákne se do něj, jako by tomu bylo u jílu. Právě díky těmto vlastnostem je u kořenové zeleniny, jako jsou mrkev a brambory, produkce vyšší (Hussain et al. 2014).

6) Pemza

Pemza je přírodní produkt, lehký silikátový materiál vulkanického původu. Je používán jako substrát pro plodovou zeleninu (rajče, okurka, paprika) a pro řezané květiny. Pemza vyžaduje relativně nízké investice a může být využívána mnoho let, čímž produkuje méně substrátového odpadu (Resh 2013). Má nízkou objemovou hmotnost (450–670 kg/m³), dobrou porézní kapacitu (55–80 %), avšak pH může mít vysoké (Savvas & Gruda 2018). Sice přispívá málo k výživě rostlin, ale nesnižuje dostupnost živin z hnojiv (Resh 2013).

7) Rockwool

Rockwool (minerální vata) je vyráběn zahřátím čedičové horniny s vápencem a koksem při teplotě 1500–2000 °C (Savvas & Gruda 2018). Tato tavenina je odstředována na vlákna, která jsou dohromady spojena zahříváním (Resh 2013). Má nízkou objemovou hmotnost (80–90 kg/m³), vysokou porézní kapacitu (95–97 %) a snadnou manipulovatelnost. Je zcela inertní, s výjimkou některých menších účinků na pH. Počáteční pH materiálu je poměrně vysoké (7,0–8,0) a je vyžadována jeho úprava (Resh 2013). Jeho problémem je likvidace použitého materiálu, vysoké množství energie spotřebované během výroby (Savvas & Gruda 2018) a především jeho cena, která je vyšší než u ostatních kultivačních médií (Maya Waiba et al. 2020).

8) Kůra

Kůra je vedlejším produktem dřevařského a papírenského průmyslu. Obvykle je odstraněna ze stromů, frézována a prosívána do různých velikostí. K pěstování se používá stará nebo kompostovaná kůra (Resh 2013). Disponuje dobrou vzdušností, schopností zadržovat vodu, dobrou porézností (75–90 %), neutrálním pH (5–7), průměrnou objemovou hmotností (320–750 kg/m³) a může být užívána dlouho (Savvas & Gruda 2018)

3.2 Kvalita produktů v bezpůdních systémech

Srovnání bezpůdních systémů pěstování s konvenčním pěstováním je velice složité, jelikož se jedná o dva naprosto odlišné systémy. Rozporuplné výsledky lze někdy připisat neporovnatelným faktorům, jako je typ hnojiva, podnebí nebo kultivar rostlin, což má za následek rozdíl v růstových faktorech (Savvas & Passam 2002).

Podle Santamaria et al. (2001) umožňují bezpůdní kultivační systémy dosažení lepší úrovně kvality produktu. Ve srovnání s půdní kultivací se zdají být lepší zejména v parametrech týkajících se výživy, sensorických a hygienických vlastností (Gruda 2009). Některé aspekty kvality zeleniny v bezpůdních systémech byly zřetelně hodnotnější, například pokles reziduí pesticidů, lepší organoleptické vlastnosti a delší skladovatelnost (Cefola et al. 2011). Některé výživové parametry byly v bezpůdní kultivaci taktéž významnější. Jedná se např. o obohacení / zvýšení obsahu selenu, železa (Inoue et al. 2000), omega-3 mastných kyselin (Palaniswamy et al. 2000) a nižší obsah dusičnanů (Šmídová & Izzo 2009).

Někdy se kvality produktu měnily pod vlivy různých kultivačních metod. Podle Gruda (2009) se obsah redukujících cukrů, titrovatelných kyselin, kyseliny askorbové a karotenoidů měnil pod vlivem tří kultivačních metod (NFT, PPH – Plant Plane Hydroponics, kultivace v půdě). Sensorické testy však neodhalily žádné rozdíly v chuti ani v konzistenci, způsobené kultivačními metodami. Největší odchylky v sensorických atributech byly způsobeny rozdílnou odrůdou, následované zralostí, dobou sklizně a elektrickou vodivostí (EC), zatímco typ růstového média měl velice malý, až žádný vliv. Literatura nezmiňuje žádné významné sensorické rozdíly ani u dalších produktů, jako je hlávkový salát, paprika, meloun nebo jahoda, mezi bezpůdní kultivací a kultivací v půdě (Gruda 2009).

Pro vlastnosti, jako je jednotná hmotnost, velikost a konzistence, bezpůdní systémy vykazují větší kvalitu, než pěstování v půdě (Savvas & Passam 2002). Podle Verdoliva et al. (2021) mají rajčata pěstovaná v půdě vyšší kyselost a méně redukujících cukrů než ty, které byly pěstovány metodou NFT. Gruda (2009) uvádí, že rajčata kultivovaná metodou NFT byla pevnější a bohatší na vitamin C, než rajčata pěstovaná v půdě. Rajčata také obsahují více sacharidů, kyselin a sodíku, což má za následek výraznější chuť. Navíc je obsah dusičnanů v metodě NFT podstatně nižší a koncentrace fosforu, draslíku, vápníku a hořčíku jsou prakticky totožné s těmi v rostlinách pěstovaných v půdě.

Rouphael et al. (2004) uvádí, že nebyly pozorovány žádné rozdíly v podílu sušiny a celkovému obsahu bílkovin, zatímco koncentrace sacharidů (glukóza, fruktóza, sacharóza a škrob), byla vyšší u cukety pěstované v bezpůdním systému.

Gopinath et al. (2017) porovnával výnos produktů, celkový obsah fenolických látek, flavonoidů a antioxidačních vlastností u rostlin pěstovaných v aeroponických systémech a na poli. Byly testovány různé listové zeleniny (bazalka, mangold, petržel, špenát a červená kapusta) i rostliny produkující plody (paprika, cherry rajčata a okurka). V aeroponických systémech byl vyšší průměrný nárůst a výtěžek o 19 %, 8 %, 65 %, 21 %, 53 %, 35 %, 7 % a 50 % u bazalky, mangoldu, červeného kadeřávku, petržele, papriky, cherry rajčat, okurky a špenátu v uvedeném pořadí, než při konvenčním pěstování v půdě. Antioxidační vlastnosti plodin byly hodnoceny pomocí 2,2-difenyl-1-pikrylhydrazilu (DDPH) a buněčných antioxidačních testů (CAA). Studie obecně ukazují, že rostliny pěstované v aeroponickém systému měly nejen větší výtěžek, ale i srovnatelné hladiny fenolických, flavonoidních a antioxidačních vlastností s rostlinami pěstovanými v půdě (Chandra et al. 2014). Obsah vitamínu C byl vyšší ve všech bylinách pěstovaných v aeroponii, zatímco obsah silic byl vyšší v bazalce pěstované stejným způsobem (Gopinath et al. 2017).

Používáním bezpůdní kultivace však není zaručen automatický výsledek vysoce kvalitních produktů. Bezpůdní systémy vyžadují především správné využití pěstitelských postupů a technologií. Například je dobře známo, že bezpůdní systémy, vzhledem ke své relativně malé a omezené kořenové oblasti, mají omezenou vyrovnávací kapacitu týkající se dodávky vody a hnojiv, stejně jako pH živného roztoku. Nedostatek přísunu vody a živin může vyvolat hnilobu květu rostliny. Podle Savvas & Gruda (2018) je nejčastější příčinou hniloby květů kombinace vysoké teploty a vodního stresu, bez ohledu na systém pěstování. Neposkytnutím vláhy v bezpůdních systémech by mohlo dojít ke zhoršení kvality, v nejhorším případě až k usmrcení rostlin. Rostliny pěstované v půdě mají větší šanci na zotavení bez viditelných nedostatků na kvalitě (Gruda 2009).

3.3 Vliv živného roztoku na kvalitu rostlin

Použití koncentrovaných živných roztoků u plodin, jejichž komerčními výnosy jsou listy, může vést ke zhoršení kvality sklizeného produktu. To může být způsobeno vysokým obsahem dusičnanů v jedlé části rostliny (Wang & Ito 1997). Důležité je poznamenat, že tento jev je často pozorován také u plodin pěstovaných v půdě, které jsou vystaveny nadměrnému hnojení dusičnany (Chen et al. 2004). Aby byla snížena akumulace dusičnanů, byly navrženy některé agronomické postupy, které jsou však proveditelné pouze pro hydroponický systém. Například krátkodobým nedostatkem dusičnanů, provedeným nahrazením hydroponického živného roztoku roztokem neobsahujícím dusičnany nebo zavlažováním pouze čistou vodou několik dní před sklizní (Santamaria et al. 2001). Bylo však pozorováno obecné zhoršení listových tkání rostlin (zažloutnutí listů). Nikolic et al. (2007) uvedli, že po pěti denní absenci přísunu dusíku do kořenového systému okurek došlo k téměř úplnému omezení schopnosti získat Fe z externího média. S ohledem na známou roli Fe v biosyntéze chlorofylu a jako prostetické skupiny v hemových a nehemových proteinech (Marschner 2017), se jeví jako evidentní, že změny v dostupnosti dusičnanů v růstovém médiu mohou způsobit nevyvážené získávání dalších živin s nežádoucími účinky nejen na výnos, ale i na vzhled produktu (Manzocco et al. 2011).

Dále je dobře známo, že draslík hraje hlavní roli při příjmu dusičnanů dekarboxylací draselného malátu, která probíhá v kořenech rostliny a poskytuje adekvátní hydrogenuhličitanové ionty, které se během absorpce mění na dusičnany (Coskun et al. 2017). Úprava kationtových proporcí v nutričním roztoku poskytuje efektivní cestu ke snížení obsahu dusičnanů (El-Nakhel et al. 2020).

Bylo také prokázáno, že nutriční nerovnováha odlišná od dusíku, jako je omezená dostupnost Fe a S v růstovém médiu, může také způsobit narušení absorpci dusíku a metabolismu rostliny, vedoucí k akumulaci dusičnanů v tkáních různých druhů plodin, jako je okurka nebo špenát (Tomasi et al. 2015). V rostlinách rajčat bylo pozorováno, že nedostatek síry zabraňoval vyšší rychlosti vychytávání Fe v rostlinách, které měli deficit Fe (Zuchi et al. 2009). Iacuzzo et al. (2011) prokázali, že když je v hydroponickém roztoku k dispozici vysoká hladina dusičnanů, zvýší se absorpce Fe a S, čímž se zvýší asimilace dusičnanů a tím se zvýší produkce biomasy listů s nižším obsahem dusičnanů. Tato skutečnost poukazuje na těsné interakce mezi N, S a Fe a zdůrazňuje, že vhodnými úpravami lze dosáhnout zvýšení ve výnosu, kvalitě a zdraví rostlin pěstovaných v bezpůdních systémech (Tomasi et al. 2015).

Mezi minerálními živinami rostlin je anorganický dusík jedinečný. Kromě oxidované formy (dusičnany) ho můžeme nalézt i v jiné formě (amonium, aminokyseliny a močovina). Je známo, že poměr mezi dusičnany a amoniem přítomným v růstovém médiu ovlivňuje obsah dusíkatých sloučenin ve tkáních. Obsah organických kyselin je vyšší u rostlin, kterým jsou dodávány dusičnany, zatímco celkový obsah aminokyselin je vyšší u rostlin pěstovaných přidávkem amonia, jako jediného zdroje dusíku (Chaillou et al. 1991).

Když jsou rostliny pěstovány v bezpůdních systémech, jejich kořeny přicházejí do kontaktu s živinami pouze prostřednictvím živného roztoku. Živný roztok ale nemůže sám nabýt prvky, které mohou být kořeny absorbovány v přímém kontaktu s půdou, protože v hnojivech jednoduše nejsou obsaženy. Příkladem je křemík (Si), nejhojnější prvek v půdě (Epstein 1999), nahromaděný rostlinami až do 10 % hmotnosti sušiny jejich nadzemních částí (Liang et al. 2007). Křemík je ve složení živných roztoků velmi často vynechán. Napomáhá anatomickým změnám, které jsou způsobeny usazováním oxidu křemičitého v buněčných stěnách. Zachovává vztyčení listů, upřednostňuje ty, které zachycují světlo a fotosyntetizují (Ma & Takahashi 2002). Gottardi et al. (2012) dokázali, že přidáním Si do živného roztoku byl zvýšen výtěžek a trvanlivost salátu. Zahrnutí křemíku do živného roztoku je důrazně doporučeno (Tomasi et al. 2015).

Lakhiar et al. (2018) ve své studii uvádí, že zvýšený obsah kationtů v živném roztoku vedl ke zvýšení odpovídajících minerálů v listových tkání, např. zvýšená koncentrace draslíku v roztoku zvýšila koncentraci draslíku v listech. Stejně tak tomu bylo i u vápníku a hořčíku. Obsah fosforu v listových tkáních byl největší u rostlin živených roztokem se zvýšenou koncentrací draslíku. Výsledky této studie ukazují na antagonismus mezi kationty, jako jsou K a Mg, Mg a Ca, a Ca a K, zatímco účinek genotypu měl na rostlinu minimální vliv. Hermans et al. (2013) uvádí, že obohacením rostliny Mg má za následek vyčerpání Ca. Barickman et al. (2016) uvádí, že nadměrné množství K má za následek depolarizaci cytosolu, čímž sníží hnací sílu nosičů plazmatické membrány pro absorpci dalších kationtů, jako je Ca a Mg.

Listová zelenina je považována za dobrý zdroj hydrofilních antioxidantních molekul, jako je kyselina askorbová a fenolové sloučeniny. Ve studii El-Nakhel et al. (2020) byl v živném

roztoku zvýšen obsah kyseliny askorbové, což mělo za následek zvýšení koncentrace kationtů Ca a Mg v listových tkáních. Kromě toho obsah kyseliny askorbové negativně koreloval s obsahem dusičnanů (Mozafar 1993). V odrůdách salátu byly identifikovány čtyři hlavní fenolické kyseliny. Nejhojnější fenolovou kyselinou je kyselina cikorová následovaná kyselinou chlorogenovou. V menších koncentracích byla přítomna kyselina meso-vinná a kyselina kofeoyl-vinná. Kyselina cikorová je typická fenolová kyselina detekovatelná v rodu *Asteraceae*, zatímco kyselina chlorogenová je v rostlinné říši široce rozšířena (Petropoulos et al. 2018). El-Nakhel et al. (2020) uvádí rozdíly ve fenolickém složení mezi zelenými a červeně pigmentovanými kultivary salátu. Llorach et al. (2008) v salátech identifikoval i deriváty kyseliny kávové, flavony a flavonoly. S ohledem na významné účinky kultivaru rostliny a složení živného roztoku na obsah fenolických sloučenin, zvýšení obsahu hořčíku a/nebo vápníku představuje účinný nástroj ke zvýšení bioaktivního obsahu hydroponicky pěstovaných rostlin (El-Nakhel et al. 2020).

Pigmentace rostlinné tkáně je připisována lipofilním a hydrofilním sloučeninám, zejména karotenoidům, respektive antokyanům. U konvenčního pěstování byla ke zvýšení obsahu lipofilních antioxidantů využita genetická transformace, zatímco v bezpůdních systémech pěstování toho bylo dosaženo prostou úpravou živného roztoku (Kyriacou & Rouphael 2018). El-Nakhel et al. (2020) ve své studii měřili obsah karotenoidů v salátové odrůdě Salanova. Hlavními karotenoidy byl $[\beta\text{-cryptoxanthin}] > [\text{violaxanthin} + \text{neoxanthin}] > [\text{lutein}] > [\beta\text{-carotene}]$, v množství podle uvedeného pořadí. Koncentrace violaxanthinu + neoxanthinu, luteinu a $\beta\text{-cryptoxanthinu}$ v listové tkáni byla zvýšena po zvýšení koncentrace Mg v živném roztoku. Zvýšení fytochemického obsahu, jako jsou karotenoidy a antokyaniny, lze vyvolat cílenou modulací podílu kationtových látek v živném roztoku. Tento účinek je ale závislý na genotypu salátu (Ada et al. 2007).

3.4 Nejpěstovanější plodiny

1) Rajčata

Rajčata (*Solanum lycopersicum* L.) jsou nejdůležitější pěstovanou skleníkovou plodinou v bezpůdních kultivačních systémech. Nejpoužívanějším bezpůdním systémem pro pěstování rajčat je pěstování na deskách z minerální vlny zabalených v polyetylenových pytlích, do kterých je dodáván živinový roztok kapkovou závlahou. Jako substrát je používán perlit, pemza a tuf. V bezpůdní kultuře mohou rajčata tolerovat celkovou koncentraci soli v kořenové zóně až 2,5–2,9 dS/m bez ztráty výnosu (Sonneveld & Voogt 2009). Ve většině případů si pěstitelé v kořenové zóně rajčat udržují vyšší hodnoty EC, aby byla zlepšena kvalita ovoce, co se týče kvality ovoce a rozpustnou sušinu (Gruda 2009).

Rozhodujícím faktorem pro výživu rajčat v bezpůdní kultuře je poměr N:K v živném roztoku (Adams 1994). Další důležitá vlastnost živného roztoku dodávaného rajčatům je poměr $\text{NH}_4\text{-N}$ /celkový N. Jak uvádí Sonneveld (2002), růst i výtěžnost rajčat se zvýší, když je malé množství N, v rozmezí od 5 do 15 % celkového množství N, dodáváno ve formě NH_4^+ . Rajčata jsou tolerantní ke středně vysokému pH, ale citlivá na nízkou hladinu pH v kořenové zóně, hlavně kvůli zhoršení vstřebatelnosti Ca (Savvas et al. 2008). Pokud jde o kationty

makronutrientů, požadavky na příjem K se zvyšují s množstvím ovoce, zatímco požadavky na příjem Ca klesají (Savvas & Gruda 2018). Hladiny Ca v dodávaných živných roztocích by však měly být udržovány na relativně vysoké úrovni během reprodukční fáze plodiny, aby se minimalizoval výskyt hniloby květů (Resh 2013).

2) Okurka

Okurka (*Cucumis sativus* L.) je semitropická rostlina pocházející z Indie a druhá nejpěstovanější plodina v bezpůdních systémech. Okurky pěstované v bezpůdních systémech jsou dlouhé, bezsemenné a lze je pěstovat v různých ročních obdobích. Pro okurky je běžné pěstování v rockwoolu, ale používají se i jiná rostoucí média (např. perlit, pemza) (Resh 2013).

Okurka je velice citlivá na koncentraci soli v roztoku. EC v kořenové zóně by v ideálním případě mělo být udržováno na 2,7 dS/m a v žádném případě by hranice neměla překročit 3 dS/m, jinak dochází k významným ztrátám na výnosu (Sonneveld & Voogt 2009). Doporučená úroveň pH v kořenové zóně okurek je 5,3–6,4, čehož lze dosáhnout zahrnutím asi 10 % z celkového N ve formě NH₄-N v roztoku (Resh 2013).

Při jejím pěstování je zavlažování kritickým faktorem, jelikož tato rostlina ráda vysokou úroveň relativní vlhkosti. V tom případě je do růstového média nutné přidat velké množství vody, aniž by neustále zaplavovala kořeny a připravovala je o kyslík. Při použití NFT nebo podobných systémů by měly být brány v úvahu další prostředky ke zlepšení okysličení živného roztoku (Petropoulos et al. 2018).

3) Paprika

Třetí nejpěstovanější rostlinou bezpůdních systémů je paprika (*Capsicum annuum* L.). Paprika by měla být často hnojena vhodně řešeným živinovým roztokem. Doporučené pH v kořenové zóně během období sklizně je 6 – 6,7, které je dosažitelné dodáním asi 5 % celkového N ve formě NH₄-N. Vyšší příjem NH₄-N během reprodukční fáze není doporučen, protože amonium může snižovat absorpci Ca a zvyšovat výskyt hniloby květů, na který je paprika velice citlivá. Paprika je považována za rostlinu citlivou na slanost a doporučené EC v kořenové zóně je 2,7 – 3,0 dS/m, v závislosti na ročním období a minerálním složení dostupné závlahové vody (Resh 2013).

4) Lilek

Lilek (*Solanum melongena* L.) lze úspěšně pěstovat ve většině komerčních kultivačních systémech bez půdy, včetně kultivace v substrátech a živném roztoku. Požadavky na K jsou nižší během vegetativní vývojové fáze a během reprodukční fáze se zvyšuje, protože se zvyšuje zátěž ovocem. Živinové požadavky lilku vykazují mnoho podobností s požadavky rajčat. Jediné důležité rozdíly jsou v jeho požadavcích na větší množství Mg a B a menší množství K (Savvas & Gruda 2018). Tolerance množství solí v roztoku je však u lilku mnohem nižší než u rajčat. Doporučené EC v kořenové zóně se pohybuje od 2,6 do 2,8 dS/m. Avšak hodnoty nad 3,0 dS/m mohou být nevyhnutelné, pokud je koncentrace NaCl v dostupné závlahové vodě v množství 3,0 mM (Resh 2013).

5) Fazole

Fazole (*Phaseolus vulgaris* L.) je další plodová zelenina pěstovaná v bezpůdních systémech. Doporučená hustota je 10–14 rostlin na m² v případě použití hydroponické nebo substrátové kultury. Rostliny lze podporovat buď plastovým provázkem připevněným na vodorovném drátu jako u jiné plodové zeleniny (např. rajčata, okurky a paprika) nebo natažením vhodných sítí podél linií výsadby (Resh 2013). Fazole jsou citlivé na slanost, proto jsou doporučené hodnoty EC relativně nízké (cca 2 dS/m). Dále je třeba dbát na to, aby bylo zabráněno hromadění Na⁺ a Cl⁻ iontů v kořenové zóně, zvláště když se živný roztok recykluje. Vzhledem k tomu, že je fazole citlivá na slanost, je dostupnost kvalitní vody pro pěstování v bezpůdních systémech zásadní. Nízké hodnoty pH v kořenové zóně mají negativní dopad na růst rostlin, pH by nikdy nemělo klesnout pod 5,5. Aby se zabránilo příliš nízkému pH, procento NH₄-N / celkový N v živném roztoku dodávaného do fazolí by mělo být relativně nízké (< 10 %) (Savvas et al. 2012).

6) Brambory

Christie & Nichols (2004) použili aeroponii k hromadné produkci sadbových brambor, ale také k produkci brzkých (nových) brambor pro labužníky. Kořenový systém brambor se vyvinul daleko dříve než stolony, které mají produkovat hlízy. Klíčem k produkci hlíz v aeroponii je kontrola jejich iniciace. Toho můžeme dosáhnout pomocí přerušovaného zavlažovacího systému nebo vyvoláním dočasného stresu rostliny. Jednou z výhod tohoto systému je, že umožňuje synchronizovanou produkci hlíz, což umožňuje produkci relativně uniformních hlíz o velmi velkém počtu najednou.

Jako řešení problému nedostatku kvalitního osiva existují strategie rychlého rozmnožování hlíz pomocí tkáňové kultury ve spojení s hydroponickými a aeroponickými systémy (Idris & Sani 2012). Chang et al. (2012) zjistili, že přerušování dodávky živin do stolonu ve stadiu růstu významně zvyšuje kořenovou aktivitu, omezuje růst stolonu a nakonec vyvolává iniciaci hlíz. Z tohoto důvodu jsou kvůli netuberizujícím podmínkám, jako jsou horké teploty a pozdní sezónní odrůdy, upřednostňovány techniky přerušování dodávky živin při kultivaci v hydroponii, zejména u sadbových brambor. Aeroponie by mohla být vhodným systémem pro výrobu bramborových minutuberů. Gopinath et al. (2017) ve své studii získal až 800 minutuberů na metr čtvereční za použití pouze 60 rostlin na metr čtvereční s opakovanou sklizní každý týden. Takto získané hydroponické minutubery byly zdravé, bez infekcí a jejich fyziologické chování bylo podobné těm, které vyrůstaly v polních podmínkách (Farran & Mingo-Castel 2006). Výsledky ukázaly, že systém aeroponie je životaschopnou technologickou alternativou pro produkci bramborových mini-hlíz, které se vyznačují větší produkcí, hmotností, výnosem a absencí kontaminace patogeny (Mateus-Rodríguez et al. 2012). Aeroponický systém má tedy potenciál zvýšit příjmy a snížit náklady na produkci kvalitního osiva, čímž se stává dostupnější pro pěstitele v rozvojových zemích, kde je produkce brambor silně omezena používáním nekvalitních semenných hlíz (Gopinath et al. 2017).

7) Salát

Salát lze díky velmi krátké kultivační době vyprodukovat ve více než osmi cyklech za rok. Vyznačuje se vysokou mírou absorpce K a P, ale je citlivý na toxicitu Mn. V tabulce 3 jsou uvedena doporučení týkající se koncentrací základních živin v živných roztocích pro salátové rostliny pěstované v bezpůdních systémech a také cílové koncentrace v kořenové zóně (Resh 2013).

Demšar et al. (2004) studovali závislost aplikace dusičnanů na růst a výnos aeroponicky pěstovaného salátu. Jie & Kong (1998) zjistili, že růst výhonků, kořenů a fotosyntetická reakce tří kultivarů salátu, omezených na různé teploty kořenové zóny za tropických podmínek, byly lepší v aeroponických podmínkách než u rostlin pěstovaných v půdě.

Tabulka 3: Doporučené hodnoty EC (dS/m), pH a koncentrace živin mmol/l) v živných roztocích pro bezpůdně pěstovaný salát, zdroj: Resh (2013)

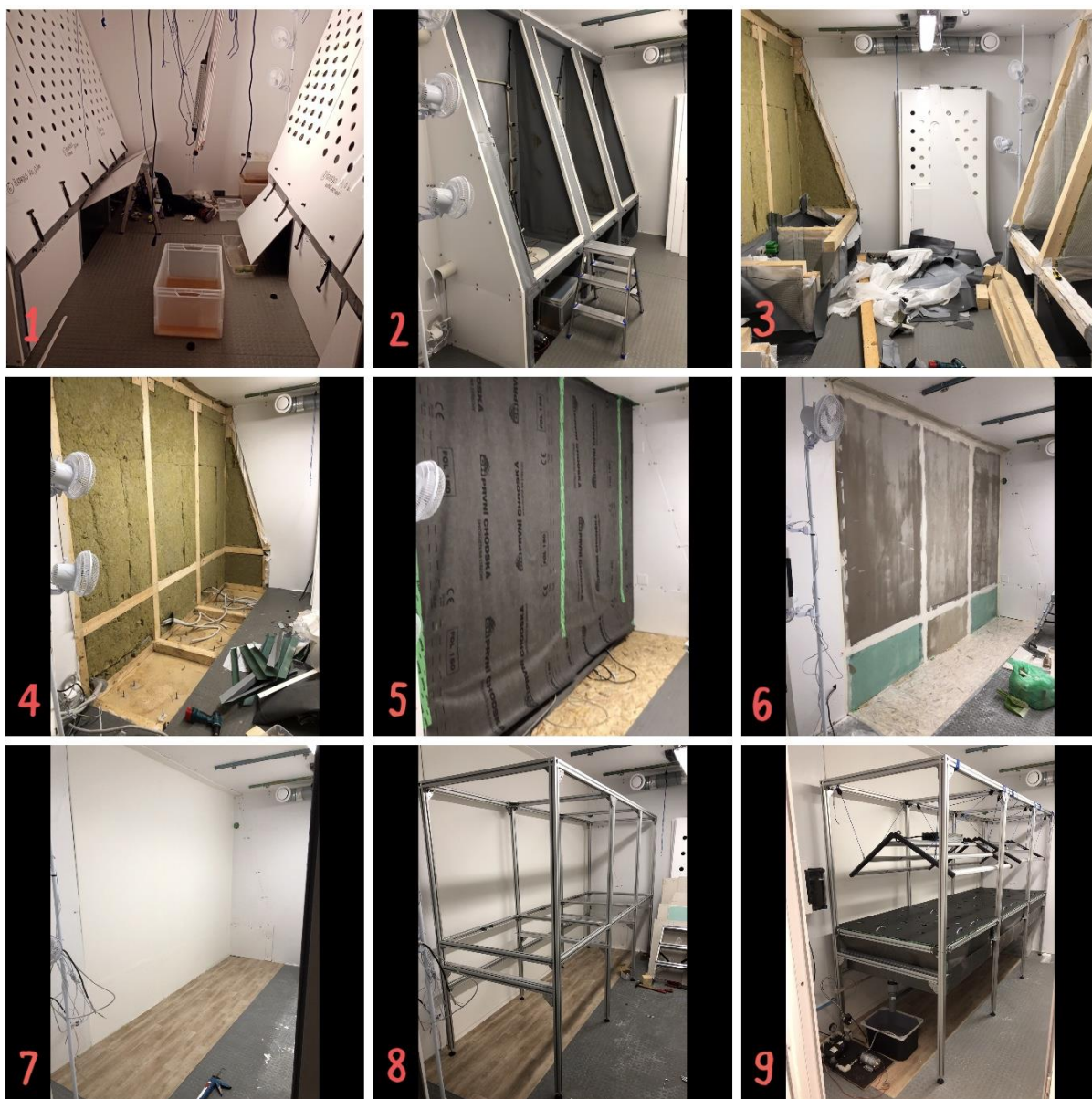
Požadované vlastnosti	Roztok dodaný do systému	Konečná koncentrace v kořenové zóně
EC	2,30	2,60
pH	5,60	5,60 – 6,50
[K ⁺]	9,00	6,20
[Ca ²⁺]	3,75	7,30
[Mg ²⁺]	1,00	1,60
[NH ₄ ⁺]	1,60	< 0,6
[SO ₄ ²⁻]	1,15	2,00
[NO ₃ ⁻]	15,50	18,00
[H ₂ PO ₄ ⁻]	1,80	1,20
[Fe]	30,00	40,00
[Mn]	5,00	1,00
[Zn]	4,00	5,00
[Cu]	1,00	0,80
[B]	30,00	50,00
[Mo]	0,50	-

4 Metodika

Součástí práce bylo vytvoření technologického návrhu aeroponické jednotky a technických parametrů, metodika péče o rostliny a živné roztoky, výsledky růstu rostlin, způsob hodnocení nárůstu biomasy, kvalitativních parametrů, senzorické analýzy, mikrobiální aktivity a živinového složení použitých roztoků.

Místem realizace byla pěstírna v budově Katedry veterinárních disciplín na ČZU, Praha – Suchbátka. Projekt byl realizován pod záštitou Fakulty agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, katedry kvality a bezpečnosti potravin. Rekonstrukce aeroponické jednotky byla vymezena finančními prostředky do výše 130 000 Kč.

Demolice původní nefunkční aeroponické laboratoře započala v listopadu 2020 a stávající jednotka byla dokončena začátkem ledna 2021. Proces rekonstrukce aeroponické jednotky je na obrázku 8. Sledované období pěstování salátů k získání požadovaných výsledků probíhalo od 15. 2. do 23. 3. 2021.



Obrázek 8: Proces rekonstrukce aeroponické jednotky

4.1 Návrh aeroponické jednotky

Hlavním záměrem bylo vytvoření funkčního aeroponického systému. Při návrhu samotné konstrukce bylo nutné se zabývat pojmy jako účinnost, efektivita, ekonomičnost návrhu, variabilita a v neposlední řadě proveditelnost v rámci možností studenta VŠ.

4.1.1 Technologický návrh

Před zahájením tvorby myšlenky bylo nutné rozhodnout, jakým způsobem bude proces aeroponie prováděn. Na základě dostupných podkladů a výše uvedeného bylo rozhodnuto o stolovém provedení. Principem tohoto provedení je rovná plocha s otvory pro umístění rostlin určených pro pěstování, prostor pro kořenový systém a systém rozstříku, jímací nádoba na aerosol a prostor pro technologii. Nad rovinou plochy pro pěstování bylo dále nutné uvažovat a konstrukci pro osvětlení.

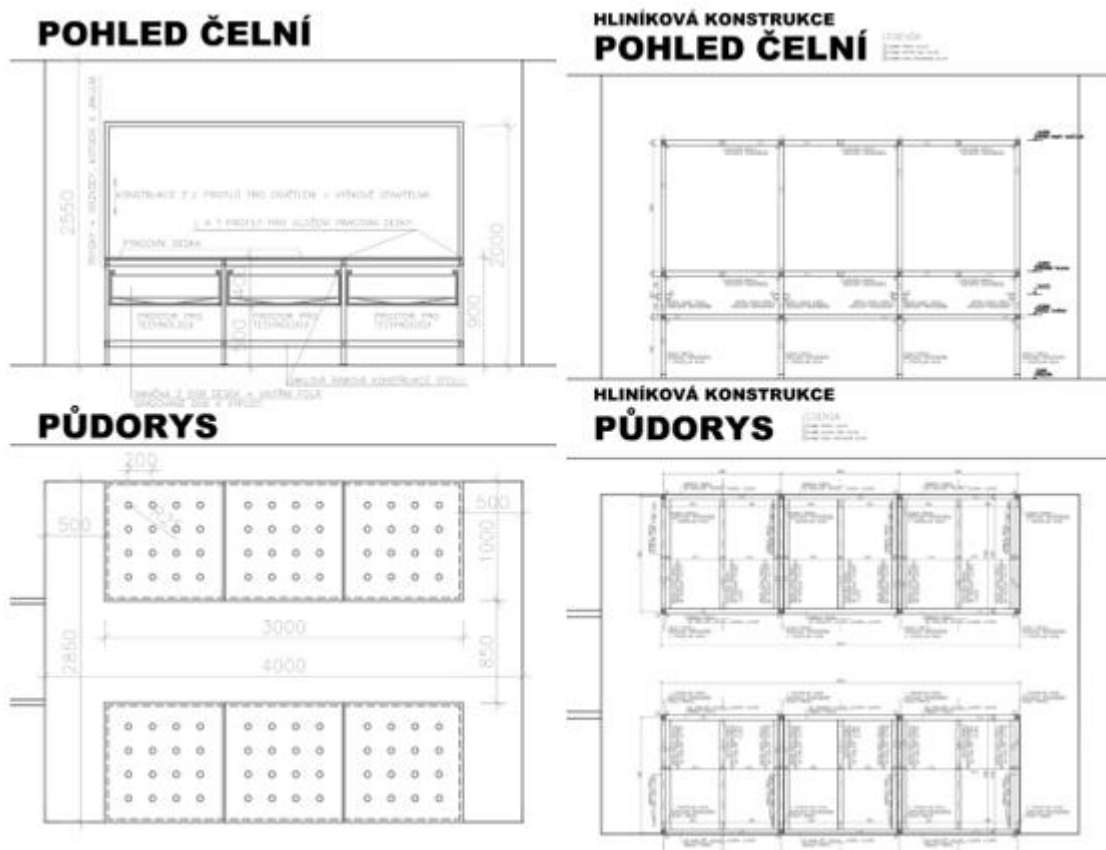
Rozměrově bylo pro zadání nutné respektovat požadovaný počet rostlin a prostorové možnosti místnosti, v níž měl být pokus realizován. Po zaměření místnosti a porovnání požadovaných kapacit, byl zvolen rozměr jednotlivých stolů na půdorysné míry 1000 x 3000 mm. Tento modul umožňoval rozdělit plochu na jednotlivé sekce o rozměru 1000 x 1000 mm. Po umístění stolů do prostoru zbýval mezi stoly dostačující manipulační prostor.

Při prvotním návrhu se uvažovalo o provedení konstrukce stolů z klasických tenkostěnných ocelových profilů jako jakly, L profily nebo páskoviny. Jednalo se o klasický zámečnický výrobek (viz obrázek 9). Po vytvoření prvotního návrhu a vynesení půdorysného modelu na místě bylo zjištěno, že dosud nebyla řešena otázka transportu výrobku na určené místo. Po ověření šířkových možností cesty bylo shledáno, že stávající dispozice neumožňuje, bez provedení destrukčních stavebních zásahů, dopravit uvažované stoly na místo. V úvahu přicházela jejich rozměrová korekce, to by však bylo provedeno na úkor pěstební kapacity a využitelnosti dané plochy místnosti.

Bylo nutno najít jiný konstrukční systém, který by umožňoval sestavení konstrukce stolů na místě. Za tímto účelem byl zvolen systém hliníkových profilů Kombi 40/40. Systém umožňuje spojování jednotlivých profilů v různých úhlech, jedná se víceméně o velkou stavebnici.

Celý systém řešení je unikátní v tom, že umožňuje dodatečné úpravy – případnou celkovou demontovatelnost za použití základních domácích nástrojů.

Další částí bylo provedení jímací nádrže pod kořenovým systémem a koordinace s celkovou technologií systému. Pro zjednodušení v následujícím textu nazývám tuto část také jímací nádrž.



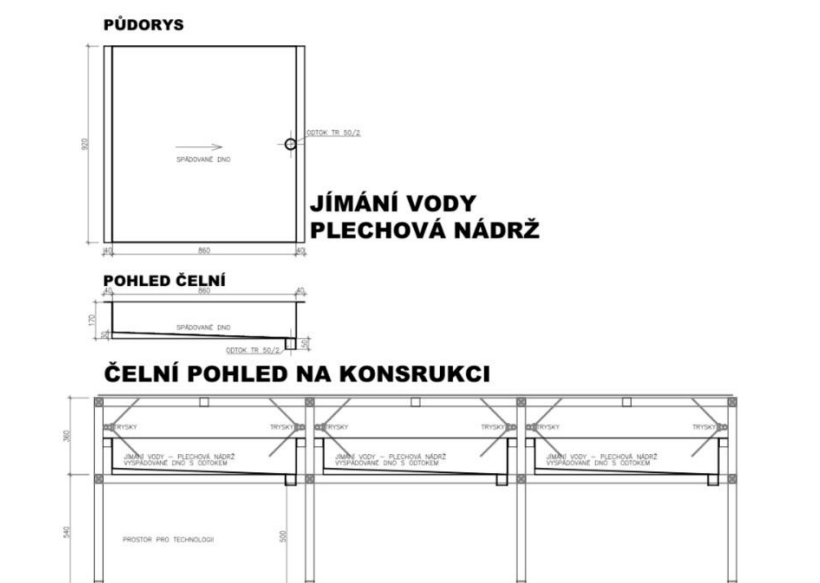
Obrázek 9: Návrh konstrukce aerobické jednotky

Variant na provedení jímací nádrže bylo více. Zadáním pro její konstrukci byla její vyjímatelnost a zajištění odtoku živního roztoku.

Mezi prvotními návrhy bylo provedení jímacích nádrží z OSB desek + jejich následné vylepení PVC střešní folií. Tato myšlenka v sobě spojovala několik technologických kroků, zejména pak výrobní cestu minimálně přes dva subjekty, které v pandemické době nebylo jednoduché časově zkoordinovat.

Druhou variantou bylo provedení jímací nádrže z plastových desek tl. cca 5 mm, které by se po nařezání na požadované díly k sobě slepily. Zde však panovala obava o celkovou stabilitu jímacích nádrží po jejich slepení. Variantně se řešila možnost zakázkové výroby plastové jímací nádrže systémem monobloku (systém vstřikovaného plastu do předem připravené formy). Tato varianta však nebyla ekonomicky ani časově dostupná.

Jako konečné řešení byla zvolena varianta zámečnické výroby jímacích nádrží. K výrobě byl z ekonomických důvodů zvolen klasický plech tl. 2 mm (viz obrázek 10). Jednalo se o minimální možnou tl. plechu pro daný rozměr šuplíků, aby se zamezilo vlnění plechu a byla zaručena dostatečná stabilita jeho konstrukce při minimalizaci celkové váhy šuplíku. I tak, při uvedené tl. plechu váží jeden kus šuplíku 25 kg. Na jeden stůl byly použity 3 šuplíky, celkové zatížení konstrukce tedy dosáhlo 75 kg. Tato váha + váha konstrukce stolu je roznesena do 6 bodů (nohy stolu), tzn. že bodové zatížení podlahy dosahovalo 12,5 kg na roznášecí ploše 4 x 4 cm. Po započtení celkové předpokládané váhy konstrukce se jednalo o bodové zatížení cca 15 kg. Preventivně byla provedena zkouška nosnosti podlahové konstrukce pokusem. Nosnost konstrukce vyhověla.



Obrázek 10: Jímací nádrže pro aeroponickou jednotku

Protože se jednalo o zámečnický výrobek, bylo možno požadovaným způsobem konstrukci jímací nádrže vytvarovat tak, aby byl zabezpečen odtok jímaného roztoku a byl umožněn jeho pojezd v konstrukci stolu na připravených vodících profilech. Korozivzdornost povrchu pak byla zajištěna syntetickým nátěrem. Jako výhledové zlepšení kvalitativních vlastností tohoto prvku je výroba jímací nádrže z nerezového materiálu, nejlépe vlastnosti AISI 316 (nerez používající se v bazénech) a výše.

Dále bylo nutno dořešit provedení samotné plochy pro umístění rostlin. Muselo se jednat o lehký materiál, odolný vlhkosti, s možností provedení otvorů pro umístění rostlin. Jako optimální řešení byly zvoleny polykarbonátové komůrkové desky tl. 10 mm. Tyto desky se vyznačují svojí tuhostí, minimální vahou a snadnou zpracovatelností. Po vyrobení šablony (vytištěno v měřítku 1:1 na velkoplošném tisku) pro vynesení otvorů se za použití truhlářského vykružovače realizovaly samotné otvory. Po provedení otvorů bylo nutné utěsnit obnažené komůrky v řezu. Bylo uvažováno o umístění plastových prostupek, které se používají jako kabelové prostupky pracovních desek kancelářských stolů. Jejich cena při celkovém počtu všech provedených otvorů byla vyhodnocena jako neekonomická, proto byla zvolena varianta vylepení řezové roviny instalátorskou voděodolnou izolační páskou.

Pro zajištění tmavého prostředí kořenového systému byl povrch desek opatřen černým nátěrem. Za účelem vyjímatelnosti desek pak byla instalována madla pro uchopení.

Další otázkou bylo, jakým způsobem utěsnit obvodovou mezeru mezi spodním lícem desek pro umístění rostlin a horním lícem vodícího profilu šuplíku. V této mezeře byl umístěn systém trysek. Bylo nutno zamezit, aby aerosol, který trysky produkují, pronikal mimo vymezený prostor. Původně bylo uvažováno důmyslném řešení, kdy by byl tento prostor zajištěn klempířským lemováním z barveného plechu. Toto řešení nebylo nakonec z ekonomických a časových důvodů realizováno. Výroba klempířských lemů by musela proběhnout až po zaměření na místě, tzn. po provedení všech konstrukcí, včetně technologických rozvodů. Cena, čas a nutnost koordinace s vnějším subjektem nakonec rozhodly, že k utěsnění byla použita pojistná střešní hydroizolační folie a instalátorská těsnící

páska. Jednalo se o rychlé a efektivní řešení, které sice není systémové, ale požadovanou funkci zajistí.

Závěrem lze konstatovat, že navržená konstrukce požadovaným způsobem splňuje své zadání. Jedná se o funkční konstrukci, kterou je možno nadále zlepšovat. Její hlavní předností je její nízká cena, funkčnost, demontovatelnost a variabilita. Finální podoba nově postavené aeroponické jednotky je na obrázku 11.



Obrázek 11: Nově zhotovená aeroponická jednotka



Obrázek 12: Řídící jednotka

4.1.2 Technologický systém

Samotnou konstrukci bylo nutné vybavit funkčním technologickým systémem. Systém se skládá ze dvou částí, z tlakové a gravitační.

Gravitační část pracuje na principu samovolného pohybu kapaliny. Jedná se o princip, při němž živný roztok opustí tlakovou část systému, tzn. tryskou je živný roztok distribuován ve formě aerosolu ke kořenovému systému rostlin. Okap z kořenů je jímán jímací nádrží pod kořeny a odtud stéká plastovým potrubím, zakončeným filtrem, zpět do sběrné nádrže s živným roztokem. Do této nádrže je roztok doplňován a jsou v něm měřeny všechny stěžejní parametry (pH, EC, rozpuštěný O_2 , teplota).

Z této nádoby je pak membránovým čerpadlem SHURFLO 8000-543-238 roztok distribuován do tlakové části systému, na jehož jedné straně je umístěna expanzní nádoba o objemu 5 l a na straně druhé tlakový ventil a vysokotlaké trysky. Tento systém je propojen PP-RCT potrubím, které má pracovní teplotu 10–60 °C při pracovním tlaku 0,8–1,6 MPa. Expanzní nádoba v této části systému udržuje trvalý tlak 5,5 baru. Vysoký tlak je důležitý pro vytvoření co jemného aerosolu, který je vysokotlakými tryskami distribuován do kořenového systému rostlin. Součástí celého systému je časový spínač, který zajišťuje v pravidelných intervalech

sepnutí systému. Po celou dobu kultivace byl spínač nastaven na interval 4 s zapnuto a 96 s vypnuto.

Celý systém funguje v následujícím schématu: čerpadlo nasaje vodu ze sběrné nádrže a natlačí ji do uzavřené části systému, kde je díky expanzní nádobě udržován potřebný tlak. Časový spínač pak otevře tlakový ventil, který vpustí živný roztok do potrubí a trysek a dojde k ostřiku kořenového systému. Z kořenové zóny se nevstřebaný živný roztok vrací do sběrné nádrže. Řídící jednotka je zobrazena na obrázku 12.

Jako zdroj světla byly použity LED panelová světla 2 SPYDR 2X od výrobce Fluorence, která byla na konstrukci zavěšena pomocí provázků s karabinami.

4.2 Pěstování, údržba a péče

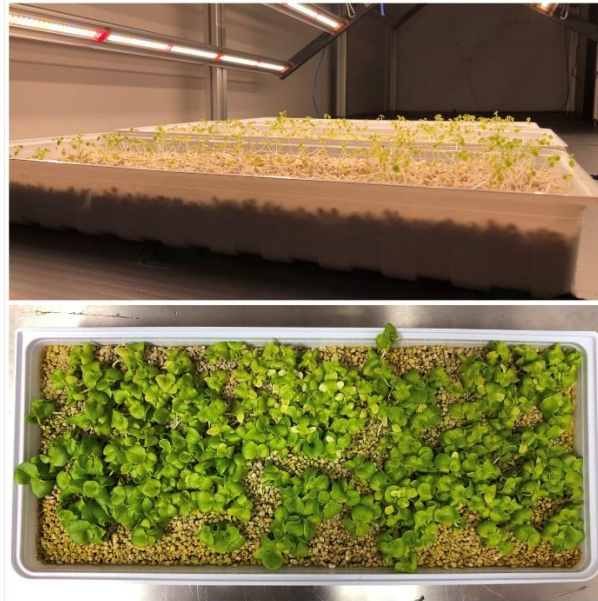
Kapitola popisuje proces bezpůdní kultivace v aeroponické jednotce od předpěstování sazeniček, až po finální sklizeň. Experiment kultivace trval 55 dní, z nichž 20 dní byly předpěstovávány sazeničky. Samotná kultivace v aeroponickém systému trvala 35 dní. Systém byl kontrolován denně, kdy byly měřeny hodnoty pH, EC, O₂ a teplota živných roztoků, přičemž roztoky byly po změření doplněny do původního množství, aby bylo zamezeno přerušování zavlažovacího cyklu. Byla kontrolována vlhkost a teplota pěstební místnosti a v případě vychýlení hodnot ze stanovených hranic byly tyto parametry okamžitě upraveny. Časová náročnost každodenního úkonu se pohybovala mezi 30–60 minutami.

4.2.1 Předpěstování sazeniček

Dříve než bylo možné zahájit kultivační proces, bylo nutné vybrat správnou odrůdu salátu. Na trhu se nevyskytují žádné odrůdy vyšlechtěné speciálně pro bezpůdní systémy, a proto byl výběr omezen na odrůdy určené do půdní kultivace. Byla vybrána odrůda hlávkového salátu k rychlení (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.) – Bremex od výrobce SEMO. Výrobce uvádí, že odrůda Bremex je velmi raná odrůda salátu určená k rychlení, která tvoří středně velké cca 200–300 g světle zelené hlávky, které jsou pevné a dobře uzavřené. Odrůda je vysoce odolná k vybíhání a je rezistentní k plísni salátové. Předpokládaná vegetační doba odrůdy pro kultivaci v půdě je 75–85 dní od výsadby do sklizně a sklízet lze jednorázově.

Jako pěstební médium pro výsev byl vybrán Agroperlit, jehož hlavní vlastností je dobré provzdušnění substrátu. Perlit byl nasypán do plastových misek o rozměrech 45 x 20 x 6 cm, které byly naplněny do tří čtvrtin. Poté byla vyseta semínka (cca 100 semínek na jednu plastovou misku), která byla překryta jemnou vrstvou nově přidaného perlitu. Každá mísa byla zavlažena 1 litrem kohoutkové vody, přikryta černou, paropropustnou střešní fólií a nechána 3 dny při teplotě 21 °C, přičemž byla každý den kontrolována a v případě vyschnutí perlitu byl přidán další litr kohoutkové vody. Po 3 dnech už semínka začala viditelně klíčit, proto byla fólie sejmuta. Mísy se sazeničkami byly přesunuty na horní desku aeroponické jednotky, přímo pod světla. Světelný režim byl časovačem nastaven na 12 hodin zapnuto a 12 hodin vypnuto. Následně byla každý další den kontrolována vlhkost perlitu a v případě vyschnutí byla přilita čerstvá kohoutková voda. Zpravidla se přilával 1 l kohoutkové vody každý druhý den. K tomu byl jednou týdně namíchán živný roztok z hnojiv Terra Aquatica o koncentraci určené pro vývoj prvních kořínků rostliny. Detailní popis koncentrací živného roztoku je uveden v kapitole

„Management živného roztoku – Hydroponický roztok“. Sazeničky byly pěstovány do té doby, než se jim vytvořil dostatečně velký kořenový systém, který dokáže absorbovat živinový roztok vytvářený tryskami. Kultivace sazeniček trvala 20 dní. Na obrázku 13 jsou sazeničky kultivované v perlitu a stav sazeniček před jejich úpravou a vsazením do systému.



Obrázek 13: Sazeničky v míse s perlitem a sazeničky před výsadbou do systému

Před vsazením sazeniček do systému byl proveden testovací pokus, kdy byly zvláště pěstované sazeničky umístěny do aeroponického systému. Jelikož po 5 dnech nedošlo k usmrcení ani jednoho salátu a nárůst biomasy salátů byl viditelný, aeroponický systém byl vyhodnocen jako kultivace–schopný. Na obrázku 14 jsou sazeničky připravené na testovací provoz a jejich stav po 5 dnech.



Obrázek 14: Sazeničky pro testovací provoz

Před vsazením sazeniček do systému musela být provedena řádná úprava. Každá vybraná rostlina byla opatrně vyjmuta z perlitu, který byl následně odstraněn opakovaným oplachováním ve vodě a očištěn. Kořínky byly vysušeny papírovými utěrkami a následně byla každá vybraná rostlina zvážena a byl spočítán aktuální počet jejích listů. Zvážené sazeničky byly umístěny do neoprenových kroužků, které byly zasunuty do upravených plastových košíčků, jež měly stejný průměr jako díry vytvořené do desky aeroponického systému, aby tak došlo k dokonalému oddělení kořenové a listové zóny. Každý košíček byl označen a před vložením do systému prozatímně zavlažován uložením do plastové mísy s vodou. Očištěno, naváženo a upraveno bylo dohromady 108 kusů salátů, 54 kusů pro aeroponickou jednotku živenou hydroponickým roztokem (Systém 1) a 54 kusů pro jednotku živenou akvaponickým roztokem (Systém 2). Nakonec byly sazeničky v košíčcích vsazeny do systému a aeroponická kultivace započala.

4.2.2 Management živného roztoku

U Systému 1 i Systému 2 byl živný roztok umístěn v plastových bednách v množství 15 l. Každých 7 dní došlo ke kompletní výměně roztoku, vymytí plastových beden a vyčištění filtrů. Aeroponické jednotky měly různý druh výživy. Systém 1 byl živen roztokem vzniklým smícháním vody a hnojiv TriPart (Terra Aquatica), zatímco Systém 2 byl živen vodou z akvakultury. Živné roztoky byly kontrolovány a doplňovány na původní množství 15 l každý den. K úpravě pH byl použit přípravek Advanced Hydroponics pH minus na růst.

4.2.2.1 Hydroponický roztok

K míchání hydroponického roztoku do Systému 1 byla používána voda upravená reverzní osmotickou jednotkou od výrobce Grow Max Water.

Podíl reverzně osmotické vody činil 80 %, dalších 20 % bylo doplněno kohoutkovou vodou. Do vody bylo přimícháno třísluškové hnojivo značky TriPart (Terra Aquatica). Kombinace a množství hnojiv na litr vody společně s dobou užívání dávkování pro jednotlivé růstové fáze je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4: Dávkování hnojiv TriPart (Terra Aquatica) podle růstové fáze

	1 st roots	1 st true leaves	Growing	Preflowering
TriPart Grow	0,5 ml/l	1 ml/l	1,8 ml/l	2 ml/l
Tripart Micro	0,5 ml/l	1 ml/l	1,2 ml/l	2 ml/l
TriPart Bloom	0,5 ml/l	1 ml/l	0,6 ml/l	1,5 ml/l
Užívání	1. – 7. den	7. – 19. den	20. – 49. den	50. – 55. den

Živný roztok byl každý den kontrolován přístrojem MultiLine® IDS, jímž byly měřeny parametry pH, EC, rozpuštěný O₂ a teplota vody. Na tyto parametry byly pevně stanoveny hranice podle Singh & Bruce (2016), kteří pro hydroponickou kultivaci salátu doporučují pH 5,5 – 6,8; EC 1,2 – 1,8 dS/m a teplotu roztoku 16 – 21 °C. Míra rozpuštěného O₂ se u hydroponického roztoku nedala nijak ovlivnit, systém aeroponie se sám postaral o dostatečnou

hladinu O₂ v živném roztoku. K jedinému vychýlení od hranic došlo při použití hnojiv TriPart při růstové fázi Preflowering, která trvala posledních 5 dní kultivace. Vychýleným parametrem byla EC, která by podle výrobce měla dosahovat 2 dS/m, jelikož je do vody namíchána větší koncentrace hnojiv.

Následně bylo třeba doplnit hladinu roztoku v plastové bedně do původního stavu (15 l). Doplnění bylo přizpůsobeno naměřeným parametrům. Podle velikosti EC byla doplňována směs reverzní osmotické a kohoutkové vody v poměru 80 ku 20 % nebo nově přimíchaný živný roztok z hydroponických hnojiv nebo směs obojího, aby došlo k uvedení hodnot EC do požadovaného stavu. Poté bylo upraveno pH za použití přípravků pH Plus či pH DOWN (Advanced Hydroponics, Holandsko). Hydroponický živný roztok byl z hlediska úprav pH nenáročný, k úpravám došlo pouze několikrát za celou dobu kultivace v systému.

4.2.2.2 Akvaponický roztok

Akvaponický živný roztok, kterým byl zásobován Systém 2, byl přivážen každých 7 dní z akvaponické farmy Rybí zahrada v Lážovicích. Akvaponická voda byla na farmě odebírána ze sběrné nádrže polykultury, která byla tvořena tilapiemi, koi kapry a baby sumečky, živnými krmeními Skretting Mervall (Skretting, Francie). Voda byla přečerpána do 50 l barelu, u kterého byly po přivezení do pěstírny okamžitě změřeny všechny kontrolní parametry (pH, EC, O₂, teplota). Průměrné hodnoty přivezené vody byly: pH 7,27; EC 1,205 dS/m; rozpuštěný O₂ 6,018 mg/l a teplota 21,88 °C. Barel s akvaponickou vodou byl skladován v pěstírně při teplotě přibližně 19 °C. Kontrolní parametry byly měřeny každý den, upravováno bylo ale jen množství rozpuštěného kyslíku ve vodě. V případě, že množství rozpuštěného O₂ kleslo pod 5 mg/l, byl do vody ponořen vzduchovací kámen na 30–60 min, načež se hodnota zvýšila na 6–7 mg/l rozpuštěného O₂. Voda z barelu byla dle potřeby doplňována do Systému 2, přičemž voda byla před nalitím do bedny se zásobním roztokem zfiltrována průtokem filtrační ponožkou o jemnosti filtrace 100 µm.

U zásobního roztoku Systému 2 byly také každý den měřeny parametry, jako pH, EC, rozpuštěný O₂ a teplota vody. Po změření byl roztok doplňován na původní množství 15 l. Pokud úprava EC nepožadovala razantnější úpravu, bylo každý den dolito 750 ml mixu reverzně osmotické a kohoutkové vody v poměru 80 ku 20 %, aby byla simulována recirkulace 5 % objemu živného roztoku. Úprava EC byla závislá na hodnotě EC akvakulturní vody v barelu. Pokud se hodnota EC pohybovala v hodnotě EC barelu +/- 0,400 dS/m, nebyla dodatečná úprava živného roztoku nutná. Roztok byl doplněn na původní množství vodou z barelu.

Nakonec docházelo k úpravě pH, které se v Systému 2 enormně zvyšovalo. Požadovaná hodnota pH v roztoku byla řízena pH vody v barelu, ve většině případů se jednalo o hodnotu blízké 7,2. Stav pH roztoku byl po dni recirkulace v akvaponickém systému vyšší než 8, proto byly každý den až na výjimky aplikovány 0,4 ml pH DOWN, čímž došlo k úpravě pH na požadovanou hodnotu. Zdánlivým problémem byla udržovaná hodnota pH, jelikož pH akvakulturní vody v barelu se pohybovalo okolo 7,2 a Singh & Bruce (2016) doporučují pH 5,5–6,8. Na posledních 15 dní kultivace byla provedena změna v úpravě pH, kdy bylo za denního použití přibližně 0,8 ml pH DOWN přípravku sníženo pH na hodnotu blízkou 6,5.

Hodnota rozpuštěného kyslíku v živném roztoku nebyla stejně jako u Systému 1 ovlivnitelná, aeroponický systém se ale dokázal postarat o dostatečné množství rozpuštěného O₂ v roztoku.

4.2.3 Péče o vsazené rostliny

Rostliny byly stejně jako živné roztoky kontrolovány každý den. Kontrolními parametry byla teplota místnosti a vlhkost vzduchu. Hlavními aspekty ovlivňujícími teplotu a vlhkost vzduchu v místnosti byla klimatizace a světla. Světla produkovala velké množství tepla a při vypnutí klimatizace se teplota v místnosti zvýšila až na 33 °C, což může mít pro rostliny fatální následky. Klimatizace byla spuštěna neustále v nastavení na 18 °C, ale i přes její poměrně dobrou účinnost teplota v místnosti zpravidla neklesla pod 20 °C. Kvůli teplu produkovaném světly byly na konstrukci umístěny ventilátory, které zajistily dostatečnou cirkulaci vzduchu a přijatelnější teplotu působící na povrch listů salátu.

Problémem použití klimatizace bylo vysoušení vzduchu v místnosti, kdy se vlhkost vzduchu při její funkci pohybovala okolo 33 %, což je hodnota pod požadovanou hranicí. Ideální vlhkost vzduchu v místnosti je uvedena v tabulce 5.

Tabulka 5: Vlhkost vzduchu v místnosti podle VPD (vapor pressure deficit)

Teplota v místnosti (°C)	Minimální vlhkost vzduchu (%)	Maximální vlhkost vzduchu (%)
18	37,5	50
19	40	55
20	45	60
21	47,5	60
22	50	62,5
23	52,5	65
24	55	67,5

Jelikož vlhkost vzduchu v místnosti byla nedostatečná, byl pořízen ochlazovač vzduchu 4v1 OV5200 (Concept), který dokázal snížit teplotu a pomohl zvýšit vlhkost vzduchu v místnosti na požadované hodnoty. Do přístroje byla doplňována každé ráno a odpoledne voda, aby mohl fungovat nepřetržitě. Rostliny byly každé ráno pomocí ručního rozprašovače ošťříkány přibližně 400ml vody, čímž se dočasně zvýšila vlhkost vzduchu až o 10 %.

Světla byla řízena časovačem a jejich režim byl na začátku kultivace 12 hodin zapnuto a 12 hodin vypnuto. Poté docházelo k úpravě časování podle aktuální roční doby, kdy se doba zapnutí světel prodlužovala podle východu slunce.

Jelikož byly Systém 1 i Systém 2 umístěny v jedné místnosti, parametry jako teplota i vlhkost byly vždy u obou stejné a nemohlo tak dojít k ovlivnění růstu salátů jedním z uvedených faktorů.

Po 35 denní kultivaci a splnění všech výše popsaných podmínek bylo možné provést sklizeň salátů. Sklizeň probíhala hladce, saláty byly z desek snadno vyjímatelné a nepopíratelnou výhodou oproti sklizni z půdy byla čistota salátů. Stav salátů je zobrazen na obrázku 15 a 16 a kořenový systém je na obrázku 17.



Obrázek 15: Stav salátů v Systému 1 a Systému 2 před sklizní



Obrázek 16: Stav salátů Systému 1 s hydroponickým roztokem před sklizní



Obrázek 17: Stav kořenového systému v Systému 1 s hydroponickou výživou

4.3 Vyhodnocovací metody

4.3.1 Růstové parametry

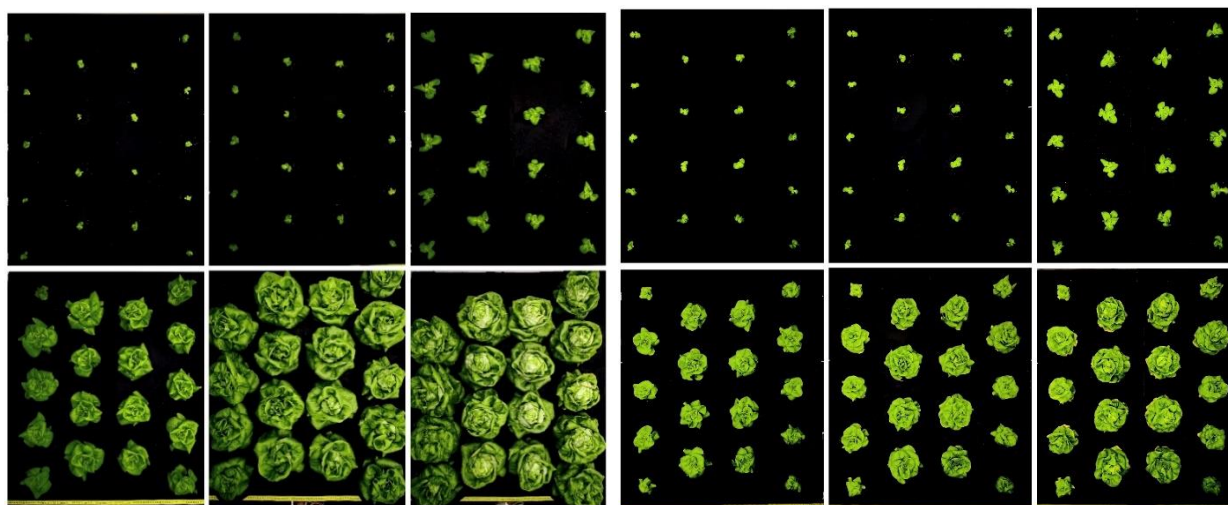
Před vsazením do systému byla každá sazenice salátu zvážena, byl spočítán počet listů rostliny a hodnoty byly zapsány do tabulky. Po 35 dnech kultivace proběhla sklizeň, kdy byl každý salát zvlášť vyndán ze systému, byl sejmuto neoprenový kroužek z kořene, který rostlinu držel a kořeny rostliny byly usušeny papírovými utěrkami. Byla zvážena celá hlávka i s kořenem, poté byl odříznut kořen v místě, kde začínaly růst první listy a následně byl samostatně zvážen kořen i hlávka salátu. Z každého aeroponického systému (Systém 1 a Systém 2) byly spočítány listy z 10 salátů. Shoot root ratio bylo vypočítáno ve vztahu $SR\ ratio = \frac{\text{váha čerstvých kořenů}}{\text{váha čerstvých listů}}$.

4.3.2 Počítačová analýza obrazu

Systém 1 i 2 obsahoval 3 pěstební boxy. Tyto rostliny byly foceny telefonem ihned po vsazení do systému a následně byla fotodokumentace pro počítačovou analýzu prováděna každých 7 dní. Pro odstranění stínů a odlesků byly fotografie upraveny v programu Procreate, kterým bylo upraveno černé pozadí tak, aby se na něm nevyskytovaly odlesky, které by mohly ovlivnit analýzu velikosti listové plochy. K měření velikosti listové plochy salátů byl použit program ImageJ. Programem ale nebyl zjištěn 100 % povrch salátů, jelikož byly listy různě zkroucené, a tak nebyly v některých momentech započítány do měření. Z měření byly vyřazeny saláty, které v průběhu kultivace odumřely. Z aeroponického systému s hydroponickým roztokem (Systém 1) byly vyřazeny vzorky: 18 z boxu č. 1; 19 a 36 z boxu č. 2; 41, 51, 52 a 54 z boxu č. 3. Ze systému s akvaponickým živným roztokem (Systém 2) byly vyřazeny vzorky: 1, 14, a 18 z boxu č. 1; 19, 22, 23 a 32 z boxu č. 2; 37 a 50 z boxu č. 3.

Analýza listové plochy byla porovnáována mezi jednotlivými pěstebními boxy u Systému 1 a Systému 2, byl nakonec porovnán nárůst listové plochy mezi Systémem 1 a Systémem 2.

Na obrázku 18 a 19 je zobrazen nárůst listové plochy pěstební boxu č. 1 u Systému 1 a Systému 2 za 35 dní kultivace. Obrázky jsou ve stavu použitelném pro program ImageJ, k jehož úpravě byla využita aplikace Procreate.



Obrázek 18: Nárůst listové plochy v Systému 1, box 1

Obrázek 19: Nárůst listové plochy v Systému 2, box 1

4.3.3 Kvalitativní hodnocení

Salátové hlávky byly ihned po sklizni zabaleny do označených igelitových sáčků a odvezeny do Ústavu experimentální botaniky AV ČR, v. v. i., kde byly vzorky zpracovány.

Zpracování vzorků a extrakce

Čerstvé saláty byly lyofilizovány ve vakuu při teplotě $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hodin. Vysušená tkáň byla homogenizována (pod kapalným dusíkem) na jemný prášek. Pro extrakci sušiny bylo do falkon naváženo 100 mg homogenizovaných listů, do kterých bylo přidáno 5 ml 90% MeOH. Falkony byly vortexovány a inkubovány ve tmě při pokojové teplotě po dobu 1 hodiny, následně znovu vortexovány, sonikovány 10 sekund a inkubovány další 1 hodinu. Vzorky byly odstředovány po dobu 10 minut při 4000 otáčkách za minutu. Nakonec byl použit PVDF filtr k získání čirého extraktu, který byl až do analýzy skladován při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro stanovení obsahu chlorofylů a celkového obsahu karotenoidů byly extrakty zředěny 1:1 a 1:3 (500 μl extraktu + 500 μl 90% MeOH a 250 μl extraktu + 750 μl 90% MeOH) a do jamek bylo napipetováno 200 μl .

Pro stanovení celkového obsahu polyfenolů byly extrakty naředěny 1:19 (50 μL extraktu + 950 μl H₂O) a 1:39 (25 μl extraktu + 975 μl H₂O) a postupovalo se podle níže uvedeného protokolu.

Měření proběhlo za použití přístrojů FreeZone 2.5 Labconco Freeze-Dryer (Labconco corp., Kansas City, Missouri, USA) vybavený vakuovou pumpou (Vacuubrand GMBH + CO KG, Wertheim, Germany) at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.370 mBar., TECAN Infinite M200 microplate reader (Tecan Group, Grodig, Austria), Centrifuge Hettich Universal 32R, (Hettich Zentrifugen, Tuttlingen, Germany), Thermo Shaker MB 100-4P for microplate incubation and shaking (Hangzhou Allsheng Instruments Co., LTD, Hangzhou, China).

Stanovení obsahu chlorofylů

Pro stanovení obsahu chlorofylů bylo napipetováno 200 μl zředěného roztoku do jamky a vzorky byly měřeny UV/VIS spektrofotometrem při 665, 652 a 470 nm. Koncentrace chlorofylů a a b byly stanoveny podle rovnice pro 90% MeOH popsané Lichtenthalerem (1987):

$$\begin{aligned} 90\% \text{ MeOH:} \quad Ca \text{ (}\mu\text{g/ml)} &= 16.82 \text{ Abs}_{665.2} - 9.28 \text{ Abs}_{652.4} \\ Cb \text{ (}\mu\text{g/ml)} &= 36.92 \text{ Abs}_{652.4} - 16.54 \text{ Abs}_{665.2} \end{aligned}$$

$$\text{Celkový obsah karotenoidů (x+c) (}\mu\text{g/mL)} = (1000 \text{ Abs}_{470} - 1.91 Ca - 95.15 Cb)/225$$

Celkový obsah polyfenolů

Ke stanovení celkového obsahu polyfenolů bylo potřeba připravit 12% Na₂CO₃ (12 g Na₂CO₃ rozpustit v 88 ml H₂O) a připravit ředící řadu kyseliny gallové v koncentrační řadě 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,56; 0,78; 0,39 $\mu\text{g/ml}$ (pracovní roztok z 1 mg/mL MeOH zředěného na 75 $\mu\text{g/ml}$ MeOH; 75 μl vzorku + 925 μL H₂O). Do jamek na destičku byla přidána ředící řada kyseliny gallové (GA) (200 μl standardu do první jamky, do dalších 100 μl) a do dalších bylo přidáno 100 μL H₂O, 100 μl vzorku, 25 μl F-C činidla, poté byly vzorky umístěny na 10 minut na orbitální třepačku (cca 200 rpm.) a nakonec bylo přidáno 75 μl 12% Na₂CO₃. Celkový objem v jamce byl 300 μl . Vzorky na destičce byly inkubovány po dobu 30 minut ve tmě při teplotě

37 °C a nakonec byla měřena absorbance vzorků při 760 nm. Vzorky byly vyhodnoceny jako GA ekvivalent \pm SD (mg GA/g sušiny).

4.3.4 Senzorická analýza

Senzorické analýzy se zúčastnilo 10 hodnotitelů, skládajících se ze 4 žen a 6 mužů ve věku od 25 do 45 let.

Na senzoričnou analýzu bylo třeba vyčlenit dohromady 20 kusů salátu (10 kusů ze Systému 1 a 10 kusů ze Systému 2). Salátové hlávky byly sklizeny v dopoledních hodinách. Poté byl každý salát umístěn do igelitového pytle, zalepen a umístěn do chladničky, kde byl skladován 22 hodin při teplotě 5 °C.

Senzorická analýza byla provedena v senzoričnou laboratoři ČZU vybavené individuálními boxy, které znemožňovaly vizuální kontakt s okolím. Každý účastník měl za úkol senzoričnou posoudit dvě hlávky salátu, které byly označeny čtyřčíselnými kódy, přičemž jeden salát pocházel ze Systému 1 a druhý salát ze Systému 2. K neutralizaci chuti mezi posuzováním vzorků měli hodnotitelé k dispozici čerstvou vodu. Každý hodnotitel byl vybaven nožem a prkénkem k nakrájení salátové hlávky. Fotodokumentace průběhu senzoričnou hodnocení je na obrázku 20.



Obrázek 20: Proces senzoričnou hodnocení

Pro posuzování bylo zvoleno 9 senzoričnou deskriptorů, jejichž charakteristika a způsob posuzování jsou uvedeny v tabulce 6. Senzoričnou panel hodnotil vzorky s využitím 100 mm dlouhé nestrukturované stupnice, která byla pro účely statistické analýzy transformována na číselnou škálu (0–100). Získaná data byla analyzována ve statistickém programu SAS s využitím smíšeného lineárního modelu (MIXED), který pro odhad používá metodu REML

(Restricted Estimate Maximum Likelihood). Do modelové rovnice byl zařazen pevný efekt systému produkce (Systém 1 = 1, Systém 2 = 2) a náhodný efekt hodnotitele. Výsledky jsou uváděny jako nejmenší průměrné čtverce (LSM) s příslušnou standartní chybou (SEM).

Tabulka 6: Popis deskriptorů uplatňovaných při senzorické analýze salátů

Senzorický atribut	Deskriptor a způsob hodnocení	Měřítko
Zrak		
Celková přijatelnost vzhledu	Osobní hodnocení, jak je vzorek pro konzumenta vzhledově přijatelný	0 – extrémně nepříjemný 100 – extrémně příjemný
Zahnědnutí okrajů	Výskyt zahnědnutí na okrajích listů (% výskyt kontinuity zahnědnutí na okrajích-lemování listů). Vyberete tři nejhnědší listy a odhadnete průměr míry zahnědnutí.	0 – žádné 100 – zahnědnutí okrajů listů je 100%
Čerstvost	Živost a jas charakteristický pro zeleninu před ztrátou vitality. Charakteristika vegetace v dobrém stavu, kdy dává spotřebiteli pocit čerstvosti a kvality vzorku	0 – zvadlý, naprostá absence čerstvosti 100 – čerstvý – 100% čerstvost, dojem právě sklizeného salátu
Čich		
Intenzita vůně	Intenzita jakéhokoliv aroma, velmi jemně 5krát promnout v ruce a v uzavřených dlaních přičichnout	0 – žádné aroma 100 – extrémně intenzivní
Sluch		
Křupavost	Intenzita slyšitelného křupnutí při prvním kousnutí do záhybu přeloženého listu salátu. Vyberte jeden z nejkrajnějších listů a tímto způsobem jej zhodnoťte.	0 - nekřupavý 25 – čerstvý baby špenát 80 – hrách setý 100 – extrémně křupavý
Chuť		
Intenzita chuti	Salát rozkrojte jako koláč. Vyřízněte malý trojúhelníček z celé hlávky salátu tak, aby se vám množství listů vešlo do úst	Výraznost chuti po 5 žvýknutích
Přijatelnost chuti	Příjemnost chuti po 10 žvýknutích	0 – žádná chuť 100 – extrémně intenzivní chuť
Hořkost	Přítomnost hořké, ostré nebo štiplavé chuti po 10 žvýknutích	0 – nepřítomná 100 – extrémně hořká
Celkové hodnocení		
Celková přijatelnost vzorku	Subjektivní zhodnocení přijatelnosti vzorku	0 – extrémně nepříjemný 100 – extrémně příjemný

4.3.5 Živinové složení roztoků

Obsah kationtů, aniontů a jednotlivých prvků byl měřen v roztocích pro Systém 1 i Systém 2. Akvaponická voda ze Systému 2 byla z barelu odebírána ihned po přivezení vody z akvaponické farmy do kónických zkumavek o objemu 50 ml. Vzorky byly do doby měření skladovány v mrazáku při teplotě $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ze Systému 1 bylo dohromady odebráno 6 vzorků. Pro Systém 1 s hydroponickým roztokem byly zvlášť namíchány 0,5 l vzorky pro jednotlivé růstové fáze dle návodu uvedeného v tabulce 4. Z těchto vzorků byly naplněny 50 ml kónické zkumavky, které byly do doby měření skladovány při teplotě $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dohromady byly odebrány 4 vzorky, pro jednotlivé růstové fáze rostliny: 1st roots, 1st leaves, growing a preflowering.

Před měřením byly všechny vzorky 1x zředěny destilovanou H_2O a zfiltrány membránovým filtrem Nylon o propustnosti $0,45\text{ }\mu\text{m}$. Obsah aniontů a kationtů v roztocích byl měřen iontovou chromatografií, zatímco obsah jednotlivých prvků byl měřen emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

5 Výsledky

5.1 Ztráty a spotřeba

V Systému 1 s hydroponickým roztokem uhynulo 8 kusů salátů, úspěšnost kultivace dosáhla 85,2 %. V Systému 2 s akvaponickým roztokem uhynulo 11 salátů, úspěšnost kultivace dosáhla 79,6 %. Veškerá uhynutí byla způsobena především rohovým efektem trysek, kdy kořeny salátů v rozích boxu byly umístěny mimo dosah aerosolu z trysek. Další ztráty byly způsobeny zanesením trysek, jež byly ucpány v průběhu kultivace.

Podle záznamů z laboratorního deníku byla spočítána spotřeba vody pro jednotlivé systémy. Systém 1 spotřeboval za celou dobu kultivace 198,2 l vody na celý systém. Spotřeba vody na 1 m² plochy činila 66 l vody, přičemž jeden salát v boxu by podle přímé úměry spotřeboval 3,7 l vody za 35 dní kultivace. Systém 2 měl výrazně nižší spotřebu vody, a to až o 50,4 %. Spotřeba vody činila 99,8 l na celý systém; 33,3 l vody na 1 m² plochy a 1,8 l vody na jeden salát.

5.2 Růstové parametry

Pro růstové parametry bylo hodnoceno 38 salátů ze Systému 1 a 43 salátů ze Systému 2. Byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka pro hmotnost před vsazením do systému, počet listů před vsazením do systému, hmotnost salátu po sklizni, přírůstek hmotnosti od vsazení po sklizeň, počet listů po sklizni, přírůstek počtu listů od vsazení po sklizeň, hmotnost samotných kořenů, hmotnost samotné salátové hlávky a shoot/root ratio (SR ratio), které bylo vypočítáno ve vztahu $SR\ ratio = \text{hmotnost kořene} / \text{hmotnost hlávky}$. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Průměr + směrodatná odchylka hodnot Systému 1 (hydroponie) a Systému 2 (akvaponie)

Systém	m 0	PL 0	m 1	Přírůstek m	PL 1	Přírůstek PL	m kořene	m hlávky	SR ratio
1	0,502	3,676	240,127	239,625	48	44	32,412	207,606	0,158
	± 0,191	± 0,709	± 51,667	± 51,705	± 7,81	± 6,928	± 9,1	± 45,193	± 0,031
2	0,472	3,698	60,803	60,331	27	34	24,562	36,164	0,716
	± 0,132	± 0,558	± 25,352	± 25,326	± 1,9	± 2,179	± 10,199	± 16,283	± 0,158

m 0 = hmotnost při vsazení do systému; PL 0 = počet listů při vsazení do systému; m 1 = hmotnost hlávky s kořenem po sklizni; Přírůstek m = přírůstek hmotnosti od vsazení po sklizeň; PL 1 = počet listů po sklizni; Přírůstek PL = přírůstek listů od vsazení po sklizeň

V programu Statistica 12 byly testovány hypotézy, že neexistují statisticky významné rozdíly mezi váhou salátů a počtem listů před vsazením do systému až po sklizeň.

Výsledky t-testu ukazují, že existuje statisticky významný rozdíl mezi váhou před vsazením do systému ($0,4914 \pm 0,016$ g) a po sklizni ($156,56 \pm 101,65$ g). Podobně existuje statisticky významný rozdíl mezi počtem listů před vsazením do systému ($3,639 \pm 0,618$) a počtem listů po sklizni ($42,47 \pm 10,96$), nezávisle na systému.

Další t-test byl použit ke zjištění statisticky významného rozdílu mezi váhovým přírůstkem od vsazení po sklizeň u Systému 1 ($245,57 \pm 51,57$ g) a Systému 2 ($60,33 \pm 25,32$ g). Podobně existuje statisticky významný rozdíl v přírůstku listů od vsazení až po sklizeň u Systému 1 ($51 \pm 6,11$) a Systému 2 ($34,89 \pm 25,32$).

Dalším aspektem byl nárůst kořenového systému, přičemž kořeny nejdelšího salátu dosáhly délky až 70 cm. U Systému 1 byla váha kořenů $32,77 \pm 8,433$ g a u Systému 2 byla $24,562 \pm 16,283$ g. Současně byl proveden ANOVA a Tukeyův test, kterým byl zjištěn statisticky významný rozdíl. Nárůst kořenového systému je zobrazen na obrázku 21.



Obrázek 21: Nárůst kořenového systému

5.3 Počítačová analýza obrazu

Veškerá data z programu ImageJ byla převedena do programu MS Excel. Data v jednotlivých skupinách od vsazení až po 5. týden kultivace byla zprůměrována a byla vypočítána směrodatná odchylka. Tato data uvedená v tabulce 8 byla použita pro výpočet statistické významnosti v programu Statistica 12.

Tabulka 8: Průměr a směrodatná odchylka velikosti listové plochy (cm^2) od vsazení až po sklizeň u jednotlivých pěstebních boxů v akvaponickém i hydroponickém systému

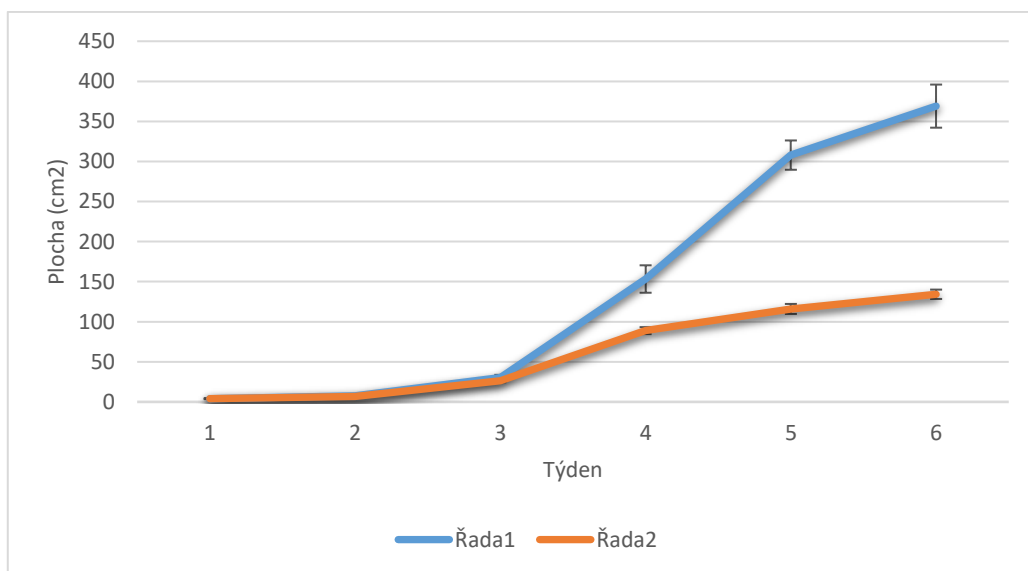
Box	Vsazení	1.týden	2.týden	3.týden	4.týden	5.týden
1 A	$4,218 \pm 1,4^{ab}$	$6,918 \pm 1,4^{ab}$	$27,535 \pm 5,0^{ab}$	$87,671 \pm 24,6^a$	$109,927 \pm 31,6^a$	$139,242 \pm 38,9^a$
2 A	$3,323 \pm 1,0^a$	$5,895 \pm 1,6^b$	$24,238 \pm 6,6^a$	$93,745 \pm 30,3^a$	$122,391 \pm 41,5^a$	$135,768 \pm 46,7^a$
3 A	$4,555 \pm 1,6^b$	$7,996 \pm 2,3^a$	$27,767 \pm 7,9^{ab}$	$93,745 \pm 25,8^a$	$122,391 \pm 33,8^a$	$135,768 \pm 35,9^a$
1 H	$3,727 \pm 0,9^{ab}$	$6,973 \pm 1,2^{ab}$	$28,942 \pm 5,4^{ab}$	$142,949 \pm 27,3^b$	$307,988 \pm 40,3^b$	$358,412 \pm 42,9^b$
2 H	$4,05 \pm 0,7^{ab}$	$7,998 \pm 1,6^a$	$28,493 \pm 5,1^{ab}$	$143,93 \pm 30,9^{bc}$	$289,621 \pm 57,5^b$	$349,1 \pm 69,9^b$
3 H	$4,078 \pm 1,1^{ab}$	$7,638 \pm 2,3^{ab}$	$34,214 \pm 6,8^b$	$173,065 \pm 24,5^c$	$326,17 \pm 39,5^b$	$399,642 \pm 54,4^b$

Čísla 1, 2, 3 = čísla boxů; A = akvaponický roztok; H = hydroponický roztok

Různá písmena jako horní indexy ve stejném sloupci označují homogenní skupiny ($p < 0,05$)

Z provedeného ANOVA testu vyplývá, že rozdíl mezi nárůstem listové plochy, zaznamenávaném po dobu 5 týdnů mezi třemi pěstebními boxy u Systému 1, neexistuje statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$). Statisticky významný rozdíl nebyl zjištěn ani u nárůstu listové plochy v jednotlivých boxech u Systému 2 ($p > 0,05$).

Nakonec byl srovnán nárůst listové plochy mezi Systémem 1 a Systémem 2, který je zobrazen v grafu 1.



Graf 1: Nárůst listové plochy Systému 1 (Řada 1) a Systému 2 (Řada 2) za 35 dní kultivace

K určení statisticky významného rozdílu byl použit t-test, jímž byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi nárůstem listové plochy u Systému 1 ($145 \pm 1,60 \text{ cm}^2$) a Systému 2 ($62,78 \pm 57,46 \text{ cm}^2$). Rozdílný nárůst začal v 3. týdnu, kdy Systém 1 dosáhl listové plochy $153,315 \pm 17,111 \text{ cm}^2$, zatímco rostliny v Systému 2 dosáhly plochy $88,903 \pm 4,36 \text{ cm}^2$. Ve 4. týdnu Systém 1 dosáhl plochy $307,926 \pm 18,28 \text{ cm}^2$ a Systém 2 plochy $116,007 \pm 6,236 \text{ cm}^2$. Signifikantní rozdíl byl zaznamenán v 5. týdnu před sklizní, kdy plocha povrchu salátů Systému 1 dosáhla $369,051 \pm 26,89 \text{ cm}^2$, kdežto u Systému 2 pouhých $134,285 \pm 5,841 \text{ cm}^2$.

5.4 Chlorofyl, karotenoidy a polyfenoly

U všech analýz proběhly tři měření při dvou až třech koncentracích. Výsledné hodnoty byly zaznamenány jako průměr ze tří jamek. U obsahu chlorofylu a, chlorofylu b, celkového obsahu karotenoidů a celkového obsahu polyfenolů byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka z 9 vzorků ze Systému 1 a z 9 vzorků ze Systému 2. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v množství mg/g sušiny v tabulce 9.

Tabulka 9: Obsah chlorofylu a (Ch a), chlorofylu b (Ch b), celkového obsahu karotenoidů (TC) a celkového obsahu polyfenolů (TPC) u Systému 1 a Systému 2

Vzorek	Ch a (mg/g sušiny)	Ch b (mg/g sušiny)	TC (mg/g sušiny)	TPC (mg/g sušiny)
Systém 1	$1,178 \pm 0,185$	$0,509 \pm 0,053$	$0,254 \pm 0,031$	$11,91 \pm 2,212$
Systém 2	$1,089 \pm 0,127$	$0,442 \pm 0,047$	$0,218 \pm 0,024$	$27,44 \pm 5,577$

Za použití ANOVA a Tukeyova testu nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl v obsahu chlorofylu a u Systému 1 ($1,178 \pm 0,185$ mg/g sušiny) a Systému 2 ($1,089 \pm 0,127$ mg/g sušiny).

Byl zjištěn statisticky významný rozdíl u obsahu chlorofylu b mezi Systémem 1 ($0,509 \pm 0,053$ mg/g sušiny) a Systémem 2 ($0,442 \pm 0,047$ mg/g sušiny). Podobně existuje statisticky významný rozdíl u celkového obsahu karotenoidů, který činil $0,254 \pm 0,024$ mg/g sušiny u Systému 1 a $0,218 \pm 0,024$ mg/g sušiny u Systému 2.

Ve prospěch systému s akvapponickou vodou byla zjištěna statistická významnost v celkovém obsahu polyfenolů, jehož obsah byl $11,91 \pm 5,577$ mg/g sušiny u Systému 1 a $27,44 \pm 5,577$ mg/g sušiny u Systému 2.

5.5 Senzorická analýza

Hodnoty zjištěné pro organoleptické vlastnosti salátů jsou prezentovány v tabulce 10.

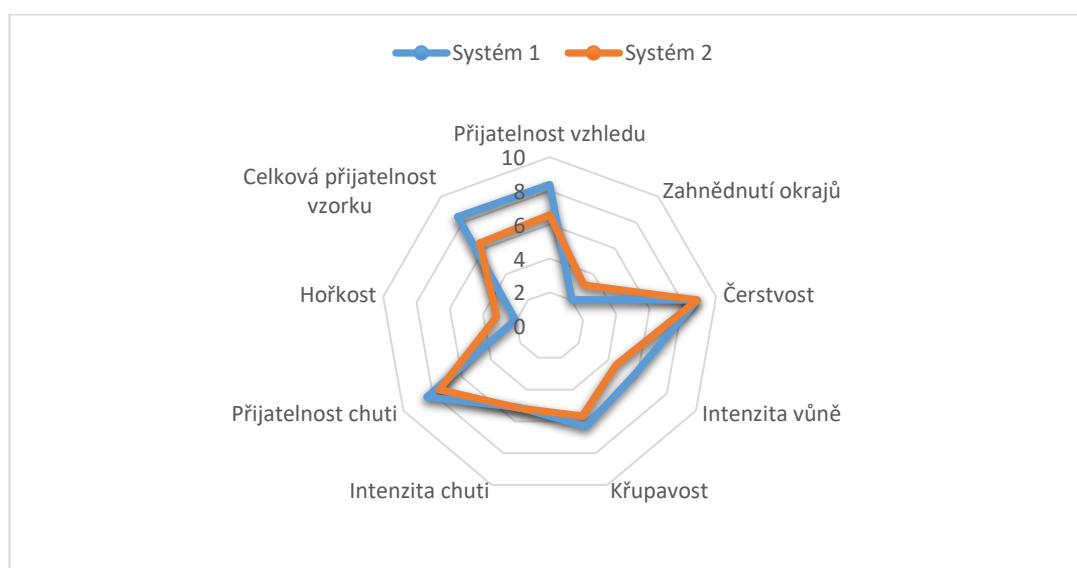
Tabulka 10: Organoleptické vlastnosti salátů z obou systémů

	LSM Systém 1	LSM Systém 2	SEM	Významnost P-value
Přijatelnost vzhledu	83,9	65,9	6,672	0,077
Zahnědnutí okrajů	20,5	31,3	7,642	0,344
Čerstvost	88,6	88,7	4,540	0,983
Intenzita vůně	57,8	45,6	6,290	0,204
Křupavost	63,2	56,8	6,221	0,485
Intenzita chuti	51,4	51,9	6,423	0,955
Přijatelnost chuti	83,9	75,4	4,221	0,053
Hořkost	20,6	32	7,495	0,03
Celková přijatelnost vzorku	84,4	66,3	6,053	0,042

Z výsledků vyplývá, že atributy jako zahnědnutí okrajů, čerstvost, intenzita vůně, křupavost a intenzita chuti nedosáhly statistické významnosti. U přijatelnosti vzhledu a chuti existuje zjevná tendence (těsně neprůkazné), ve prospěch Systému 1, která by se velmi pravděpodobně projevila například pokud by se sensorické hodnocení opakovalo v dalších seancích a bylo nasbíráno více dat. Signifikantní rozdíly byly zjištěny pouze u hořkosti a celkové přijatelnosti vzorků, v obou případech ve prospěch Systému 1. Po vyhodnocení výsledků sensorické analýzy pro saláty z obou produkčních aeroponických systémů uvedených v grafu 1 vyplývá, že kromě hořkosti a celkové přijatelnosti vzorku můžeme tvrdit, že u zbývajících deskriptorů produkční systém neovlivnil sensorické vlastnosti produktu.

Posledním úkolem hodnotitelů byl výběr preferovaného vzorku. V 8 z 10 případů byl preferován salát ze Systému 1, převážně kvůli přijatelnější vzhledové a velikostní stránce. Salát

ze Systému 2 byl ve dvou případech preferovanější díky praktičnosti, jelikož velikost salátu byla adekvátní porcí pro jednoho člověka. Průměrné hodnoty jednotlivých deskriptorů jsou zaznamenány v grafu 2.



Graf 2: Organoleptické vlastnosti salátů ze Systému 1 a 2

5.6 Živinné složení roztoků

Obsah aniontů, kationtů a prvků byl měřen ze 6 vzorků odebraných po každém přivezení barelu s akvaponickou vodou z farmy a z 5 vzorků hydroponického roztoku, které byly namíchány podle návodu výrobce pro jednotlivé růstové fáze.

Iontovou chromatografií byl změřen obsah aniontů v živných roztocích ze Systému 1 a Systému 2. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. Jelikož u analýzy proběhlo pouze jedno opakování, nebylo možné provést statistické hodnocení.

Tabulka 11: Obsah aniontů naměřených v akvaponickém roztoku po 6 odběrech a v jednotlivých růstových fázích hydroponického roztoku

Vzorek mg/L	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	S- SO ₄ ²⁻	P- PO ₄ ³⁻
Akva 1	0,06	135,47	0,82	0,14	84,97	190,75	44,8	63,668	14,609
Akva 2	0,06	136,52	0,05	0,15	66,21	192,35	47,65	64,202	15,539
Akva 3	0,04	142,87	0,77	0,15	49,74	204,45	50,19	68,241	16,367
Akva 4	0,04	139,79	0,05	0,13	4,73	205,35	47,2	68,541	15,392
Akva 5	0,06	128,76	0,16	0,13	8,3	193,92	36,74	64,726	11,981
Akva 6	0,07	131,33	0,2	0,14	8,4	197,82	47,14	66,028	15,372
1 st roots	0,34	12,41	0,31	0,35	177,56	63,92	61,3	21,335	19,99
1 st leaves	1,7	22,6	1,35	1,52	373,57	123,62	130,0	41,262	42,393
Growing	0,41	20,7	0,33	0,48	536,33	123,67	108,55	41,278	35,398
Preflowering	0,05	21,11	0,04	0,26	545,44	121,72	105,58	40,627	34,430

U akvaponického roztoku byl detekován až 9krát vyšší obsah Cl^- , vyšší obsah SO_4^{2-} a S-SO_4^{2-} . Největší rozdíly jsou v obsahu NO_3^- , kdy v akvaponickém roztoku bylo po 3. týdnu odebrání množství NO_3^- za nevysvětlitelných příčin enormně sníženo. Nedostatek NO_3^- může být jeden z hlavních faktorů sníženého růstu rostlin u akvaponického systému. V hydroponickém roztoku byl naměřen vyšší obsah PO_4^{3-} a P-PO_4^{3-} .

Naměřené množství kationtů v roztocích iontovou chromatografií je uveden v tabulce 12.

Tabulka 12: Obsah kationtů naměřených v akvaponickém roztoku po 6 odběrech a v jednotlivých růstových fázích hydroponického roztoku

Vzorek mg/L	Na^+	NH_4^+	Mg^{2+}	K^+	Ca^{2+}
Akva 1	96,109	0,460	41,998	29,714	88,187
Akva 2	97,404	2,03	44,415	33,987	94,211
Akva 3	101,099	3,024	46,581	35,921	94,725
Akva 4	100,883	1,845	48,797	47,662	106,341
Akva 5	91,648	5,5	44,564	38,783	88,953
Akva 6	93,976	8,012	45,107	40,385	91,294
1 st roots	5,482	14,711	20,411	55,745	55,017
1 st leaves	7,664	29,708	34,787	116,084	77,404
Growing	7,371	43,908	36,905	164,696	92,59
Preflowering	8,297	45,644	30,559	155,391	94,602

U akvaponického roztoku byl detekován až 10krát vyšší obsah Na^+ , vyšší množství Ca^{2+} a Mg^{2+} . Hydroponický roztok byl bohatší na obsah NH_4^+ a K^+ .

Obsah prvků naměřených pomocí ICP-OES je uveden v tabulce 13.

Tabulka 13: Obsah prvků naměřených v akvaponickém roztoku po 6 odběrech a v jednotlivých růstových fázích hydroponického roztoku

Vzorek mg/L	B	Ba	Ca	Co	Cu	Fe	K	Mg
Akva 1	0,224	-	73,085	-	-	-	24,185	34,483
Akva 2	0,162	-	72,822	-	0,079	-	27,154	36,125
Akva 3	0,160	0,070	70,198	-	0,063	-	29,006	36,620
Akva 4	0,162	0,103	67,904	-	0,076	-	33,365	38,247
Akva 5	0,138	0,072	64,433	0,025	0,062	-	30,631	35,922
Akva 6	0,147	-	69,518	-	0,065	-	33,227	36,797
1 st roots	0,140	-	36,034	-	0,113	0,785	51,123	15,593
1 st leaves	0,206	-	63,718	0,029	0,158	1,564	112,545	29,236
Growing	0,214	0,226	77,494	0,030	0,242	1,998	150,866	27,644
Preflowering	0,232	-	75,431	-	0,217	1,874	145,808	25,682

V akvaponickém a hydroponickém roztoku bylo detekováno přibližně stejné množství B a Ca. Akvaponický roztok byl bohatší na obsah Mg, naopak hydroponický roztok byl bohatší na

obsah Cu a K, kterého bylo až 4krát větší množství. V akvaponicím roztoku nebylo detekováno žádné množství Fe.

Tabulka 13: Obsah prvků naměřených v akvaponicím roztoku po 6 odběrech a v jednotlivých růstových fázích hydroponického roztoku

Vzorek	Mn	Na	Ni	P	S	Si	V	Zn
Akva 1	0,008	80,646	-	13,523	60,231	2,915	-	-
Akva 2	0,013	83,804	-	15,331	64,873	2,208	-	-
Akva 3	0,015	86,588	0,005	15,172	63,811	2,348	-	-
Akva 4	0,015	90,078	0,006	15,411	68,724	1,977	-	-
Akva 5	0,031	79,339	-	11,678	60,877	2,225	0,017	-
Akva 6	0,023	82,203	-	14,886	63,808	2,489	0,007	-
1 st roots	0,552	4,816	-	19,108	20,173	-	0,008	0,138
1 st leaves	1,141	6,349	-	40,534	40,110	-	0,008	0,274
Growing	1,359	6,712	-	32,980	39,556	-	-	0,325
Preflowering	1,343	6,680	-	31,435	37,977	-	-	0,331

V akvaponicím roztoku bylo detekováno až 14krát větší množství Na a větší obsah S. Roztok obsahoval i množství Si, které v hydroponickém roztoku nebylo detekováno vůbec. Nebyl detekován obsah Zn a u V bylo naměřeno pouze stopové množství při 5. a 6. odběru akvaponicího roztoku. Hydroponický roztok obsahoval 2krát více P a větší množství Mn.

6 Diskuze

Hlavním cílem práce je sledovat výnos a kvalitu produktů vypěstovaných v aeroponickém systému, za použití dvou druhů živinového roztoku. Na základě získaných dat je nutné posoudit, zda druh výživy ovlivnil kvantitativní, kvalitativní a senzorické vlastnosti lociky seté (*Lactuca sativa* L.). Bohužel zatím neexistuje žádná dostupná literatura, která by porovnávala srovnání kultivace v aeroponickém systému za použití hydroponického a akvaponického živinového roztoku.

Hlavní výhodou bezpůdných kultivačních systémů je úspora spotřeby vody. Barbosa et al. (2015) uvádí, že při konvenčním pěstování v půdě je na 1 kg salátu průměrně spotřebováno až 250 l vody. V tomto experimentu bylo dosaženo menší spotřeby vody, a to průměrně 28,9 l vody na 1 kg salátu u Systému 2 (2,7 l/salát) a 15 l vody na 1 kg salátu u Systému 1 (1,8 l/salát). Oproti konvenčnímu systému pěstování můžeme za použití aeroponie spotřebovat až 16krát méně vody.

Další nespornou výhodou těchto systémů je výnos produktů na m². Barbosa et al. (2015) uvádí, že u konvenčního pěstování bylo na 1 m² plochy vypěstováno 3,9 kg salátu. V tomto experimentu byl dosažen výnos Systému 2 1,08 kg/m² a u Systému 1 bylo dosaženo výnosu 4,4 kg/m². V případě aeroponického systému využívajícího hydroponický živný roztok, jsou výnosy na m² větší než při kultivaci v půdě.

6.1 Živinový roztok

Správné složení a péče o živný roztok je nejdůležitějším aspektem, kterým můžeme ovlivnit výnos a kvalitu produktů z aeroponie. Pro většinu rostlin je 17 prvků považováno za esenciální: C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B, Cl a Ni (Salisbury & Ross 1994). Ostatní prvky jako Na, V, Se, Co, Al a I jsou považovány za prospěšné, protože některé z nich mohou stimulovat růst rostliny, vyvažují toxický efekt jiných prvků nebo mohou zčásti nahradit esenciální prvky (Trejo-Téllez et al. 2007). Většina komerčně využívaných hydroponických živinových roztoků obsahuje pouze N, P, K, Ca, Mg a S, přičemž jsou suplementovány další mikronutrienty. Nejvyužívanější hydroponický roztok je podle Hoagland & Arnon (1938), kteří uvádí, že ideální živný roztok by měl obsahovat 210 mg/l N; 31 mg/l P; 234 mg/l K; 160 mg/l Ca; 34 mg/l Mg; 64 mg/l S; 2,5 mg/l Fe; 0,02 mg/l Cu; 0,05 mg/l Zn; 0,5 mg/l Mn; 0,5 mg/l B a 0,01 mg/l Mo.

Pro rostliny je nejdůležitějším prvkem dusík. Jeho nedostatek zpomaluje růst a vývoj rostliny, rostliny vypadají zakrněle a jsou světle zelené. Při dlouhodobém nedostatku N dochází ke žloutnutí (chloróze) starších nebo spodních listů. Poté následuje nekróza špičky a okraje listů, která způsobuje hnědé zbarvení (Onderzoek et al. 1981). Tyto symptomy byly zaznamenány u salátů umístěných v Systému 2 s akvaponickým roztokem. Nedostatek N v akvaponickém roztoku potvrzuje i rozbor, ze kterého bylo zjištěno, že se v akvaponické vodě vyskytuje velice malé množství NO₂⁻, NO₃⁻ a NH₄⁺. V živném roztoku Systému 2 bylo také analyzováno malé množství K (29,6 mg/l), P (14,2 mg/l), kvůli němuž dochází k nekrotickým, obdobně jako při nedostatku N. Můžeme tvrdit, že živinový roztok Systému 2 postrádá nejdůležitější prvky N, P a K, čímž byl zapříčiněn pomalý vývoj a růst rostliny. Naopak ionty Na⁺ a Cl⁻ jsou v akvaponické vodě přítomny ve velikém množství. Podle

Amirossadat et al. (2012) je obsah NaCl jedním z neškodlivějších abiotických faktorů ovlivňujících produkci plodin.

Goddek & Vermeulen (2018) ve své studii testovali hypotézu, že salát vykazuje lepší růstový výkon v hydroponických roztocích založených na recirkulačním akvakulturním systému (RAS). Výsledky jejich studie ukazují, že růst salátu v hydroponii na základě z RAS může překonat tempo růstu salátů v čistém hydroponickém roztoku jen za chemicky neoptimálních podmínek (tj. s vysokým obsahem chloridu sodného). Možným vysvětlením pro tento jev by mohla být prospěšná interakce mezi organismy z vody RAS a kořeny rostlin. Mayak et al. (2004) ve své studii popsali odolnost rajčat vůči sodíku v důsledku symbiózy s bakteriemi. Goddek & Vermeulen (2018) předpokládají, že akvakulturní voda by mohla vést k lepšímu vývoji rostlin. V současné době jsou prováděny další studie k ověření těchto hypotéz. Budoucí studie by rovněž měly prokázat, zda lze vyvodit podobné závěry, pokud by bylo do hydroponického roztoku přidáno stejné množství NaCl jako obsahuje voda použitá z RAS. Výsledky této studie ukazují, že jsou v rozporu s tvrzením, kde zvýšené množství NaCl v živném roztoku vykazuje větší nárůst salátů.

Nejvýraznějším nedostatkem Systému 1 s hydroponickým roztokem byl nedostatečný podíl K, který pravděpodobně způsobil nekrózy na okrajích listů. V případě ostatních prvků bylo jejich množství v roztoku Systému 1 dostatečné.

6.2 Kvalita a kvantita

Prvním parametrem bylo vyhodnocení nárůstu listové plochy mezi Systémem 1 a Systémem 2. Z výsledků vyplývá, že nebyl zjištěn signifikantní rozdíl v nárůstu listové plochy u jednotlivých boxů systému. Signifikantní rozdíl byl zjištěn v nárůstu listové plochy mezi jednotlivými systémy, který se začal projevovat ve 3. týdnu kultivace. Před sklizní dosáhly hlávky salátů v Systému 1 plochy $369 \pm 26,898 \text{ cm}^2$ a u Systému 2 plochy $134,285 \pm 5,841 \text{ cm}^2$. Největší hlávka dosáhla velikosti $495,8 \text{ cm}^2$ u Systému 1 a $229,6 \text{ cm}^2$ u Systému 2. Další signifikantní rozdíl byl zjištěn u root/shoot ratio ve prospěch Systému 1. Li et al. (2018) uvádí, že aeroponie je prospěšná pro růst kořenů s výrazně větším poměrem root/shoot. Aeroponický systém tedy může být vhodný pro produkci kořenových plodin s vysokou hodnotou. Navíc při sklizni okopanin v aeroponii mohou být produkty sklizeny postupně a v čistém stavu.

Nedostatečná výživa Systému 2 se nejvíce projevila na kvantitativních parametrech. Sazeničky salátu byly sázeny do obou systémů ve stejném stavu při hmotnosti jedné sazeničky $0,491 \pm 0,167 \text{ g}$ a počtu listů $3,638 \pm 0,618$ kusů. Mezi Systémem 1 a Systémem 2 byl zjištěn signifikantní rozdíl mezi váhou a počtem listů před vsazením a po sklizni. Zatímco váha salátu po sklizni v Systému 1 dosáhla hmotnosti $246,072 \pm 51,538 \text{ g}$ a počtu listů $51 \pm 6,11$ kusů, u Systému 2 bylo dosaženo hmotnosti salátu pouze $60,33 \pm 25,324 \text{ g}$ a počtu listů $34,889 \pm 25,326$ kusů. Ze Systému 1 o velikosti 3 m^2 bylo sklizeno $11,319 \text{ kg}$ salátu, ze Systému 2 o stejné velikosti bylo sklizeno pouze $2,614 \text{ kg}$ salátu. Salát o nejvyšší hmotnosti měl $349,36 \text{ g}$ v Systému 1 a $113,1 \text{ g}$ v Systému 2.

Tyto výsledky jsou v rozporu se studií Saha et al. (2016), kteří pěstovali bazalku za použití hydroponického a akvaponického systému, přičemž akvaponicky pěstovaná bazalka měla o 14 % větší nárůst listové plochy a 56 % větší hmotnost po sklizni než bazalka pěstovaná

v hydroponickém systému. V této práci kvantitativní parametry hovoří jasně ve prospěch produkčního Systému 1 s hydroponickým živným roztokem.

Obsah chlorofylu a v Systému 1 ($1,178 \pm 0,185$ mg/g sušiny) a Systému 2 ($1,089 \pm 0,127$ mg/g sušiny) nebyl statisticky významný. Signifikantní rozdíl byl zjištěn u obsahu chlorofylu b, přičemž bylo naměřeno větší množství v Systému 1 ($0,509 \pm 0,053$ mg/g sušiny), než v systému 2 ($0,042 \pm 0,047$ mg/g sušiny). Celkový obsah karotenoidů v salátech Systému 2 byl $0,218 \pm 0,024$ mg/g sušiny byl signifikantně menší, než u Systému 1, kde celkový obsah karotenoidů činil $0,254 \pm 0,024$ mg/g sušiny. Naopak signifikantní rozdíl ve prospěch Systému 2 byl zaznamenán v celkovém obsahu polyfenolů, který činil $27,44 \pm 5,577$ mg/g sušiny u Systému 2 a $11,91 \pm 5,577$ mg/g sušiny u Systému 1. Celkový obsah polyfenolů byl u Systému 2 větší o 43 %. Sharma et al. (2019) tvrdí, že akumulace polyfenolů je obvykle konzistentním rysem rostlin ve stresu, a představuje obranný mechanismus pro zvládnutí více abiotických stresů. Fenoly v rostlinách hrají důležitou roli v několika fyziologických procesech sloužících ke zlepšení tolerance a přizpůsobivosti rostlin v neoptimálních podmínkách. Kromě toho se v reakci na stres solí stimuluje biosyntetická dráha fenylypropanoidů a vede k produkci různých fenolických sloučenin, které mají silný antioxidační potenciál. Další biologické role polyfenolů ve stresových reakcích testovaných *in vivo* závisí na experimentálních podmínkách, jako je doba expozice stresu, výběr modelové rostliny, fáze růstu rostliny a metoda analýzy metabolitů. Podle dostupné literatury je obtížné určit, které polyfenolové struktury jsou zahrnuty do specifických ochranných mechanismů (Šamec et al. 2021). Příčinou zvýšeného celkového obsahu polyfenolů v Systému 2 by mohl být stres rostliny způsobený nedostatkem příjmu vody a živin. Ke stejnému zjištění došli i El-Nakhel et al. (2019), kteří zkoumali saláty odrůdy Salanova při živinovém deficitu. Zjistili, že červený salát při silném živinovém deficitu obsahoval až o 160 % více polyfenolů než rostliny se splněnými živinovými potřebami.

Z výsledků sensorické analýzy salátů vyplývá, že atributy jako zahnědnutí okrajů, čerstvost, intenzita vůně, křupavost a intenzita chuti nedosáhly statistické významnosti. U přijatelnosti vzhledu a chuti existuje zjevná tendence ve prospěch Systému 1. Signifikantní rozdíly byly zjištěny pouze u hořkosti a celkové přijatelnosti vzorků, v obou případech ve prospěch Systému 1. Kromě uvedené hořkosti a celkové přijatelnosti vzorku můžeme tvrdit, že u zbývajících deskriptorů produkční systém neovlivnil organoleptické vlastnosti produktu. Z hlediska preference vzorků byl salát ze Systému 1 ohodnocen jako přijatelnější v 8 z 10 případů, především kvůli lepšímu vzhledu a větší velikosti. Selma et al. (2012) provedli sensorickou analýzu mezi saláty kultivovanými v bezpůdních systémech a saláty pěstovanými v půdě. Zjistili, že saláty z bezpůdních systémů měly signifikantně větší vizuální přijatelnost než u kultivace v půdě, ale při skladování po 8 dnech se vizuální přijatelnost obrátila k salátům kultivovaným v půdě. Hlavní příčinou ztráty kvality u bezpůdně kultivovaných salátů bylo zhoršení stavu postranních listů a nežádoucí pachy.

7 Závěr

Na základě informací uvedených v kapitole výsledky a následné diskuzi lze vyvodit tyto závěry:

- Aeroponický systém pěstování by mohl být udržitelnou alternativou k zajištění různých druhů rostlinných produktů, která vyžaduje méně vody, méně hnojiv a zároveň zvýší výnos na jednotku plochy.
- Tato práce potvrzuje hypotézu, tvrdící, že aeroponický systém bude vyhovovat pro kultivaci salátu. Zároveň je potvrzena hypotéza, že mezi testovanými druhy výživy budou existovat rozdíly jak v objemu produkce salátu, tak v parametrech jeho kvality.
- Různé druhy výživy vykazují signifikantní rozdíl v nárůstu listové plochy u jednotlivých systémů od 3. týdnu kultivace. Rozdíl v kvantitativních parametrech, jako je nárůst hmotnosti, počet listů po sklizni a root/shoot ratio hovoří jasně ve prospěch aeroponického systému s komerčním hydroponickým roztokem.
- Analýzou živinových roztoků byl zjištěn silný nedostatek nejdůležitějších prvků N, P a K v akvakulturní vodě, která zapříčinila nedostatečný vývoj salátů. Dalším faktorem ovlivňujícím vývoj rostliny může být vysoká slanost roztoku.
- Hydroponický roztok způsobil vyšší obsah chlorofylu b a celkového obsahu karotenoidů v jedlé části rostliny. Stresem vyvolaným živinovým deficitem u akvakulturního roztoku byl zvýšen celkový obsah polyfenolů a antioxidační kapacity.
- Lze tvrdit, že produkční systém významně neovlivnil senzorické vlastnosti produktů z aeroponie, avšak salát z hydroponického kultivačního systému byl respondenty ohodnocen jako vzhledově a velikostně atraktivnější.

Hypotézou do budoucna může být tvrzení, že akvakulturní voda obohacená komerčními hydroponickými hnojivy bude mít za následek větší výnos na jednotku plochy než při použití samostatného hydroponického roztoku.

8 Literatura

- Ada NL, Ovadia R, Izhak F, Oren-Shamir M. 2007. Increased anthocyanin accumulation in ornamental plants due to magnesium treatment. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **82**:481–487.
- Adams P. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables and hydroponic systems. *Acta Horticulturae*:245–257. International Society for Horticultural Science (ISHS).
- Amirossadat Z, Ghehsareh AM, Mojiri A. 2012. Impact of silicon on decreasing of salinity stress in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) in soilless culture. *Environmental Science and Bio/Technology* **6**:171–174.
- Avvaru B, Patil MN, Gogate PR, Pandit AB. 2006. Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties. *Ultrasonics* **44**:146–158.
- Barak P, Smith JD, Krueger AR, Peterson LA. 1996. Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. *Plant, Cell and Environment* **19**:237–242.
- Barickman TC, Horgan TE, Wheeler JR, Sams CE. 2016. Elevated levels of potassium in greenhouse-grown red romaine lettuce impacts mineral nutrient and soluble sugar concentrations. *HortScience* **51**:504–509.
- Buer CS, Correll MJ, Smith TC, Towler MJ, Weathers PJ, Nadler M, Seaman J, Walcerz D. 1996. Development of a nontoxic acoustic window nutrient-mist bioreactor and relevant growth data. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant* **32**:299–304.
- Cefola M, Pace B, Buttarò D, Santamaria P, Serio F. 2011. Postharvest evaluation of soilless-grown table grape during storage in modified atmosphere. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **91**:2153–2159.
- Chaillou S, Vessey JK, Morot-gaudry JF, Raper CD, Henry LT, Boutin JP. 1991. Expression of characteristics of ammonium nutrition as affected by pH of the root medium. *Journal of Experimental Botany* **42**:189–196.
- Chandra S, Khan S, Avula B, Lata H, Yang MH, Elsohly MA, Khan IA. 2014. Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: A comparative study. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*. Oxford University Press.
- Chang DC, Park CS, Kim SY, Lee YB. 2012. Growth and tuberization of hydroponically grown potatoes. *Potato Research* **55**:69–81.

- Chapman VJ, Chapman DJ. 1980. Seaweed as animal fodder, manure and for energy. Pages 30–61 *Seaweeds and their Uses*. Springer Netherlands.
- Chen BM, Wang ZH, Li SX, Wang GX, Song HX, Wang XN. 2004. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. *Plant Science* **167**:635–643.
- Christie CB, Nichols MA. 2004. Aeroponics - A production system and research tool. Pages 185–190 *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science.
- Clawson JM, Hoehn A, Stodieck LS, Todd P. 2019. NASA – Review of aeroponics *Aeroponics for Spaceflight Plant Growth*:1–15.
- Coskun D, Britto DT, Kronzucker HJ. 2017. The nitrogen–potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. **40**:2029–2041.
- Demšar J, Osvald J, Vodnik D. 2004. The effect of light-dependent application of nitrate on the growth of aeroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of the American Society for Horticultural Science* **129**:570–575.
- Diver S. 2006. Aquaponic-integration hydroponic with aquaculture. National Centre of Appropriate Technology. Department of Agriculture’s Rural Business Cooperative Service. P. Water:1–28.
- EI-Kazzaz A. 2017. Soilless agriculture a new and advanced method for agriculture development: an introduction. *Agricultural Research & Technology:Open Access Journal* **3**.
- El-Nakhel C, Pannico A, Kyriacou MC, Giordano M, De Pascale S, Rouphael Y. 2019. Macronutrient deprivation eusterss elicits differential secondary metabolites in red and green-pigmented butterhead lettuce grown in a closed soilless system. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **99**:6962-6972.
- El-Nakhel C, Petropoulos SA, Pannico A, Kyriacou MC, Giordano M, Colla G, Troise AD, Vitaglione P, de Pascale S, Rouphael Y. 2020. The bioactive profile of lettuce produced in a closed soilless system as configured by combinatorial effects of genotype and macrocation supply composition. *Food Chemistry* **309**:125713.
- Epstein E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Biology* **50**:641–664.
- Farran I, Mingo-Castel AM. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research* **83**:47–53.

- Gislerød HR, Mortensen LM. 2019. Relative humidity and nutrient concentration affect nutrient uptake and growth of *begonia × hiemalis*. *HortScience* **25**:524–526.
- Goddek S, Vermeulen T. 2018. Comparison of *Lactuca sativa* growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. *Aquaculture International* **26**:1377–1386.
- Gopinath P, Vethamoni PI, Gomathi M. 2017. Aeroponics soilless cultivation system for vegetable crops. *Chemical Science Review and Letters* **6**:838–849.
- Gottardi S et al. 2012. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) *Laterr*) plants. *Plant Physiology and Biochemistry* **56**:14–23.
- Gruda N. 2009. Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *Journal of Applied Botany and Food Quality* **82**:141–147.
- Hatfield JL, Prueger JH. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes* **10**:4–10.
- Hayden AL, Brigham LA, Giacomelli GA. 2004. Aeroponic cultivation of ginger (*Zingiber officinale*) rhizomes. *Acta Horticulturae* **659**:397–402.
- Hermans C, Conn SJ, Chen J, Xiao Q, Verbruggen N. 2013. An update on magnesium homeostasis mechanisms in plants. Oxford Academic. Available from www.rsc.org/metallomics (accessed April 2021).
- Hussain A, Iqbal K, Aziem S, Mahato P, Negi AK. 2014. A review on the science of growing crops without soil (soilless culture) – A novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Science* **7**:833–842.
- Iacuzzo F, Gottardi S, Tomasi N, Savoia E, Tommasi R, Cortella G, Terzano R, Pinton R, Dalla Costa L, Cesco S. 2011. Corn salad (*Valerianella locusta* (L.) *Laterr*.) growth in a water-saving floating system as affected by iron and sulfate availability. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **91**:344–354.
- Idris I, Sani MI. 2012. Monitoring and control of aeroponic growing system for potato production. Pages 120–125 *Proceedings of 2012 IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics, ICCSII 2012*.
- Inoue K, Kondo S, Adachi A, Yokota H. 2000. Production of iron enriched vegetables: Effect of feeding time on the rate of increase in foliar iron content and foliar injury. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **75**:209–213.

- Jie HE, Kong LS. 1998. Growth and photosynthetic responses of three aeroponically grown lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.) to different rootzone temperatures and growth irradiances under tropical aerial conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **73**:173–180.
- Kerns SC, Lee J-L. 2017. Automated aeroponics system using IoT for smart farming. *European Scientific Journal* **13**:7–8.
- Kloas W et al. 2015. A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions* **7**:179–192.
- Knaus U, Palm HW. 2017. Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture* **466**:51–63.
- Konig B, Junge R, Bittsanszky A, Villarroel M, Komives T. 2016. On the sustainability of aquaponics. *Ecocycles* **2**:26–32.
- Kyriacou MC, Roupheal Y. 2018. Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae* **234**:463–469.
- Lakhiar IA, Gao J, Syed TN, Chandio FA, Buttar NA. 2018. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions* **13**:338–352.
- Li Q, Kubota C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* **67**:59–64.
- Li Q, Li X, Tang B, Gu M. 2018. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics and substrate culture. *Horticulturae* **4**:35–44.
- Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution* **147**:422–428.
- Llorach R, Martínez-Sánchez A, Tomás-Barberán FA, Gil MI, Ferreres F. 2008. Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry* **108**:1028–1038.
- Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE. 2015. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* **435**:67–74.

- Lu X, Yang S, Evans JRG. 2009. Microfeeding with different ultrasonic nozzle designs. *Ultrasonics* **49**:514–521.
- Ma J, Takahashi E. 2002. Soil, Fertilizer, and plant silicon research in Japan. Page Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Available from https://books.google.com/books?hl=cs&lr=&id=gV420s5vm8QC&oi=fnd&pg=PP1&ots=NfPvAwCVuN&sig=K8NqnJy4FI7hkpqp_-cHhQvs0H0 (accessed April 2021).
- Maksymiec W. 1998. Effect of copper on cellular processes in higher plants. *Photosynthetica* **34**:321–342.
- Manzocco L, Foschia M, Tomasi N, Maifreni M, Dalla Costa L, Marino M, Cortella G, Cesco S. 2011. Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella locusta* L. *Laterr*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* **91**:1373–1380.
- Marschner H. 2017. Mineral nutrition of higher plants. Pages 315–330 Nutrient availability in soils. Academic Press. Cambridge.
- Mateus-Rodríguez J, de Haan S, Barker I, Chuquillanqui C, Rodríguez-Delfín A. 2012. Response of three potato cultivars grown in a novel aeroponics system for mini-tuber seed production. Pages 361–368 *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science.
- Maya Waiba K, Sharma P, Sharma A, Chadha S, Kaur M, Author C. 2020. Soilless vegetable cultivation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **9**:631–636.
- Mayak S, Tirosh T, Glick BR. 2004. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry* **42**:565–572.
- Mori Y, Takatsuji M, Yasuoka T. 2002. Effects of pulsed white LED light on the growth of lettuce. *Shokubutsu Kojo Gakkaishi* **14**:136–140.
- Mozafar A. 1993. Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants: A review. Taylor & Francis Group. Available from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904169309364698> (accessed April 2021).
- NASA Originating Technology. 2006. Progressive plant growing has business blooming. *NASA Spinoff* **2006**:64–67.

- Nikolic M, Cesco S, Römheld V, Varanini Z, Pinton R. 2007. Short-term interactions between nitrate and iron nutrition in cucumber. *Functional Plant Biology* **34**:402–408.
- Scaife A. 1982. Nutritional disorders in glasshouse tomatoes, cucumbers and lettuce. *Scientia Horticulturae* **18**:192–193.
- Osvald J, Petrovic N, Demsar J. 2001. Sugar and organic acid content of tomato fruits (*Lycopersicon lycopersicum* Mill.) grown on aeroponics at different plant density. *Acta Alimentaria* **30**:53–61.
- Otazú V. 2010. Manual on quality seed potato production using. International Potato Center. Peru.
- Oteng-Darko P, Kyei-Baffour N, Otoo E, Agyare WA. 2017. Growing seed yams in the air: the agronomic performance of two aeroponics systems developed in Ghana. *Sustainable Agriculture Research* **6**:106.
- Palaniswamy UR, McAvoy RJ, Bible BB. 2000. Omega-3-fatty acid concentration in *Portulaca oleracea* is altered by nitrogen source in hydroponic solution. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **125**:190–194.
- Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam Jijakli M, Kotzen B. 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International* **26**:813–842.
- Petropoulos SA, Fernandes Â, Barros L, Ferreira IC. 2018. A comparison of the phenolic profile and antioxidant activity of different *Cichorium spinosum* L. ecotypes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **98**:183–189.
- Pradhan B, Deo B. 2019. Soilless farming - The next generation green revolution. *Current Science* **116**:728–732.
- Resh H. 2013. Good agricultural practises for greenhouse vegetable crops. Pages 303–355 *Soilless culture*. National Center for Agricultural Research and Extension. Jordan.
- 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. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **79**:423–430.
- Sabatino L. 2020. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* **10**:1–24.

- Saha S, Monroe A, Day MR. 2016. Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Annals of Agricultural Sciences* **61**:181–186.
- Šamec D, Karalija E, Šola I, Vujčić Bok V, Salopek-Sondi B. 2021, January 1. The role of polyphenols in abiotic stress response: The influence of molecular structure. *Plants Basel* **10**:111–118.
- Santamaria P, Gonnella M, Elia A, Parente A, Serio F. 2001. Ways of reducing rocket salad nitrate content. Pages 529–536 *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science.
- Savvas D, Gruda N. 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *European Journal of Horticultural Science* **83**:280–293.
- Savvas D, Ntatsi G, Passam HC. 2008. Plant nutrition and physiological disorders in greenhouse grown tomato, pepper and eggplant. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* **2**:45–61.
- Savvas D, Passam H. 2002. Hydroponic production of vegetables and ornamentals. *Embryo Publications* **2**:4–8.
- Schüssler HK. 1992. The influence of different constant and fluctating water vapour pressure gradients on morphogenesis. *Acta Horticulturae* **88**:105–110.
- Selma MV, Luna CM, Martínez-Sánchez A, Tudela JA, Beltrán D, Baixauli C, Gil MI. 2012. *Postharvest Biology and Technology* **63**:16–24.
- Sharma A, Shanzad B, Rehman A, Bhardwaj R, Landi M, Zheng B. 2019. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules* **24**:1–22
- Sheikh BA. 2006. Hydroponics: Key to sustain agriculture in water stressed and urban environment. *Pakistan Journal of Agriculture Agricultural Engineering and Veterinary Sciences* **22**:53–57.
- Šmídová Z, Izzo R. 2009. Improvement of nutritional value of tomatoes under salt stress conditions. *Journal of Food Science* **27**:138–139.
- Sonneveld BGJS. 2002. Land under pressure - The impact of water erosion on food production in Ethiopia. Maastricht, Shaker Publishing. PhD thesis. The Netherlands. Shaker.

- Sonneveld C, Voogt W. 2009. Greenhouse horticulture. Pages 1–11 *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer Netherlands.
- Tilman D, Clark M. 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* **515**:518–522.
- Tomasi N, Pinton R, Dalla Costa L, Cortella G, Terzano R, Mimmo T, Scampicchio M, Cesco S. 2015. New “solutions” for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. *Trends in Food Science and Technology* **46**:267–276.
- Urrestarazu M, Nájera C, Gea M del M. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* **51**:268–271.
- Verdoliva SG, Gwyn-Jones D, Detheridge A, Robson P. 2021. Controlled comparisons between soil and hydroponic systems reveal increased water use efficiency and higher lycopene and β -carotene contents in hydroponically grown tomatoes. *Scientia Horticulturae* **279**.
- Vermeulen T, Kamstra A. 2013. The need for systems design for robust aquaponic systems in the urban environment. *Acta Horticulturae* **1004**:71–78.
- Wang XF, Ito T. 1997. Effect of NO₃-N in the additional nutrient solution on the growth, yield, and NO₃ content in spinach plant grown in hydroponics. *Engei Gakkai zasshi* **66**:313–319.
- Zuchi S, Cesco S, Varanini Z, Pinton R, Astolfi S. 2009. Sulphur deprivation limits Fe-deficiency responses in tomato plants. *Planta* **230**:85–94.

