

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv formy dusíku na růst salátu při pěstování
v hydroponii**

Diplomová práce

**Bc. Radek Samek
Rostlinná produkce**

Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv formy dusíku na růst salátu při pěstování v hydroponii" 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 14.4.2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. za odborné, trpělivé a ochotné vedení mé diplomové práce, cenné rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Zábranskému, Ph.D. za ochotný přístup, cenné informace, pomoc s chodem pokusů, časem který věnoval pokusům a společně s Katedrou agroekologie a rostlinné produkce za poskytnutí prostorů a veškerého vybavení pro realizaci pokusů. Dále bych chtěl poděkovat Katedře agroenvironmentální chemie a výživy rostlin za možnost tvorby živných roztoků, zpracování potřebných vzorků a jejich vyhodnocení patřičnými analýzami.

Vliv formy dusíku na růst salátu při pěstování v hydroponii

Souhrn

Cílem práce bylo popsat a vyhodnotit vliv poměru forem dusíku v živném roztoku na růstové parametry biomasy rostlin a příjem živin rostlinami salátu pěstovanými v hydroponii. Literární rešerše byla zaměřena na problematiku vlivu jednotlivých forem dusíku na produkci biomasy kořenů, prýtu a fyziologické procesy v rostlinách. Popsány byly hlavní principy pěstování rostlin v hydroponii, možnosti přípravy a složení živných roztoků. V práci byly také uvedeny další faktory, které ovlivňují jednotlivé parametry tvorby výnosu a případná možnost jejich regulace, zejména ve vztahu k výživě salátu v podmínkách hydroponického pěstování. Dále byly uvedeny poznatky k hodnocení efektivity využití dusíku rostlinami při hydroponickém pěstování. Experimentální část byla založena na čtyřech živných roztocích, kde bylo použito třísluškového (A, B, C) komerčního hnojiva Hydroflor Profi. Pro účely pokusu byla u zbylých třech variant nahrazena složka A za upravenou složku s upraveným poměrem forem dusíku pro tento pokus. První varianta K0 (varianta kontrolní s 2,3 % amonného dusíku z celkového dusíku), druhá varianta KK (kontrola komerčního hnojiva Hydroflor Profi s cca 6,2 % amonného dusíku z celkového dusíku), varianta třetí V20 (varianta se zastoupením 18,9 % amonného dusíku z celkového dusíku), čtvrtá varianta V40 (varianta se zastoupením 36,6 % amonného dusíku z celkového dusíku). Tyto procentuální údaje vychází z výsledků rozborů živných roztoků z prvního opakování, které byly čerstvě namíchané jako zásobní roztok. V průběhu pokusu se tyto hodnoty měnily s odběrem živin rostlinou, odběrem H₂O z roztoku a tím změnou koncentrace roztoku, doplňováním živného roztoku jednou týdně a vývojovou fází rostliny. V experimentální části nebyl statisticky potvrzen vliv poměru amonného a nitrátového dusíku v živném roztoku na růst kořenů a prýtu salátu pěstovaného v hydroponii. Dále byl vyhodnocen vliv poměru amonného a nitrátového dusíku v živném roztoku na poměr prýtu a kořenů, kde tento vliv byl statisticky potvrzen pouze v prvním opakování. Hodnocen byl i obsah živin v kořenech a prýtu na základě změny poměru amonného a nitrátového dusíku v živném roztoku. Tento vliv byl statisticky potvrzen, kdy varianty V20 a V40 vykazaly statisticky průkazně vyšší obsahy dusíku v prýtu i kořenech.

Klíčová slova: hydroponie, salát, dusík, živný roztok

Effect of nitrogen form on lettuce plant grown in hydroponic system

Summary

The aim of the study was to describe and evaluate the effect of the ratio of nitrogen forms in the nutrient solution on the growth parameters of plant biomass and nutrient uptake by lettuce plants grown in hydroponics. The literature search was focused on the effect of different forms of nitrogen on root biomass production, shoot and plant physiological processes. The main principles of growing plants in hydroponics, possibilities of preparation and composition of nutrient solutions were described. The thesis also presented other factors that affect the individual parameters of yield formation and the possible possibility of their regulation, especially in relation to lettuce nutrition under hydroponic growing conditions. Furthermore, findings were presented to evaluate the efficiency of nitrogen use by plants under hydroponic cultivation. The experimental part was based on four nutrient solutions using a three-component (A, B, C) commercial fertilizer Hydroflor Profi. For the purposes of the experiment, the A component was replaced by a modified component with a modified ratio of nitrogen forms for the remaining three variants. The first variant K0 (control variant with 2.3 % ammonium nitrogen of total nitrogen), the second variant KK (control of commercial fertiliser Hydroflor Profi with about 6.2 % ammonium nitrogen of total nitrogen), the third variant V20 (variant with 18.9 % ammonium nitrogen of total nitrogen), the fourth variant V40 (variant with 36.6 % ammonium nitrogen of total nitrogen). These percentages are based on the results of the analyses of the nutrient solutions from the first repetition, which were freshly mixed as a stock solution. Over the course of the experiment, these values varied with nutrient uptake by the plant, removal of H₂O from the solution and thereby changing the concentration of the solution, weekly addition of nutrient solution, and the developmental stage of the plant. In the experimental part, the effect of the ratio of ammonium and nitrate nitrogen in the nutrient solution on the root and shoot growth of lettuce grown in hydroponics was not statistically confirmed. Furthermore, the effect of the ratio of ammonium and nitrate nitrogen in the nutrient solution on the ratio of shoot and roots was evaluated, where this effect was statistically confirmed only in the first repetition. The nutrient content of roots and shoot was also evaluated based on the change in the ratio of ammonium and nitrate nitrogen in the nutrient solution. This effect was statistically confirmed, with variants V20 and V40 showing statistically significantly higher nitrogen contents in both shoot and roots.

Keywords: hydroponics, lettuce, nitrogen, nutrient solution

Obsah

1 Úvod	8
2 Vědecké hypotézy a cíl práce	9
3 Literární rešerše.....	10
3.1 Salát.....	10
3.2 Hydroponie	10
3.2.1 Hydroponické systémy	11
3.2.1.1 Necirkulační metody (otevřené systémy).....	12
3.2.1.2 Cirkulační metody (uzavřené systémy).....	12
3.2.2 Pěstební média	13
3.3 Výživa v hydroponii.....	13
3.3.1 Hodnota pH živného roztoku.....	15
3.3.2 Elektrická vodivost živného roztoku	16
3.3.3 Živný roztok.....	17
3.3.4 Tvorba zásobního roztoku	19
3.4 Dusík.....	20
3.4.1 Vliv formy dusíku.....	21
3.4.2 Efektivita využití dusíku.....	23
3.4.3 Příjem a transport dusíku/živin.....	24
3.4.4 Asimilace dusíku	25
3.5 Poruchy způsobené výživou	27
3.5.1 Nedostatek dusíku.....	27
3.5.2 Nadbytek dusíku	28
3.5.3 Nedostatek vápníku	28
3.6 Tvorba výnosu	29
3.6.1 Řízené podmínky	29
4 Metodika.....	31
4.1 Tvorba živných roztoků.....	31
4.2 Měření a nastavování přístrojů	34
4.3 Předklíčování.....	34
4.4 Růst.....	35
4.5 Sklizeň a zpracování rostlin	36
4.6 Rozbory a analýzy rostlin.....	37
4.7 Stanovení celkového obsahu dusíku v rostlinách	37
4.8 Stanovení ostatních prvků.....	37
4.8.1 Nízkotlaký mikrovlnný rozklad.....	37
4.8.2 ICP–OES.....	38
4.9 Rozbory živných roztoků.....	38

4.9.1	Stanovení minerálních forem dusíku	39
4.9.2	Stanovení ostatních prvků.....	39
4.10	Vyhodnocení parametrů.....	40
5	Výsledky.....	41
5.1	Hodnocení živného roztoku.....	41
5.1.1	Obsah celkového dusíku v živném roztoku	41
5.1.1.1	Vývoj obsahu celkového dusíku v živném roztoku.....	42
5.1.2	Obsah nitrátového dusíku v živném roztoku	43
5.1.2.1	Vývoj obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku.....	44
5.1.3	Obsah amonného dusíku v živném roztoku	45
5.1.3.1	Vývoj obsahu amonného dusíku v živném roztoku	45
5.1.4	Úbytek celkového dusíku z živného roztoku.....	46
5.1.4.1	Hodnocení vývoje úbytku dusíku z živného roztoku	46
5.1.5	Obsah vápníku v živném roztoku	47
5.1.5.1	Vývoj obsahu vápníku v živném roztoku.....	48
5.1.6	Úbytek vápníku z živného roztoku	49
5.2	Hodnocení parametrů rostlin.....	50
5.2.1	Hmotnost prýtu	50
5.2.2	Hmotnost kořenů.....	51
5.2.3	Poměr prýtu a kořenů.....	52
5.2.4	Počet listů.....	53
5.3	Hodnocení obsahu živin v rostlinách.....	54
5.3.1	Obsah dusíku v prýtu	54
5.3.2	Obsah dusíku v kořenech.....	56
5.3.3	Obsah vápníku v prýtu.....	57
5.3.4	Obsah vápníku v kořenech.....	58
6	Diskuze.....	60
6.1	Hodnocení živného roztoku.....	60
6.1.1	Hodnocení obsahů forem dusíku v živném roztoku	62
6.2	Hodnocení parametrů rostlin.....	63
6.3	Hodnocení obsahu živin v rostlinách.....	66
7	Závěr.....	67
8	Literatura.....	69

1 Úvod

Hydroponie je vhodný a v praxi použitelný systém pro pěstování rostlin, především zeleniny a bylin. Má své výhody i nevýhody ve srovnání s běžným pěstováním rostlin v půdě. Jednou z hlavních nevýhod je počáteční ekonomická náročnost při výstavbě nových systémů a potřeba proškoleného personálu. Mezi výhody můžeme zahrnout efektivitu využití vody a živin, které jsou zadržovány v systémech a nedochází k tak vysokým ztrátám jako při konvenčním pěstování v půdě. Další výhodou je to, že listová zelenina není znečištěna zeminou a nemusí být před zpracováním omývána, tím je snížena spotřeba další vody. Díky možnosti umístění systémů jak v exteriéru, tak interiéru lze rostlinám poskytnout požadované podmínky pro růst a produkci. Pěstování v interiéru má velkou výhodu; umožňuje poskytnout sterilní podmínky, zamezit vlivu chorob a škůdců a tím snížit tlak chemické ochrany. Zajištění sterilních podmínek je ekonomicky a technicky náročné. Pěstování v exteriéru je závislé na vnějších podmínkách prostředí, a i přes nižší ekonomickou náročnost nemusí být ekonomicky výhodná z hlediska tlaku a rozvoje škodlivých organismů a klimatických podmínek.

Existuje mnoho typů hydroponických systémů, každý splňuje jiné požadavky pěstitele i rostlin. Pro úspěšné pěstování rostlin v těchto systémech je nutné pochopení jejich principu a požadavků rostlin. Rostliny jsou úzce závislé na podmínkách, které jim pěstitel úmyslně či neúmyslně vytvořil.

Kromě produkce potravin je hydroponie vhodnou metodou pro vědecké účely. Tento systém pěstování rostlin ve sterilních řízených podmínkách umožňuje zabývat se problematikou výživy rostlin bez vlivu půdy, tlaku škodlivých organismů, reakce rostlin na vnější podmínky a jiné.

Živný roztok je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících růst rostlin, proto je důležité znát požadavky rostlin na jednotlivé živiny. Při poskytnutí požadovaného poměru živin lze docílit zvýšení efektivity využití živin a zintenzivnění růstu rostlin. V této diplomové práci je cíleno na pochopení vlivu formy dusíku na růst a vývoj salátu kadeřavého, který může při správném použití usnadnit, zrychlit a zefektivnit vývoj rostlin. Reakce rostlin na vliv formy dusíku se liší jak mezi druhy rostlin, tak i v průběhu vegetace. V této práci je tento vliv a jejich poměr zkoumán na kadeřavém salátu.

Salát je ve světovém rozsahu jedním z nejpěstovanějších druhů zeleniny. Jeho výhoda spočívá v tom, že oproti plodové zelenině má krátkou vegetační dobu a oproti ostatní listové zelenině a bylinám tvoří dostatečný objem biomasy pro vyhodnocení výsledků.

2 Vědecké hypotézy a cíl práce

Cílem práce bylo popsat a vyhodnotit vliv formy dusíku v živném roztoku na růstové parametry biomasy rostlin a příjem živin rostlinami salátu pěstovanými v hydroponii. Na základě toho byly stanoveny hypotézy:

- 1) Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit výnos nadzemní biomasy a kořenů.
- 2) Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit poměr nadzemní biomasy a kořenů.
- 3) Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit obsah živin v rostlině.

3 Literární rešerše

3.1 Salát

Salát (*Lactuca sativa* L.) je listová zelenina patřící do čeledi hvězdnicovitých (*Asteraceae*) (Sapkota et al. 2019) a je to zelenina chladného období (Djidonou & Leskovar 2019). Jedná se o chladnomilnou zeleninu, které se daří při teplotách od 7 do 24 °C a běžně se konzumuje v salátových směsích (Sapkota et al. 2019). Salát je listová zelenina pěstovaná po celém světě díky své nutriční hodnotě (Hameed et al. 2022), vysoké spotřebě a ekonomické hodnotě (Djidonou & Leskovar 2019). Ve Spojených státech je salát cennou zeleninou a základní potravinou ve stravě. Salát přispívá značným množstvím polyfenolických sloučenin, vitamínů A, C a E, vápníku a železa. Vzhledem ke své syrové konzumaci v relativně velkém množství poskytuje důležitý zdroj dietních antioxidantů a má vysokou aktivitu pohlcujících radikálů, což je často využíváno jako pomoc při prevenci mnoha chronických onemocnění, jako je rakovina a kardiovaskulární onemocnění (Sublett et al. 2018). Je velmi výživným a bohatým zdrojem vitamínu C, minerálů a vlákniny. Salát se od pradávna používal jako lék na různé nemoci včetně žaludečních potíží, zánětů, bolesti a infekcí močových cest kvůli přítomnosti sekundárních metabolitů, jako jsou terpenoidy, flavonoidy a fenoly (Sapkota et al. 2019). Salát má také protiplísňové, antibakteriální a protizánětlivé účinky, které pomáhají oddálit proces stárnutí u lidí (Hameed et al. 2022). Salát je celosvětově jednou z nejrozšířenějších druhů zeleniny v hydroponické kultuře, což vyžaduje studium vhodného poměru dusíku v živném roztoku v hydroponické kultuře (Zhu et al. 2020). Obecně se salát pěstuje v různých kultivačních systémech, jako jsou hydroponické, půdní a substrátové systémy, aby splnily každodenní požadavky lidí (Hameed et al. 2022).

3.2 Hydroponie

Při použití systémů zemědělské produkce bez půdy se jedná hlavně o techniky „hydroponie“ (Fussy & Papenbrock 2022). Hydroponie je metoda kultivace plodin, která se objevila před desítkami let za účelem pěstování čerstvé tržní listové zeleniny v široké škále prostředí (Resh 2012). Slovo hydroponie je odvozeno od spojení dvou řeckých slov; „hydro“, což znamená voda a „ponos“ znamená práce, tj. „pracující voda“. Poprvé se toto slovo objevilo ve vědeckém článku v časopise Science, který vyšel v roce 1937 (Jones 2005). Hydroponie je sice poměrně nový termín používaný pro pěstování rostlin bez půdy, ale tato metoda vznikla již mnohem dříve. Závěsné zahrady v Babylonu, plovoucí zahrady Aztéků v Mexiku a zahrady Číňanů byly určitou formou "hydroponické" kultury, i když je tak nenazývali. Dokonce i egyptské hieroglyfy z doby několik set let př. n. l. popisují pěstování rostlin ve vodě (Resh 2012). Hydroponie je metoda pěstování rostlin pomocí minerálních živných roztoků, ve vodě, bez půdy. Je to možná nejintenzivnější způsob rostlinné výroby poskytující efektivní využití vody a minerálních živin s minimálním využitím prostoru. Komerční pěstitel jej úspěšně používá pro rychle rostoucí zahradní plodiny, jako je hlávkový salát, jahody, rajčata, okurky a okrasné rostliny. Tato technologie skutečně umožňuje přesnější kontrolu podmínek růstu, což usnadňuje studium proměnných faktorů nebo

parametrů. Specialitou této techniky je silný vývoj kořenového systému a efektivní příjem základních živin z kultivačního roztoku, což vede k lepšímu výnosu plodin. Tento systém řízené kultury je však omezen vysokou počáteční investicí a stálým energetickým vstupem (Asao 2012).

Bezpůdní pěstování rostlin v téměř zcela kontrolovaném prostředí je poměrně moderní pěstitelskou technologií a používá se téměř výhradně ve sklenících. V kontrolovaném prostředí lze realizovat nepřetržitou výrobu po celý rok (Fussy & Papenbrock 2022). Hydroponie má několik výhod: možnost využití oblastí nevhodných pro konvenční zemědělství, jako jsou suché a degradované půdy; nezávislost plodiny na povětrnostních podmínkách, jako je babí léto, mráz, krupobití, vítr, záplavy a roční období, což umožňuje pěstování po celý rok; omezení činností náročných na pracovní sílu, jako je pletí a příprava půdy (Domingues et al. 2012). Hydroponická rostlinná produkce umožňuje efektivnější využití vody a hnojiv a také lepší kontrolu nad klimatickými podmínkami a škůdci. Kromě toho hydroponická produkce zvyšuje kvalitu plodin a produktivitu, což má za následek vyšší konkurenceschopnost a ekonomické příjmy (Trejo–Télez & Gómez–Merino 2012). Kultivace bez půdy nabízí příležitosti k zajištění optimálních podmínek pro růst rostlin, a proto lze získat vyšší výnosy, které jsou trvale spolehlivé ve srovnání se zemědělstvím na volném poli (Fussy & Papenbrock 2022). Pro nezkušené a nekvalifikované osoby není snadné řídit většinu hydroponických/bezpůdních pěstebních systémů. Pěstování v půdě je k chybám pěstitele shovívavější než většina hydroponických/bezpůdních pěstebních systémů, zejména těch, které jsou čistě hydroponické (Jones 2005).

Pěstování rostlin v minerálním živném roztoku více umožňuje vědcům studovat vztah mezi nutričním stavem a růstem rostlin, ale také vliv biotických a abiotických faktorů na vývoj rostlin než v půdě. Kromě své užitečnosti pro zemědělský průmysl je hydroponie ideálním kultivačním zařízením k izolaci faktorů ovlivňujících růst rostlin a také k lepšímu pochopení základních, prospěšných, toxických a znečišťujících účinků chemických prvků a chemického přenosu prvků z hydro/pedosféry do biosféry (Cornelis et al. 2012). Metody kultivace bez půdy nabízejí jedinečné výhody, jako je schopnost kontrolovat dostupnost vody, pH a koncentraci živin v kořenové zóně (Silber & Bar–Tal 2019).

3.2.1 Hydroponické systémy

Hydroponie je jednou z forem bezpůdního pěstování. Jedná se o techniku, při níž jsou kořeny rostlin zavěšeny buď ve statickém, neustále provzdušňovaném živném roztoku, nebo v nepřetržitém proudu či mlze živného roztoku (Jones 2005). Hydroponické systémy se dále dělí na otevřené (tj. jakmile je živný roztok dopraven ke kořenům rostlin, není znovu použit) nebo uzavřené (tj. přebytečný roztok je obnovován, doplňován a recyklován). V uzavřených systémech se obvykle upouští od použití pěstebních médií, protože mohou komplikovat proces recirkulace (Fussy & Papenbrock 2022). Nezbytné pro optimální růst jsou systémy s odpovídajícím objemem roztoku, s dodáním kyslíku a s automatickou kontrolou pH (Langenfeld et al. 2022).

3.2.1.1 Necirkulační metody (otevřené systémy)

Systémy bez rezervoáru pro recirkulaci živného roztoku patří k otevřeným bezpůdním kulturám, proto je třeba věnovat větší péči výživě rostlin, protože závlahová voda s živinami významně ubývá (El-Kazzaz & El-Kazzaz 2017). Živný roztok necirkuluje, ale používá se pouze jednou. Když se jeho koncentrace živin sníží nebo se změní pH nebo EC, je nahrazen (Hussain et al. 2014). Při otevřeném pěstování zeleniny bez půdy se rozpuštěný živný roztok běžně dodává rostlinám přes kapkový systém. V tomto systému produkce zeleniny musí být udržován dostatečný odtok se specifickým cílem. Systém využívá pouze substrátů a kapkové závlahy (Waiba et al. 2020). V zemích, kde se hydroponie používá komerčně, vytvořily otevřené hydroponické kultivační systémy problémy se znečištěním prostředí, které vedly k následnému přechodu na uzavřené systémy (El-Kazzaz & El-Kazzaz 2017).

3.2.1.2 Cirkulační metody (uzavřené systémy)

Živný roztok je čerpán kořenovým systémem rostlin a přebytečný roztok je shromažďován, doplňován a znovu používán (Hussain et al. 2014). V uzavřených systémech pro pěstování zeleniny bez půdy se rozpuštěný živný roztok recykluje a je sledován a doplňován. Rozpuštěný živný roztok musí být v každém případě jednou týdně testován/pozorován a rozebrán, aby byla zachována úprava doplnění živin. Pokud neexistuje řádný dohled nad doplněním živin, může dojít k úniku z rovnováhy, což může způsobit odumření rostliny (Waiba et al. 2020).

3.2.1.2.1 Aeroponické systémy

Aeronomie je z definice podmnožinou hydroponie (Fussy & Papenbrock 2022). Aeroponický systém patří k uzavřenému bezpůdnímu kultivačnímu systému a je pravděpodobně nejmodernějším typem hydroponického systému (El-Kazzaz & El-Kazzaz 2017). Aeronomie je definována jako systém kultivace bez půdy, kde jsou kořeny nepřetržitě nebo přerušovaně omývány jemnými kapkami vody bohaté na živiny. Tato metoda nevyžaduje žádný substrát, jako je kamenná vlna, zemina, kokosové vlákno, vermikulit nebo perlit (Lakhiar et al. 2018). Aeroponické systémy zavěšují kořeny do prostředí s nasycenou vlhkostí, kde jsou zamlženy živným roztokem (Langenfeld et al. 2022). Větší kapky způsobují menší zásobování kyslíkem v kořenové zóně. Menší kapičky produkují příliš mnoho kořenových vlásků, aniž by se vyvinul postranní kořenový systém pro udržitelný růst (Lakhiar et al. 2018). Tyto systémy mají často extrémně nízký poměr objemu roztoku ke kultivační ploše ($V:CA = \text{Volume to Cultivation Area Ratio}$) a jsou náchylné k ucpání trysek a nerovnoměrnému dodávání živin, protože kořenové systémy mají tendenci se shlukovat, když se zvětšují (Langenfeld et al. 2022). Jakékoli delší přerušování energetické energie zastaví přívod živin a přispívá k trvalému poškození rostlin (Lakhiar et al. 2018).

Aeronomie je široce používána ve výzkumu fyziologie rostlin, ale v komerčním měřítku se nepoužívá tak běžně jako hydroponické metody. Aeronomie se však stále více používá pro pěstování četných zeleninových plodin, jako je salát, okurka, meloun, rajčata, bylinky, brambory a květinové plodiny, a zejména pro plodiny, kde se jako konečný produkt sklízí kořeny (Li et al. 2018). Nejběžnější aeroponický systém používá tlakovou vodu,

kteřá je rozstřikována na kořeny pomocí jednoduchých kapalinových trysek zahradního postřikovače (Lakhiar et al. 2018).

3.2.2 Pěstební média

Růstové médium je náhradou půdy v bezpůdních kultivačních systémech. Funkce růstového média je poskytnout kořenům kyslík, přivést vodu a rozpuštěné živiny do kontaktu s kořeny prostřednictvím zavlažovacího systému přes médium, schopnost nechat uniknout do odpadu a recirkulovat roztok skřz systém a dále stabilizovat rostliny jako podpůrné médium, aby se nepřevrhly. Existují různé substráty, které se používají jako růstové médium, sestávající z anorganických (přirodních; expandovaná hlína, skelná vlna, štěrk, perlit, pemza, minerální vlna, písek, sepiolit, vermikulit, vulkanický tuf a zeolit nebo syntetické; pěnové rohože, hydrogel a plastová pěna) nebo organických (kůřa, kokosové vlákno, kokosová zemina, rouno, rašelina, rýžové slupky, piliny a dřevěné štěpky) (El-Kazzaz & El-Kazzaz 2017). Výběr materiálu, který má být použit jako substrát, závisí na druhu pěstované rostliny. Vlastnosti pěstebních substrátů proto musí splňovat požadavky rostlinné výroby, které jsou zase dány rostlinnou biologií a způsobem pěstování. Velkou roli samozřejmě hrají i náklady. Aby se vytvořily udržitelné vyhlídky do budoucna, měly by být substráty také šetrné k životnímu prostředí a orientované na spotřebitele (Fussy & Papenbrock 2022). Čím méně média systém vyžaduje, tím jednodušší a levnější je jeho provoz. Dokonalé médium je schopno pojmout téměř stejnou koncentraci vzduchu a vody (Hussain et al. 2014). Minerální pěstební médium má neutrální pH, vysoký obsah vzduchu a nízkou hustotu, za to organické pěstební médium se vyznačuje vysokým obsahem organické hmoty a schopností výměny kationtů s vodním roztokem zavlažujícím pěstební médium. Navzdory těmto rozdílům byl výnos a počet plodů rajčete (*Solanum lycopersicum*) srovnatelný mezi rostlinami pěstovanými na minerálních nebo organických pěstebních substrátech během několika po sobě jdoucích let (Grunert et al. 2016).

3.3 Výživa v hydroponii

Na rozdíl od rostlinné produkce v polních podmínkách, která by mohla těžit z mineralizace půdních živin a aktivity mikroorganismů, jsou hydroponicky pěstované rostliny výhradně závislé na přímé dodávce hnojiv (Djidonou & Leskovar 2019). V moderním bezpůdním kultivačním systému (SCS = soilless cultivation system) jsou všechny základní živiny rostlinám dodávány prostřednictvím živného roztoku, s výjimkou uhlíku, který je získáván ze vzduchu jako oxid uhličitý (Savvas & Gruda 2018). Uhlík je také přijímán kořeny ve formě HCO_3^- , a kyslík se dodatečně dostává do kořenů jak plynným O_2 , tak jako součást molekul vody (Silber & Bar-Tal 2019).

Pro růst a produkci rostlin je esenciálních několik chemických prvků, celkem šestnáct prvků: uhlík, vodík, kyslík, dusík, fosfor, draslík, síra, vápník, hořčík, mangan, železo, zinek, bór, měď, molybden a chlór. Mezi výše uvedené prvky existuje rozdělení podle původu: hlavní biogenní prvky, C, H, O a minerály; rozdělené na makroživiny, N, P, K, Ca, Mg, S, a mikroživiny, Mn, Fe, B, Zn, Cu, Mo, Ni, Cl (Domingues et al. 2012). Esenciální prvek má jasnou fyziologickou roli a jeho absence brání úplnému životnímu cyklu rostliny (Trejo-Téllez & Gómez-Merino 2012). Bez nedostatku těchto prvků rostlina nemůže

existovat a tyto prvky nelze vyměnit za žádné jiné živiny (Lakhiar et al. 2018). Bez těchto živin nemohou rostliny dokončit svůj životní cyklus a jejich role v růstu rostlin nemůže být nahrazena žádnými jinými prvky. Všechny základní živiny jsou bezpůdním kulturním rostlinám dodávány ve formě živného roztoku, který tvoří soli hnojiv rozpuštěné ve vodě (Hussain et al. 2014). Živný roztok pro hydroponické systémy je vodný roztok obsahující převážně anorganické ionty z rozpustných solí esenciálních prvků pro vyšší rostliny. Nakonec mohou být přítomny některé organické sloučeniny, jako jsou cheláty železa (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012). Většina hnojiv používaných k přípravě živných roztoků jsou vysoce rozpustné anorganické soli, ale používají se také některé kyseliny, jako je kyselina dusičná a fosforečná (Savvas & Gruda 2018). Jiné prvky, jako je sodík, křemík, vanad, selen, kobalt, hliník a jód jsou považovány za prospěšné, protože některé z nich mohou stimulovat růst nebo mohou kompenzovat toxické účinky jiných prvků, nebo mohou nahradit základní živiny v méně specifické roli (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012).

Vzhledem ke schopnosti rostlin selektivně přijímat živiny podle svých nutričních potřeb mohou být různé druhy rostlin úspěšně kultivovány s použitím složení jednoho živného roztoku (Savvas & Gruda 2018). Složení živin však závisí na způsobu pěstování rostlin, druhu média, fázi růstu, počasí, způsobu aplikace živného roztoku atd. (Lakhiar et al. 2018). Listová zelenina může používat dvouúrovňové složení. První úroveň (přibližně polovina konečné koncentrace) se používá, dokud rostliny nejsou staré přibližně 3–4 týdny, a poté druhá úroveň (plná koncentrace) (Resh 2012). Je za potřebí dobré pochopení požadavků daných plodin na živiny pro optimální růst a výnos v hydroponickém výrobním systému. Řízení koncentrace živin je životně důležitým a klíčovým faktorem určujícím výnos a kvalitu plodin zeleniny v bezpůdních výrobních systémech. To je kritické a nezbytné pro listovou zeleninu, jako je salát, který se vyznačuje vysokou citlivostí na nedostatek dusíku a relativně nízkou efektivitu příjmu dusíku (NUpE = nitrogen uptake efficiency). Vzhledem k rozdílům v morfologických znacích typů komerčně pěstovaného salátu lze očekávat i odrůdový rozdíl v efektivnosti využití dusíku (NUE = Nitrogen use efficiency) (Djidonou & Leskovar 2019). Teoreticky je složení živného roztoku pro konkrétní druh plodiny a vývojovou fázi optimální, když průměrné poměry příjmu mezi jednotlivými živinami jsou podobné relativním poměrům mezi stejnými živinami v dodávaném živném roztoku (Savvas & Gruda 2018). Pro mnoho plodin byly stanoveny kritické úrovně pro běžně používané živiny (Fussy & Papenbrock 2022). Obecně platí, že rostliny sklizené pro jejich listy mohou tolerovat vyšší hladiny N, protože dusík podporuje vegetativní růst. Rostliny pěstované pro produkci ovoce by však měly mít nižší hladiny N a vyšší hladiny P, K a Ca. Za vysokých světelných podmínek budou rostliny spotřebovávat více dusíku než při špatném osvětlení (Resh 2012). Vzhledem k tomu, že rostlinná transpirace a současně spotřeba vody jsou plně nezávislé na metabolických funkcích spojených s asimilací živin, mohou klimatické parametry ovlivnit rychlost příjmu živin jinak než rychlost příjmu vody. V důsledku toho se poměry příjmu živin/vody mohou měnit za odlišných klimatických podmínek, což znamená, že optimální složení živného roztoku může záviset také na místních klimatických podmínkách (Savvas & Gruda 2018). Frekvence a množství podávaného živného roztoku závisí na typu použitého substrátu (objem a fyzikálně–chemické vlastnosti), plodině (druh a stádium vývoje), velikosti nádoby, použitém kultivačním a zavlažovacím systému a převládajících klimatických podmínkách. Když je živný roztok dodáván nepřetržitě, rostliny mohou přijímat ionty ve velmi nízkých

koncentracích. Uvádí se, že velká část živin není rostlinami využita, nebo alespoň jejich příjem nemá žádný vliv na produkci. Na druhou stranu, vysoce koncentrované živné roztoky vedou k nadměrnému příjmu živin, takže lze očekávat toxické účinky (Fussy & Papenbrock 2022).

V aeroponickém systému, kde dochází k recyklaci vody a živin, je důležité měření kyselosti/zásady nebo hodnoty pH, aby rostliny mohly přijímat živiny (Gopinath et al. 2017). Parametry živného roztoku jako je teplota, pH, elektrická vodivost, obsah kyslíku a další musí být přesně přizpůsobeny potřebám příslušného rostlinného druhu, aby byly vytvořeny optimální růstové podmínky. Roztok by měl být přímo dostupný kořenům, i když je vhodné vyhnout se smáčení listů, aby se omezilo poškození a výskyt chorob (Fussy & Papenbrock 2022).

3.3.1 Hodnota pH živného roztoku

Parametr, který měří kyselost nebo zásaditost roztoku je pH (power of hydrogen). Tato hodnota ukazuje vztah mezi koncentrací volných iontů H^+ a OH^- přítomných v roztoku a pohybuje se mezi 0 a 14 (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012). Je známo, že hodnota pH živného roztoku by měla být mezi 5,5 a 6,5, protože toto je rozmezí, kde budou mít rostliny větší dostupnost živin (Domingues et al. 2012). Přímý vliv pH na kořeny je minimální. Vysoké pH snižuje dostupnost Fe, Mn, Zn, Cu a P a nízké pH má tendenci snižovat dostupnost K, S, Ca, Mg a P. Nízké pH také zvyšuje rozpustnost kovů, což zvyšuje riziko toxicity mikroživin (Langenfeld et al. 2022). Důležitou vlastností živných roztoků je to, že musí obsahovat ionty v roztoku a v chemických formách, které mohou být přijímány rostlinami, takže v hydroponických systémech je produktivita rostlin úzce spjata s příjmem živin a regulací pH (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012). Nedostatek živin nebo příznaky toxicity se projeví tehdy, pokud je pH vyšší nebo nižší než doporučené rozmezí pro jednotlivé plodiny (Hussain et al. 2014).

Kořeny využívají živiny ve vodě jako kladně nabité kationty nebo záporně nabitě anionty. Příkladem kationtu je amonný iont (NH_4^+) a aniontový dusičnan (NO_3^-). Jak rostliny využívají ionty, pH roztoku se může měnit, což znamená, že může být příliš kyselé nebo příliš zásadité (Gopinath et al. 2017). Příjem těchto dvou iontů mění pH díky principu rovnováhy náboje. Příjem NO_3^- způsobí uvolnění hydroxidových iontů (nebo příjem protonů), což zvýší pH. Příjem NH_4^+ uvolňuje protony, což snižuje pH. Pokud je procento obsahu NH_4^+ zvýšeno v hydroponii, hodnota pH musí být přísně kontrolována automatickým přidáváním zásady, jako je hydroxid draselný. Bez NH_4^+ v roztoku se u většiny plodin pH postupem času zvyšuje (Langenfeld et al. 2022). V živném roztoku tvoří NH_3 pouze komplex s H^+ . Při rozsahu pH mezi 2 a 7 je NH_3 zcela přítomen jako NH_4^+ . Zvýšením pH nad 7 koncentrace NH_4^+ klesá, zatímco koncentrace NH_3 se zvyšuje (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012). Kyselina dusičná okamžitě snižuje pH, zatímco síran amonný poskytuje NH_4^+ pro dlouhodobější kontrolu pH. Tento přístup vyžaduje pouze úpravu pH směrem dolů, nejsou tedy nutné žádné alkalické úpravy. Dále použití kyseliny sírové a kyseliny fosforečné je také možné použít pro regulaci pH, ale poskytnutí dalšího dusíku z kyseliny dusičné je prospěšné díky rychlému příjmu dusíku z roztoku (Langenfeld et al. 2022).

Fosfor je prvek, který se vyskytuje ve formách silně závislých na pH prostředí. V kořenové zóně lze tento prvek nalézt jako ionty PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} a H_2PO_4^- , poslední dva ionty jsou hlavní formy fosforu přijímané rostlinami. Na inertních substrátech je největší množství dostupného fosforu v živném roztoku přítomno, když je pH roztoku mírně kyselé (pH 5). V alkalických a vysoce kyselých roztocích koncentrace fosforu významným způsobem klesá.

Draslík, vápník a hořčík jsou rostlinám dostupné v širokém rozmezí pH, přítomnost jiných iontů však narušuje jejich dostupnost v důsledku tvorby sloučenin s různým stupněm rozpustnosti.

Síra také tvoří poměrně silné komplexy, a to s Ca^{2+} a Mg^{2+} . Jak se pH zvyšuje z 2 na 9, zvyšuje se množství SO_4^{2-} , který tvoří rozpustné komplexy s Mg^{2+} jako MgSO_4 a s K^+ jako K_2SO_4^- (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012).

Nerovnoměrný příjem kationtů a aniontů spouští uvolňování H^+ nebo OH^- (nebo HCO_3^-) do apoplastu, což vede k opačným změnám pH v rhizosféře (Feng et al. 2020).

3.3.2 Elektrická vodivost živného roztoku

Celková koncentrace iontů živného roztoku určuje růst, vývoj a produkci rostlin. Celkové množství iontů rozpuštěných solí v živném roztoku působí silou zvanou osmotický tlak, což je koligativní vlastnost (látková koncentrace částic v roztoku) živných roztoků a je jasně závislá na množství rozpuštěných solutů (rozpuštěných látek). Pojmy osmotický tlak a osmotický potenciál lze tedy používat zaměnitelně, což je stále důležité s ohledem na jednotky, které se používají, běžně atm, bar a MPa.

Nepřímým způsobem odhadu osmotického tlaku živného roztoku je elektrická vodivost (EC = Electric Conductivity), index koncentrace soli, který definuje celkové množství solí v roztoku. EC živného roztoku je tedy dobrým indikátorem množství dostupných iontů rostlinám v kořenové zóně (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012). Ionty v roztoku vedou elektrický proud, takže EC indikuje vyšší koncentraci iontů (Langenfeld et al. 2022). Siemens (S) je jednotka soustavy SI (Mezinárodní systém jednotek) pro vodivost. Protože vodivost standardních živných roztoků je relativně malá, používá se milisiemens (mS) 1000× menší jednotka. Jednotka „mho“ (ohm; jednotka odporu) je ekvivalentní S a „mmho“ k mS. Vzdálenost mezi dvěma elektrodami, která se používá k měření vodivosti roztoku, také ovlivňuje odečet. Hodnota v mS/m bude 100× větší než hodnota v mS/cm. EC dobré kvalitní pitné vody může být velmi nízké, což vysvětluje, proč většina laboratoří dává přednost vyjádření vodivosti závlahové vody v mS/m (Combrink 2019). Elektrická vodivost udává sílu živného roztoku, měřenou EC metrem. Omezení EC spočívá v tom, že udává pouze celkovou koncentraci roztoku a nikoli jednotlivé složky živin. Ideální rozsah EC pro hydroponii je mezi 1,5 a 2,5. Vyšší EC zabrání příjmu živin v důsledku osmotického tlaku a nižší EC vážně ovlivní zdraví rostlin a výnos (Hussain et al. 2014). Při velmi vysoké EC voda obsahuje hodně rozpuštěných solí, které omezují osmotický pohyb vody z roztoku do kořenů (Combrink 2019). Je dobře známo, že EC závisí na teplotě vody, zvýší se přibližně o 2 % při zvýšení teploty o 1 °C (Endoh et al. 2008). Elektrická vodivost roztoku se zvyšuje s rostoucí teplotou viz tabulka 1 (Combrink 2019). Většina kapesních EC měřičů má nyní automatickou teplotní kompenzaci, která pomáhá eliminovat většinu teplotních závislostí v poměrně širokém rozsahu (Hershey & Sand 1993).

Nárůst EC v průběhu času ukazuje na nízkou efektivitu využití vody (WUE = water-use efficiency; poměr hmotnosti sušiny a transpirované vody), přičemž živiny jsou odstraňovány pomaleji než voda. Naopak pokles EC v průběhu času ukazuje na vysokou WUE, kdy živiny jsou odstraněny rychleji než voda (Langenfeld et al. 2022). Pokud je EC vyšší než doporučený rozsah, je nutné přidat čerstvou vodu, aby se EC snížilo. Pokud je EC nižší, je potřeba přidat živiny, aby se EC zvýšilo (Hussain et al. 2014). Každá živina má vhodnou koncentraci a relativní poměr pro normální růst rostliny, což jsou cílové hodnoty systému kontroly živin. Koncentrace iontů v živných roztocích se však s časem mění a následně dochází k nerovnováze živin v uzavřeném hydroponickém systému. Proto by se pro dosažení optimální regulace měly všechny živiny měřit v reálném čase. Takový systém má však ekonomická i technická omezení (Son et al. 2020).

Tabulka 1. Vliv teploty na elektrickou vodivost (EC) živného roztoku 2 mS/cm dle Combrink (2019).

Teplota roztoku	Naměřené EC
°C	(mS/cm)
15	1,62
20	1,80
standard 25	2,00
30	2,20

3.3.3 Živný roztok

V hydroponii jsou všechny základní prvky dodávány rostlinám rozpuštěním solí hnojiva ve vodě, aby se vytvořil živný roztok. Volba solí, které se mají použít, závisí na řadě faktorů (Resh 2012). Zálahová voda může obsahovat některé makroživiny (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}), mikroživiny (Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , B a Cl^-) a další ionty (HCO_3^- , Na^+) ve značně vysokých koncentracích. Tyto živiny je třeba vzít v úvahu při výpočtu množství hnojiv potřebných k přípravě živného roztoku (Savvas & Gruda 2018). Živný roztok je vodný roztok obsahující převážně rozpustné soli složek nezbytných pro vyšší výnos rostlin (Lakhari et al. 2018).

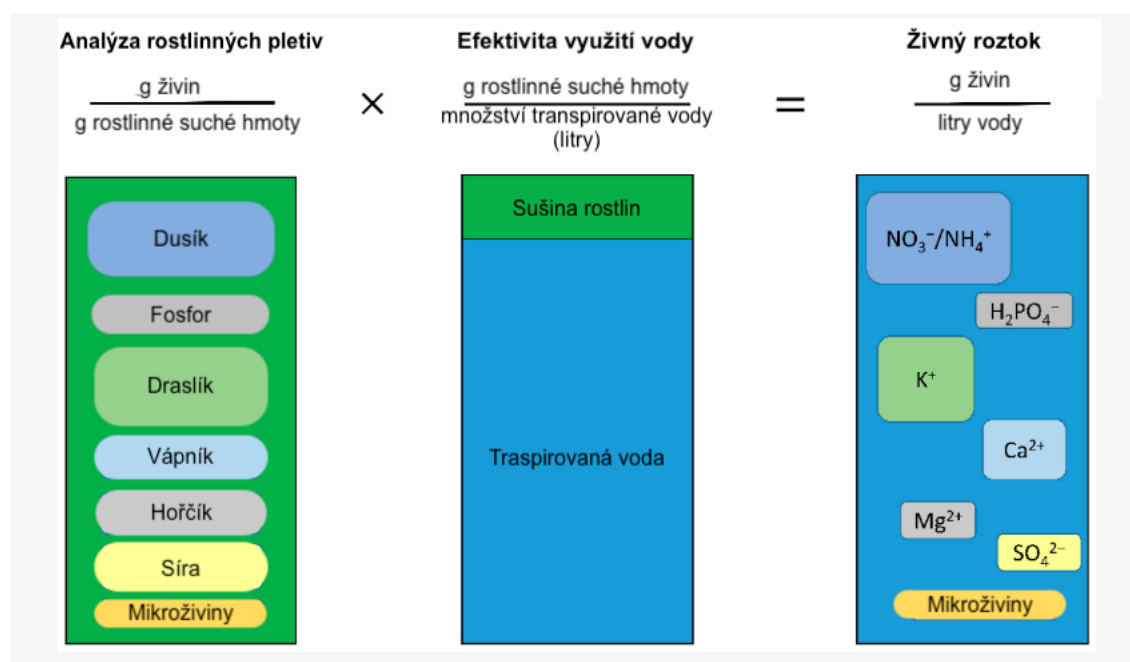
Relativní podíl iontů, které sloučenina dodá, musí být porovnán s poměrem požadovaným ve složení živin. Například jedna molekula dusičnanu draselného (KNO_3) poskytne jeden ion draslíku (K^+) a jeden dusičnan (NO_3^-), zatímco jedna molekula dusičnanu vápenatého ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) poskytne jeden iont vápníku (Ca^{2+}) a dva ionty dusičnanu ($2(\text{NO}_3^-)$). To znamená, že k uspokojení potřeb dusičnanového aniontu by bylo zapotřebí poloviční množství dusičnanu vápenatého než dusičnanu draselného (Resh 2012).

Složení živného roztoku musí odrážet poměry příjmu jednotlivých prvků plodinou a jelikož se potřeba mezi druhy liší, základní složení živného roztoku je specifické pro každou plodinu (Trejo-Téllez & Gómez-Merino 2012). Langenfeld et al. (2022) uvádějí výpočet koncentrace živného roztoku na základě hmotnostní bilance. Koncentrace živného roztoku se vypočítá vynásobením koncentrací živin v pletivech s efektivitou využití vody (WUE) viz obrázek 1.

Hodnoty WUE jsou založeny na celkové rostlinné hmotě, která zahrnuje plody, stonky a kořeny. Tyto části rostlin mohou mít nižší koncentrace živin než listy. To znamená, že výpočty potřeby živin mohou nadhodnocovat skutečné potřeby živin celé rostlinné

biomasy. V produkci s významným podílem hmoty stonku tak může být doplňovací roztok v pozdější části životního cyklu snížen. Pokud se neprovede žádná úprava, živiny přidané do roztoku mají tendenci převyšovat požadavky rostlin (Langenfeld et al. 2022). Volba koncentrace živného roztoku by tedy měla být taková, aby voda a celkové ionty byly rostlinou přijímány ve stejném poměru, v jakém jsou přítomny v roztoku (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012).

Obrázek 1. Diagram znázorňující, výpočet složení živného roztoku, měření koncentrací živin v rostlinném pletivu (analýza pletiva) a efektivity využití vody. Živiny jsou dodávány jako ionty: dusík jako NO_3^- nebo NH_4^+ , fosfor jako H_2PO_4^- , draslík jako K^+ , vápník jako Ca^{2+} , hořčík jako Mg^{2+} a síra jako SO_4^{2-} pro makroživiny dle Langenfeld et al. (2022).



Pokud má sůl nízkou rozpustnost, ve vodě se rozpustí pouze malé množství. V hydroponii je nutné používat soli hnojiv s vysokou rozpustností, protože musí zůstat v roztoku, aby byly dostupné rostlinám. Například vápník může být dodáván buď dusičnanem vápenatým nebo síranem vápenatým. Síran vápenatý je levnější, ale jeho rozpustnost je velmi nízká. Proto by měl být dusičnan vápenatý použit k zajištění veškeré potřeby vápníku. Měl by být použit dusičnan vápenatý, který poskytuje jak vápník, tak dusičnanový dusík. Jakýkoli další potřebný dusík by měl zajistit dusičnan draselný, který také poskytuje draslík. Veškerý fosfor lze získat z fosforečnanu draselného, který také poskytuje určité množství draslíku. Zbývající potřebu draslíku lze získat ze síranu draselného, který také dodává určité množství síry. Další síra pochází z jiných síranů, jako je síran hořečnatý, který dodává potřeby hořčíku (Resh 2012). Trejo–Téllez & Gómez–Merino (2012) uvádějí tabulku (2), která obsahuje seznam běžně používaných hnojiv a kyselin v hydroponii s charakteristikami zajímavých pro aplikaci výživy rostlin.

Mikroživiny lze získat z komerčních premixů. I když jsou relativně drahé, šetří podstatnou práci při vážení jednotlivých sloučenin obsažených ve směsi.

Doporučuje se použití chelátů (železa, manganu a zinku), protože zůstávají v roztoku a jsou rostlinám snadno dostupné i při změnách pH. Chelátová sůl je sůl, která má rozpustnou

organickou složku, ke které může minerální prvek přilnout, dokud nedojde k příjmu kořeny rostlin (Resh 2012).

Aplikace živin může být prováděna podle rozborů konkrétního stadia plodiny, které mohou popisovat spotřebu různých typických živin pro konkrétní plodinu, nebo pomocí rozborů celkových potřeb rostlin kvantitativně přizpůsobených rychlosti růstu a množství dodávané vody. Složení a koncentrace živného roztoku jsou tedy závislé na kultivačním systému, stadiu vývoje plodiny a podmínkách prostředí (Trejo–Téllez & Gómez–Merino 2012).

Tabulka 2. Hnojiva obsahující makroživiny, které se běžně používají při přípravě živných roztoků dle Trejo–Téllez & Gómez–Merino (2012).

Hnojiva	Vzorec	Živiny procenta	Rozpustnost g/l při 20 °C
Dusičnan vápenatý	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	N: 15.5; Ca: 19	1290
Dusičnan draselný	KNO_3	N: 13; K:38	316
Dusičnan hořečnatý	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	N: 11; Mg:9	760
Dusičnan amonný	NH_4NO_3	N:35	1920
Dihydrogenfosforečnan draselný	KH_2PO_4	P: 23; K: 28	226
Dihydrogenfosforečnan amonný	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	N; 12; P: 60	365
Síran draselný	K_2SO_4	K: 45; S: 18	111
Síran hořečnatý	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mg: 10; S: 13	335
Síran amonný	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	N: 21; S: 24	754
Chlorid draselný	KCl	K: 60; Cl: 48	330

Před přidáním hnojiv do pitné vody pro přípravu živného roztoku by měla být celková alkalita vody nastavena na úroveň vhodnou pro plodinu a výrobní systém. To je nutné, aby se zabránilo vysrážení nerozpustných solí (při vysokých úrovních alkality) a aby se zajistilo dosažení optimálních úrovní pH v živných roztocích (Combrink 2019). Koncepce hydroponických systémů založených na EC spočívá v kontrole celkové koncentrace iontů při současné minimalizaci nerovnováhy živin pomocí doplňování zásobního roztoku. Pro normální provoz systému je nutné teoreticky pochopit postup míchání živného roztoku (Son et al. 2020).

3.3.4 Tvorba zásobního roztoku

Zásobní roztoky jsou koncentrované živné roztoky. V závislosti na schopnosti injektoru mohou být zásobní roztoky připraveny v 50, 100 nebo 200násobku normální koncentrace. Druhým faktorem, který může omezit stupeň koncentrace zásobního roztoku, je rozpustnost hnojiva. Limitujícím faktorem pro celý zásobní roztok bude nejméně rozpustné hnojivo.

V samostatných nádobách musí být připraveny dva samostatné zásobní roztoky. Ty se obecně nazývají „složka A“ a „složka B“. Důvodem pro oddělení roztoků je to, že mezi sírany a dusičnany některých sloučenin dojde k vysrážení, pokud jsou smíchány

dohromady ve vysokých koncentracích. Například sírany síranu draselného nebo síranu hořečnatého se srážejí s vápníkem z dusičnanu vápenatého.

Pro složku A je pořadí přidávání hnojiv následující: polovina dusičnanu draselného, poté dusičnan vápenatý, dusičnan amonný, a nakonec chelát železa po úpravě pH na přibližně 5,5 s doplněním na konečnou hladinu roztoku.

Pro složku B je pořadí následující: druhá polovina dusičnanu draselného a poté síranu draselného. Nádobu naplňte do tří čtvrtin a poté pokračujte v přidávání síranu hořečnatého a fosforečnanu draselného. Upravte pH na přibližně 5,5 a před doplnění nádoby vodou přidejte mikroživiny (Resh 2012).

3.4 Dusík

Největší zastoupení dusíku se nachází v zemské atmosféře, a to 78 % N_2 . Aby byl však N_2 dostupný pro rostliny, musí být nejprve přeměněn na reaktivní formy dusíku, termín, který zahrnuje všechny formy dusíku, které nevstupují do organických vazeb (C–N vazby) a elementární N_2 , a vztahuje se na formy včetně NH_3 až NO_3^- , pokrývající valenční spektrum od -3 do +5 (kromě 0; valence N_2) (Esteban et al. 2016). Dusík (N) a draslík (K) potřebují rostliny k dokončení svého životního cyklu, tyto dvě živiny kořeny získávají v největším množství (Coskun et al. 2017). Dusík je jako kvantitativně nejdůležitější minerální prvek pro rostliny přijímán kořeny především v anorganické formě (dusičnany a amonný iont) a méně v organické (např. močovina, aminokyseliny, peptidy) formě (Liu & Wirén 2017; Nacry et al. 2013). Dusík je základní složkou nukleových kyselin kyseliny deoxyribonukleové a kyseliny ribonukleové (DNA, RNA), aminokyselin, proteinů a také enzymů, které jsou potřebné pro podporu růstu a vývoje (Mahlangu et al. 2016). Aminokyseliny jsou základní stavební jednotkou peptidů a polypeptidů (bílkovin). Tvoří se vzájemnou kombinací 20 základních aminokyselin tak, že podle přesného a pro jednotlivé druhy specifického genetického kódu. Bílkoviny tvoří podstatnou součást všech živých buněk a pletiv rostlin. Rostlinné bílkoviny obsahují 15–18,9 % dusíku (Vaněk et al. 2016). Dusík je jedním z nejdůležitějších stavebních materiálů v rostlinách. Zvýšení obsahu dusíku může stimulovat růst rostlin a získat vyšší obsah sušiny. Nedostatek dusíku by bránil syntéze bílkovin a snižoval aktivitu enzymů, ovlivňoval fotosyntézu a další životní aktivity listů a případně vedl k retardaci růstu rostlin (Zhang et al. 2021). Fotosyntéza je biologický proces, při kterém rostliny přeměňují světelnou energii na chemickou energii, kterou lze využít v životních procesech k syntéze a efektivní akumulaci organické hmoty. Dusík ovlivňuje chloroplasty, fotosyntézu, fotorespiraci, temnostní dýchání a syntézu enzymů a může přímo nebo nepřímo ovlivňovat fotosyntézu (Zhu et al. 2020). Fotosyntéza je zdrojem energie pro metabolismus uhlíku a dusíku v rostlinách, takže světlo může prostřednictvím fotosyntézy regulovat metabolismus uhlíku a dusíku v rostlinách, a tím ovlivnit obsah sloučenin obsahujících dusík. Naopak, jelikož dusík je součástí fotosyntetických proteinů a pigmentů, lze obsah a aktivitu fotosyntetických proteinů a pigmentů měnit změnou hladiny dusíku, což ovlivňuje fotosyntézu a biomasu rostlin (Zhang et al. 2021).

Dusík je nezbytný pro to, aby rostliny dokončily své životní cykly a je nejdůležitější živinou získanou v největším množství kořeny (Feng et al. 2020). Amonný iont je jeden z hlavních anorganických zdrojů dusíku pro rostliny. Při nízkých externích zásobách amonný

iont podporuje růst rostlin, zatímco při vysokých externích zásobách způsobuje toxicitu (Liu & Wirén 2017). Rostliny musí přizpůsobit svou morfologii kořenů v reakci na dusičnany nebo amonný iont, aby se optimalizoval příjem dusíku z půdy. Postranní kořeny (LR = lateral roots) tvoří velkou část celkové délky kořene a mnoho nitrátových transportérů (NRT = nitrate transporters) a amonných transportérů (AMT = ammonium transporters) je exprimováno v epidermis a kortexu LR, což umožňuje efektivní příjem dusíku (Hachiya & Sakakibara 2017).

3.4.1 Vliv formy dusíku

Vzhledem k podmínkám prostředí a rostlinným druhům může být relativní příspěvek každé formy dusíku k příjmu dusíku rostlinami dosti variabilní (Sambo et al. 2019). NH_4^+ a NO_3^- jsou dvě hlavní formy dusíku, které mohou rostliny přijímat a využívat a mají důležitý vliv na růst a kvalitu plodin (Zhu et al. 2021). Poměr NH_4^+ ku NO_3^- má významný vliv na biomasu, kvalitu a složení metabolitů salátu pěstovaného v půdě, substrátu a hydroponických kultivačních systémech (Hameed et al. 2022). Dostupnost sloučenin dusičnanů versus amonných sloučenin pro rostliny je důležitá pro podporu vegetativního nebo reprodukčního růstu (Resh 2012). Funkčně se NH_4^+ a NO_3^- podílejí na regulaci fyziologie rostlin, procesů růstu a vývoje, včetně rostlinné biomasy, délky kořenů a prýtu klíčení semen, růstu kořenů a listů, struktury kořenů, doby kvetení, stárnutí a výnosy rostlin (Hameed et al. 2022). Je známo, že koncentrace dusíku v živném roztoku může ovlivnit charakter růstu kořenů. Se zvyšující se koncentrací NO_3^- se snižuje počet a délka kořenových vlásků (Jones 2005). Pokud je amonný dusík jediným zdrojem dusíku je inhibováno prodlužování primárních a bočních kořenů, lokalizovaný přísun NH_4^+ rostlinám s deficitem dusíku silně stimuluje postranní větvení kořenů. Ve srovnání s primárním kořenem vykazuje vývoj postranních kořenů vyšší plasticitu v reakci na kolísající dostupnost živin nebo měnící se nutriční podněty (Liu & Wirén 2017). Koncentrace ostatních hlavních prvků, P, K, Ca a Mg, nemají podobný účinek (Jones 2005). Celkově aplikace NH_4^+ stimuluje větvení LR, zatímco dusičnany stimulují prodloužení LR. Je zajímavé, že aplikace dusičnanu a NH_4^+ společně zvyšuje větvení a prodlužování LR, což naznačuje, že aplikace dusičnanu a NH_4^+ má vhodné, doplňující se účinky na vývoj LR. Kořenové vlásky zvětšují povrchovou plochu kořínků a zvyšují jejich schopnost přijímat dusík (Hachiya & Sakakibara 2017). NH_4^+ indukované postranní větvení kořenů není způsobeno nutričním účinkem, ale spíše odráží signální funkci NH_4^+ transportérů (AMT), které jsou vyžadovány pro NH_4^+ spouštění laterální větvení kořenů. Amonný iont urychluje tvorbu postranních kořenů. Hlavním faktorem zvyšujícím postranní větvení kořenů u rostlin dodávaných NH_4^+ je spíše rychlost než pravděpodobnost vzniku laterálního kořene (Liu & Wirén 2017).

Z metabolického hlediska je asimilace NH_4^+ levnější ve srovnání s NO_3^- , NH_4^+ je přímo použitelný k syntéze kyseliny glutamové a následně k syntéze glutaminu (Sambo et al. 2019). Forma dusíku ovlivňuje spotřebu NADPH a kvůli redukci NO_3^- v listu lze podstatnou část produktů elektronového transportního řetězce využít k asimilaci NO_3^- . Náklady na fotoenergii pro dodávku NH_4^+ jsou o 145 % nižší než pro dodávku dusičnanů (Guo et al. 2007). Při nízkých koncentracích (<3 mmol/l) je NH_4^+ preferovaným zdrojem dusíku rostlinami, ale nad určitou prahovou hodnotou se NH_4^+ stává toxickým. Tento práh

závisí na rostlinném druhu a na odrůdě (v plodinách). Faktory prostředí, jako je teplota, pH půdy, koncentrace CO_2 a intenzita světla, mohou také ovlivnit práh toxicity NH_4^+ (Esteban et al. 2016). Citlivost rostlin na amoniak je kritická během raných fází růstu (zejména sazenic). Pěstitelé s hydroponickými systémy mohou zhoršovat podmínky pro růst rostlin přílišným kolísáním hladiny pH. Důvodem je, že rostliny mohou tolerovat vysoké hladiny NH_4^+ při nízkém pH, ale jakmile se pH upraví (nebo zvýší), projeví se negativní účinky vysoké koncentrace amoniaku (Lecuona 2014). Příjem NH_4^+ může proto způsobit nadměrný vegetativní růst, zejména za špatných světelných podmínek. Na druhé straně dusičnanový dusík musí být před asimilací redukován, proto bude vegetativní růst zpomalen. Amonné soli by mohly být použity za jasných letních podmínek, kdy je rychlost fotosyntézy vysoká nebo pokud dojde k nedostatku dusíku a je potřeba rychlý zdroj dusíku (Resh 2012). Interakce světla a dusíku může nejen zlepšit efektivitu využití světla rostlinami, ale také podpořit efektivitu příjmu a využití dusíkatých hnojiv rostlinami (Zhang et al. 2021). Toxické působení NH_4^+ na rostliny bylo vysvětleno několika mechanismy: vyčerpáním zásob uhlíku, poškozením ultrastruktury chloroplastů, nedostatkem minerálních kationtů, narušením hormonální homeostázy a fotosyntézy, energetická náročnost, zbytečným transmembránovým cyklováním NH_4^+ , zvýšeným odtokem protonů, inhibicí enzymu GDP–manóza pyrofosforyláza, oxidačním stresem, posunem buněčného pH na netolerovatelné úrovně a rozpojením fotofosforylace. Tyto faktory spolu nepřímo souvisí (Bittsánszky et al. 2015).

Kořeny většiny rostlin preferují příjem NH_4^+ před NO_3^- v mikromolárních koncentracích v důsledku nižších energetických nákladů spojených s příjmem a asimilací NH_4^+ než NO_3^- . Naopak NH_4^+ často způsobuje amonnou toxicitu v milimolárních koncentracích (Zhu et al. 2021). Problém s NH_4^+ je v tom, že při vysokém obsahu NH_4^+ jde o pasivní příjem a rostlina nemá kontrolu nad tím, kolik přijme. To znamená, že v rostlině lze snadno dosáhnout úrovně toxicity a způsobit poškození (Lecuona 2014). Amonný iont pak může potlačovat hromadění kationtů zejména vápníku a hořčíku, a může vést k nedostatečnému obsahu minerálních živin v době růstu zeleniny. Ačkoli amonný iont ovlivňuje příjem a akumulaci jiných minerálních živin, nebyl zjištěn opačný vliv, protože akumulace NH_4^+ není ovlivněna zvýšením koncentrace jiných iontů (Weil et al. 2020). Ve většině případů je v důsledku amonné výživy negativně ovlivněna osmotická regulace listů v důsledku sníženého příjmu kationtů (tj. K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) (Guo et al. 2007). Proto vyvážená výživa dusíkem (NO_3^- a NH_4^+) je jednoznačně prospěšná pro několik druhů rostlin ve srovnání s výživou založenou výhradně na NO_3^- . V souladu s tím bylo pozorováno u rostlin rajčat, že růst kořenů byl optimální, když NO_3^- a NH_4^+ byly dodávány v poměru 3:1. Naopak, když byla koncentrace NH_4^+ příliš vysoká, byla pozorována silná inhibice ve vývoji kořenů (Sambo et al. 2019). Při výživě pouze amonným iontem je pohyb vody v rostlině částečně omezen kapacitou příjmu vody kořenem. Tyto krátkodobé a dlouhodobé reakce naznačují přímý účinek formy N na kapacitu příjmu vody kořenem (Guo et al. 2007). Novější studie na rostlinách vodního melounu ukázala, že s klesajícím poměrem $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ se výrazně snížil počet listů, plocha listů, výška prýtlů, čistá fotosyntéza, biomasa a růst kořenů, stejně jako koncentrace několika makroživin (Sambo et al. 2019).

Zkušenosti ukazují, že procento iontů NH_4^+ v živném roztoku by nemělo překročit 50 % celkové koncentrace N. Nejlepší poměr iontů je 75 % NO_3^- ku 25 % NH_4^+ . Pokud je NH_4^+ jediným zdrojem N v živném roztoku, může dojít k toxicitě NH_4^+ . Určité množství NH_4^+

však může být žádoucí, protože experimenty ukázaly, že přítomnost NH_4^+ v živném roztoku stimuluje příjem NO_3^- . Ukázalo se, že stačí pouhých 5 % celkového N v roztoku jako NH_4^+ v tekoucím systému živných roztoků. Vyšší procento bude zapotřebí u systémů provzdušňovaných stojatých živných roztoků, ve kterých by až 25 % celkového N mělo být NH_4^+ , aby se dosáhlo stejného stimulačního účinku na příjem NO_3^- (Jones 2005). Preference příjmu N závisí na rostlinném druhu, vývojovém stádiu rostliny a podmínkách růstu v prostředí (Hameed et al. 2022). Bylo pozorováno, že optimální poměr NO_3^- ku NH_4^+ , který má být použit pro kultivaci, může záviset jak na rostlinném druhu, tak na podmínkách prostředí (např. slanost). Celkově výsledky jasně naznačují, že nejen formy dusíku, ale i současná přítomnost více než jedné formy a ve specifických poměrech mezi těmito formami jsou rozhodující pro konkrétní produktivní cíle (Sambo et al. 2019). Směs NH_4^+ a NO_3^- navíc zvýšila obsah rozpustných cukrů, rozpustných bílkovin a vitamínu C v rostlinách a snížila obsah dusičnanů. Proto je přidání směsi obsahující vhodné poměry NH_4^+ a NO_3^- prospěšné pro růst a vývoj rostlin (Zhu et al. 2021). Hodnota pH má významný vliv na příjem NH_4^+ . Optimální příjem se dosahuje při neutrálním pH, ale rychle klesá, když je pH živného roztoku nebo půdy sníženo (stává se kyselejší). Naopak pro NO_3^- je příjem lepší u roztoků s nižším pH než u roztoků s vysokým pH (Lecuona 2014). V rostlině může NO_3^- sloužit jako signální molekula k přerušení dormance semen, regulovat vývoj laterálních kořenů a růst listů, změnit dobu kvetení a integrovat expresi genů pro růst a vývoj rostlin vyvolanou NO_3^- (Fan et al. 2017).

Metody kultivace bez půdy umožňují pěstitelům kontrolovat dostupnost základních prvků úpravou nebo změnou živného roztoku tak, aby vyhovoval fázi růstu rostlin a poskytoval je ve vyváženém množství (Hussain et al. 2014).

3.4.2 Efektivita využití dusíku

Rostlinná efektivita využití dusíku (NUE = nitrogen use efficiency) lze definovat jako biomasu produkovanou na jednotku aplikovaného dusíku nebo produkci sušiny na jednotku N odebraného z půdy. Bez ohledu na plodinu, nebo jejich jednotlivé části, metoda použitá k měření efektivy využití dusíku obvykle závisí na výpočtu produkce rostlinné biomasy na jednotku aplikovaného N (Fan et al. 2017). Výroba dusíkatých hnojiv spotřebuje 1–2 % celosvětové energie, ale plodiny spotřebují pouze 30–50 % aplikovaného dusíku. Záporně nabitý dusičnan nelze snadno zadržet v půdní matici a rychle se vyluhuje, což způsobuje vážné environmentální problémy (např. eutrofizaci a emise skleníkového plynu oxidu dusného). Ke snížení vstupních nákladů na zemědělství a ke zmírnění dopadu eutrofizace je důležitým faktorem v zemědělství posílit NUE. NUE je komplikovaná agronomická vlastnost zahrnující více vzájemně propojených kroků asimilace, transportu a signalizace (Wang et al. 2018). NUE lze dále definovat, s komponentami včetně efektivy příjmu N (NUpE = N uptake efficiency), efektivy využití (asimilace) N (NUTE = N utilization efficiency), zjevné míry obnovy N (ANR = apparent N recovery), agronomické efektivy hnojiva N (AE = agronomy efficiency), efektivy fyziologického využití N (NpUE = N physiological use efficiency), efektivita transportu dusíku (NTE = N transport efficiency) a efektivita remobilizace dusíku (NRE = N remobilization efficiency) (Fan et al. 2017). Efektivní využití N by mohlo být důležitým zdrojem úspor nákladů v kultuře bez půdy. Lepší

pochopení reakcí plodin na aplikaci dusíku by umožnilo pěstitelům optimalizovat nejen růst rostlin a výnos, ale také nutriční kvalitu a ochranu životního prostředí (Mahlangu et al. 2016). Přenos dusíku do rostlinných orgánů a výnos je známý jako „efektivita využití živin“ (Fan et al. 2017).

Uzavřené substrátové systémy zvyšují efektivitu využití vody, živin a pesticidů a snižují jejich dopad na životní prostředí (El–Kazzaz & El–Kazzaz 2017). Protože pěstitelé mají plnou kontrolu nad ztrátami živin, mohou být provedeny kroky ke zlepšení NUE daleko nad rámec toho, co je možné v konvenčních zemědělských systémech (Cowan et al. 2022). V otevřených hydroponických systémech však část živného roztoku odtéká (Savvas & Gruda 2018). Aeroponie spotřebovává méně vody a živin, protože kořeny rostlin jsou stříkány v intervalech pomocí přesné velikosti kapiček, které by mohly být neefektivněji využity osmózou k výživě rostliny (Lakhiar et al. 2018). Vrcholem přesné výživy je dosažení dlouhodobé optimální rovnováhy živin bez vyplavování nebo vyhazování živin do životního prostředí. Zcela uzavřené systémy eliminují vypouštění živin, ale vyžadují doplňovací/zavlažovací roztok, který nahrazuje vodu i živiny, když je rostliny odebírají (Langenfeld et al. 2022). Díky šlechtění plodin pro vysoké výnosy bez ohledu na množství potřebného hnojiva vykazuje většina současných plodin velmi nízkou efektivitu využití živin (včetně dusíku) (Esteban et al. 2016). Santamaria et al. (2002) uvádí, že když se obsah dusíku v živném roztoku zvýší, efektivitu využití dusíku (NUE) se sníží.

3.4.3 Příjem a transport dusíku/živin

Živiny lze rozdělit do tří kategorií příjmu: aktivní, střední a pasivní. Živiny s aktivním příjmem (N, P, K, Mn) jsou z roztoku rychle odebrány a časté doplňování může vést k nadměrnému příjmu. Živiny s pasivním příjmem (Ca, B) jsou přijímány stejnou rychlostí jako voda a jejich koncentrace zůstávají blízké počáteční úrovni. Živiny se středním příjmem (Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mo, Ni, Cl) mohou být přijímány rychleji než voda, ale nižší rychlostí než ty s aktivním příjmem (Langenfeld et al. 2022). Hlavní funkcí kořenů rostlin je příjem a následná translokace živin z půdy do nadzemních rostlinných orgánů. Aby se živiny dostaly do prýtu, musí být nejprve transportovány radiálně přes kořenová pletiva, než vstoupí do xylému pro translokaci z kořene do prýtu. Jakmile živiny projdou plazmatickou membránou kořenových epidermálních buněk, vstupují do symplastické dráhy, po které se pohybují cytoplazmatickým kontinuem přes plasmodesmata z buňky do buňky, dokud nedorazí do xylému (Duan et al. 2018). O příjmu dusíku obou iontů (NH_4^+ a NO_3^-) rozhodují hlavně vnější podmínky, ale i sama rostlina. Významný vliv vykazuje pH prostředí. V kyselější oblasti převažuje příjem NO_3^- a v neutrální až alkalické oblasti pH se příjem obou iontů vyrovnává nebo je vyšší příjem NH_4^+ . Příjem jednotlivých iontů a jejich využití v rostlině ovlivňuje i příjem ostatních iontů (Vaněk et al. 2016). Příjem NH_4^+ nebo NO_3^- rostlinami doprovází tok dalších iontů živin včetně K^+ , Cl^- a H^+ pro rovnováhu náboje. Je dobře známo, že antagonismus nebo spolupráce mezi NH_4^+ nebo NO_3^- a draslíkem (K^+) vzniká jejich nábojem a vlivem na membránový potenciál, konkrétně kompetice K^+ s NH_4^+ a spolupráce K^+ s NO_3^- (Feng et al. 2020). Rostlinné buňky a roztoky musí mít elektroneutralitu, což znamená, že koncentrace kationtů a aniontů musí být stejná. Tento princip také znamená, že příjem kationtů je spojen s příjmem aniontů a naopak. Princip

je základem pro většinu synergií a antagonismů při příjmu živin. Příjem kationtů inhibuje příjem jiných kationtů a anionty inhibují anionty. Naopak příjem kationtů podporuje příjem aniontů a naopak. N se z roztoku přijímá rychleji než součet všech ostatních živin a je jedinou živinou přijímanou jak kationtem, tak aniontem (Langenfeld et al. 2022).

Dusičnany a protony jsou společně transportovány do cytosolu prostřednictvím NRT, zatímco příjem NH_4^+ je doprovázen vylučováním protonů H^+ –ATPázou přes plazmatické membrány, aby se udržela rovnováha náboje (Hachiya & Sakakibara 2017). Systém příjmu NO_3^- vyšších rostlin se skládá z nízkoafinitního transportního systému (LATS = low-affinity transport system) a vysokoafinitního transportního systému (HATS = high-affinity transport system). NO_3^- je získáván kořeny prostřednictvím dusičnanových transportérů a poté transportován po celé rostlině, nebo jej lze před redistribucí navázat do organických vazeb s navázat do organických vazeb s uhlíkem za vzniku aminokyselin (asimilace) (Fan et al. 2017). NO_3^- je transportován z kořene do prýtu s K^+ jako protiiontem v xylému, omezený přísun K^+ tedy může vést k vysoké akumulaci NO_3^- v kořenech (Feng et al. 2020). Rostlinné transportéry dusičnanů byly poprvé identifikovány a funkčně charakterizovány před více než 20 lety. Jsou kódovány alespoň čtyřmi genovými skupinami, NRT1 (NPF), NRT2, CLC a SLAC1/SLAH (Fan et al. 2017).

Příjem NH_4^+ z půdního roztoku a jeho translokace v rostlinných pletivech jsou připisovány vysoce selektivním amonným transportérům, proteinům umístěným v plazmatické membráně. AMT se vyznačují přítomností konzervovaného hydrofobního póru, kterým se amonný iont pohybuje. Existují však nejistoty ohledně přesných chemických druhů transportovaných těmito membránovými proteiny, které mohou být buď ve formě nenabitě molekuly amoniaku nebo nabitěho amonného iontu, a zda je proces aktivní nebo pasivní (Bittsánszky et al. 2015). Příjem NH_4^+ je relativně energeticky méně náročný proces ve srovnání s příjmem NO_3^- , což vede k tomu, že mnoho rostlinných druhů preferuje NH_4^+ jako zdroj N (Song et al. 2021).

V hydroponii se NH_4^+ z živného roztoku přijímá 100 až 1000× rychleji než NO_3^- a zvýšená koncentrace NH_4^+ tak způsobuje rychlý pokles pH. Nadměrný příjem NH_4^+ může inhibovat příjem jiných kationtů. Z tohoto důvodu udržování NH_4^+ na konzistentně nízkých úrovních obvykle vede k vyváženému příjmu živin a optimálnímu růstu (Langenfeld et al. 2022). Rostliny přijatý minerální dusík postupně využívají ke tvorbě organických dusíkatých sloučenin. Zatímco NH_4^+ mohou rostliny bezprostředně využít k syntéze aminokyselin, nitrátový dusík musí být nejprve převeden (redukován) na amonný dusík (Vaněk et al. 2016). V rostlinných pletivech může být amonný iont a nenabitý amoniak transportován prostřednictvím aquaporinů, neselektivních kationtových kanálů, draslíkových kanálů, prosté osmotické difúze nebo za účasti vysokoafinitních amonných transportérů (AMT). Relativní význam těchto mechanismů se silně mění v závislosti na vnější a vnitřní koncentraci amonného iontu/amoniaku, pH a přítomnosti dalších živin (zejména dusičnanů a draslíku) v růstovém médiu (Bittsánszky et al. 2015).

3.4.4 Asimilace dusíku

Většina NH_4^+ získaná z kořene se rychle asimiluje v kořenech, zatímco NO_3^- se asimiluje hlavně v prýtu v závislosti na různých rostlinných druzích a vnější úrovni dusíku,

což vyžaduje jak ATP (adenosintrifosfát), tak uhlíkové vazby (Feng et al. 2020). Amonný iont v rostlinných pletivech není pouze přijímán z prostředí, ale vzniká také v mnoha endogenních metabolických procesech, včetně redukce dusičnanů, fotorespirace, katabolismu aminokyselin a metabolismu fenylpropanoidů (Liu & Wirén 2017).

Existují dvě cesty dusičnanů po jeho příjmu z půdy. Jedna zahrnuje okamžitou redukci dusičnanů v kořenech a druhá zahrnuje transport od kořene k prýtu přes xylém s následným snížením dusičnanů v listech. U rostlinných druhů je většina dusičnanů redukována převážně v prýtu prostřednictvím redukčních ekvivalentů odvozených z fotosyntézy (Hachiya & Sakakibara 2017). Redukce je prostorově oddělena mezi cytoplazmou a plastidy/chloroplasty. V cytoplazmě dochází k redukci dusičnanů (NO_3^-) a v chloroplastech dochází k redukci dusitanů (NO_2^-). Redukce dusičnanů na dusitany je v cytosolu katalyzována nitrátreduktázou (NR). Po redukci dusičnanů je dusitan přemístěn do chloroplastů pomocí dusitanových transportérů (NITR = nitrite transporter), kde je druhým enzymem, nitritreduktázou (NiR), redukován na amoniak (NH_3) (Tegeder & Masclaux–Daubresse 2018; Masclaux–Daubresse et al. 2010). Redukce dusičnanů probíhá v rostlinných pletivech, hlavně listech za pomoci enzymů. Nejprve redukce nitrátreduktázy na nitrity, které jsou dále redukovány přes hyponitrit a hydroxylamin až na amoniak. V rostlinných pletivech je za potřeby dostatek energie. Významnou roli má přítomnost několik prvků (Mo, Fe, Cu, Mn a Mg) (Vaněk et al. 2016). (Masclaux–Daubresse et al. 2010). Následná asimilace amoniaku na glutamát je za pomoci glutaminu a glutamátreduktázy (GS/GOGAT) (Guo et al. 2007).

Amoniak je vázán na organické kyseliny (oxokyseliny) za vzniku aminokyseliny. Nejběžnější vazba NH_3 je na kyselinu oxoglutarovou (α -ketoglutarovou) za vzniku kyseliny glutamátové. Podobně se může tvořit z kyseliny octové a amoniaku (NH_3) kyselina asparagová. Obě aminokyseliny jsou schopny vázat další molekulu NH_3 na karboxylovou skupinu a tvořit amidy – asparagin a glutamin, a omezovat tak možné toxické působení NH_3 v pletivech. Kyselina glutamátová a asparagová jsou prvotními a základními aminokyselinami v rostlinách. Většina dalších aminokyselin se tvoří přestavbou jiných, které jsou donory aminoskupiny (Vaněk et al. 2016). Všechny detoxikační reakce NH_4^+ zahrnují tvorbu C–N vazeb a existuje několik anaplerotických reakcí, které mohou poskytnout potřebný uhlík pro tuto transformaci. Konjugace NH_4^+ na kyselinu glutamovou za vzniku glutaminu a syntéza kyseliny glutamové z kyseliny 2-oxoglutarové jsou považovány za kritické cesty asimilace amoniaku a za cesty k ochraně buněk před toxicitou NH_4^+ (Bittsánszky et al. 2015). Glutamin syntetázy (GS), glutamin oxoglutarát aminotransferáza (GOGAT) a asparagin syntetázy (AS) jsou zodpovědné za asimilaci NH_4^+ na aminokyseliny (Tegeder & Masclaux-Daubresse 2018). Amoniak pocházející z redukce dusičnanů a také z fotorespirace nebo z recyklace aminokyselin v plastidu/chloroplastu je asimilován hlavně takzvaným cyklem glutamin syntetázou (GS) nebo glutamát syntázou (GOGAT).

Listové bílkoviny a zejména fotosyntetické bílkoviny plastidů se během stárnutí značně uvolňují, což poskytuje enormní zdroj dusíku, který mohou rostliny využívat k doplnění výživy rostoucích orgánů, jako jsou nové listy a semena. Mobilizace dusíku byla studována u několika druhů rostlin metodou „zjevné remobilizace“. Touto metodou se stanoví množství celkového dusíku přítomného v různých orgánech rostlin v různých dobách vývoje a je prováděno dlouhodobé značení, což umožňuje stanovení toků dusíku (Masclaux–Daubresse et al. 2010).

3.5 Poruchy způsobené výživou

Kořeny mají prospěšnou mikrobiální aktivitu v rhizosféře, dokonce i v hydroponii, ale nadměrný únik uhlíku do živného roztoku z nezdravých kořenů poskytuje zdroj energie, který může mít za následek nadměrný mikrobiální růst v živném roztoku. Tyto sloučeniny (převážně karboxylové kyseliny) mohou být toxické pro rostliny, pokud se hromadí ve zvýšených koncentracích. Zvýšený zákal obvykle ukazuje na nezdravé kořeny s únikem sacharidů. Dobře provzdušňovaný roztok ve vodní hlubinné kultivaci zůstává čirý po celý cyklus plodin (měsíce), což ukazuje na nízkou mikrobiální aktivitu v zásobním roztoku (Langenfeld et al. 2022).

3.5.1 Nedostatek dusíku

Nedostatek dusíku od počátku vegetace má za následek omezení tvorby stavebních a funkčních bílkovin, což se projevuje omezením růstu rostlin a tvorby všech jejich podstatných orgánů. Při nedostatku dusíku jsou rostliny slabší a nižší (Vaněk et al. 2007; Vaněk et al. 2012; Vaněk et al. 2016). Příznaky nedostatku dusíku se začínají projevovat na starších listech světle zelenou chlorózou. S postupujícím nedostatkem dochází ke žluto–zelenému zabarvení celé hlávky (YARA 2022). Výrazným znakem nedostatku dusíku je světlejší zbarvení rostlin, které je způsobeno sníženou tvorbou chlorofylu. Při déletrvajícím nedostatku dusíku rostlina ve snaze o zachování vegetačního vrcholu odbourává dusíkaté látky, včetně chlorofylu ve starších listech, a takto uvolněný dusík transportuje do vegetačního vrcholu. Starší listy postupně žloutnou až usychají (Vaněk et al. 2007; Vaněk et al. 2012; Vaněk et al. 2016). Mezi další příznaky patří viditelné zastavení růstu, opoždění vývoje rostlin a listy jsou žlutavě zelené. Při vážném nedostatku starší listy světlají a nakonec hnijí. Tvar listu je normální. Při silném nedostatku dusíku nedochází k tvorbě hlávky (van Eysiga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981; YARA 2022). Omezená tvorba listů a také chlorofylu vede ke snížení fotosyntézy a tím k nižší tvorbě produkce biomasy (Vaněk et al. 2007; Vaněk et al. 2012; Vaněk et al. 2016). Rostliny s nedostatkem dusíku mají často hustý kořenový systém s dlouhými kořeny a slabě vyvinutým sekundárním kořenovým systémem než normálně (van Eysiga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981; YARA 2022). Odrůdy obsahující antokyany mohou vytvářet purpurové pruhy na listech (van Eysiga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981; YARA 2022). V pokusech Gunter et al. (2009) počáteční příznaky začaly zakrněním rostliny ve srovnání s nedeficitními rostlinami stejného věku. Listy byly světle zelené nebo žluté, zejména starší listy. Nekróza se začala vyvíjet nejprve v nejstarších listech podél okraje listu. Když byly příznaky vážné, starší listy začaly hnědnout, a nakonec z rostliny opadávat.

V pokusech Galieni et al. (2015) došlo u varianty nehnojené dusíkem ke zkrácení délky listů o 21 % a čerstvá hmotnost biomasy listů salátu klesla o 74 % oproti variantám přihnojovaným dusíkem.

Nedostatek dusíku může být zaměněn s příznaky nedostatku hořčíku, síry nebo manganu. Při nedostatku hořčíku dochází ke žloutnutí listů, ale žilky zůstávají zelené. Nedostatek síry způsobuje žlutavé zbarvení listů, projevující se nejdříve na mladších listech. Mimoto listy bývají méně zkroucené než obvykle. Při nedostatku manganu dochází také

ke žloutnutí listů, ale nedochází k výraznému zastavení růstu a žilky zůstávají zelené. Na okrajích listů se objevují nekrotické oblasti (YARA 2022).

3.5.2 Nadbytek dusíku

Rostliny jsou tmavě nebo šedozeleň a mají růžicový vzhled. Růst je inhibován. Listy jsou malé, zaoblené a více vrásčité než obvykle a připomínají listy špenátu. U kultivarů s antokyany mohou okraje mladších listů zčervenat (van Eysinga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981). Velmi citlivé na nadbytek dusíku (i celkově vyšší koncentraci solí) v raných fázích vegetace, tzn. již při vzcházení, jsou některé drobnosemenné zeleniny (květák, brukev, zelí, salát) a jiné rostliny. Omezení vzcháživosti a negativní ovlivnění růstu mladých rostlinek způsobuje více amonná forma dusíku než ledková (nitratová) (Vaněk et al. 2007; Vaněk et al. 2012; Vaněk et al. 2016).

3.5.3 Nedostatek vápníku

Růst je silně zpomalený, rostlina vypadá ploše a listy mají otevřený růžicový růst. Růst je nejvíce omezen u nejmladších listů, které jsou tmavě zelené a více zvlněné než obvykle. Na okrajích nejmladších listů vznikají nepravidelně tvarované hnědé až šedé léze. Tento příznak se nazývá "spálení špiček". S postupujícím nedostatkem vápníku začínají listy odumírat od špiček a okrajů směrem dovnitř. Poté se příznaky šíří i na starší listy. Odumřelá listová pletiva jsou šedozeleň. Pokud se nedostatek vápníku objeví v rané fázi vývoje, je růst silně zpomalen a netvoří se hlávky (van Eysinga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981; YARA 2022). Na středních listech kultivarů s antokyany bylo někdy pozorováno světle fialové zbarvení (van Eysinga & Smilde 1971; van Eysinga & Smilde 1981). V pokusech Gunter et al. (2009) se nedostatek vápníku projevil zakrňením rostlin ve srovnání s rostlinami stejné růstové fázi, u nichž nedostatek vápníku nebyl zjištěn. Rostliny s nedostatkem vápníku zůstaly menší než rostliny, které dostávaly všechny živiny, po celý vegetační cyklus.

Těžký nedostatek vápníku může být zaměněn s nedostatkem bóru, který rovněž začíná na nejmladších listech. Nedostatek bóru se však mnohem více soustřeďuje na vzrostný vrchol a po listech se nerozšiřují žádné léze. Kořeny jsou krátké a velmi rozvětvené. Vypadají křovitě, někdy jsou slizké a mají hnědou barvu. Zvláště špičky kořenů zčernají. Nedostatek bóru způsobuje také špatně vyvinuté kořeny. Také vypadají křovinatě, protože vzniká velké množství velmi krátkých, rozvětvených sekundárních kořenů. Při silném nedostatku kořeny hnědnou a odumírají (YARA 2022).

Ne všechny nutriční problémy jsou způsobeny přísunem příliš velkého nebo příliš malého množství určité živiny. „Popálení špiček“ vnitřních listů je běžný problém u hydroponického salátu. Vápník se pohybuje rostlinami pasivně a je unášen proudem vody. Jak rostliny transpirují a přijímají vodu, vápník se v podstatě „vytahuje“ z kořenů a do celé rostliny. Vzrostný vrchol salátu je obklopen listy, které tvoří „hlavu“ salátu, které blokují pohyb vzduchu a vytvářejí velmi vlhké mikroprostředí kolem vzrostného vrcholu. Toto vlhké mikroprostředí má za následek nízkou transpiraci vzrostného vrcholu a snižuje transport vápníku k novým listům, i když vnější listy transpirují adekvátně. Při nízké transpiraci způsobí nedostatečný transport vápníku k vzrostnému vrcholu. V tomto případě není

problémem nedostatečným přívodem vápníku do kořenové zóny, ale fyziologická porucha související se špatnou transpirací vody a vlhkými podmínkami prostředí (e-GRO 2019).

3.6 Tvorba výnosu

Mezi faktory ovlivňující hydroponické výrobní systémy je živný roztok považován za jeden z nejdůležitějších určujících faktorů výnosu a kvality plodin (Trejo–Télez & Gómez–Merino 2012). Faktory prostředí v kořenové zóně, jako je koncentrace živin, pH, rozpuštěný kyslík a teplota, přímo ovlivňují růst hydroponicky pěstovaných rostlin. Pro měření těchto parametrů v reálném čase je zapotřebí odpovídajících senzorů (Son et al. 2020). Vzhledem k tomu, že živiny jsou přítomny v iontových formách v živném roztoku a také bez nutnosti hledání nebo soutěžení o dostupné živiny, jako je tomu v půdě, dosáhnou kulturní rostliny bez půdy mnohem dříve zralosti. Optimalizace výživy rostlin lze snadno dosáhnout v kultuře bez půdy než v půdě (Hussain et al. 2014). Růst rostlin, ať už v půdě nebo v bezpůdních systémech, ovlivňuje mnoho faktorů, jako je výživa, světlo, teplo, vzduch, pH a salinita. Při pěstování v bezpůdních systémech mají rostliny neustále k dispozici výživu a vodu, a proto rostliny nikdy nejsou ve stresu (El–Kazzaz & El–Kazzaz 2017).

Posílení fotosyntézy je účinným prostředkem ke zlepšení výnosu a kvality zeleniny (Zhu et al. 2020). Ve venkovním prostředí je však sluneční světlo, ale pro vnitřní systémy musí být použity adekvátní světelné zdroje (El–Kazzaz & El–Kazzaz 2017). Na jihovýchodě Spojených států nepříznivé teploty a dlouhé dny do značné míry omezují produkci hlávkového salátu v teplé sezóně. Důsledné vystavování se těmto nad optimálním podmínkám snižuje kvalitu salátu. Například hlávkový salát vystavený 13 hodinám denního světla a teplotám nad 24 °C vedl k předčasné iniciaci kvetení (Sublett et al. 2018).

Všechny kultivační systémy bez půdy musí poskytovat dostupný kyslík pomocí dobré cirkulace vzduchu v kořenových zónách, aby je udržely naživu. Zdravé kořeny, které mají bílou barvu, jsou zodpovědné za příjem živin a vody pro růst rostliny (El–Kazzaz & El–Kazzaz 2017).

3.6.1 Řízené podmínky

V hydroponickém kultivačním systému dochází k růstu a vývoji rostlin v kontrolovaném prostředí regulací různých faktorů, jako je pěstební médium, doba světla a výživa rostlin (Hameed et al. 2022). Resh (2012) uvádí, že optimální teploty pro klíčení se pohybují od 5 °C do 20 °C. Teploty vyšší než 23 °C mohou vyvolat dormanci. Dále doporučuje během dne udržovat RH (relative humidity = relativní vlhkost vzduchu) na 60–80 % a oxid uhličitý na 1000 ppm. Miller (2019) zjistil významnou interakci mezi teplotním pěstováním a výnosem čerstvé hmotnosti rostlin salátu. Rozdíly v čerstvé hmotnosti mezi kultivary se zvyšovaly spolu se zvyšováním teploty. U všech kultivarů rostly rostliny pěstované při vyšších teplotách lépe než rostliny pěstované při nižších teplotách. Rostliny pěstované při mírně chladném ošetření nedosáhly komerční velikosti po 28 dnech růstu. To naznačuje, že pěstitelé by měli během produkce udržovat alespoň 15,5 °C, nicméně růst je optimální při 21,1 °C. Hiroki et al. (2014) provedli dva samostatné experimenty s použitím salátu „Greenwave“, a to na účinky světelného cyklu (období světla/období tmy = 16/8 h, 16/4 h, 16/2 h) a úrovně fotosyntetického fotonového toku (PPF = photosynthetic

photon flux) (110 a 170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). V jejich pokusech bylo zjištěno, že kratší období tmy podporuje růst salátu a čerstvá hmotnost salátu pěstovaného v cyklu světlo/tma 16/2 h byla asi o 30 % vyšší než u salátu pěstovaného v cyklu 16/8 h. Vyšší PPF podpořilo růst salátu, ale efektivita jeho produkce (čerstvá hmotnost/spotřeba elektřiny) klesla. Hustota fotosyntetického toku fotonů (PPFD) se v kontrolovaných prostředích značně liší, ale to má malý vliv na WUE. Zvyšující se tok fotonů zvyšuje fotosyntézu a potřebu živin, ale současně zvyšuje transpiraci, takže WUE zůstává relativně konstantní (Langenfeld et al. 2022).

Ainsworth & Rogers (2007) zjistili, že stomatální vodivost se snížila o 22 %, když se průměrná koncentrace CO_2 zvýšila z 366 na 567 ppm. Stomatální vodivost se může snížit o více než 30 %, když se koncentrace CO_2 zvýší ze 400 na 1200 ppm. Zvýšením CO_2 dochází částečnému uzavírání průduchů, což snižuje transpiraci, zvyšuje růst a zvyšuje efektivitu využití vody (WUE = water use efficiency). WUE je definována jako biomasa produkovaná na jednotku transpirované vody. WUE se pohybuje od 3 g suché biomasy na litr vody s okolním oxidem uhličitým (CO_2) při 40% relativní vlhkosti. Koncentrace CO_2 zvýšila z 366 na 567 ppm. Zvýšená koncentrace CO_2 a vysoká relativní vlhkost, která je běžná v uzavřených, kontrolovaných prostředích, se mohou spojit a zvýšit WUE ze 3 na 6 g/l. V praxi obvykle naměříme WUE přibližně 5 g na litr při 1200 ppm CO_2 a 60 % relativní vlhkosti (při 25 °C) (Langenfeld et al. 2022).

Otevírání a zavírání průduchů je hlavním činitelem kontroly výdeje vody rostlinou. Při plné turgescenci listů má při otevírání průduchů důležitou úlohu intenzita slunečního záření. Náhlý přechod temnoty ve světlo způsobuje prudké otevírání průduchů. Tento jev se nazývá fotoaktivní reakce průduchů. V přírodě probíhá v ranních hodinách po východu Slunce. V průběhu dne turgor v listech postupně klesá, průduchy se uzavírají a vliv světla na regulaci ustupuje vlivu turgoru (Hejtník et al. 2005).

4 Metodika

Pro vyhodnocení vlivu poměru amonného a nitrátového dusíku v živném roztoku na růst kořenů a prýtu salátu pěstovaného v hydroponii byla použita odrůda kadeřavého salátu Laliqe. Jedná se o vyšlechtěnou odrůdu pro celoroční hydroponické pěstování.

Pokus probíhal v řízených podmínkách ve dvou klimaboxech (Microclima MC1000E) s řídicími jednotkami (IMAGO F3000), které umožňují přesné řízení široké škály parametrů, například vlhkosti, teploty, osvětlení, CO₂ a průtoku vzduchu.

Klíčení salátů a růst klíčenců probíhal ve dvou hydroponických klíčících boxech (X-Stream 40), dále byly přesazeny do čtyř hydroponických systémů Platinum Aero STAR 60, kde každý systém představoval jednu variantu pokusu.

Pokus byl proveden ve dvou samostatných termínech, na základě nich byla sumarizována data, statisticky vyhodnoceny výsledky, závěry a hypotézy.

Pro splnění cílů práce byly navrženy čtyři varianty živných roztoků: první varianta „A“ značená jako K0 (varianta kontrolní s 2,3 % amonného dusíku z celkového dusíku), druhá varianta „B“ značená KK (kontrola za použití komerčního hnojiva Hydroflor Profi s cca 6,2 % amonného dusíku z celkového dusíku), varianta třetí „C“ označována jako V20 (varianta se zastoupením 18,9 % amonného dusíku z celkového dusíku), čtvrtá varianta „D“ označována V40 (varianta se zastoupením 36,6 % amonného dusíku z celkového dusíku). Tyto procentuální údaje vychází z výsledků rozborů živných roztoků z prvního opakování, které byly čerstvě namíchaný jako zásobní roztok. V průběhu pokusu se tyto hodnoty měnily s odběrem živin rostlinou, odběrem H₂O z roztoku a tím změnou koncentrace roztoku, doplňováním živného roztoku jednou týdně a vývojovou fází rostliny.

4.1 Tvorba živných roztoků

Jako výchozí bod bylo použito komerční hnojivo Hydroflor Profi, podle kterého byly vytvořeny ostatní živné roztoky sledovaných variant. Hydroflor Profi je profesionální třísložkové (A, B, C) hnojivo pro recirkulační hydroponii. Doporučené dávkovací schéma dle druhu rostliny je uvedeno v tabulce 7. Složka A obsahuje: vápník, dusík, hořčík, draslík, železo, mangan, bór, zinek, měď. Složka B obsahuje: síru, draslík, hořčík, železo, zinek. Složka C obsahuje: draslík, fosfor, dusík, molybden, kobalt (GardeniX s.r.o. 2022).

Na základě procentuálního obsahu chemických sloučenin v komerčním hnojivu na příbalovém letáku byl vypočítán obsah čistých živin. K výpočtu obsahu čistých živin v roztoku, které jsou uváděny v jednotkách hmotnosti především v miligramech na litr (ppm), bylo zapotřebí zjistit hmotnost koncentrovaného třísložkového (A, B, C) komerčního hnojiva. Pomocí injekční stříkačky bylo odebráno 100 ml od každé složky (A, B, C) zvlášť a zváženo na tři desetinná místa. Tím byla zjištěna objemová hmotnost jednotlivých složek komerčního hnojiva. Na základě doporučeného dávkování výrobcem 20 ml na 10 l zálivky s již zjištěnou objemovou hmotností a procentuálním obsahem čistých živin byl vypočítán teoretický obsah živin v živném roztoku v jednotkách ppm (tabulka 3). Komerční hnojivo bylo namícháno s demineralizovanou vodou (DEMI H₂O) dle dávkování 2 ml každé složky (A, B, C) na litr roztoku. Byly namíchaný vzorky pro každou složku zvlášť a jeden vzorek se všemi složkami.

Vzorky byly proměřeny na obsah živin (tabulka 4). Výsledky sloužily pro kontrolu obsahu jednotlivých živin, které byly vypočteny z uvedeného procentuálního obsahu živin výrobcem.

Pro přípravu ostatních živných roztoků byly použity složky B a C komerčního hnojiva a složka A byla nahrazena vlastně namíchanými složkami s upraveným poměrem amonného a nitratového dusíku. Pro výpočet zastoupení jednotlivých chemických sloučenin pro ostatní varianty byla použita aplikace HydroBuddy. Jednotlivá složení jsou uvedena v tabulce 5 a 6. Z důvodu obsahu většiny mikroprvků ve složce A, která byla nahrazována, bylo použito komerčního přípravku BioNova MicroMix pro dodání chybějících mikroprvků. Za důležité bylo považováno zastoupení dostatečného množství mikroprvků, a ne jejich stejný poměr jako u složky A u komerčního hnojiva Hydroflor Profi, které bylo nahrazováno. Na základě dávkování 0,2 ml/l byl namíchán vzorek roztoku komerčního přípravku BioNOva MicroMix (BN MM), který byl proměřen na obsah živin. Výsledky jsou zaneseny v tabulce 4.

Tvorba koncentrovaných složek A pro varianty A, C a D byla provedena navážením jednotlivých chemických sloučenin na čtyři desetinná místa gramu a postupně pomocí nálevky byly nasypány do odměrné baňky. Stříčkou s DEMI H₂O byly smývány ze stěn nálevky a za stálého míchání se postupně doplnily všechny chemické sloučeniny (tabulka 5). Poté došlo k doplnění objemu do jednoho litru DEMI H₂O a k důkladnému promíchání. Koncentrované roztoky byly skladovány v lednici ve skleněných nádobách s uzávěrem. Namíchané koncentrované roztoky byly namíchány s nižší koncentrací oproti komerčnímu hnojivu HydroFlor Profi, tudíž zde bylo dávkování vyšší a to 10 ml/l. Po namíchání živných roztoků byly pro pokusy odebírány vzorky živných roztoků a podrobeny analýzám. Složení živných roztoků jednotlivých variant je vyjádřeno v tabulce 8.

Tabulka 3. Teoretický obsah živin v živném roztoku komerčního hnojiva na základě výpočtu.

Makroprvky	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A	114,414	9,949	0,000	22,709	116,553	19,401	0,000
B	0,000	0,000	0,000	55,375	0,000	11,622	38,739
C	19,855	0,000	43,383	104,371	0,000	0,000	0,000
ABC	134,269	9,949	43,383	182,455	116,553	31,022	38,739
Mikroprvky	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	B	Ni
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A	1,492	1,244	0,249	0,199	0,000	0,995	–
B	0,861	0,000	0,000	0,108	0,000	0,000	–
C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,066	0,000	–
ABC	2,353	1,244	0,249	0,307	0,066	0,995	–

Tabulka 4. Obsah jednotlivých živin v roztoku komerčního hnojiva zjištěné na základě kontinuální průtokové analýzy a metody ICP-OES.

Makroprvky	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A	132,860	7,790	<0,1	27,224	133,296	21,841	0,283
B	1,000	0,040	<0,1	45,109	1,078	12,635	34,494
C	20,840	1,310	45,150	94,642	0,292	0,138	0,299
ABC	142,760	9,650	45,100	160,073	127,109	38,352	35,955
BN MM	0,490	3,730	<0,1	0,687	0,267	0,184	4,843
Mikroprvky	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	B	Ni
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A	1,290	1,125	0,236	0,271	<0,005	0,993	<0,005
B	0,860	0,017	0,012	0,193	<0,005	0,024	<0,005
C	0,011	<0,001	0,237	0,046	0,053	0,015	<0,005
ABC	2,235	1,110	0,224	0,349	0,053	1,033	0,012
BN MM	19,731	5,607	1,055	3,263	0,125	3,004	<0,005

Tabulka 5. Složení jednotlivých složek A pro varianty A, C, D.

	Chemická sloučenina	Vzorec	Množství g/l
A – K0	dusičnan draselný	KNO ₃	5,948
	dusičnan hořečnatý (hexahydrát)	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	21,099
	dusičnan vápenatý (tetrahydrát)	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	79,031
C – V20	dusičnan draselný	KNO ₃	5,948
	dusičnan hořečnatý (hexahydrát)	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	21,099
	dusičnan vápenatý (tetrahydrát)	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	57,947
	chlorid amonný	NH ₄ Cl	9,552
D – V40	dusičnan draselný	KNO ₃	5,948
	dusičnan hořečnatý (hexahydrát)	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	21,099
	dusičnan vápenatý (tetrahydrát)	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	36,862
	chlorid amonný	NH ₄ Cl	19,104
	chlorid vápenatý	CaCl ₂	14,863

Tabulka 6. Teoreticky vypočítaný obsah živin v jednotlivých složkách A variant A, C a D.

Chem. Prvek	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	K	Mg	Ca
Varianta	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A – K0	125,001	0,000	23,001	20,000	133,863
C – V20	100,002	25,000	23,001	20,000	98,151
D – V40	75,000	50,000	23,000	20,000	116,000

4.2 Měření a nastavování přístrojů

Řízené podmínky ve dvou klimaboxech (Microclima MC1000E) s řídicími jednotkami (IMAGO F3000) regulovaly světelné podmínky růstovými nízkotlakými trubicemi Sylvania luxline plus 54 W v každém boxu 20 ks, teplotní podmínky za pomoci teplotních řídicích jednotek Microprocessor PID s teplotním čidlem PT100 (DIN EN 60 751) a vlhkost vzduchu pomocí zvlhčovače vzduchu Ultrasonic s plastovým, voděodolným, bezúdržbovým čidlem. Intenzita záření byla měřena PAR/PPFD metrem Apogee Instruments MQ-500. V průběhu růstu byly do každého klimaboxu doplněny dva 12 V ventilátory o rozměru 92×92×25 mm z důvodu zvýšení intenzity proudění vzduchu, aby nedošlo k popálení špiček salátů.

Dva klíčící boxy (X-Stream 40) vlastní 14 litrovou nádrž, průhledné víko s klapkami k regulaci proudění vzduchu, podpurný ták, mřížkované květináče, čerpadlo, distribuční systém s tryskami.

Všech šest hydroponických systémů (Platinum Aero STAR 60) vlastní sběrnou nádobu na živný roztok o objemu 25 l, v kterém bylo umístěno čerpadlo pro stálé míchání roztoku, vzduchovací kámen napojen na vzduchovací čerpadlo (BOYU S-2000, 480 l/h) pro neustálé okysličování roztoku a čerpadlo pro výtlak živného roztoku (MAX-JET 1000, 230 V, 50 HZ) do 6 hranatých květináčů s víkem. V rohu pod víkem byla umístěna tryska s 360° rádiusem ostříku, která přímo ostříkovala košíček s rockwoolem a kořeny rostliny a nepřímo po odrazu roztoku od stěny květináče. Rozměry květináčů byly 18×18×23 cm s objemem 6 l.

Hodnota pH byla měřena pH metrem ESSENTIALS. Zároveň bylo měřeno a zaznamenáváno EC v jednotkách milisiemens (mS). Měření bylo prováděno EC metrem ESSENTIALS. Kalibrace pH a EC metru byla prováděna v kalibračních roztocích VITALINK ESSENTIALS-CF Calibration 28 (EC 2,8), pH Buffer 7. Úprava pH byla prováděna plastovou pipetou za pomoci kyseliny fosforečné (P₂O₅ 80%) a hydroxidu draselného (KOH 60%).

DEMI H₂O byla produkována reverzní osmózou GORO AQUA COMPLET 65 a skladována v 25 l neprůsvitných kanystrech, dále byla odměřována pomocí odměrného válce a přelévána do sběrných nádob hydroponických systémů. Hnojiva byla aplikována pomocí injekčních stříkaček do proudu roztoku konstantně vytvářeném pomocí čerpadla pro míchání živného roztoku.

Při sklizni bylo použito analytických vah s třemi desetinnými místy.

4.3 Předklíčování

Osivo bylo obalované, což zajistilo lepší manipulaci, klíčení a vzházení. Osivo bylo umístěno do samostatné sadbovací rockwool kostky Grodan Delta o rozměru 40×40×40 mm, která nejdříve musela být zastřižena do tvaru košíčku o vrchním průměru 5 cm, který má tvar do kónusu a směrem ke dnu se zužuje. Po zastřižení byla grodan kostka umístěna do košíčku. Za pomoci odstřížků se zacpaly netěsnosti mezi košíčkem a grodan kostkou z důvodu zamezení nežádoucího kontaktu živného roztoku s nadzemní částí rostliny. Do takto připravených košíčků byla umístěna semínka salátů, která byla před výsevem skladována v chladničce. Na jedno opakování bylo použito 46 semen a dva hydroponické klíčící boxy (X-Stream 40) po 23 semenech. Pro klíčení bylo použito 10 l roztoku DEMI H₂O a pitné

vody z řádu v poměru 1:4 (= 8 l DEMI H₂O a 2 l pitné H₂O z řádu). V průběhu předklíčování bylo pH postupně snižováno na hodnotu 6,3, dle tabulky 7. Klíčení probíhalo v řízených podmínkách v klimaboxu, za nastavených podmínek – 16 h světelné fáze a 8 h temnostní fáze. Intenzita záření (PPFD = Photosynthetic photon flux density – ukazatel hustoty fotosynteticky aktivních fotonů) byla nastavena na 170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ u povrchu košíčku. Za světelné fáze bylo nastaveno 17 °C a za temnostní fáze došlo k poklesu teploty na 15 °C, čímž byl simulován noční pokles teplot. Byla udržována 70% vlhkost vzduchu. V prvním opakování došlo k prvnímu dodání živin dříve, ve vývojové fázi dvou děložních lístků (den 4; kdy den 0 byla vyseta semínka), zatímco ve druhém opakování došlo k prvnímu dodání živin až ve vývojové fázi tvorby prvního pravého listu (den 8). Dávky byly stejné pro všechny rostliny všech variant, a to 6 ml komerčního dvousložkového hnojiva Hydroflor Profi a bylo dosaženo hodnoty EC 0,6. Druhé doplnění hnojiva proběhlo v prvním opakování v době prodlužování prvního pravého listu (den 9) a v druhém opakování v době prodlužování druhého pravého listu (den 11). Dávka byla totožná a to 5 ml komerčního hnojiva Hydroflor Profi a EC bylo zvýšeno na hodnotu 1,0, dle doporučení komerčního hnojiva viz tabulka 7.

Tabulka 7. Doporučené dávkovací schéma (ml hnojiva na 10 l zálivky) dle tabulky z příbalového letáku komerčního hnojiva Hydroflor Profi.

Rostlina	Zakořenění	Salát	Bylinky	Jahody sazenice	Jahody kvetoucí	Chilli	Mix listové zeleniny	Cannabis růst
Hnojivo (ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)	(ml/10L)
A	10	20	15	10	15	20	15	15
B	20	20	20	15	20	30	20	20
C	15	20	15	10	15	15	20	20
Poměr	1:2:1,5	2:2:2	1,5:2:1,5	1:2:1	1,5:2:1,5	2:3:1,5	1,5:2:2	1,5:2:2
pH	6,4 – 6,8	6 – 6,5	6 – 6,7	5,5 – 6,2	5,5 – 6,2	6 – 6,5	6 – 6,5	5,8 – 6,2
EC	0,8 – 1,1	1,3 – 1,8	1 – 1,5	≤1	1 – 1,3	1,4 – 1,8	1,2 – 1,7	1,2 – 1,5

4.4 Růst

Z důvodu co největšího ovlivnění růstu a dalších zkoumaných ukazatelů živnými roztoky pokusu byly po 14 dnech od zasetí semínek rostlinky přesazeny. Rostlinky salátů byly ve vývojové fázi dvou pravých listů a byly přesazeny přímo s košíčky do čtyř hydroponických systémů Platinum Aero STAR 60. Systémy byly po dvou umístěny ve dvou klimaboxech. Každá varianta obsahovala 6 rostlin, což je 24 rostlin celkem. Předklíčeno bylo 46 semen z důvodu možnosti výběru zdravých a fyziologicky vyrovnaných rostlin do všech variant. Poměr světelné a temnostní fáze byl zachován, teplota se zvýšila na 21 °C za světla a 17 °C za tmy. Vlhkost vzduchu byla snížena na 65 %. Intenzita záření kolísala mezi 160–210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ u povrchu košíčku. Živný roztok již byl tvořen pouze z DEMI H₂O a patřičné dávky hnojiva. Obsahy živin v počátečních roztocích jednotlivých variant v prvním opakování jsou uvedeny v tabulce 8. Hodnota EC se měnila v jednotlivých variantách a v průběhu růstu. U varianty K0 a KK byla počáteční hodnota u obou opakování 1,6. Varianta V20 v prvním opakování začínala na hodnotě EC 1,8 a v druhém opakování

na hodnotě EC 1,7. U varianty V40 v prvním opakování byla hodnota EC 2 a v druhém opakování 1,9. Doplnění živného roztoku probíhalo jednou týdně, a to vždy do objemu 25 l. Na základě doplněného množství DEMI H₂O byl stanoven odběr vody a byla vypočtena dávka hnojiva pro doplnění živin. Před úpravou živného roztoku byl odebrán jeho vzorek, další vzorek byl odebrán po jeho zředění DEMI H₂O a po doplnění živin do živného roztoku byl odebrán třetí vzorek. Vzorky byly podrobeny patřičným analýzám pro stanovení obsahu živin. Na základě obsahu živin byla stanovena dynamika obsahu živin v živném roztoku a odběr živin v rámci jedné varianty. Hodnota pH byla upravována na 6,3 k dodržení rozsahu hodnot pH doporučených v příbalovém letáku komerčního hnojiva, který je uveden v tabulce 7.

Tabulka 8. Obsah jednotlivých živin v roztocích sledovaných variant v prvním opakování po namíchání živného roztoku.

Makroprvky	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A – K0	137,711	3,199	43,600	165,789	130,000	29,934	35,600
B – KK	133,347	8,851	46,200	174,386	115,000	33,907	46,900
C – V20	117,420	27,288	45,200	164,386	98,344	30,861	36,800
D – V40	97,611	56,306	45,100	167,895	102,548	30,596	36,300
Mikroprvky	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	B	Ni
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A – K0	5,912	2,396	0,528	1,537	0,100	1,320	0,010
B – KK	2,455	1,131	0,230	0,396	0,053	0,841	0,007
C – V20	6,031	2,435	0,539	1,603	0,100	1,340	0,009
D – V40	6,317	2,487	0,531	1,570	0,099	1,360	0,009

4.5 Sklizeň a zpracování rostlin

Sklizeň probíhala 49. den od zasetí semínek, kdy se postupně sklízely varianty v pořadí A, B, C, D. Po vyjmutí rostliny ze systému byla oddělena nadzemní biomasa a kořeny v úrovni rockwoolu. Biomasa, která zůstala v rockwoolu a pod ním, byla brána jako podzemní biomasa (kořeny) a ta, co zůstala nad rockwoolem, byla brána jako prýt. Rostlina byla nafocena pro jiné účely pokusu. Délka kořene byla měřena skládacím metrem v zavěšeném stavu kořene na háčku, který byl umístěný na černé desce pro účely focení kořenů. Následovalo rozebrání hlávky na jednotlivé listy, zaznamenání jejich počtu, vážení čerstvé hmotnosti a rozložení na papírové pytlíky, na kterých biomasa zavadala. Následující den se zavadlá biomasa umístila do sušárny (Venticell LSIS–B2V/VC 404) s nastavenou teplotou na 35 °C po dobu cca 7 dnů, kde došlo k vysušení na 100% sušinu. Paralelně probíhalo zpracování kořenů, kdy byly kořeny pod košíčkem odříznuty a kořeny v rockwoolu byly ve vodě vypreparovány a očištěny od rockwoolu, následně byly vysušeny a zváženy. Sušení a zavadání probíhalo stejně jako u prýtu. Po vysušení byla zvážena sušina jednotlivých materiálů. Dále probíhalo mletí vzorků, kde již došlo k tvorbě směšného vzorku prýtu a směšného vzorku kořenů pro každou variantu. Mletí probíhalo na mlýnku IKA MF 10 s 1 mm sítím.

4.6 Rozbory a analýzy rostlin

Po vysušení rostlinných vzorků a navážení hmotnosti jednotlivých rostlin byl vytvořen směsný vzorek pro patričné varianty a opakování. Do směsných vzorků nebyly zahrnuty rostliny s nežádoucím poškozením trysek a nepokračovaly k rozborům a analýzám rostlin, čímž bylo eliminováno zkreslení vzorků poškozenými rostlinami. Mletím na mlýnku byl vytvořen homogenní materiál. Za pomoci patričných analýz byly zjištěny obsahy jednotlivých živin v kořenech a prýtu jednotlivých variant.

4.7 Stanovení celkového obsahu dusíku v rostlinách

Stanovení celkového obsahu dusíku v prýtu a kořenech bylo stanoveno metodou podle Kjeldahla (Sáez–Plaza et al. 2013; Muñoz–Huerta et al. 2013). Tato metoda se skládá ze tří základních fází: mineralizace, destilace a titrace.

Mokrý kyselý rozklad (mineralizace) dusíku ze vzorku za přítomnosti koncentrované kyseliny sírové (H_2SO_4) a katalyzátoru (síran draselný a síran měďnatý), který zvyšuje bod varu kyseliny sírové, v Kjeldahlově baňce s dlouhým hrdlem způsobí rozklad dusíku na amonné ionty (NH_4^+). Pro stanovení byla zvolena navážka vzorků 0,4 g u prýtu a 0,5 g u kořenů s variabilitou navážky 0,005 g. Konečným výsledkem mineralizace je roztok síranu amonného. Rozklad musí obsahovat zbytek kyseliny sírové (H_2SO_4), aby amoniak (NH_3) zůstal jako amonný kationt (NH_4^+).

Zmineralizovaný vzorek je následně destilován vodní párou. U destilace je Kjeldahlova baňka připojena k vyvíječi páry. K mineralizovanému vzorku se přidá určité množství hydroxidu sodného (NaOH), aby se amonné ionty (v síranu amonném) přeměnily na amoniak. Roztok se zahřívá, aby se uvolnil plynný čpavek, který prochází kondenzátorem, a poté je zachycen v jímacím roztoku (kyselině borité) obsaženým v baňce.

Dále probíhá titrace roztoku z destilační nádoby. Amoniak z destilace se shromažďuje v kyselině borité, kde dochází ke změně pH. Za pomoci vyrovnání pH zpětnou titrací 0,05 mol/l roztokem kyseliny chlorovodíkové a následného přepočtu spotřeby kyseliny chlorovodíkové se stanoví celkový obsah dusíku.

Proces destilace a titrace byl proveden automaticky pomocí přístroje Vapodest 50s, který stanovil obsah dusíku a výsledky z jednotlivých měření zpracoval, zaznamenal do tabulek a následně uložil.

4.8 Stanovení ostatních prvků

4.8.1 Nízkotlaký mikrovlnný rozklad

Pro stanovení ostatních prvků v prýtu a kořenech metodou ICP–OES bylo zapotřebí rozložit organickou hmotu na tekutý vzorek (roztok). Byla použita metoda nízkotlakého mikrovlnného rozkladu na mokré cestě. Namleté vzorky byly naváženy s variabilitou navážky 0,005 g. U prýtu byla navážka 0,5 g a u kořenů 0,3 g. Kromě vzorků prýtu a kořenů byl navážen i referenční standardizovaný vzorek špenátu o hmotnosti 0,3 g a dále byly použity dva slepé vzorky (bez navážky). Podle referenčního vzorku a slepých vzorků byly výsledné hodnoty kalibrovány. Vzorky byly umístěny do teflonových trubic. Do teflonových trubic

se vzorky i bez vzorků (slepých vzorků) bylo přidáno 8 ml kyseliny dusičné (HNO_3) a 2 ml peroxidu vodíku (H_2O_2). Následně byly vzorky přibližně jednu hodinu sklepávány v průběhu prvotního rozkladu a silného šumění. Principem mikrovlnného zahřívání je urychlení rozkladu vzorků. Po uzavření teflonových trubic víčky s tlakovým ventilem a zasunutí do keramických patron byly umístěny do stojanu mikrovlnného zařízení ETHOS 1. Zde vzorky byly postupně zahřívány až na teplotu 180 °C, které bylo docíleno po 35 minutách. Po zchladnutí vzorků byl tekutý roztok přelit do zkumavek a za pomoci DEMI H_2O byly vymyty stěny teflonových trubic. Vzorky byly doplněny DEMI H_2O do objemu 20 ml, následně byly zkumavky utěsněny parafinem a promíchány.

4.8.2 ICP–OES

Jednotlivé prvky ve vzorcích byly stanoveny pomocí emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (Khan et al. 2022) neboli ICP–OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spektrometry) přístrojem Varian Vista–Pro. Přístroj ICP–OES se skládá z nebulizérů, sprejových komor, injektoru vzorků, ICP hořáku, RF generátoru, optiky nebo spektrometru, emisních detektorů, zpracování signálu a softwaru. Tato technologie umožňuje stanovení prvků téměř celé periodické tabulky s citlivostí od jednotek ppb (parts per billion = miliardtina) až po ppm (parts per million = miliontina).

Principem metody je vstříkávání kapalného vzorku směrem k centrálnímu kanálu radiofrekvenční indukované argonové plazmy, kde je kapalný vzorek transformován do formy aerosolu nazývaného proces aerosolové nebulizace. Ve svém jádru ICP–OES udržuje velmi vysoké teploty 8000–10000 K (7726,85–9726,850 °C), aby rychle vysušil a odpařil aerosol, přičemž uvolňuje prvky jako analyt v plynném stavu jako volné atomy. Dále se vzorek aerosolu dopraví do plazmatu, kde se pomocí plazmatu vzorek rozloží, odpaří, atomizuje a excituje a také ionizuje, dojde k jejich přeměně na ionty a převedení do excitovaného stavu vyzařováním fotonů, pak dosáhnou základního stavu jak excitované atomy, tak ionty. Fotony ICP–OES se pak sbírají pomocí konkávního zrcadla nebo čočky a tato zaostřovací optická čočka vytváří obraz ICP na vstupní aperturu pomocí zařízení pro výběr vlnové délky zvaného monochromátor a vybraná specifická vlnová délka se pak převádí detektorem, hlavně fotodetektem, který je převádí na elektrický signál, který se pak zpracovává a zesiluje integrátorem a zaznamenává počítačem. Vlnovou délkou je tak určen prvek a intenzitou signálu jeho množství. Monochromátor je jako jednoduchý monochromátor nebo fotonásobič (PMT), který lze použít pro detekci jednoho prvku, zatímco kombinace polychromátoru a pokročilého maticového detektoru se používá k současnému stanovení více prvků (až 70 prvků).

4.9 Rozbory živných roztoků

Pro předkličování rostlin byl odebrán vzorek živného roztoku při přesazování do růstových systémů. Na základě výpočtu doplněných živin a zbylých živin v roztoku byl vypočítán odběr živin rostlinami v průběhu předkličování.

Při fázi růstu odběry živných roztoků k analýzám byly odebírány v týdenním intervalu. První odběr byl při přesazení rostlin do růstových systémů, počáteční roztok. Další odběry byly odebírány ve třech úrovních 1) plně koncertovaný živný roztok (po doplnění živin

a DEMI H₂O a v prvním týdnu počáteční roztok), 2) živný roztok doplněný pouze o DEMI H₂O do 25 litrů (zředěný roztok), 3) živný roztok po týdenním intervalu růstu rostlin (bez úpravy). Na základě těchto odběrů byla po ukončení pokusů vyhodnocena, dynamika obsahu a odběr jednotlivých živin a forem dusíku.

4.9.1 Stanovení minerálních forem dusíku

Stanovení obsahu jednotlivých forem dusíku bylo provedeno automatizovaným analyzátozem Skalar San plus známým jako kontinuální průtokový analyzátor (CFA = continuous flow analyzer) (Skalar 2007). Vzorčky byly několikanásobně zředěny z důvodu vysoké koncentrace a citlivosti čidel analyzátoru.

Kontinuální průtokový analyzátor San plus společnosti Skalar umožňuje konfiguraci, tak aby splňovali požadavky jednotlivých laboratoří. Analyzátor se skládá ze třech částí: dávkování, chemická sekce a zpracování. Část odběru tvoří vzorkovač typu SA 1050, tento počítačem řízený vzorkovač s náhodným přístupem vlastní 140 pozic pro vzorky rozdělen na čtyři stojany po 35 pozicích s objemem vzorku až 12 ml. Standardy, slepé vzorky a další interní kontrolní roztoky jsou umístěny v 11 samostatných zásobnících. Volitelná integrovaná ředicí stanice rozšiřuje funkčnost vzorkovače a umožňuje automatickou přípravu pracovních standardů a předběžných a následných ředění pro známé a neznámé vzorky s nadměrným rozsahem.

Chemická sekce je založena na integrované koncepci sestávající z jednotky peristaltického čerpadla, segmentového injektoru se samostatným vzduchovým kompresorem, rozdělovačů pro aplikaci chemie s nádobami na odpad a sběru dat s digitální detekcí. Chemické aplikační rozdělovače obsahují všechny potřebné komponenty pro úplnou automatizaci analýzy, jako jsou in-line ohříváče, dialyzátory, digestoře a destilační jednotky. Digitální fotometrické detektory s vysokým rozlišením jsou integrovány do snadno přístupného samostatného prostoru chemické jednotky. Každý detektor se skládá z optické detekční hlavy s až dvěma filtry a průtokovými komorami.

San plus je řízen softwarem FlowAccess™ společnosti Skalar, který je snadno ovladatelný a všestranný nástroj umožňující plné ovládání analyzátoru. Soubory s nezpracovanými daty jsou uloženy odděleně, takže při manipulaci s nimi nemůže dojít k jejich ohrožení. Během analýzy se výsledky zobrazují a počítají v reálném čase. Výsledky analýzy lze exportovat do systému LIMS nebo stáhnout ve formátu MS Excel® a navíc lze vytvářet vlastní tiskové sestavy.

4.9.2 Stanovení ostatních prvků

Ostatní prvky v živném roztoku byly stanoveny metodou ICP–OES, stejně jako byly stanoveny ostatní prvky v rostlinách. Výhodou stanovení prvků v živném roztoku je, to že nemusí se podrobit chemickému rozkladu, jako organická hmota rostlin. Živné roztoky byly několikanásobně zředěny z důvodu vysoké koncentrace a citlivosti čidel analyzátoru a následně probíhala analýza metodou ICP–OES (viz stanovení ostatních prvků v rostlinách).

4.10 Vyhodnocení parametrů

Sumarizace dat, přepočítávání hodnot a tvorba tabulek byla provedena prostřednictvím programu Excel (.xls). Dynamika obsahu a odběr jednotlivých živin a forem dusíku byla vyhodnocena graficky také prostřednictvím Excelu.

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v aplikaci STATISTICA 12 CZ pomocí jednofaktorové ANOVY a Tukeyova testu. Grafické vyjádření bylo vyjádřeno také pomocí aplikace STATISTIKA 12 CZ možností tvorby souhrnných a vícenásobných krabicových grafů.

5 Výsledky

5.1 Hodnocení živného roztoku

Ke statistickému hodnocení bylo použito 5 hodnot pro každou variantu (5 odběrů vzorků po týdnu), pro hodnocení byly použity zředěné roztoky doplněné o H₂O. Bylo použito hodnot z odběrů vzorků živného roztoku ze 3. týdne od zasetí semínek až do 7. týdne (do sklizně). Hodnoty byly statisticky vyhodnoceny pomocí jednofaktorové ANOVY s použitím Tukeyova testu v programu STATISTICA 12 CZ. Výsledky statistického hodnocení byly zaneseny do krabicových grafů vytvořených v programu STATISTICA 12 CZ pomocí funkce tvorby grafů a na základě textových popisků doplněny o statisticky významné rozdíly z výstupu Tukeyova testu.

Hodnocení dynamiky obsahu dusíku ve zředěném (odběr 2) živném roztoku v průběhu vegetace rostlin u jednotlivých variant a opakování bylo znázorněno v grafech v programu MS Excel. Na základě toho lze sledovat vývoj obsahu živin v týdenním intervalu. Graf začíná v 3. týdnu od zasetí semínek, což znázorňuje změnu živného roztoku v průběhu třetího týdne (14–21. den), hned po přesazení rostlin do jednotlivých systémů. Grafy končí 7. týden, kdy byly rostliny sklizeny a živný roztok byl zředěn a vyhodnocován po sklizni rostlin.

Odběr živin byl stanoven na základě rozdílů týdenních vzorků, kdy byla odečtena koncentrace živiny (ppm) z plně koncertovaného živného roztoku předchozího týdne s koncentrací živného roztoku následný týden po vlivu růstu rostlin a následného doplnění DEMI H₂O do plného objemu.

5.1.1 Obsah celkového dusíku v živném roztoku

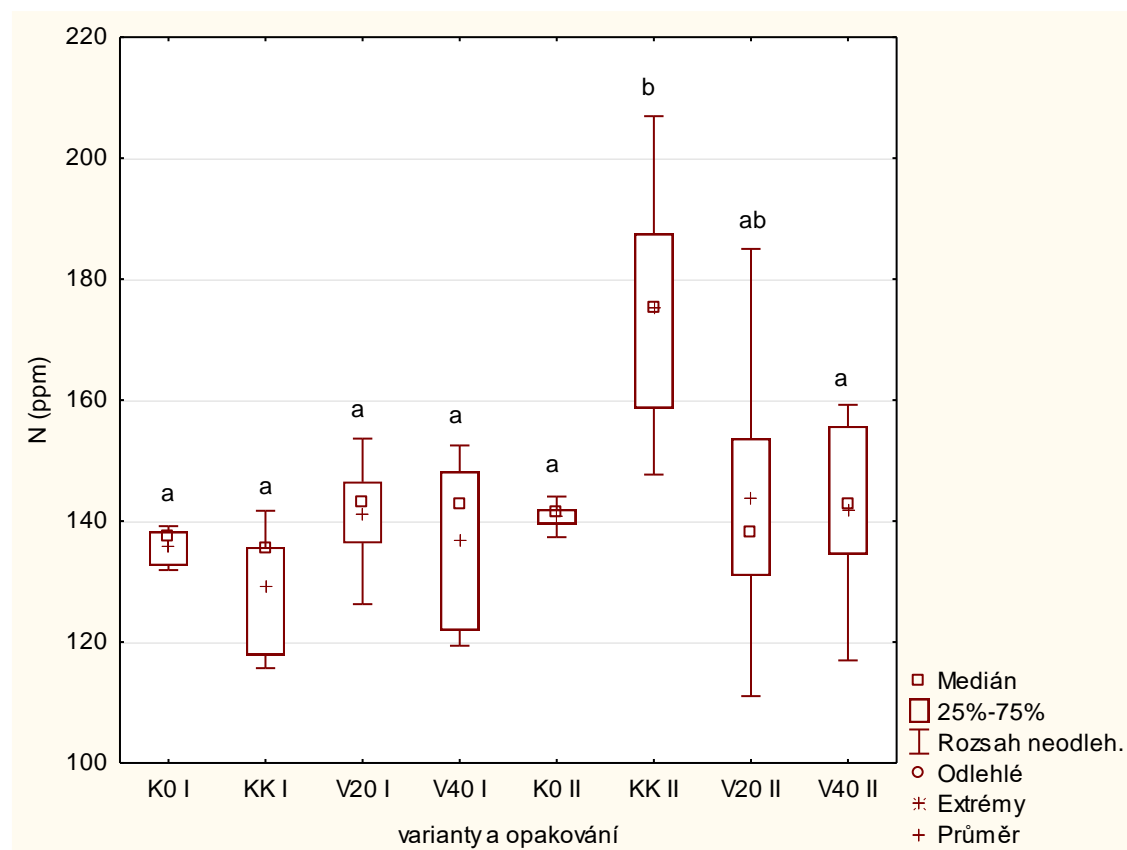
Z grafu 1 lze vyjádřit, že v prvním opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot celkového obsahu dusíku od 131,9 do 139,2 ppm u varianty KK od 115,7 do 141,7 ppm u varianty V20 od 126,3 do 153,6 ppm a u varianty V40 od 119,4 do 152,5 ppm. V prvním opakování neexistují statisticky významné rozdíly v obsahu celkového dusíku v živném roztoku mezi jednotlivými variantami.

V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot celkového obsahu dusíku od 137,3 do 144,1 ppm u varianty KK od 147,7 do 206,9 ppm u varianty V20 od 111,1 do 185,0 ppm a u varianty V40 od 117,0 do 159,2 ppm. V druhém opakování existuje statisticky významný rozdíl pouze u varianty KK s variantami K0 a V40 v obsahu celkového dusíku v živném roztoku. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot celkového obsahu dusíku u všech variant byl od 111,1 do 206,9 ppm. Mezi opakováními existuje statisticky významný rozdíl mezi stejnými variantami pouze u varianty KK. V druhém opakování varianta KK vykázala vyšší obsah celkového dusíku oproti ostatním variantám.

Cílem bylo dodržet u všech variant stejný obsah celkového dusíku, který byl statisticky potvrzen, jen v druhém opakování u varianty KK došlo ke statisticky průkaznému navýšení obsahu celkového dusíku.

Graf 1. Seskupený krabicový graf: Rozsah obsahu celkového N v živném roztoku v průběhu pokusu u jednotlivých variant a opakování.



5.1.1.1 Vývoj obsahu celkového dusíku v živném roztoku

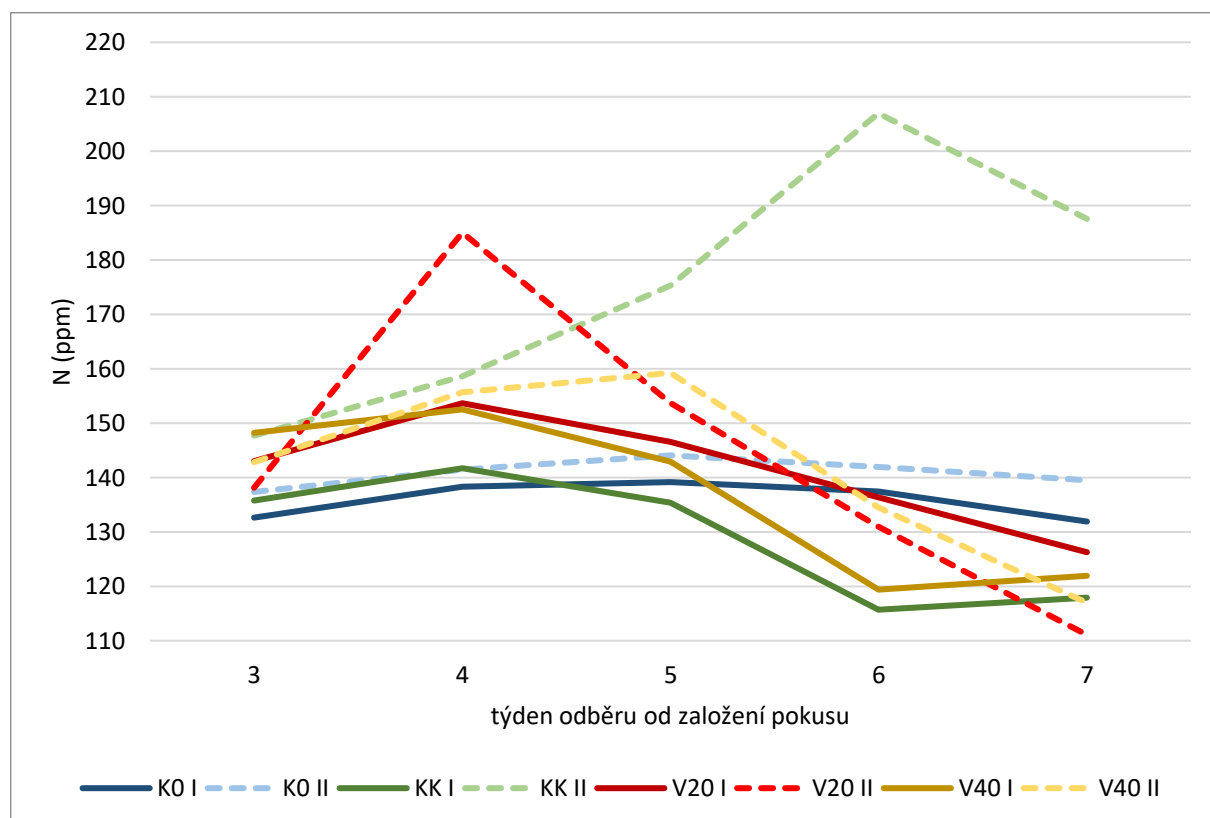
Z grafu 2 lze pozorovat, že u varianty K0 v obou opakování byl dodržen stejný trend vývoje celkového obsahu dusíku v živném roztoku s rozdílem, že v druhém opakování bylo o 3,3–6,2 ppm vyšší obsah celkového dusíku v roztoku. U varianty K0 se obsah dusíku do 5. týdne zvýšil o 6 ppm u obou opakování a následně do sklizně se vrátil na počáteční hodnotu třetího týdne.

Varianta KK vykázala odlišný trend vývoje obsahu dusíku v živném roztoku mezi opakováními. Rozdíl v obsahu dusíku mezi opakováními u varianty KK byl již po třetím týdnu v druhém opakování vyšší o 12 ppm a následně stoupl do dalšího týdne o 11 ppm a v prvním opakování byl nárůst ve čtvrtém týdnu pozvolnější, a to pouze o 6 ppm. K dalšímu rozdílu došlo během 5. týdne, kde v prvním opakování došlo k poklesu obsahu celkového dusíku a pokles trval do 6. týdne, a to na hodnotu 115,7 ppm a následně se nepatrně zvýšil do posledního týdne o 2,2 ppm. Naopak v druhém opakování během 5. týdne došlo k nárůstu obsahu a pokračoval nárůst až do 6. týdne až na hodnotu 206,9 ppm, kde se následně obsah do sklizně snížil na hodnotu 187,5 ppm.

Varianta V20 měla podobný trend vývoje mezi opakováními, kdy v obou opakování do 4. týdne zvýšila obsah celkového dusíku v živném roztoku s rozdílem, že v druhém opakování byl tento nárůst o 31,4 ppm vyšší než v prvním opakování. Po 4. týdnu u obou opakování došlo k poklesu obsahu až do sklizně, kdy v druhém opakování i přes vyšší obsah ve 4. týdnu klesla na nižší hodnotu (111,1 ppm) než v prvním opakování (126,2 ppm).

Varianta V40 v prvním opakování během 4. týdne vykázala nárůst obsahu celkového dusíku v živném roztoku o 4,3 ppm a následně do 6. týdne se obsah snížil na 119,4 ppm a nepatrně se zvýšil v průběhu 7. týdne na 121,9 ppm, tento vývoj je obdobný jako u varianty KK v prvním opakování. V druhém opakování u varianty V40 nárůst obsahu stoupl do 5. týdne o 16,4 pmm a následně klesl do sklizně na podobnou hodnotu jako v prvním opakování na 117 ppm.

Graf 2. Dynamika obsahu celkového N (ppm) v živném roztoku u jednotlivých variant a opakování.



5.1.2 Obsah nitrátového dusíku v živném roztoku

V prvním opakování byl u varianty K0 rozsah hodnot obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku od 131,7 do 138,8 ppm u varianty KK od 115,7 do 136,2 ppm u varianty V20 od 116,5 do 126,2 ppm a u varianty V40 od 95,8 do 120,9 ppm. V prvním opakování mezi jednotlivými variantami neexistují statisticky významné rozdíly v obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku. Z rozsahu hodnot a průměrů hodnot lze varianty seřadit od nejvyššího obsahu po nejnižší v pořadí K0, KK, V20 a V40.

V druhém opakování byl u varianty K0 rozsah hodnot obsahu nitrátového v živném roztoku od 135,8 do 205,6 ppm u varianty V20 od 110,1 do 157,3 ppm a u varianty V40 od 93,4 do 134,3 ppm. V druhém opakování existují statisticky významné rozdíly v obsahu nitrátového dusíku u varianty KK s ostatními variantami. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly. Z rozsahu hodnot a průměrů hodnot lze varianty seřadit od nejvyššího obsahu po nejnižší v pořadí KK, K0, V20, V40.

Celkový rozsah hodnot obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku všech variant byl od 93,4 do 205,6 ppm. Mezi opakováními existuje statisticky významný rozdíl mezi stejnými

variantami pouze u varianty KK. U varianty KK v druhém opakování bylo vykázáno vyšších hodnot a širšího rozsahu hodnot oproti prvnímu opakování. U ostatních variant neexistují statisticky významné rozdíly mezi opakováními. U variant V20 a V40 sice nebylo vykázáno statisticky významných rozdílů mezi opakováními, ale v druhém opakování soubory hodnot vykázali širší rozsah hodnot. Pouze varianta K0 si zachovala úzký rozsah hodnot.

5.1.2.1 Vývoj obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku

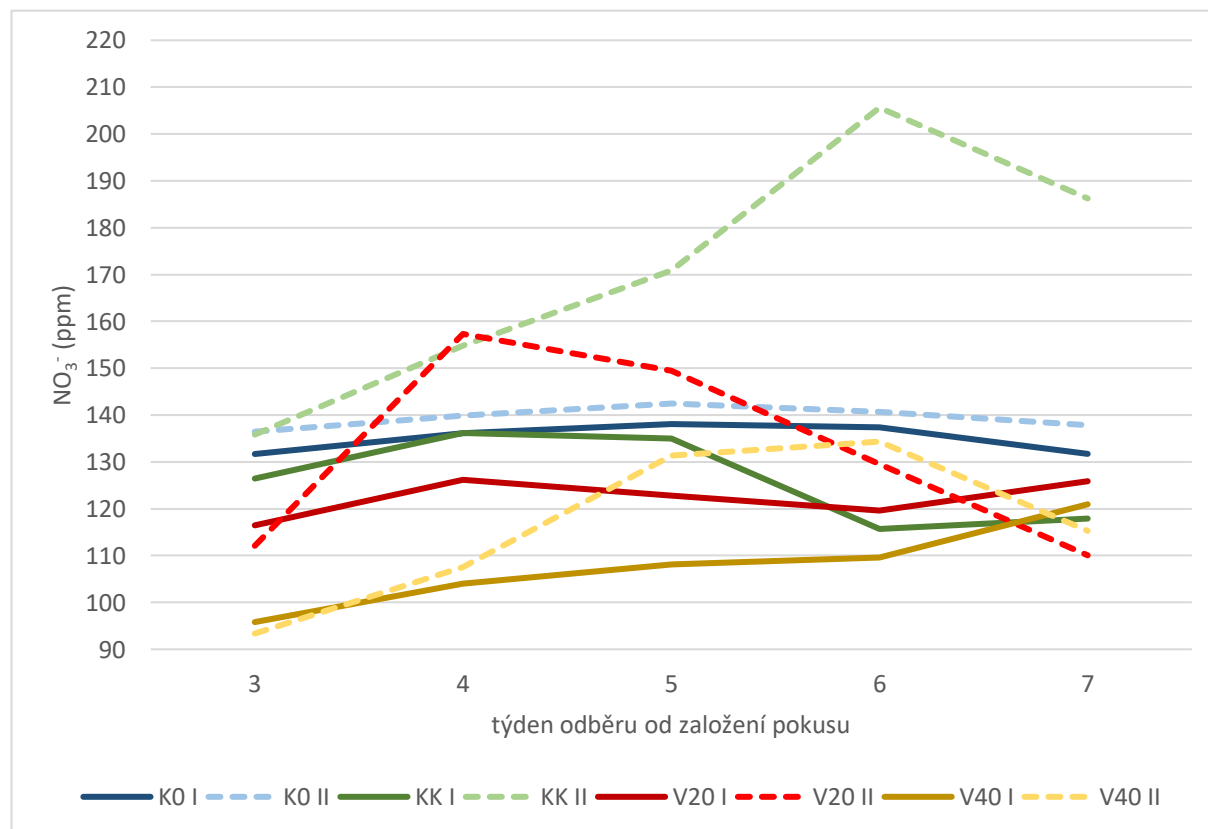
Z grafu 3 lze sledovat, že u variant K0 byl stabilní obsah nitrátového dusíku v obou opakování, kdy v druhém opakování byl o 3,3–6,2 ppm vyšší než v prvním opakování.

Varianta KK vykázala odlišný trend mezi opakováními. V prvním opakování obsah nitrátového dusíku do 5. týdne narostl o 8,6 ppma a následně došlo k jeho poklesu o 19,4 ppm. V druhém opakování u varianty KK už od 3. týdne docházelo k nárůstu obsahu nitrátového dusíku až na hodnotu 205,6 ppm v 6. týdnu a následně v průběhu 7. týdne poklesla o 19,3 ppm.

U varianty V20 v prvním opakování kolísala obsah nitrátového dusíku mezi hodnotami 116,5 až 126,2 ppm a v druhém opakování došlo v průběhu 4. týdne k jeho nárůstu o 45 ppm a následně do sklizně se obsah snižoval až na hodnotu 110 ppm, což je o 6 ppm nižší hodnota než ve 3. týdnu.

U varianty V40 v prvním opakování došlo k nárůstu obsahu nitrátového dusíku z 96 ppm na 121 ppm. V druhém opakování byl tento nárůst intenzivnější až na hodnotu 134 ppm a v posledním 7. došlo k poklesu na 115 ppm.

Graf 3. Dynamika obsahu NO_3^- (ppm) v živném roztoku u jednotlivých variant a opakování.



5.1.3 Obsah amonného dusíku v živném roztoku

V prvním opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu amonného dusíku v živném roztoku od 0,01 do 2,1 ppm u varianty KK od 0,01 do 9,3 ppm u varianty V20 od 0,3 do 27,5 ppm a u varianty V40 od 1,0 do 52,4 ppm. V prvním opakování neexistují statisticky významné rozdíly v rozsahu hodnot obsahu amonného dusíku v průběhu vegetace mezi jednotlivými variantami. Pouze mezi variantou K0 a V40 existuje statisticky významný rozdíl v obsahu amonného dusíku v živném roztoku.

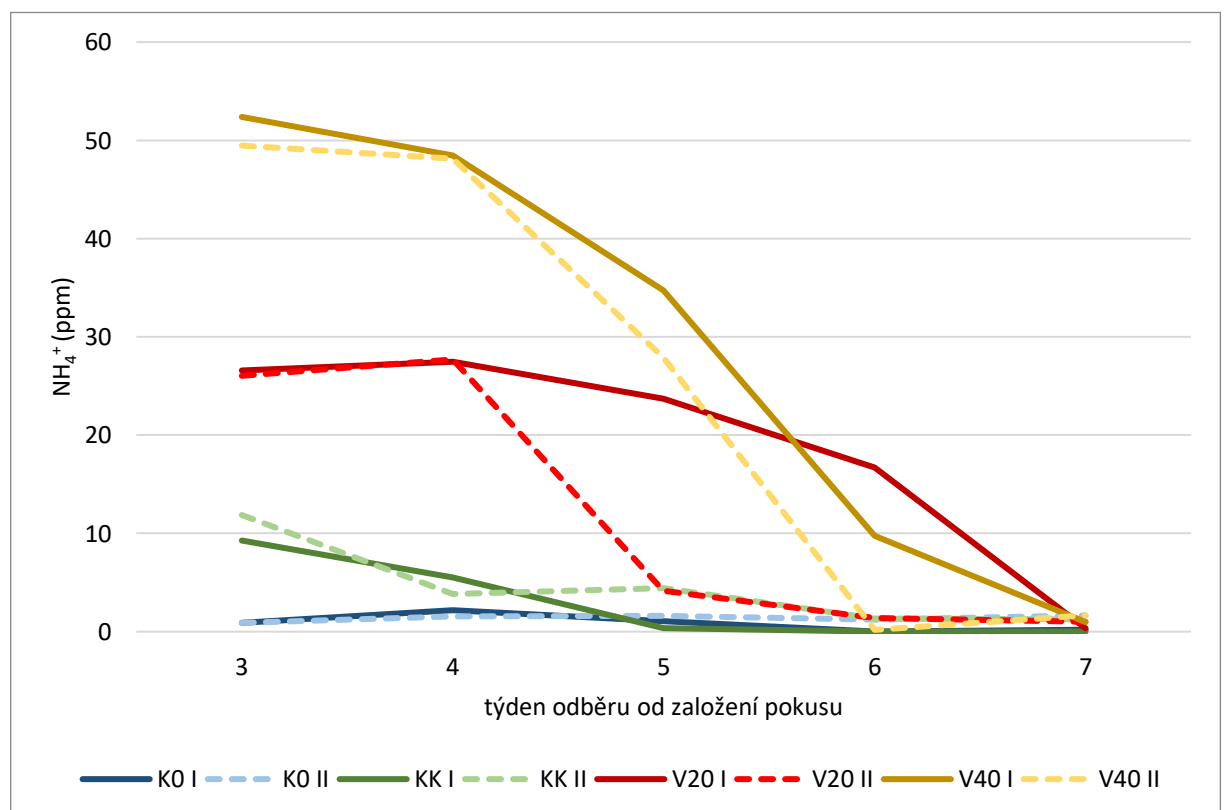
V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu amonného dusíku od 0,9 do 1,6 ppm u varianty KK od 1,3 do 11,9 ppm u varianty V20 od 1 do 27,7 ppm a u varianty V40 od 0,2 do 49,9 ppm. V druhém opakování neexistují statisticky významné rozdíly v rozsahu hodnot obsahu amonného dusíku v průběhu vegetace mezi jednotlivými variantami.

Celkový rozsah hodnot obsahu amonného dusíku u všech variant byl od 0,01 do 52,4 ppm.

Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly mezi stejnými variantami. Mezi jednotlivými variantami a opakováními neexistují statisticky významné rozdíly a rozsahy hodnot se překrývají z důvodu dosažení nízkého až nulového obsahu amonného dusíku u všech variant vlivem odebrání veškerého amonného dusíku rostlinami. Horní hranice rozsahu hodnot obsahu amonného dusíku je ovlivněna variantou a poměrem minerálních dusíků.

5.1.3.1 Vývoj obsahu amonného dusíku v živném roztoku

Graf 4. Dynamika obsahu NH_4^+ (ppm) v živném roztoku u jednotlivých variant a opakování.



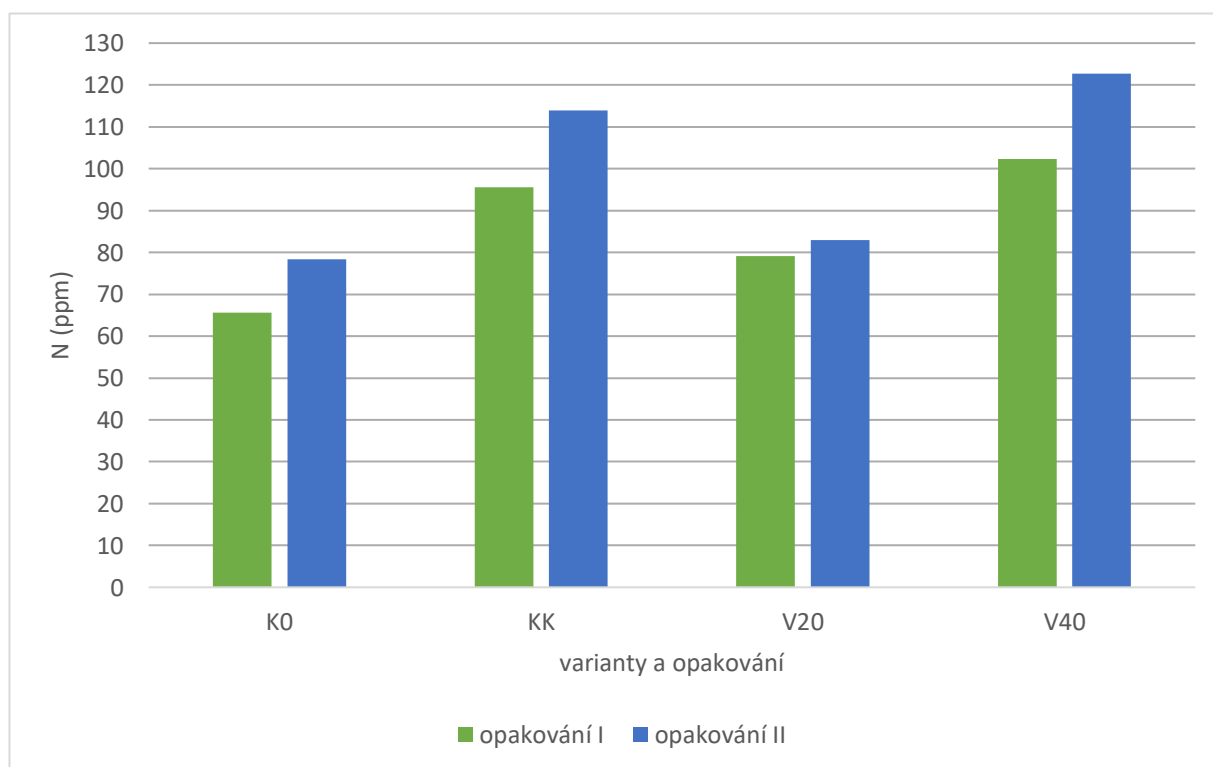
Graf 4 vyjadřuje, že u varianty K0 bylo od počátku cíleno na nulový obsah amonného dusíku, kde se tento požadavek podařilo udržet v hladině 0,01 až 2,1 ppm.

U zbylých variant s obsahem amonného dusíku došlo v průběhu vegetace k poklesu obsahu amonného dusíku až k nulovým hodnotám ppm (0,01–1,65 ppm). Z tohoto grafu je patrná preference příjmu amonného dusíku rostlinou před nitrátovou formou v těchto zkoumaných podmínkách a přírodních poměrech minerálních dusíků.

5.1.4 Úbytek celkového dusíku z živného roztoku

V grafu 5 lze pozorovat, že u všech variant byl vyšší úbytek celkového dusíku v druhém opakování oproti prvnímu opakování. Také je patrný nejvyšší úbytek celkového dusíku u varianty V40 v obou opakování, kde v druhém opakování ubylo o 20,35 ppm N více než v prvním opakování. Druhý nejvyšší úbytek vykázala varianta KK, ve které v druhém opakování ubylo o 18,29 ppm N více než v prvním. Třetí nejvyšší úbytek byl vykázán u varianty V20, kde v druhém opakování ubylo o 3,86 ppm N více. Nejmenší úbytek ze sledovaných variant vykázala varianta K0, která v druhém opakování vykázala úbytek o 12 ppm N více než v prvním opakování.

Graf 5. Úbytek celkového N (ppm) u jednotlivých variant a opakování.

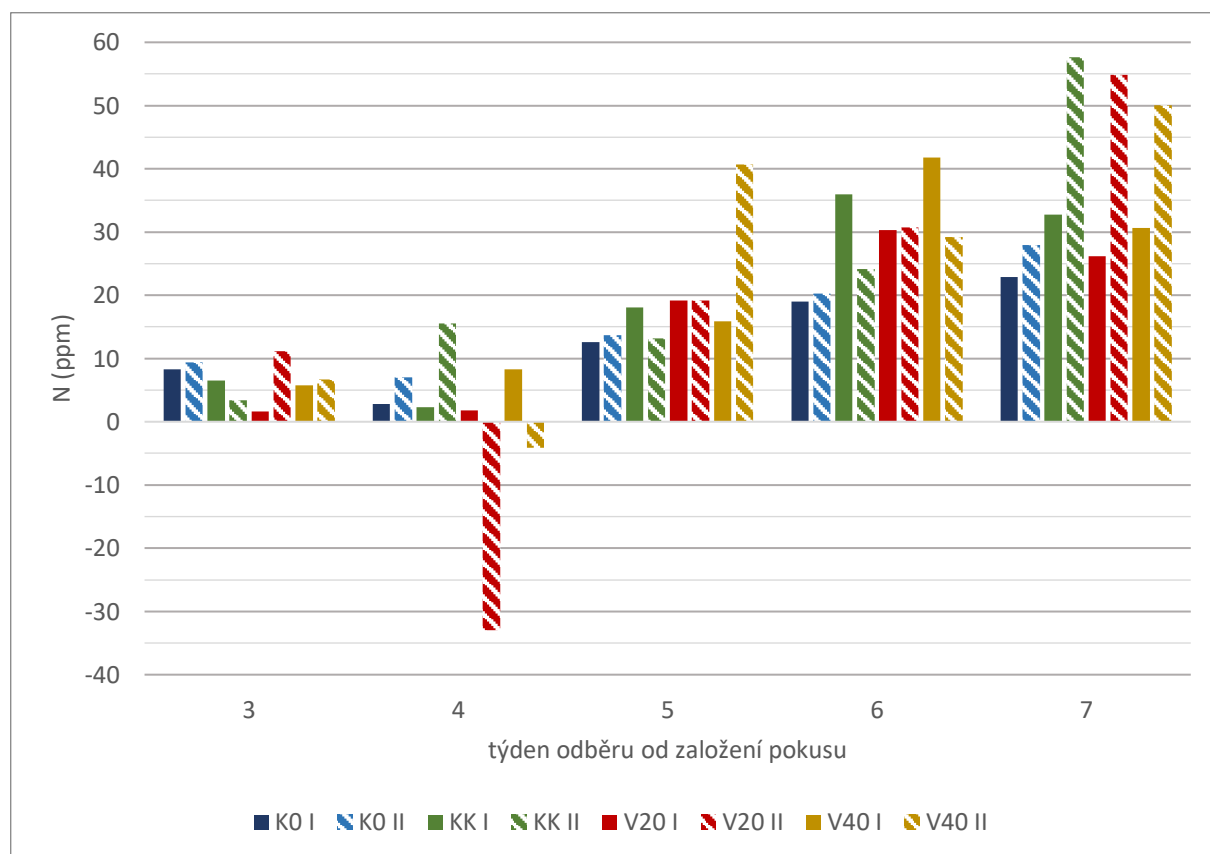


5.1.4.1 Hodnocení vývoje úbytku dusíku z živného roztoku

V grafu 6 si můžeme povšimnout rozdílného úbytku celkového dusíku v průběhu vegetace a mezi variantami. V průběhu čtvrtého týdne byl v průměru vykázán nejnižší úbytek, a to i k vykázání k nárůstu obsahu N v živném roztoku u varianty V20 v druhém opakování o 32,95 ppm a u varianty V40 z druhého opakování o 4,08 ppm N. Týdny můžeme seřadit

podle průměrného úbytku od nejmenšího v tomto pořadí 4., 3., 5., 6., a 7. týden. Ve třetím týdnu můžeme pozorovat, že varianta K0 v obou opakování spolehlivě převyšuje úbytek celkového N ostatních variant obsahujících amonný dusík pouze kromě varianty V20 ve druhém opakování, která vykázala o 9,52 ppm vyšší úbytek než v prvním opakování. Od 5. týdne varianty s obsahem amonného dusíku spolehlivě převyšují variantu K0 v úbytku celkového N.

Graf 6. Dynamika odběru celkového N (ppm) v průběhu růstu u jednotlivých variant a opakování.



5.1.5 Obsah vápníku v živném roztoku

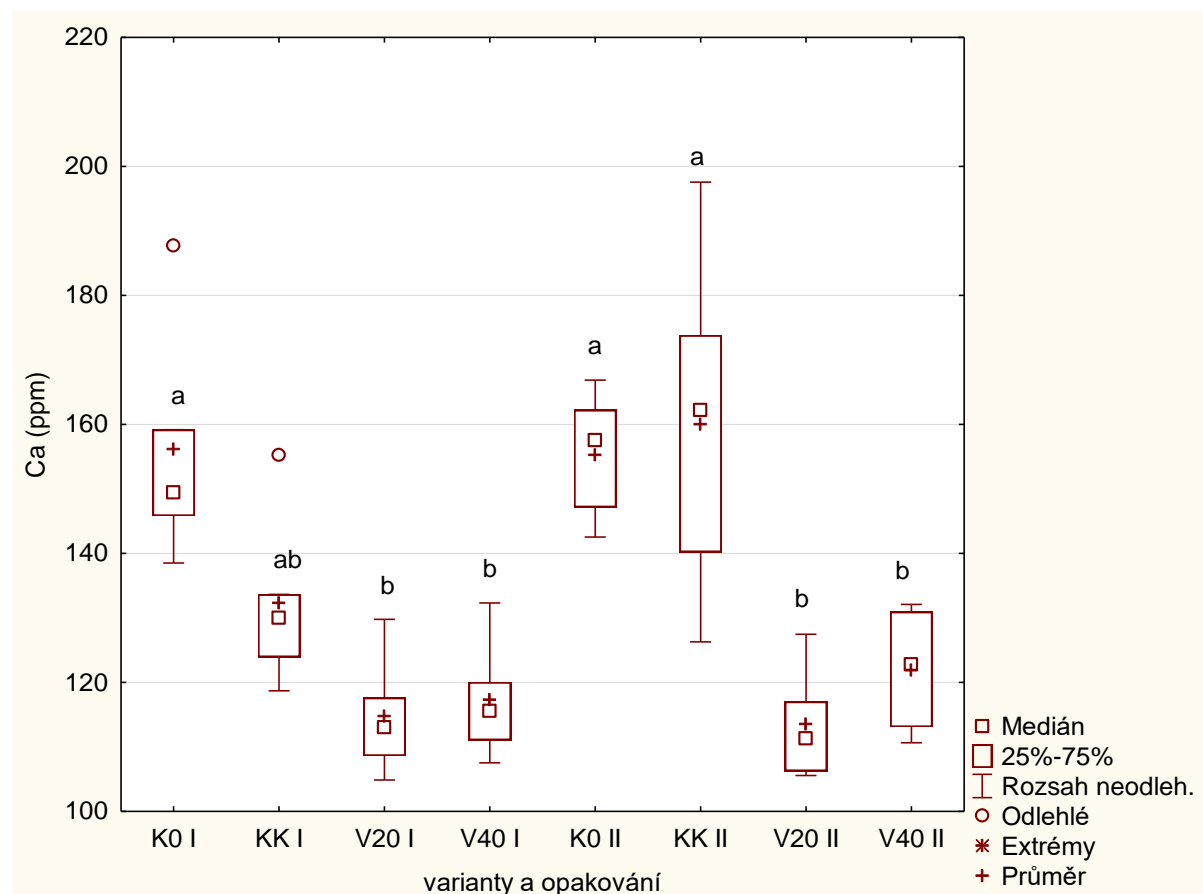
Z grafu 7 lze vyjádřit, že v prvním opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu vápníku od 138,5 do 187,7 ppm u varianty KK od 118,7 do 155,3 ppm u varianty V20 od 104,9 do 129,8 ppm a u varianty V40 od 107,5 do 132,3 ppm. V prvním opakování existují statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v živném roztoku pouze u varianty K0 s variantami V20 a V40. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu vápníku od 142,5 do 166,9 ppm u varianty KK od 126,3 do 197,6 ppm u varianty V20 od 105,6 do 127,5 ppm a u varianty V40 od 110,7 do 132,1 ppm. V druhém opakování neexistují statisticky významné rozdíly mezi variantami K0 a KK a mezi variantami V20 a V40. mezi variantami K0 a V40 v obsahu vápníku v živném roztoku. Mezi ostatními variantami existují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot obsahu vápníku u všech variant byl od 104,9 do 197,6 ppm. Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v živném roztoku mezi stejnými variantami.

Na základě těchto výsledků lze vyjádřit, že varianty K0 a KK v obou opakování obsahovaly statisticky průkazně vyššího obsahu vápníku v živném roztoku oproti variantám V20 a V40 (kromě varianty KK v prvním opakování, která nevykázala statisticky významný rozdíl s žádnou z variant) mezi kterými neexistují statisticky významné rozdíly.

Graf 7. Seskupený krabicový graf: Rozsah obsahu vápníku v živném roztoku v průběhu pokusu u jednotlivých variant a opakování.



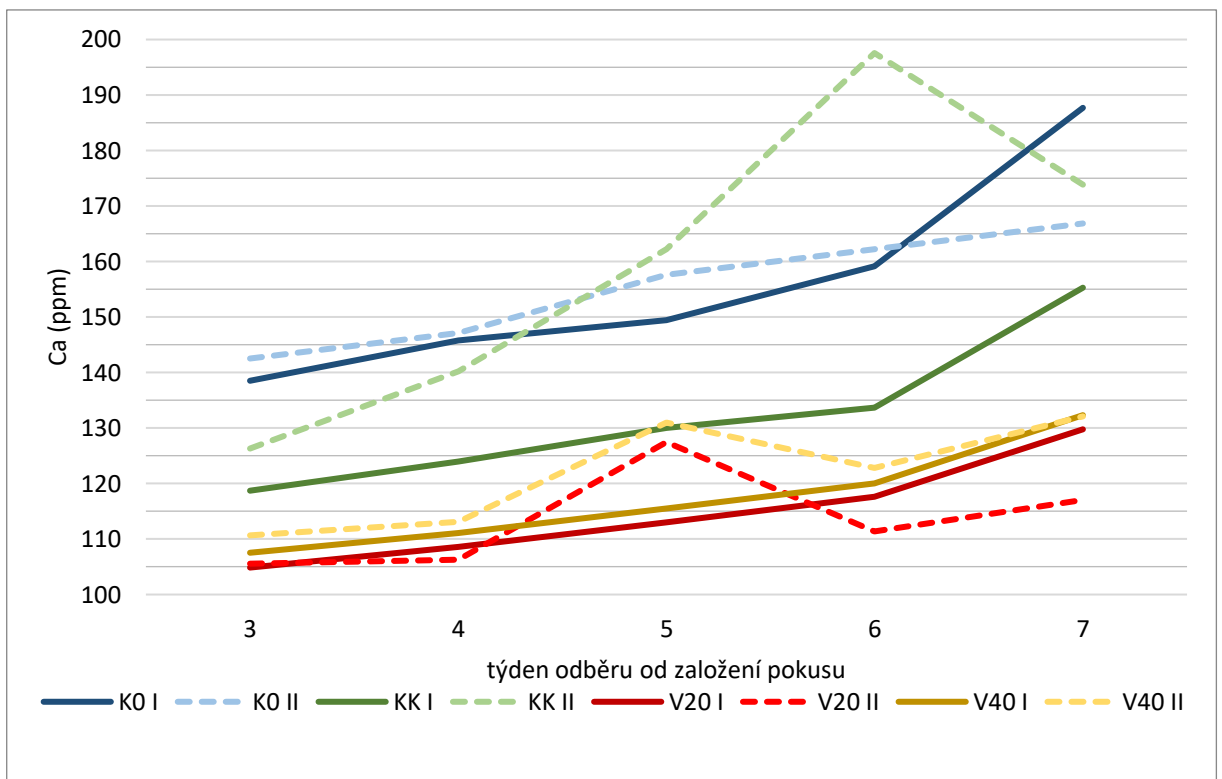
5.1.5.1 Vývoj obsahu vápníku v živném roztoku

Z grafu 8 lze pozorovat, že u varianty K0 v obou opakování byl dodržen podobný trend vývoje obsahu vápníku v živném roztoku s rozdílem, že v prvním opakování během posledního (7. týdne) došlo k výraznému nárůstu obsahu Ca o 20,8 ppm než v druhém opakování. U varianty K0 se obsah vápníku lineárně narůstal v průběhu vegetace. V prvním opakování byl nárůst 49,2 ppm Ca a v druhém opakování 24,4 ppm Ca.

Zbýlé varianty vykázaly nárůst obsahu vápníku v živném roztoku v průběhu vegetace, ale s odlišným trendem vývoje obsahu vápníku v živném roztoku mezi opakováními.

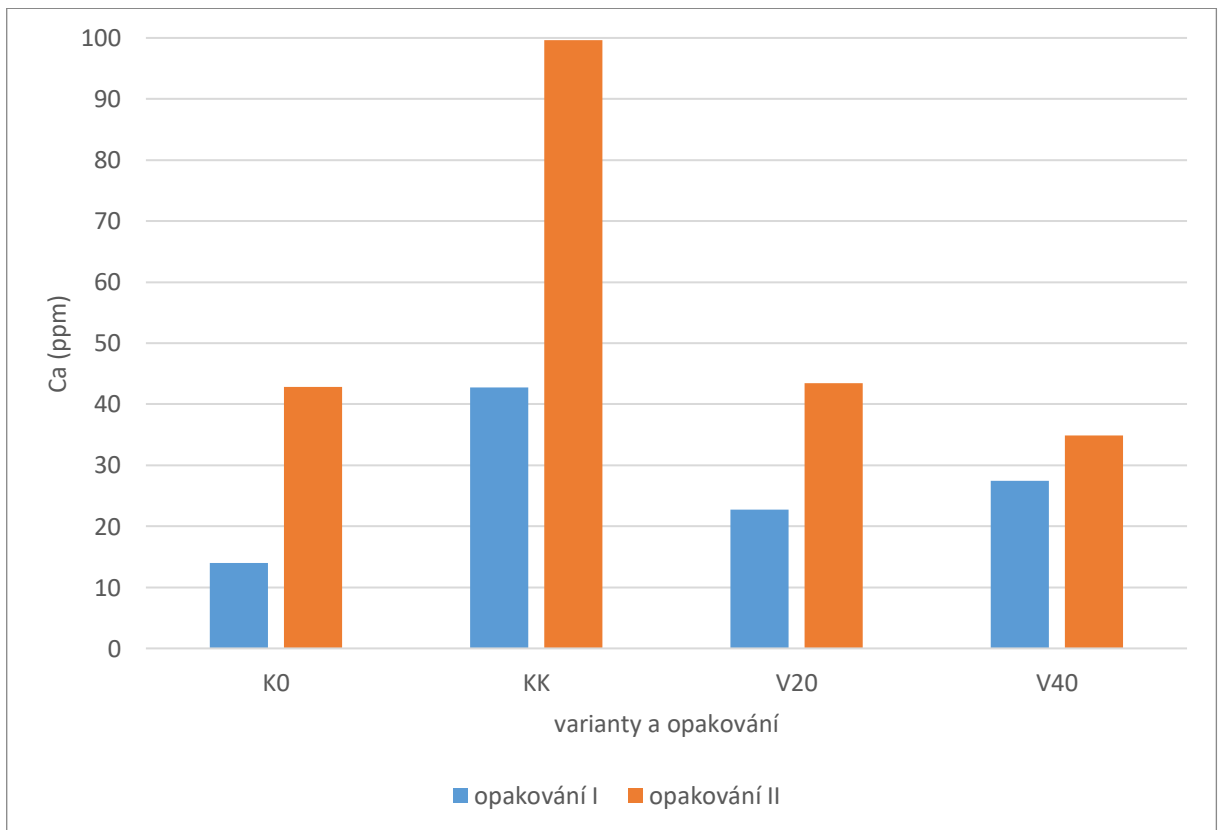
Dále si lze povšimnout podobné dynamiky obsahu vápníku v živném roztoku u variant v prvním opakování, které vykázaly v průběhu růstu lineární nárůst obsahu Ca, a to pozvolný do 6. týdne a razantnější během posledního týdne. V druhém opakování si lze povšimnout podobného trendu u variant V20 a V40.

Graf 8. Dynamika obsahu Ca (ppm) v živném roztoku u jednotlivých variant a opakování.



5.1.6 Úbytek vápníku z živného roztoku

Graf 9. Úbytek celkového Ca (ppm) u jednotlivých variant a opakování.



Z grafu 9 lze pozorovat, že u všech variant byl vyšší úbytek celkového vápníku v druhém opakování oproti prvnímu opakování. Dále je patrný nejvyšší úbytek vápníku z živného roztoku u varianty KK v obou opakování oproti ostatním variantám stejného opakování. Varianta KK v druhém opakování vykázala o 56,95 ppm Ca více než v prvním opakování. U varianty K0 ubylo o 28,9 ppm Ca více v druhém opakování. U varianty V20 v druhém opakování ubylo o 20,7 ppm Ca více Ca než v prvním opakování. U varianty V40 ubylo o 7,4 ppm Ca více v druhém opakování.

5.2 Hodnocení parametrů rostlin

Každá varianta obsahovala 6 rostlin, z důvodu poškození rostlin během růstu vlivem poruchy trysek systémů byly poškozené rostliny odstraněny ze statistického vyhodnocování. Dále z důvodu nežádoucího kontaktu živného roztoku s listy rostlin, po přesazení do jednotlivých variant/systémů v průběhu třetího týdne, byly tyto rostlinky nahrazeny a označeny. Tyto rostlinky byly zahrnuty do statistického. V prvním opakování u varianty K0 se vycházelo z 5 hodnot (z 5 rostlin) u KK, V20 a V40 z 6 hodnot. Varianta KK obsahovala 2 nahrazené rostliny a varianta V40 obsahovala 4 nahrazené rostliny. V druhém opakování u variant K0 a V20 z 5 hodnot a u KK a V40 z 6 hodnot. V druhém opakování nebyly žádné rostliny nahrazovány. Hodnoty byly statisticky vyhodnoceny pomocí jednofaktorové ANOVY s použitím Tukeyova testu.

5.2.1 Hmotnost prýtu

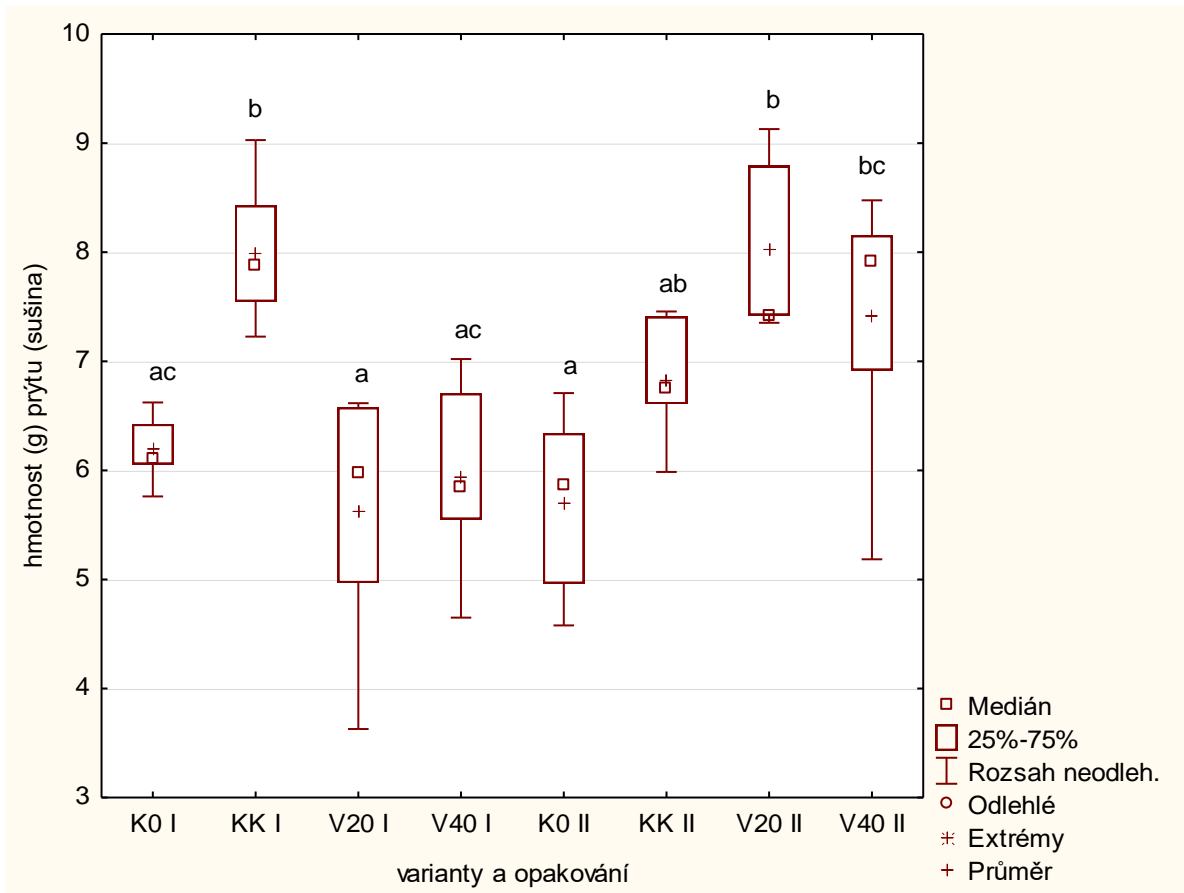
Z grafu 10 lze stanovit, že v prvním opakování rozsah hodnot hmotnosti sušiny prýtu byl u varianty K0 od 5,761 do 6,622 g u varianty KK od 7,226 do 9,027 g u varianty V20 od 3,629 do 6,616 a u varianty V40 od 4,65 do 7,021 g. V prvním opakování existují statisticky významné rozdíly u varianty KK se všemi ostatními variantami z prvního opakování. Varianta KK vykázala vyšší hmotnost prýtu oproti ostatním variantám. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

V druhém opakování rozsah hodnot hmotnosti prýtu byl u varianty K0 od 4,579 do 6,709 g u varianty KK od 5,985 do 7,456 g u varianty V20 od 7,353 do 9,129 g a u varianty V40 od 5,185 do 8,475 g. V druhém opakování existují statisticky významné rozdíly u varianty K0 s variantami V20 a V40. Kde varianta K0 vykázala statisticky nižší hmotnosti prýtu oproti variantám V20 a V40. Zbylé varianty mezi sebou nevykázali statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot hmotnosti sušiny prýtu všech variant z obou opakování byl od 3,629 do 9,12 g. Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly u stejných variant, pouze u varianty V20 existuje statisticky významný rozdíl, která v prvním opakování vykázala nižší hmotnost prýtu než v druhém opakování.

Z výsledků lze říci, že stejné varianty mezi opakováními nevykázali statisticky významné rozdíly, až na variantu V20, která v prvním opakování vykázala nižší výnos prýtu oproti druhému opakování. Mezi variantami neexistují statisticky významné rozdíly pro potvrzení vlivu jednotlivých variant s různým poměrem amonného dusíku v živném roztoku na měnící se hmotnost prýtu.

Graf 10. Seskupený krabicový graf: hmotnost (g) prýtu (sušina) u jednotlivých variant a opakování.



5.2.2 Hmotnost kořenů

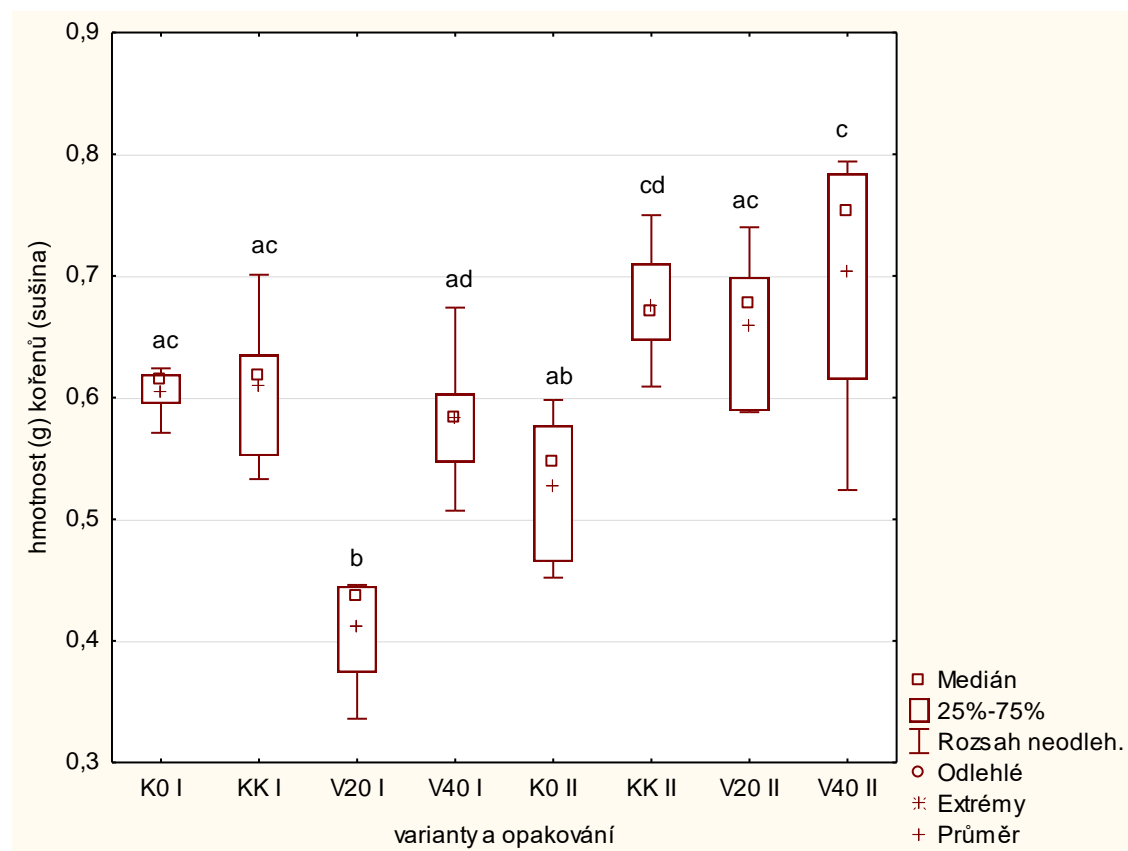
Z grafu 11 lze vyjádřit, že v prvním opakování byl rozsah hodnot hmotnosti sušiny kořenů u varianty K0 od 0,571 do 0,624 gramů u varianty KK od 0,533 do 0,701 g u varianty V20 od 0,336 do 0,446 g a u varianty V40 od 0,507 do 0,674 g. V prvním opakování existují statisticky významné rozdíly pouze u varianty V20 s ostatními variantami, kde u varianty V20 bylo naváženo nejnižších hodnot oproti ostatním variantám. Mezi ostatními variantami v prvním opakování neexistují statisticky významné rozdíly v hmotnosti sušiny kořenů.

V druhém opakování byl rozsah hodnot hmotnosti kořenů u varianty K0 od 0,452 do 0,598 g u varianty KK od 0,609 do 0,75 g u varianty V20 od 0,588 do 0,74 g a u varianty V40 od 0,524 do 0,794 g. V druhém opakování existují statisticky významné rozdíly u varianty K0 s variantami KK a V40. Kde K0 vykázala nižší hmotnost kořenů oproti ostatním variantám, díky širokému rozsahu hodnot u varianty V40 se tyto dva soubory překrývají a nevykazují statisticky významný rozdíl. Zbylé varianty v druhém opakování mezi sebou nevykazují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot hmotnosti kořenů všech variant z obou opakování byl od 0,336 do 0,794 g. Mezi opakováními existují statisticky významné rozdíly u variant V20 a V40. U variant K0 a KK neexistuje statisticky významný rozdíl mezi stejnými variantami v opakování.

Na základě těchto výsledků nelze pozorovat vliv jednotlivých variant s různým poměrem amonného dusíku v živném roztoku na měnící se hmotnost kořenů.

Graf 11. Seskupený krabicový graf: hmotnost (g) kořenů (sušina) u jednotlivých variant a opakování.



5.2.3 Poměr prýtu a kořenů

Poměr prýtu a kořenů byl vyjádřen podílem prýtu s kořeny a stanoven jako hodnota gramů prýtu na jeden gram kořenů.

Graf 12 vyjadřuje, že v prvním opakování rozsah hodnot poměru prýtu a kořenů byl u varianty K0 od 9,307 do 10,795 u varianty KK od 11,380 do 14,513 u varianty V20 od 10,801 do 14,912 a u varianty V40 od 9,172 do 11,119. V prvním opakování neexistuje statisticky významný rozdíl mezi variantami K0 a V40 a dále mezi variantou KK a V20. Existují statisticky významné rozdíly u varianty K0 s variantami KK a V20, kde K0 vykázala menší poměr prýtu a kořenů. Dále existují statisticky významné rozdíly u varianty V40 s variantami KK a V20, kde V40 vykázala menší poměr prýtu a kořenů.

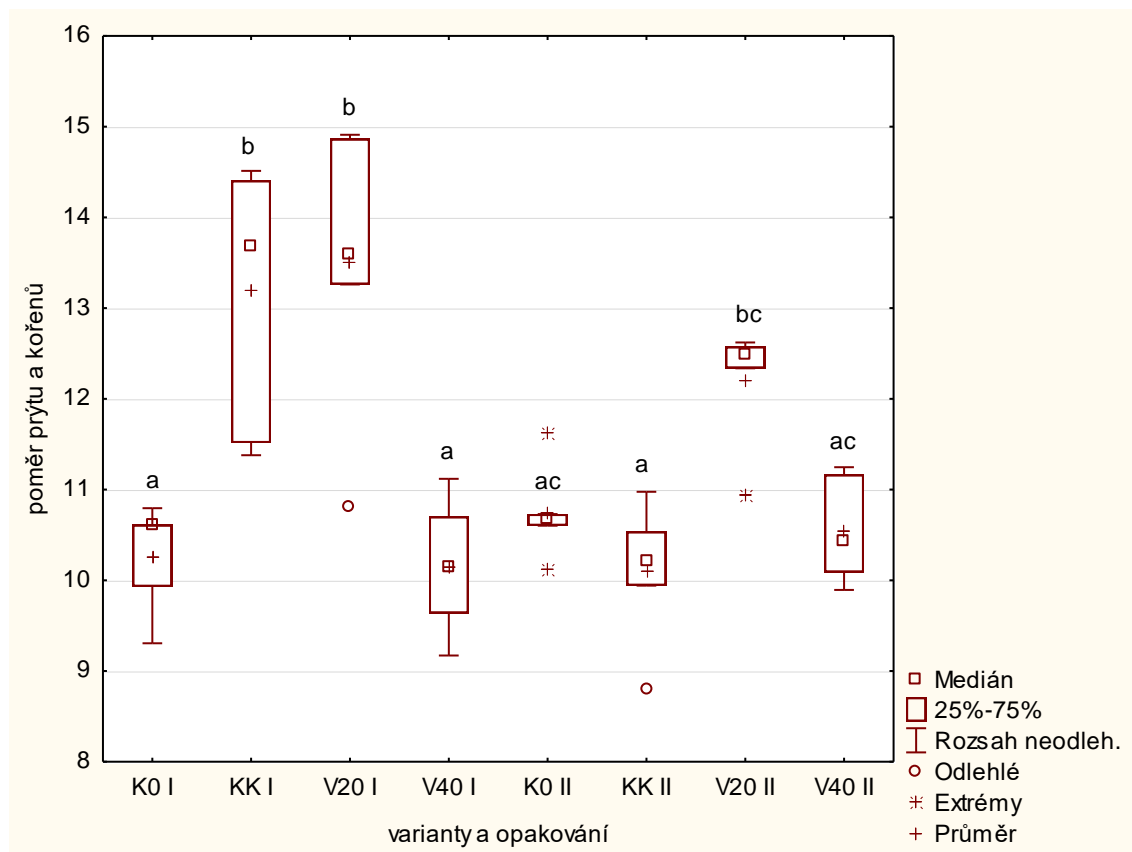
V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot od 10,131 do 11,627 u varianty KK od 8,789 do 10,975 u varianty V20 od 10,951 do 12,622 a u varianty V40 od 9,895 do 11,247. V druhém opakování existuje statisticky významný rozdíl v poměru prýtu a kořenů u sledovaných variant pouze mezi variantami KK a V20. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot poměru prýtu a kořenů všech variant z obou opakování byl od 8,789 do 14,912. Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly u stejných

variant, pouze u varianty KK existuje statisticky významný rozdíl, která v druhém opakování vykazala nižší poměr prýtu a kořenů než v prvním opakování.

Na základě statistického vyhodnocení nelze potvrdit vliv jednotlivých variant s různým poměrem amonného dusíku v živném roztoku na měnící se poměr prýtu a kořenů. Lze pouze pozorovat stabilní poměr prýtu a kořenů mezi opakováními u variant K0 a V40, mezi kterými v pokusu nebyly vykazány statisticky významné rozdíly a vykazovaly nejnižší poměr prýtu a kořenů z celkového pokusu. Varianta KK s variantou V20 v prvním opakování vykazaly statisticky průkazně vyššího poměru prýtu a kořenů oproti variantám K0 a V40 z obou opakování. Varianty KK a V20 v druhém opakování vykazaly nižší poměr prýtu a kořenů a nevykazaly statisticky významné rozdíly s variantami K0 a V40. Varianta V20 si udržela nejvyšší průměrný poměr prýtu a kořenů v obou opakování oproti ostatním variantám a vykazala statisticky nevýznamný rozdíl mezi prvním a druhým opakováním.

Graf 12. Seskupený krabicový graf: poměr prýtu a kořenů u jednotlivých variant a opakování.



5.2.4 Počet listů

Pro stanovení počtu listů byly listy počítány po sklizni po rozebrání celé hlávky salátů. Byly započítány všechny listy, které byly viditelně odděleny od středu salátu (vzrostného vrcholu).

Graf 13 znázorňuje, že prvním opakování byl u varianty K0 rozsah počtu listů od 34 do 39 listů u varianty KK od 37 do 42 listů u varianty V20 od 32 do 40 listů a u varianty V40 od 32 do 37 listů. V prvním opakování existuje statisticky významný rozdíl pouze mezi variantami KK a V40, kde varianta KK vykazala nejvyššího počtu listů a varianta V40

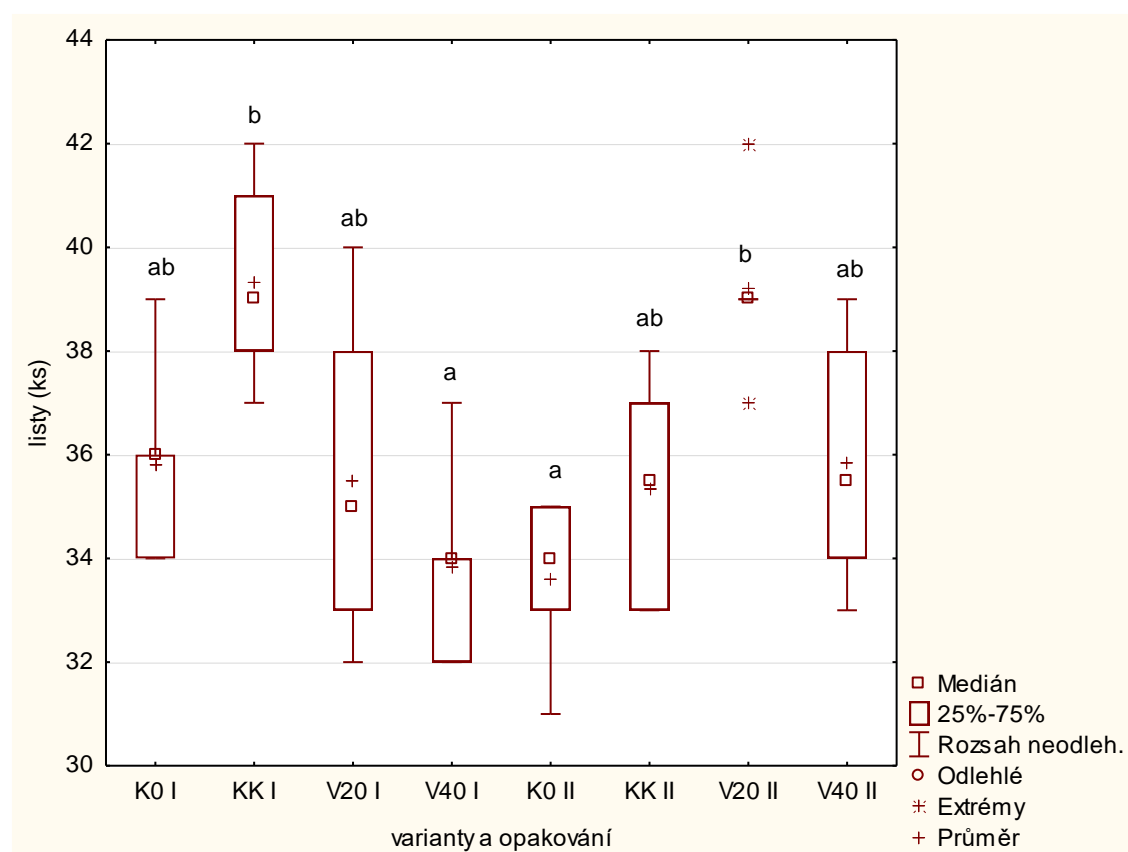
nejnižšího počtu listů v prvním opakování. Mezi ostatními variantami v prvním opakování neexistují statisticky významné rozdíly v počtu listů.

V druhém opakování se počet listů pohyboval u varianty K0 od 31 do 35 listů u varianty KK od 33 do 38 listů u varianty V20 od 37 do 42 listů a u varianty V40 od 33 do 39 listů. V druhém opakování existuje statisticky významný rozdíl pouze mezi variantou K0 a V20, kde K0 vykázala nejnižší počet listů a V20 nejvyšší počet listů v druhém opakování. Mezi ostatními variantami v druhém opakování neexistují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah počtu listů všech variant z obou opakování byl od 31 do 42 listů. Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly u stejných variant. Varianty mají statisticky nevýznamné rozdíly mezi prvním a druhým opakováním.

Z těchto výsledků nelze statisticky vyjádřit vliv jednotlivých variant s různým poměrem amonného dusíku v živném roztoku na měnící počet listů rostlin salátu.

Graf 13. Seskupený krabicový graf: počet listů (ks) u jednotlivých variant a opakování.



5.3 Hodnocení obsahu živin v rostlinách

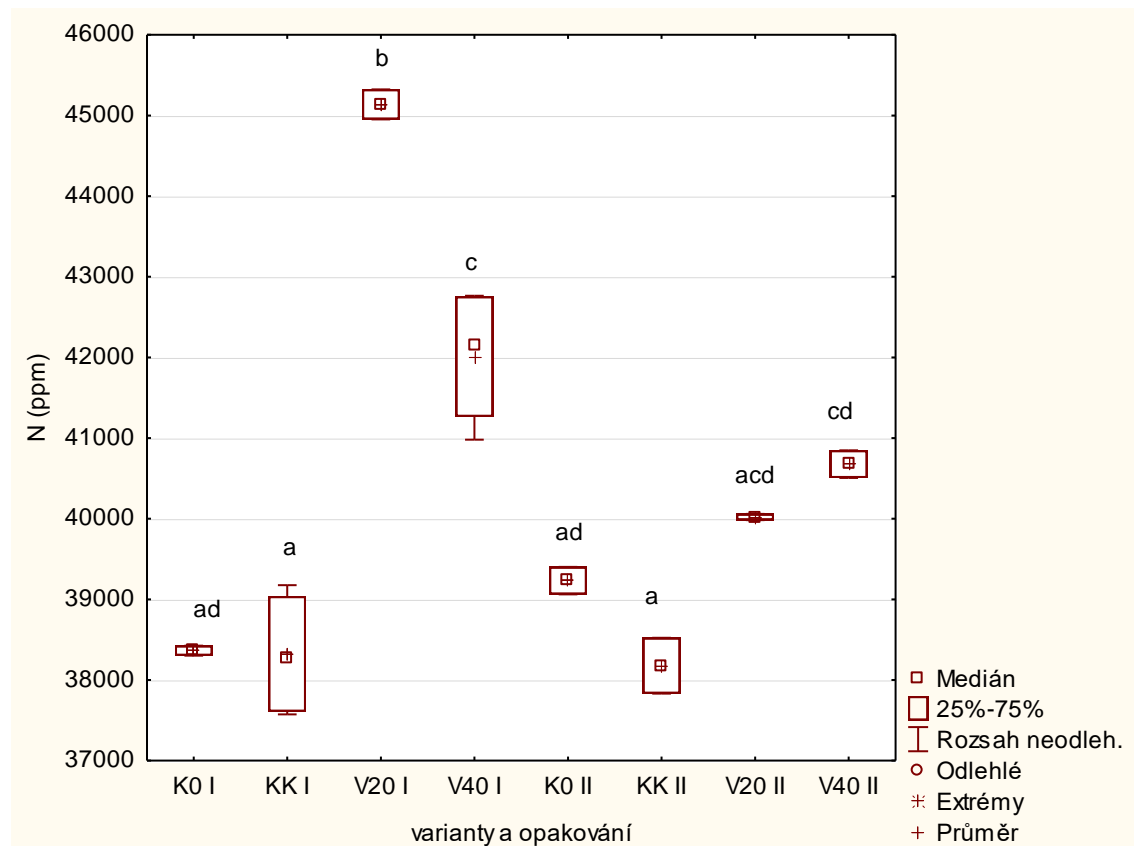
5.3.1 Obsah dusíku v prýtu

Stejně jako u vyhodnocování parametrů rostlin zde byla variabilita v počtu analyzovaných vzorků ovlivněna počtem nahrazených rostlin, což se týkalo pouze prvního opakování. Nahrazené rostliny byly analyzovány odděleně a následně byly zahrnuty do statického vyhodnocování. U varianty KK nové rostliny průměrně vykázaly o 3,8 % vyšší obsah dusíku oproti původním (nenahrazeným) rostlinám. U varianty V40 byl vykázán

průměrný pokles o 3,5 % u nových rostlin oproti původním rostlinám v obsahu dusíku v prýtu.

V prvním opakování se u varianty K0 a V20 vycházelo ze 2 hodnot (ze 2 vzorků souhrnného homogenního vzorku) u variant KK a V40 ze 4 hodnot (2 vzorky původních rostlin a 2 vzorky nahrazených rostlin). V druhém opakování u všech variant se vycházelo ze 2 hodnot.

Graf 14. Seskupený krabicový graf: Obsah N (ppm) v prýtu u jednotlivých variant a opakování.



V Grafu 14 lze pozorovat, že v prvním opakování byl u varianty K0 rozsah hodnot obsahu dusíku v prýtu od 38303,0 do 38425,7 ppm N u varianty KK od 37574,2 do 39176,3 ppm N u varianty V20 od 44952,0 do 45324,4 ppm N a u varianty V40 od 40979,9 do 42765,2 ppm N. V prvním opakování mezi variantami K0 a KK neexistuje statisticky významný rozdíl v obsahu dusíku v prýtu. Kde varianty K0 a KK vykázali v prvním opakování nejnižších obsahů N v prýtu. Mezi ostatními variantami existují statisticky významné rozdíly a varianta V20 vykázala nejvyššího obsahu N v prýtu.

V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu dusíku v prýtu od 39062,5 do 39403,0 ppm N u varianty KK od 37832,1 do 38523,6 ppm N u varianty V20 od 39981,5 do 40059,6 ppm N a u varianty V40 od 40506,0 do 40848,4 ppm N. V druhém opakování neexistují statisticky významné rozdíly mezi variantami v obsahu dusíku v prýtu, pouze mezi variantou KK a V40 existuje statisticky významný rozdíl. Kde varianta KK vykázala nejnižšího obsahu N v prýtu a varianta V40 nejvyššího obsahu N v prýtu.

Celkový rozsah hodnot obsahu dusíku v prýtu u všech variant byl od 37574,2 do 45324,4 ppm N. Mezi opakováními neexistují statisticky významné rozdíly u stejných

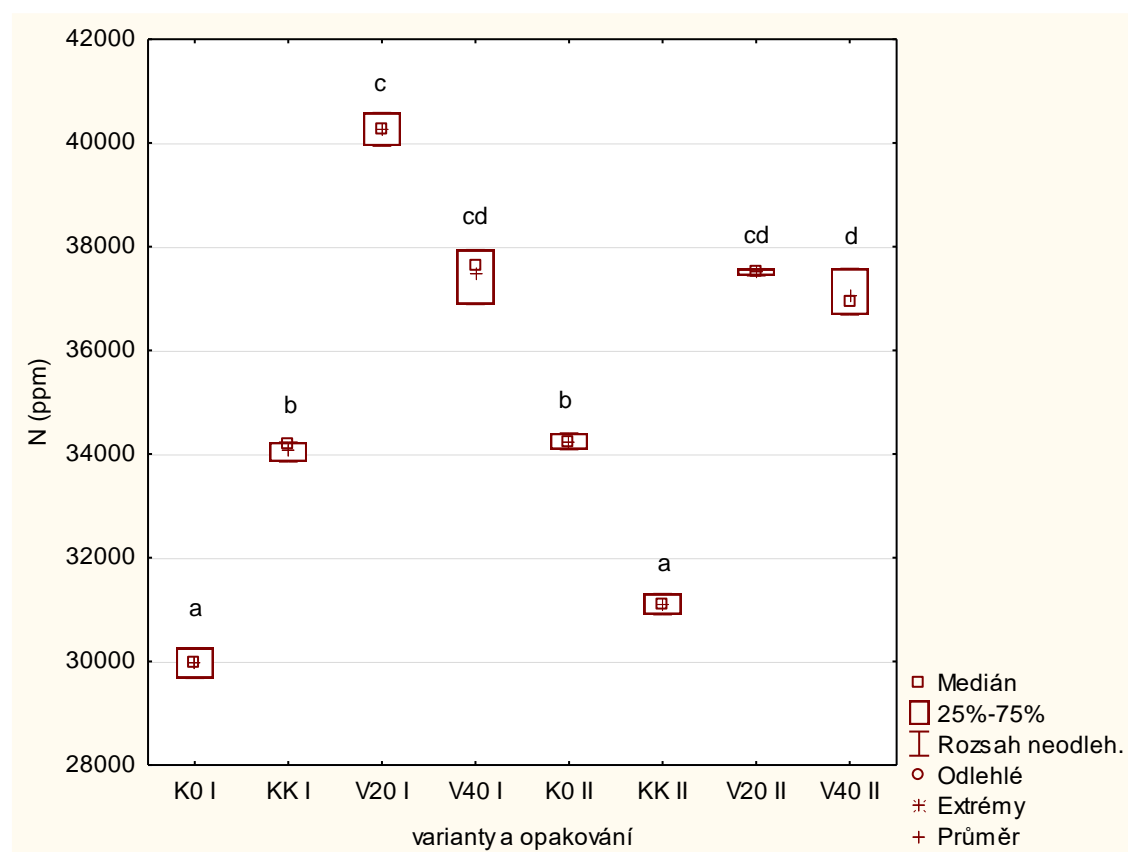
variant, pouze u varianty V20 existuje statisticky významný rozdíl. Kde u varianty V20 v druhém opakování nebylo vykááno tak vysokých hodnot obsahu N v prýtu jako v prvním opakování.

Z těchto výsledků se na základě prvního opakování dá statisticky vyjádřit, že varianty V20 a V40 vykazovali vyšších obsahů N v prýtu než varianty K0 a KK, v druhém opakování je tento trend také patrný z hodnot v grafu, ale není již statisticky průkazný.

5.3.2 Obsah dusíku v kořenech

Množství analyzovaných vzorků u hodnocení obsahu dusíku v kořenech bylo jednak limitováno nízkou návázkou směsných vzorků kořenů, tak nahrazením rostlin v prvním opakování a také u varianty V40 v druhém opakování ze spekulace výskytu plísně na kořenech po sušení vzorků rostlin. V prvním opakování u variant K0 a V40 se vycházelo ze 2 hodnot (ze 2 vzorků souhrnného homogenního vzorku) a u variant KK a V20 ze 3 hodnot (z toho u KK ze dvou původních rostlin a u V40 z jedné původní rostliny). V druhém opakování se vycházelo u variant K0, KK, a V20 ze 2 hodnot a u varianty V40 ze 3 hodnot.

Graf 15. Seskupený krabicový graf: Obsah N (ppm) v kořenech u jednotlivých variant a opakování.



Z grafu 15 lze stanovit, že v prvním opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu dusíku v kořenech od 29679,3 do 30260,7 ppm N u varianty KK od 33854,0 do 34225,1 ppm N u varianty V20 od 37937,0 do 40580,5 ppm N a u varianty V40 od 36890,1 do 37639,9 ppm N. V prvním opakování neexistuje statisticky významný rozdíl pouze u variant V20 a V40, mezi ostatními variantami existují statisticky významné rozdíly v obsahu dusíku v kořenech.

V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu dusíku v kořenech od 34090,4 do 34402,1 ppm N u varianty KK od 30905,0 do 31302,6 ppm N u varianty V20 od 37444,1 do 37570,2 ppm N a u varianty V40 od 36688,6 do 37576,1 ppm N. V druhém opakování neexistuje statisticky významný rozdíl pouze u variant V20 a V40, jako u prvního opakování. Mezi ostatními variantami existuje statisticky významný rozdíl v obsahu dusíku v kořenech.

Celkový rozsah hodnot obsahu dusíku v kořenech všech u variant byl od 29679,3 do 40580,5 ppm N. Mezi opakováními u variant V20 a V40 neexistují statisticky významné rozdíly. U variant K0 a KK mezi opakováními existují statisticky významné rozdíly.

Z výsledků je patrný statisticky významný rozdíl u variant V20 a V40, které vykazovaly vyšší obsah N v kořenech, s variantami K0 a KK, kde byl statisticky průkazně nižší obsah N v kořenech.

5.3.3 Obsah vápníku v prýtu

Stejně jako u vyhodnocování parametrů rostlina obsahu dusíku v prýtu, zde byla variabilita v počtu analyzovaných vzorků ovlivněna počtem nahrazených rostlin, což se týkalo variant KK a V40 pouze z prvního opakování. Nahrazené rostliny byly analyzovány odděleně a následně byly zahrnuty do statického vyhodnocování. U varianty KK nové rostliny průměrně vykazaly o 0,3 % vyšší obsah Ca oproti původním (nenahrazeným) rostlinám. U varianty V40 byl vykázan průměrný nárůst o 1,9 % u nových rostlin oproti původním rostlinám v obsahu vápníku v prýtu.

V prvním opakování se u varianty K0 vycházelo ze 3 hodnot (ze 3 vzorků souhrnného homogenního vzorku) u variant KK z 5 hodnot (2 vzorky původních rostlin a 3 vzorky nahrazených rostlin) u varianty V20 ze 2 hodnot a u varianty V40 ze 6 hodnot (3 původní a 3 nahrazené). V druhém opakování u všech variant se vycházelo ze 3 hodnot.

V Grafu 16 lze pozorovat, že v prvním opakování byl u varianty K0 rozsah hodnot obsahu vápníku v prýtu od 8528,0 do 9286,2 ppm Ca u varianty KK od 13078,4 do 13579,3 ppm Ca u varianty V20 od 9810,3 do 9854,5 ppm Ca a u varianty V40 od 9271,4 do 10343,0 ppm Ca. V prvním opakování existují statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v prýtu pouze u varianty KK s ostatními variantami (K0, V20 a V40), kde varianta KK vykazovala statisticky průkazně vyšší obsah Ca v prýtu oproti ostatním variantám. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

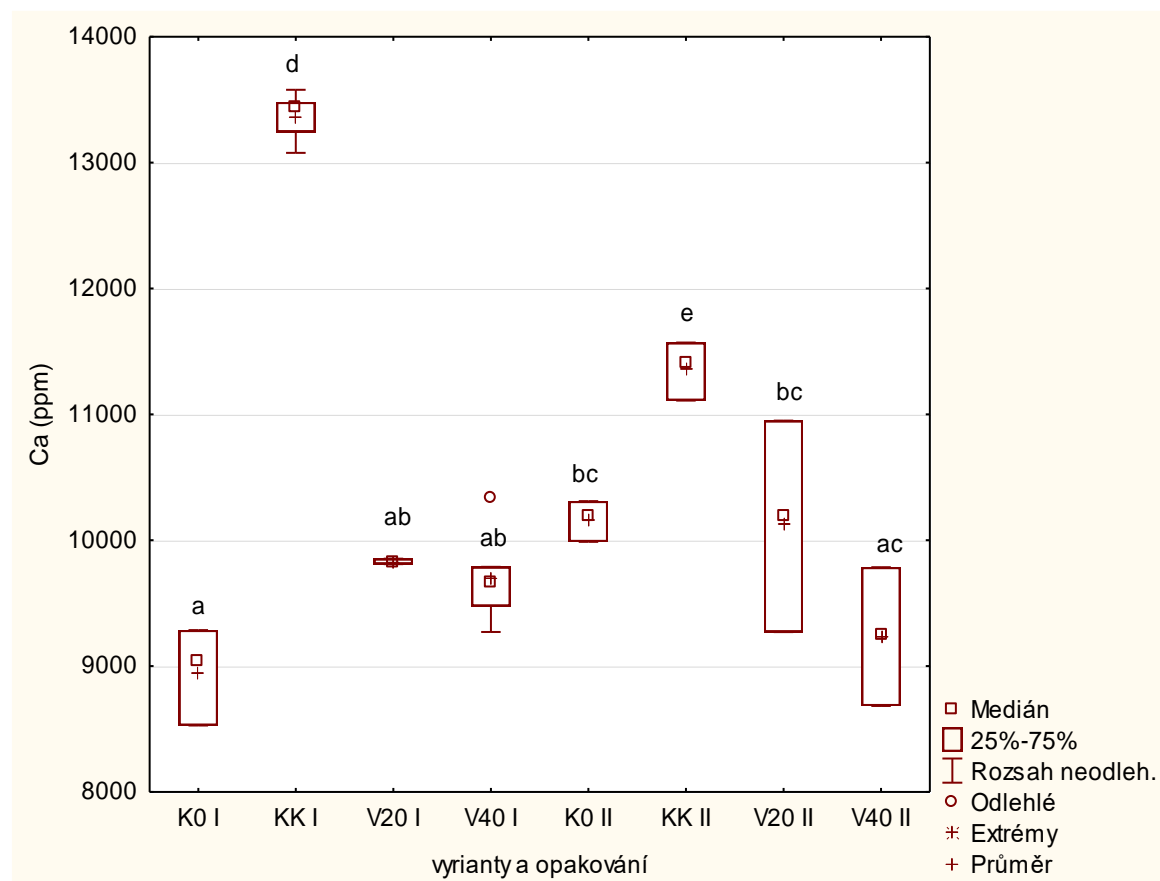
V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu vápníku v prýtu od 9987,8 do 10311,4 ppm Ca u varianty KK od 11110,2 do 11571,1 ppm Ca u varianty V20 od 9270,0 do 10951,0 ppm Ca a u varianty V40 od 8683,7 do 9785,9 ppm Ca. V druhém opakování bylo dosaženo stejných statisticky významných rozdílů jako v prvním opakování. Existují statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v prýtu pouze u varianty KK s ostatními variantami (K0, V20 a V40), kde varianta KK vykazovala statisticky průkazně vyšší obsah Ca v prýtu oproti ostatním variantám, avšak ne o tolik jako v prvním opakování. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot obsahu vápníku v prýtu u všech variant byl od 8528,0 do 13579,3 ppm Ca. Mezi opakováními existují statisticky významné rozdíly u stejných

variant pouze u variant K0 a KK a u variant V20 a V40 neexistují statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v prýtu.

Na základě těchto výsledků lze vyjádřit, že varianta KK v obou opakování vyjádřila statisticky průkazně vyššího obsahu vápníku v prýtu oproti variantám K0, V20 a V40, mezi kterými nebyl statisticky významný rozdíl v obou opakování.

Graf 16. Seskupený krabicový graf: Obsah Ca (ppm) v prýtu u jednotlivých variant a opakování.



5.3.4 Obsah vápníku v kořenech

Stejně jako u hodnocení obsahu dusíku v kořenech zde bylo množství analyzovaných vzorků jednak limitováno nízkou navázkou směsných vzorků kořenů, tak nahrazením rostlin v prvním opakování a také u varianty V40 v druhém opakování ze spekulace výskytu plísně na kořenech po sušení vzorků rostlin.

V prvním opakování u variant K0 a V40 se vycházelo ze 2 hodnot (ze 2 vzorků souhrnného homogenního vzorku) a u variant KK I a V20 ze 3 hodnot (z toho u KK ze dvou původních rostlin a u V40 z jedné původní rostliny). V druhém opakování se vycházelo u variant K0, KK, a V20 ze 2 hodnot a u varianty V40 ze 3 hodnot.

Z grafu 17 lze stanovit, že v prvním opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu vápníku v kořenech od 14932,4 do 16388,8 ppm Ca u varianty KK od 24389,7 do 28265,4 ppm Ca u varianty V20 od 10309,7 do 10316,2 ppm Ca a u varianty V40 od 13021,6 do 14538,5 ppm Ca. V prvním opakování bylo vykázáno stejných statisticky významných rozdílů v obsahu vápníku v kořenech jako v obou opakování obsahu vápníku v prýtu. Existují

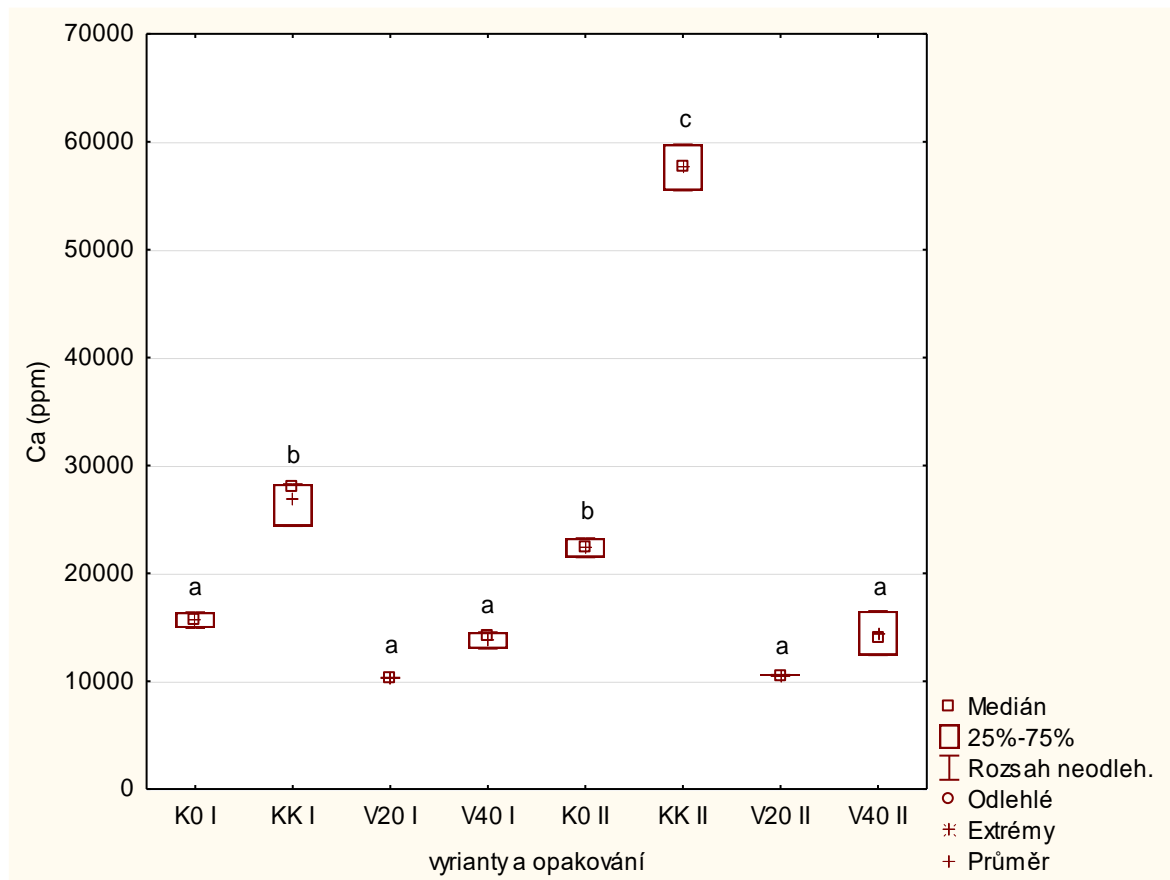
statisticky významné rozdíly v obsahu vápníku v kořenech pouze u varianty KK s ostatními variantami (K0, V20 a V40), kde varianta KK vykázala statisticky průkazně vyšší obsah Ca v kořenech oproti ostatním variantám. Mezi ostatními variantami neexistují statisticky významné rozdíly.

V druhém opakování u varianty K0 byl rozsah hodnot obsahu vápníku v kořenech od 21492,3 do 23259,3 ppm Ca u varianty KK od 55487,3 do 59759,9 ppm Ca u varianty V20 od 10482,7 do 10595,6 ppm Ca a u varianty V40 od 12414,7 do 16503,3 ppm Ca. V druhém opakování je z grafu patrného stejného trendu jako v prvním opakování, ale bylo zde vykázáno statisticky významného rozdílu i s variantou K0 s ostatními variantami. Neexistuje statisticky významný rozdíl v obsahu vápníku v kořenech pouze mezi variantami V20 a V40, mezi ostatními variantami existují statisticky významné rozdíly.

Celkový rozsah hodnot obsahu vápníku v kořenech všech u variant byl od 10309,7 do 59759,9 ppm N. Mezi opakováními u variant V20 a V40 neexistuje statisticky významný rozdíl. U variant K0 a KK mezi opakováními existují statisticky významné rozdíly.

Z výsledků je patrný stejný statisticky významný rozdíl v obsahu vápníku v kořenech jako u obsahu vápníku v prýtu. Varianta KK v obou opakování vyjádřila statisticky průkazně vyššího obsahu vápníku v prýtu oproti variantám K0, V20 a V40, mezi kterými nebyl statisticky významný rozdíl v obou opakování (kromě varianty K0 v druhém opakování).

Graf 17. Seskupený krabicový graf: Obsah Ca (ppm) v kořenech u jednotlivých variant a opakování.



6 Diskuze

6.1 Hodnocení živného roztoku

Cílem této práce bylo dodržet u všech variant stejný obsah celkového dusíku, který byl statisticky potvrzen, pouze u druhého opakování u varianty KK došlo ke statisticky průkaznému navýšení obsahu celkového dusíku, což je patrné v grafu 1. U varianty KK bylo v průběhu pokusu rostlinami odčerpáno větší množství vody/živného roztoku, což je uvedené v tabulce 9. Z důvodu nestejnomyšerného úbytku živin a H₂O se hodnota EC měnila. Při doplňování živného roztoku DEMI H₂O a s ní patřičného poměru živin došlo ke kumulaci živin v živném roztoku, což je patrné pro dusík v grafu 2 znázorňujícím dynamiku obsahu celkového dusíku v roztoku. Dále toto lze potvrdit na základě vyhodnocení obsahu a dynamiky obsahu vápníku (v grafech 7 a 8) v živném roztoku, u kterého došlo u varianty KK při druhém opakování k nadměrnému nárůstu obsahu Ca v živném roztoku oproti prvnímu opakování. Tento nárůst obsahu živin v živném roztoku lze podložit i hodnotou EC živného roztoku, kdy tento nárůst hodnoty z původních 1,6 stoupl až na hodnotu 3,8, což byla v tomto pokusu nejvyšší hodnota EC. Tento pokus byl závislý na zpětné analýze vzorků živného roztoku, tudíž v průběhu vegetace nebyla známa aktuální koncentrace jednotlivých živin v živném roztoku. GardeniX s.r.o. (2022) doporučuje aplikovat hnojiva pomocí automatických dávkovacích systémů. Mnoho hydroponických pěstitelů vypouští a nahrazuje živný roztok v týdenních intervalech (Langenfeld et al. 2022). Mnohdy se doporučuje časté monitorování jednotlivých živin v roztoku, potřebu monitorování však lze minimalizovat doplňováním roztoku pomocí principů hmotnostní bilance. Monitorovací přístroje se obvykle snaží udržet požadovanou koncentraci každé živiny v roztoku. Rychle rostoucí rostliny však hladoví po živinách s aktivním příjmem. To znamená, že budou pokračovat ve vstřebávání živin, aniž by věděly, kdy přestat. Pokud je koncentrace živin udržována na počátečních úrovních, rostlina je bude nadále absorbovat, někdy až na toxické úrovni. Optimální konstrukce hydroponického systému usnadňuje aplikaci principů hmotnostní bilance (Langenfeld et al. 2022).

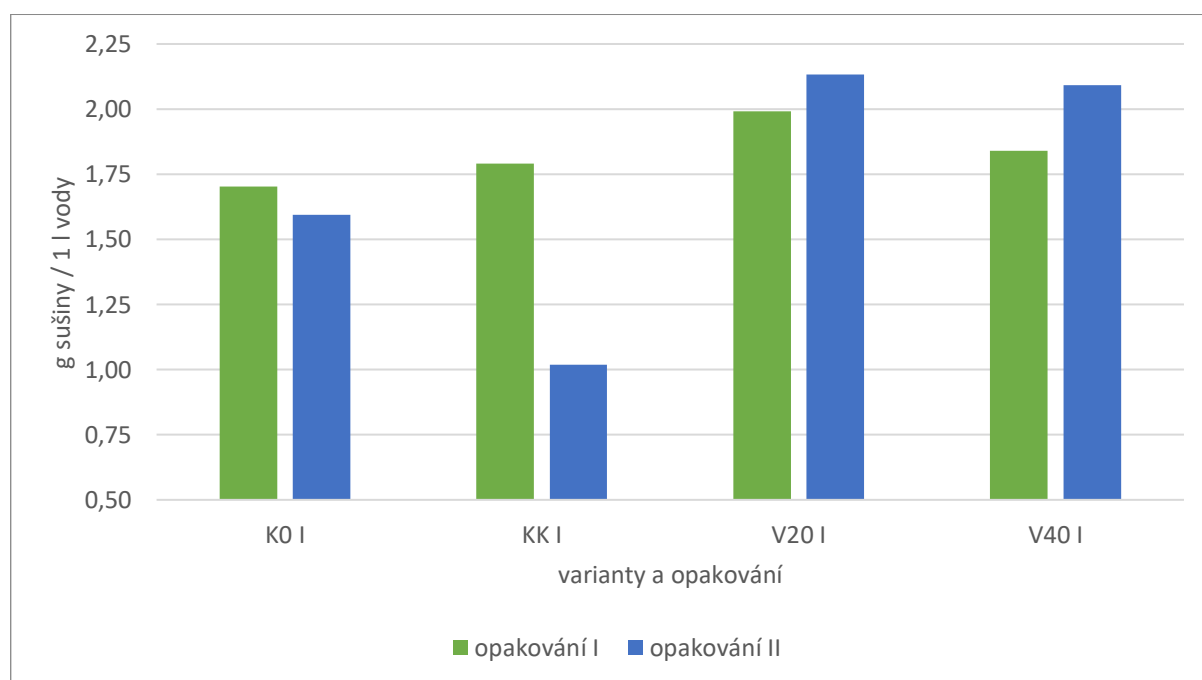
Tabulka 9. Doplněné množství DEMI H₂O v průběhu vegetace u jednotlivých variant a opakování.

Opakování	I.	II.
Varianta	DEMI H ₂ O (L)	DEMI H ₂ O (L)
K0	21,64	22,61
KK	28,83	44,15
V20	18,18	22,9
V40	21,25	23,32

Dále tento nežádoucí nadměrný odběr živného roztoku/H₂O můžeme pozorovat v grafu 18 znázorňujícím efektivitu využití vody (WUE). Hodnoty WUE u všech variant v obou opakování se vyskytovaly v rozmezí 1,59 až 2,13 g sušiny/l H₂O, kdežto tato varianta KK v druhém opakování s nadměrným odběrem H₂O vykázala hodnotu WUE 1,02 g sušiny/l H₂O. WUE se může také lišit mezi druhy, ale tyto rozdíly jsou menší, než se často předpokládá. Při pěstování ve skleníkovém prostředí v Loganu, UT, USA,

při okolním CO₂ hodnota WUE během růstu pšenice (*Triticum aestivum*), rajčat (*Solanum lycopersicum*) a salátu (*Latuca sativa*) byla 3,5; 3,8 a 3,3 g/l v daném pořadí (Langenfeld et al. 2022). U poměru minerálních forem N se liší také příjem a transport vody. Nízkou spotřebu vody rostlinami zásobovanými amoniem ve srovnání s těmi, které jsou zásobovány dusičnany, lze částečně přičíst malé listové ploše a nízkému poměru listové plochy. Bylo prokázáno, že rostliny jetele bílého (*Trifolium repens* L.) a pšenice (*Triticum aestivum* L.) pěstované na amonném základu měly vyšší efektivitu využití vody než rostliny pěstované na dusičnanech (Guo et al. 2007). To lze potvrdit i z výsledků této diplomové práce, kde si v grafu 18 můžeme povšimnout, že varianty V20 a V40 v obou opakování vykázaly hodnoty WUE v rozmezí 1,84–2,13 g/l. U variant K0 a KK se tyto hodnoty pohybovaly v rozmezí 1,59–1,79 g/l, kromě již zmíněné varianty KK v druhém opakování.

Graf 18. Vyjádření hodnot efektivity využití vody (WUE) v g sušiny na litr vody u jednotlivých variant a opakování.



Proč k takovému extrémnímu úbytku v živném roztoku došlo, není zcela jasné. Tento úbytek může být způsoben více faktory, pro které nebyla získána podkladová data. Na základě nárůstu obsahu jednotlivých živin v živném roztoku a nárůstu hodnoty EC lze vyloučit faktory související s úbytkem živného roztoku spojeným se ztrátami živin. Pro možnosti úbytku mohou být brány v potaz faktory související s výparem H₂O nebo s odběrem H₂O a následnou transpirací rostlin. Z důvodu vykázání tohoto extrému pouze ve druhém opakování nelze tento vliv přičítat složení živného roztoku a poměru forem dusíku. Zvýšenou transpirací nelze přičítat ani okolním podmínkám, které byly pro všechny varianty a opakování nastaveny a hlídány za pomoci řízených podmínek v klimaboxu. Možným vysvětlením pro tento nadměrný úbytek může být vliv 12 V ventilátorů, které měly za úkol výměnu a pohyb vzduchu především v oblasti středu salátů, aby nedošlo k popálení špiček salátů. Ventilátory byly uchyceny pomocí drátků k vnitřní stěně klimaboxu, kdy mohlo dojít k posunutí a změně směru/úhlu, popřípadě rychlosti proudění vzduchu a tím ovlivnění transpirace rostlin. Jak je již v literární části popsáno, že rostlinná transpirace a současně spotřeba vody jsou plně

nezávislé na metabolických funkcích spojených s asimilací živin, mohou klimatické parametry ovlivnit rychlost příjmu živin jinak než rychlost příjmu vody. V důsledku toho se poměry příjmu živin/vody mohou měnit za odlišných klimatických podmínek, což znamená, že optimální složení živného roztoku může záviset také na místních klimatických podmínkách (Savvas & Gruda 2018).

U obsahu vápníku nebyl kladen tak vysoký důraz na jeho stejnou koncentraci v živném roztoku, ta se lišila na základě složení jednotlivých hnojiv vytvořených pro jednotlivé varianty. Z důvodu změny poměru forem dusíku se musel změnit i zdroj doplnění těchto forem. Kvůli vázanosti a složení jednotlivých solí dusíku se zde měnil poměr doplněného vápníku. Hlavním použitým zdrojem nitrátového dusíku byl dusičnan vápenatý (tetrahydrát; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), tudíž s požadavkem snížení obsahu nitrátového dusíku klesal obsah vápníku v živném roztoku. U varianty V40 s nejnižším obsahem nitrátového dusíku musel být vápník doplněn pomocí chloridu vápenatého (CaCl_2). Výsledná koncentrace vápníku v živném roztoku byla teoreticky vypočítána a vyjádřena v tabulce 6 a hodnoty naměřené z živného roztoku byly uvedeny v tabulce 8. Pro normální růst rostlin je nutný stálý přísun 100–1000 ppm (1–10 mM) Ca^{2+} (Mitra 2017). Yap et al. (2022) uvádí, že je u salátu vyžadována vyšší koncentrace vápníku v živném roztoku v rozmezí 150 až 250 mg/l (ppm) kvůli jeho vysoké náchylnosti k popálení špiček.

6.1.1 Hodnocení obsahů forem dusíku v živném roztoku

Mezi variantami a opakováními neexistují statisticky významné rozdíly v obsahu jednotlivých forem dusíku v živném roztoku z odebraných vzorků v průběhu vegetace (kromě varianty KK v druhém opakování u nitrátové formy a mezi variantami K0 a V40 v prvním opakování u amonné formy dusíku). U nitrátové formy dusíku v průběhu vegetace došlo k nárůstům a poklesům jeho obsahu v živném roztoku (viz graf 3), což zapříčinilo, i přes jeho rozdílnou počáteční koncentraci, vykázání statisticky nevýznamných rozdílů. U varianty K0 byl obsah nitrátového dusíku konstantní a nevykazoval výrazné změny v obsahu, protože nebyl ovlivňován příjmem amonné formy, která v této variantě nebyla přítomna. U zbylých variant obsahujících amonnou formu dusíku došlo z počátku k nárůstu obsahu nitrátového dusíku v živném roztoku. Po vyčerpání amonné formy z živného roztoku rostlinou se teprve obsah nitrátového dusíku v živném roztoku snižoval. Dynamiku obsahu amonného dusíku můžeme pozorovat v grafu 4. U varianty KK v prvním opakování došlo k vyčerpání amonné formy v 5. týdnu a ve druhém opakování v 6. týdnu, následně po těchto týdnech došlo k poklesu obsahu nitrátové formy. U varianty V20 v prvním opakování došlo k vyčerpání amonné formy až během posledního týdne růstu, a proto nitrátová forma nevykázala značný pokles jeho obsahu. Ve druhém opakování byl v průběhu 5. týdne vykázán razantní pokles obsahu amonné formy a s ní nepatrně začal klesat obsah nitrátové formy, následně byl vykázán pokles obou forem až do konce vegetace. U varianty V40 v prvním opakování došlo k odčerpání amonné formy až poslední týden růstu, a proto již nedošlo k poklesu nitrátové formy v roztoku a v průběhu růstu byl vykázán jen nárůst jeho koncentrace. Ve druhém opakování došlo k odčerpání amonné formy o týden dříve (předposlední týden) a tudíž došlo k poklesu nitrátové formy v průběhu posledního týdne růstu. Na základě těchto

výsledků lze vyjádřit preferenci příjmu amonné formy dusíku před nitrátovou formou rostlinami.

Příjem NH_4^+ je relativně energeticky výhodný proces ve srovnání s příjmem NO_3^- , což vede k tomu, že mnoho rostlinných druhů preferuje NH_4^+ jako zdroj N. Paradoxně rostliny často nejsou schopny optimálně růst s vysokými koncentracemi NH_4^+ nebo s NH_4^+ jako výhradním zdrojem N, protože způsobuje silnou toxicitu pro rostlinné buňky. Toxicita amonia mění různé fyziologické charakteristiky a biochemické vlastnosti rostlin (Song et al. 2021). Rostliny jsou adaptovány na dusičnan jako zdroj dusíku, protože dusičnan je forma přítomná v dobře provzdušněné půdě. Synergické přínosy pro růst byly pozorovány, pokud jsou dusičnany a amonium dodávány společně a pokud NH_4^+ nepředstavuje více než 50 % z celkového obsahu N (Weil et al. 2020). V pokusech této diplomové práce nebylo cíleno na vyšší obsah amonné formy než 50 % z celkového dusíku.

6.2 Hodnocení parametrů rostlin

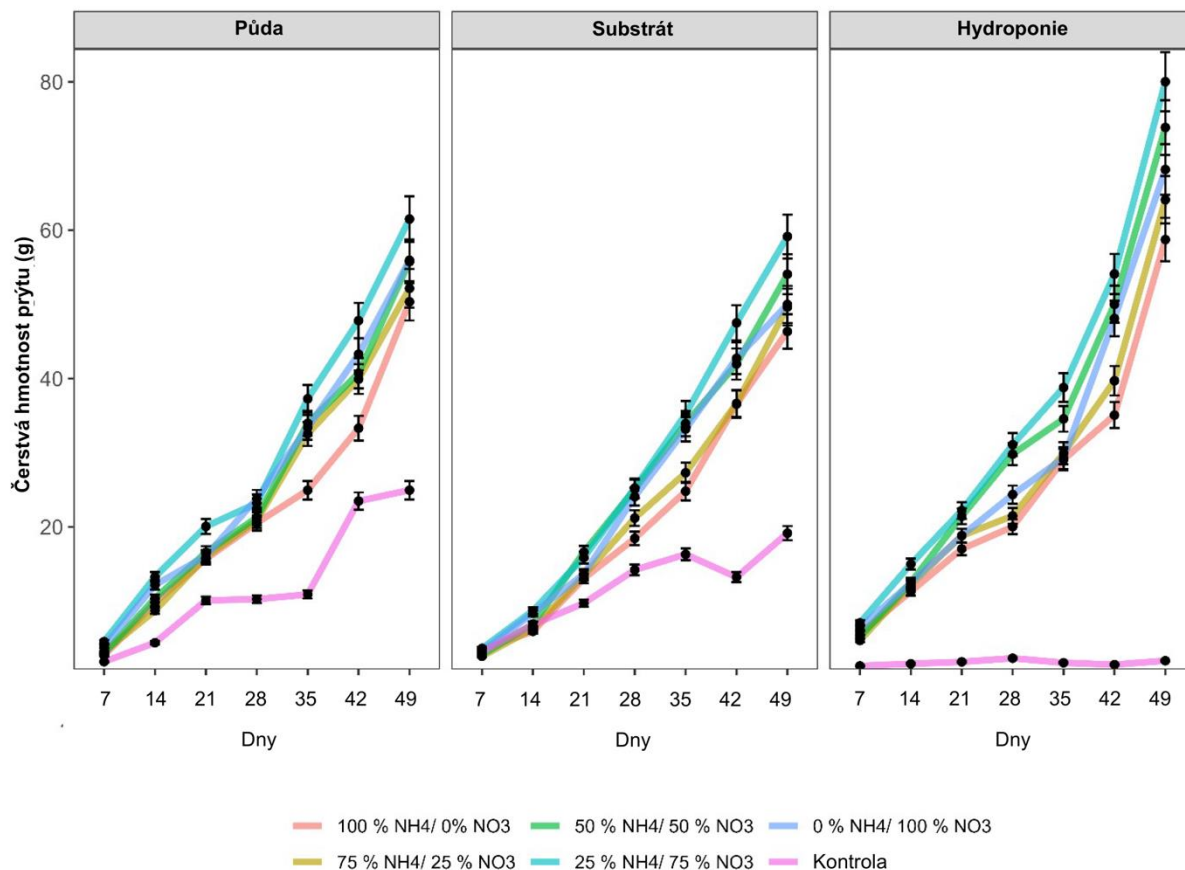
Pro hmotnost prýtu lze z výsledků pokusu říci, že stejné varianty mezi opakováními nevykázaly statisticky významné rozdíly, až na variantu V20, která v prvním opakování vykázala nižší výnos prýtu oproti druhému opakování. Dále mezi variantami neexistují statisticky významné rozdíly pro potvrzení vlivu jednotlivých variant s různým poměrem amoného dusíku v živném roztoku na měnící se hmotnost prýtu. Ani na základě výsledků hmotnosti kořenů nelze pozorovat vliv jednotlivých variant s různým poměrem amoného dusíku v živném roztoku na měnící se hmotnost kořenů. Na základě těchto výsledků nelze potvrdit hypotézu číslo 1. Hameed et al. (2022) porovnávali vliv poměru forem dusíku v půdě, substrátu bez půdy a hydroponických kultivačních systémech. Aplikovali poměry: 100 % NH_4^+ / 0 % NO_3^- , 75 % NH_4^+ / 25 % NO_3^- , 50 % NH_4^+ / 50 % NO_3^- , 25 % NH_4^+ / 75 % NO_3^- , 0 % NH_4^+ / 100 % NO_3^- a kontrolu bez aplikace dusíku. Jejich výsledky ukázaly, že poměr 25 % NH_4^+ / 75 % NO_3^- zvýšil relativní obsah chlorofylu i biomasu salátu ve všech pěstitelských systémech, což je patrné z grafu 19. Nejlepší výsledky však vykazoval hlávkový salát pěstovaný v systému hydroponického pěstování. Z výsledků pokusů této diplomové práce bylo tohoto trendu dosaženo pouze v druhém opakování, kdy varianta V20 dosáhla nejvyššího výnosu biomasy prýtu.

Z důvodu poklesu obsahu amoného dusíku, a naopak nárůstu nitrátového dusíku v živném roztoku nebyl dodržen a zachován prvotní poměr forem dusíku v průběhu celé vegetace salátů. Z tohoto důvodu nebyla již v posledních týdnech pokusu v intenzivním růstu salátů dostatečná/plánovaná koncentrace amoného dusíku zachována, což mohlo zapříčinit nedostatečný projev amonné formy dusíku v patřičných koncentracích. V některých případech byla amonná forma na konci pokusu zcela vyčerpána a rostliny byly nuceny změnit hlavní zdroj příjmu dusíku a přejít na výživu nitrátovým dusíkem. Za těchto okolností již nebyl zkoumán vliv původního poměru jednotlivých forem dusíku v živném roztoku.

Citlivost rostlin na amoniak je kritická během raných fází růstu (zejména sazenic) (Lecuona 2014) na základě toho bychom mohli usuzovat, že rostliny preferují určitou formu dusíku v jednotlivých fázích růstu. Je důležité dodávat živiny ve správný čas s požadovanou koncentrací. Proto je také důležité upravovat hodnoty EC a pH živného roztoku (Lakhia et al. 2018) Bylo by tedy pravděpodobně efektivnější v průběhu růstu měnit poměr forem dusíku

dle potřeb rostlin, nikoli cílit na konstantní doplňování stejného poměru živin k odebranému množství roztoku.

Graf 19. Účinek různých aplikovaných poměrů $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ v různých časových intervalech na čerstvé biomase hlávkového salátu pěstovaného v půdě, substrátu a v hydroponickém systému dle Hameed et al. (2022).



Dalším proměnným faktorem, který je nutné vzít v potaz, byla celková koncentrace živin v živném roztoku vyjádřena hodnotou EC, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. U všech variant došlo v průběhu pokusu k navýšení hodnoty EC. Počáteční hodnota u všech variant se pohybovala v rozmezí 1,6 a 2,0. U všech variant kromě varianty V40 v obou opakováních a varianty KK v druhém opakování došlo k pozvolnému nárůstu hodnoty EC, tato konečná hodnota se pohybovala v rozmezí 2,2 až 2,5. U varianty V40 se u obou opakováních dostala na hodnotu 3,1 a 3,2. Tento vyšší nárůst EC oproti předchozím variantám lze přičíst jinému složení solí v živném roztoku s vyšším zastoupením chloridu vápenatého a amonného. To mohlo vést ke kumulaci chlóru v živném roztoku a také by to vysvětlovalo vyšší počáteční hodnotu EC. U varianty KK v druhém opakování došlo k extrémnímu navýšení hodnoty EC oproti ostatním variantám až na hodnotu 3,8. Tento extrémní nárůst je vysvětlován již zmíněným vysokým úbytkem H_2O /živného roztoku a následně k nadměrnému doplnění živin. Miller (2019) uvádí, že hodnota EC u pěstování salátu by se měla udržovat mezi 1,0 a 2,0 pro optimální růst. Příliš vysoké EC mohou mít za následek osmotický stres pro rostliny, které inhibuje příjem živin. Tento problém by mohl být řešen, jak již bylo uvedeno výše, buď aplikací hnojiva pomocí automatických dávkovacích systémů nebo vypouštěním a nahrazováním živných roztoků v týdenním

intervalu, monitorováním jednotlivých živin v roztoku, anebo doplňováním roztoku pomocí principů hmotnostní bilance.

Dalším faktorem byla zvýšená úprava pH u varianty V40 z důvodu vyššího odběru amonného dusíku a tím okyselování živného roztoku. Hodnota pH u této varianty se mezi každodenními úpravami (jedenkrát za den) byla schopna snížit až o hodnotu pH 1,9. U zbylých variant nedocházelo k takovýmto extrémním změnám pH. Nadměrné množství NH_4^+ v roztoku může snižovat pH pod 4, což způsobuje zvýšenou rozpustnost kovů, to má za následek jejich nadměrný příjem a potenciální toxicitu. Pro většinu plodin, včetně hlávkového salátu, rajčat, pšenice a petúnie, musí být poměr NO_3^- k NH_4^+ v hydroponickém roztoku alespoň 20:1, aby nedošlo ke snížení pH (Langenfeld et al. 2022). Pěstitelé s hydroponickými systémy mohou zhoršovat podmínky pro růst rostlin přílišným kolísáním hladiny pH. Důvodem je to, že rostliny mohou tolerovat vysoké hladiny NH_4^+ při nízkém pH, ale jakmile se pH upraví (nebo zvýší), projeví se negativní účinky vysoké koncentrace amoniaku (Lecuona 2014). Optimální pH pro růst rostlin je mezi 5,8 a 6,3 (Gopinath et al. 2017).

Tabulka 10. Vyjádření nárůstu hodnoty EC v průběhu růstu u jednotlivých variant a opakování.

Varianta	Počáteční (15. den)	Konečná (49. den)
K0 I	1,6	2,2
KK I	1,6	2,5
V20 I	1,8	2,2
V40 I	2,0	3,1
K0 II	1,6	2,3
KK II	1,6	3,8
V20 II	1,7	2,3
V40 II	1,9	3,2

U poměru prýtu a kořenů můžeme také konstatovat stejný problém jako u hmotnosti prýtu a kořenů se změnou poměru forem dusíku a nárůstu hodnoty EC. Na základě statistického vyhodnocení nelze potvrdit vliv jednotlivých variant s různým poměrem amonného dusíku v živném roztoku na měnící se poměr prýtu a kořenů. Lze pouze pozorovat stabilní poměr prýtu a kořenů mezi opakováními u variant K0 a V40, mezi kterými v pokusu nebyly vykázány statisticky významné rozdíly a vykazovaly nejnižší poměr prýtu a kořenů z celkového pokusu. Varianta KK s variantou V20 v prvním opakování vykazovaly statisticky průkazně vyššího poměru prýtu a kořenů oproti variantám K0 a V40 z obou opakování. Varianta KK v druhém opakování vykazovala nižší poměr prýtu a kořenů a nevykazovala statisticky významný rozdíl s variantami K0 a V40. To mohlo být zapříčiněno již vysvětlovaným nadměrným úbytkem H_2O /živného roztoku u varianty KK a tím v druhém opakování nebylo dosaženo stejného trendu jako v prvním. Z grafu 10 je patrný nižší průměrný výnos prýtu u varianty KK v druhém opakování než v prvním a z grafu 11 je patrný vyšší průměrný výnos kořenů v druhém opakování než v prvním. Reakce rostlin na tuto změnu živného roztoku reagovala vyšší tvorbou kořenů a snížením tvorby prýtu oproti prvním opakování. Varianta V20 si udržela nejvyšší poměr prýtu a kořenů v obou opakování oproti ostatním variantám a zachovala si i statisticky nevýznamný rozdíl mezi prvním

a druhým opakováním. Při pomnutí nežádoucího nadměrného úbytku H_2O /živného roztoku u varianty KK v druhém opakování lze stanovit, že varianty KK a V20 vykázaly nejvyšší poměr prýtu a kořenů. Na základě těchto výsledků lze akceptovat potvrzení hypotézy číslo 2.

N forma ovlivňuje distribuci sušiny a spotřebu sacharidů. Amonium inhibuje růst kořenů, což má za následek vyšší poměr prýtu a kořene ve srovnání s dusičnanovou výživou nebo směsí dusičnanu a amonia v pšenici (Guo et al. 2007). Lze říci, že optimální aplikace N zlepšuje kvalitu salátu pěstovaného v půdě, substrátu a hydroponických kultivačních systémech, což v konečném důsledku zvyšuje nutriční hodnotu salátu (Hameed et al. 2022).

6.3 Hodnocení obsahu živin v rostlinách

Na základě výsledků tohoto pokusu lze z grafů 14 a 15 znázorňujících obsah dusíku v prýtu a kořenech stanovit, že amonné varianty V20 a V40 v obou opakování vykázaly statisticky průkazně vyšší obsahy celkového dusíku v prýtu a kořenech oproti variantám K0 a KK, které obsahovaly minimální až nulový obsah amonného dusíku. Na základě toho lze potvrdit hypotézu 3 ve vztahu k dusíku. Obsah dusíku v listech u rostlin s dostatkem N se mění od nízkých 2 do vysokých 5 % suché hmotnosti. Optimální rozsah dostatku listů nebo rostlin se liší podle rostlinných druhů. Obecně platí, že obsah dusíku v rostlinách je nejvyšší v raných fázích růstu a pak s růstem klesá (Jones 2005). Vyšší obsah celkového dusíku u těchto amonných variant mohl být vysvětlen tím, že amonný dusík NH_4^+ je z živného roztoku přijímán 100 až 1000× rychleji než NO_3^- (Langenfeld et al. 2022) a musí být hned zabudován do organické vazby z důvodu toxicity amoniaku. Což představuje velmi rychlý proces příjmu a zabudování NH_4^+ do organických vazeb obzvláště v pozdějších růstových fázích. Z tohoto důvodu bylo vykázáno vyšších obsahů celkového dusíku v rostlinách. Nitrátový dusík je pomaleji přijímán a déle uchovávan ve formě NO_3^- a také může být zásobně ukládán ve vakuolách bez vazeb na organické látky. Jelikož celkový obsah dusíku v rostlině byl stanoven Kjeldahlovou metodou, která není schopna stanovit volný nitrátový dusík v rostlinách a vakuolách, tudíž přijatý NO_3^- , který nebyl přeměněn a zabudován do organických vazeb nebyl touto metodou stanoven a započítán do celkového obsahu dusíku v rostlinách. Abu-Rayyan et al. (2004) uvádějí, že listy salátu vykazují široký rozsah akumulace dusičnanů, pohybující se od 190 do 6600 mg/kg (ppm). Obsah dusičnanů se také může lišit v rámci jednotlivých rostlin a také s vývojovou fází rostlin.

Pro obsah vápníku v prýtu a kořenech můžeme vyjádřit statisticky průkazný rozdíl pouze u varianty KK, která vykazala vyššího obsahu oproti ostatním variantám což je patrné z grafů 16 a 17. Langenfeld et al. (2022) uvádějí, že vysoký podíl NH_4^+ inhibuje další kationty, zejména Ca^{2+} . Roztoky se 100 % N jako NO_3^- mají tendenci zvyšovat příjem kationtů, zejména kationtů makroživin jako K^+ , Ca^{2+} a Mg^{2+} . Vysoký obsah NH_4^+ typicky snižuje vychytávání vápníku, což může způsobovat onemocnění související s transportem vápníku (pálení špiček salátů). Mitra (2017) uvádí, že zdravé rostliny rostoucí s dostatečným přísunem Ca^{2+} mají obsah Ca^{2+} od 0,1 do 5 % suché hmotnosti prýtu. Procentuální obsah Ca v prýtu salátů v pokusu této diplomové práce byl v rozmezí od 0,85 do 1,3 %. V tomto pokusu nebyl vykázan nedostatečný obsah Ca v rostlinách ani jeho nadbytek.

7 Závěr

- U obsahu celkového dusíku v živném roztoku bylo vykázáno statisticky nevýznamných rozdílů mezi variantami a opakováními, kromě varianty KK v druhém opakování, která vykázala vyšší koncentraci celkového dusíku v živném roztoku.
- Pouze nitrátová varianta K0 si zachovala v obou opakování stabilní koncentraci nitrátového/celkového dusíku v živném roztoku v průběhu vegetace.
- U všech variant došlo v průběhu vegetace k vyčerpání amonného dusíku z živného roztoku rostlinou až na nulovou koncentraci (0,01–1,65 ppm NH_4^+).
- Nejvyšší úbytek celkového dusíku z živného roztoku byl vykázán u varianty V40 a nejnižší u varianty K0. Celkově k vyšším úbytkům došlo v druhém opakování.
- Nejvyšších úbytků celkového dusíku z živného roztoku bylo vykázáno v posledních třech týdnech před sklizní (v průběhu 5. až 7. týdne).
- Varianty K0 a KK v obou opakování obsahovaly statisticky průkazně vyšší obsah vápníku v živném roztoku oproti variantám V20 a V40 (kromě varianty KK v prvním opakování, která nevykázala statisticky významný rozdíl s žádnou z variant) mezi kterými neexistují statisticky významné rozdíly.
- U všech variant a opakování si lze povšimnout zvýšení obsahu vápníku v živném roztoku v průběhu vegetace.
- Nejvyšší úbytek vápníku vykázala varianta KK v obou opakování. Celkově k vyšším úbytkům došlo v druhém opakování.
- **Hypotéza 1:** Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit výnos nadzemní biomasy a kořenů.

Tato hypotéza nebyla potvrzena na základě statistického vyhodnocení, které vykázalo statisticky nevýznamné rozdíly ve výnosu prýtu a kořenů. Na základě vykázání odlišného trendu výnosu sušiny mezi opakováními nelze vyjádřit potenciál výnosu.

- **Hypotéza 2:** Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit poměr nadzemní biomasy a kořenů.

Na základě prvního opakování lze hypotézu potvrdit, kdy varianty KK a V20 vykázaly statisticky významně vyšší poměr prýtu a kořenů oproti variantám K0 a V40. V druhém opakování na základě statisticky nevýznamných rozdílů nelze tuto hypotézu potvrdit. Varianta V20 si udržela nejvyšší průměrný poměr prýtu a kořenů v obou opakování oproti ostatním variantám a vykázala statisticky nevýznamný rozdíl mezi prvním a druhým opakováním.

- **Hypotéza 3:** Předpokládám, že se změnou poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku se bude měnit obsah živin v rostlině.

Danou hypotézu lze potvrdit na základě statisticky významných rozdílů v obsahu celkového dusíku v prýtu a kořenech. Z obou opakování lze vyjádřit, že varianty V20 a V40 statisticky průkazně vykazaly vyšších obsahů celkového dusíku v prýtu a kořenech oproti variantám K0 a KK.

Na základě obsahu vápníku v rostlině lze pouze vyjádřit statisticky průkazný rozdíl v obsahu vápníku v prýtu a kořenech v obou opakováních pouze u varianty KK, která vykazala statisticky průkazně vyšší obsah vápníku jak v kořenech, tak v prýtu oproti variantám K0, V20 a V40. Mezi variantami K0, V20 a V40 neexistují statisticky průkazné rozdíly.

- Doporučení pro další výzkum:
 - Zvolení vhodného systému s možností pěstování vyššího počtu rostlin pro každou variantu.
 - Použití automatizované úpravy pH a automatizovaných dávkovačů živin.
 - Zaměření se na vliv poměru forem dusíku v jednotlivých vývojových fázích růstu.
 - Zaměření na obsah dusičnanů v rostlinách ve vztahu ke změně poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku v živném roztoku.
 - Zaměření na efektivitu využití dusíku v hydroponických systémech (ve vztahu ke změně poměru amonného dusíku ku nitrátovému dusíku v živném roztoku).

8 Literatura

- Abu-Rayyan A, Kharawish BH, Al-Ismail K. 2004. Nitrate content in lettuce (*Lactuca sativa* L) heads in relation to plant spacing, nitrogen form and irrigation level. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **84**:931-936.
- Ainsworth EA, Rogers A. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, cell & environment* **30**:258-270.
- Asao T. 2012. *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. IntechOpen, Chorvatsko.
- Bittsánszky A, Pilinszky K, Gyulai G, Komives T. 2015. Overcoming ammonium toxicity. *Plant Science* **231**:184-190.
- Combrink NJJ. 2019. *Nutrient solution management*. Department of Agronomy Stellenbosch University, Africa.
- Cornelis JT, Kruyts N, Dufey JE, Delvaux B, Opfergelt S. 2012. Understanding Root Uptake of Nutrients, Toxic and Polluting Elements in Hydroponic Culture. Pages 153-180 in Asao T, editor. *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. IntechOpen, Chorvatsko.
- Coskun D, Britto DT, Kronzucker HJ. 2017. The nitrogen–potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. *Plant, cell & environment* **40**:2029-2041.
- Cowan N, White S, Olszewska J, Dobel A, Sim G, Eades LJ, Skiba U. 2022. Integration of algae treatment with hydroponic crop waste to reduce impact of nutrient waste streams. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment* **1**:203-215.
- Djidonou D, Leskovar DI. 2019. Seasonal changes in growth, nitrogen nutrition, and yield of hydroponic lettuce. *HortScience* **54**:76-85.
- Domingues DS, Takahashi HW, Camara CA, Nixdorf SL. 2012. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and electronics in agriculture*, **84**:53-61.
- Duan F, Giehl RF, Geldner N, Salt DE, von Wirén N. 2018. Root zone–specific localization of AMTs determines ammonium transport pathways and nitrogen allocation to shoots. *PLOS Biology* (e2006024) DOI: 10.1371/journal.pbio.2006024.
- e-GRO. 2019. Inner Leaf “Tip-Burn” In Lettuce. *Electronic Grower Resources Online*. Available from <https://urbanagnews.com/blog/education/inner-leaf-tip-burn-in-lettuce/> (accessed November 2022).
- El-Kazzaz KA, El-Kazzaz AA. 2017. *Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: an Introduction*. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal* **3**:63-72.

- Endoh S, Tsujii I, Kawashima M, Okumura Y. 2008. A new method for temperature compensation of electrical conductivity using temperature–fold dependency of fresh water. *Limnology* **9**:159-161.
- Esteban R, Ariz I, Cruz C, Moran JF. 2016. Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. *Plant Science* **248**:92-101.
- Fan X, Naz M, Fan X, Xuan W, Miller AJ, Xu G. 2017. Plant nitrate transporters: from gene function to application. *Journal of Experimental Botany* **68**:2463-2475.
- Feng H, Fan X, Miller AJ, Xu G. 2020. Plant nitrogen uptake and assimilation: regulation of cellular pH homeostasis. *Journal of Experimental Botany* **71**:4380-4392.
- Fussy A, Papenbrock J. 2022. An overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants* (e11091153) DOI: 10.3390/plants11091153.
- Galieni A, Di Mattia C, De Gregorio M, Specca, S, Mastrocola D, Pisante M, Stagnari F. 2015. Effects of nutrient deficiency and abiotic environmental stresses on yield, phenolic compounds and antiradical activity in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, **187**:93-101.
- GardeniX s.r.o. 2022. GardeniX – výživa rostlin. Available from <https://gardenix.cz> (accessed July 2022).
- Gopinath P, Vethamoni PI, Gomathi M. 2017. Aeroponics soilless cultivation system for vegetable crops. *Chemical Science Review and Letters* **6**:838-849.
- Grunert, O, Hernandez–Sanabria E, Vilchez–Vargas R, Jauregui R, Pieper DH, Perneel M, Van Labeke M–C, Reheul D, Boon N. 2016. Mineral and organic growing media have distinct community structure, stability and functionality in soilless culture systems. *Scientific reports* (e18837) DOI: 10.1038/srep18837.
- Gunter CC, Whipker BE, McCall I, Garzon J. 2009. Characterization of Nutrient Disorders of Lettuce in Silica Sand Culture. In *International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics* **843**:171-176.
- Guo S, Zhou Y, Shen Q, Zhang F. 2007. Effect of ammonium and nitrate nutrition on some physiological processes in higher plants—growth, photosynthesis, photorespiration, and water relations. *Plant Biology* **9**:21-29.
- Hachiya T, Sakakibara H. 2017. Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and signaling in plants. *Journal of Experimental Botany* **68**:2501-2512.
- Hameed MK, Umar W, Razzaq A, Aziz T, Maqsood MA, Wei S, Niu Q, Huang D, Chang L. 2022. Differential Metabolic Responses of Lettuce Grown in Soil, Substrate and Hydroponic Cultivation Systems under NH₄⁺/NO₃⁻ Application. *Metabolites* (e12050444) DOI: 10.3390/metabo12050444.
- Hejnák V, Zámečnicková B, Zámečník J, Hnilička F. 2005. *Fyziologie rostlin*. Česká zemědělská univerzita, Praha.

- Hershey DR, Sand S. 1993. Electrical conductivity. *Science Activities* **30**:32-35.
- Hiroki R, Shimizu H, Ito A, Nakashima H, Miyasaka J, Ohdoi K. 2014. IDENTIFYING THE OPTIMUM LIGHT CYCLE FOR LETTUCE GROWTH IN A PLANT FACTORY. *Acta Horticulturae* **1037**:863-868.
- Hussain A, Iqbal K, Aziem S, Mahato P, Negi AK. 2014. A Review On The Science Of Growing Crops Without Soil (Soilless Culture) – A Novel Alternative For Growing Crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* **7**:833-842.
- Jones JB Jr. 2005. *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower* Second Edition. CRC press, USA.
- Khan SR, Sharma B, Chawla PA, Bhatia R. 2022. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP–OES): a powerful analytical technique for elemental analysis. *Food Analytical Methods* **15**:666-688.
- 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.
- Langenfeld NJ, Pinto DF, Faust JE, Heins R, Bugbee B. 2022. Principles of nutrient and water management for indoor agriculture. *Sustainability* (e10204) DOI: .3390/su141610204.
- Lecuona A. 2014. How important is the ammonium/nitrate ratio. *Commercial Hydroponic Farming*. Available from <https://www.commercial-hydroponic-farming.com/> (accessed January 2023).
- Li Q, Li X, Tang B, Gu M. 2018. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture. *Horticulturae* (e4040035) DOI: 10.3390/horticulturae4040035.
- Liu Y, von Wirén N. 2017. Ammonium as a signal for physiological and morphological responses in plants. *Journal of Experimental Botany* **68**:2581-2592.
- Mahlangu RIS, Maboko MM, Sivakumar D, Soundy P, Jifon J. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non–circulating hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition* **39**:1766-1775.
- Masclaux–Daubresse C, Daniel–Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany* **105**:1141-1157.
- Miller AG. 2019. *Optimization of Greenhouse Hydroponic Lettuce Production* [Doctoral dissertation]. Purdue University Graduate School, West Lafayette; Indiana.
- Mitra G. 2017. Essential plant nutrients and recent concepts about their uptake. Pages 3-36 in Naeem M, Ansari AA, Gill SS, editors. *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*. Springer, Switzerland.

- Muñoz–Huerta RF, Guevara–Gonzalez RG, Contreras–Medina LM, Torres–Pacheco I, Prado–Olivarez J, Ocampo–Velazquez RV. 2013. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors* **13**:10823-10843.
- Nacry P, Bouguyon, E, Gojon A. 2013. Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource. *Plant and Soil* **370**:1-29.
- Resh HM. 2012. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower seventh edition*. CRC press, Boca Raton.
- Sáez–Plaza P, Michałowski T, Navas MJ, Asuero AG, Wybraniec S. 2013. An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part I. Early history, chemistry of the procedure, and titrimetric finish. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* **4**:178-223.
- Sambo P, et al. 2019. Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Frontiers in Plant Science* (e923) DOI: 10.3389/fpls.2019.00923.
- Santamaria P, Elia A, Serio F. 2002. Effect of solution nitrogen concentration on yield, leaf element content, and water and nitrogen use efficiency of three hydroponically–grown rocket salad genotypes. *Journal of plant nutrition* **25**:245-258.
- Sapkota S, Sapkota S, Liu Z. 2019. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae* (e5040072) DOI: 10.3390/horticulturae5040072.
- 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.
- Silber A, Bar–Tal A. 2019. Nutrition of substrate–grown plants. Pages 197-257 in Raviv M, Lieth H, Bar–Tal A, editors. *Soilless culture: Theory and practice: Theory and practice*. Elsevier, United Kingdom.
- Skalar. 2007. The San++ continuous flow analyzer. Sakalar, Netherlands. Available from www.skalar.com (accessed January 2023).
- Son JE, Kim HJ, Ahn TI. 2020. Hydroponic systems. In *Plant factory* **20**:273-283.
- Song J, Yang J, Jeong BR. 2021. Growth, quality, and nitrogen assimilation in response to high ammonium or nitrate supply in cabbage (*Brassica campestris* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Agronomy* (e2556) DOI: 10.3390/agronomy11122556.
- Sublett WL, Barickman TC, Sams CE. 2018. The effect of environment and nutrients on hydroponic lettuce yield, quality, and phytonutrients. *Horticulturae* (e4040048) DOI: 10.3390/horticulturae4040048.
- Tegeder M, Masclaux-Daubresse C. 2018. Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use. *New phytologist* **217**:35-53.

- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2012. Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. Pages 1-22 in Asao T, editor. Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches. IntechOpen, Chorvatsko.
- van Eysinga JPNLR & Smilde KW. 1971. Nutritional disorders in glasshouse lettuce. Centre for Agricultural publishing and documentation, Wageningen.
- van Eysinga JPNLR, Smilde KW. 1981. Nutritional disorders in glasshouse tomatoes, cucumbers and lettuce. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Vaněk V, Balík J, Černý J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Valtera J. 2012. Výživa zahradních plodin. Nakladatelství Academia, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press, Praha.
- Waiba KM, Sharma P, Sharma A, Chadha S, Kaur M. 2020. Soil-less vegetable cultivation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **9**:631-636.
- Wang YY, Cheng YH, Chen KE, Tsay YF. 2018. Nitrate transport, signaling, and use efficiency. *Annual review of plant biology* **69**:85-122.
- Weil S, Barker AV, Zandvakili OR, Etemadi F. 2020. Plant growth and calcium and potassium accumulation in lettuce under different nitrogen regimes of ammonium and nitrate nutrition. *Journal of Plant Nutrition* **44**:270-281.
- Yap MY, Lim MW, Brendan LKW. 2022. Influence of calcium macronutrient on tip burn occurrence in hydroponically cultivated lettuces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (e12003) DOI: 10.1088/1757-899X/1257/1/012003.
- YARA International ASA. 2021. Crop nutrition – Lettuce. Yara UK Limited. Available from <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/lettuce/> (accessed October 2022).
- Zhang Y, Zha L, Liu W, Zhou C, Shao M, Yang Q. 2021. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen. *Plants* (e176) DOI: 10.3390/plants10010176.
- Zhu X, Yang R, Han Y, Hao J, Liu C, Fan S. 2020. Effects of different NO₃⁻: NH₄⁺ ratios on the photosynthesis and ultrastructure of lettuce seedlings. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **61**:459-472.
- Zhu Y, Qi B, Hao Y, Liu H, Sun G, Chen R, Song S. 2021. Appropriate NH₄⁺/NO₃⁻ ratio triggers plant growth and nutrient uptake of flowering Chinese cabbage by optimizing the pH value of nutrient solution. *Frontiers in Plant Science* (e656144) DOI: 10.3389/fpls.2021.656144.