

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Bilance makroprvků u okrasných letniček pěstovaných
v půdě nebo v zahradnickém substrátu**

Diplomová práce

Bc. Tomáš Kesl

Management zakládání a péče o zeleň

doc. Ing. Martin Kulháněk, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Bilance makroprvků u okrasných letniček pěstovaných v půdě nebo v zahradnickém substrátu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.4. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D za odborné vedení, vstřícnost, možnost osobní konzultace a pomoc při analýzách. Dále bych rád poděkoval Bc. Janu Vašíčkovi za spolupráci na experimentu.

Bilance makroprvků u okrasných letniček pěstovaných v půdě nebo v zahradnickém substrátu

Souhrn

Letničky jsou již po staletí oblíbeným prvkem městských záhonů, ale v dnešní době jsou klasické ornamentální záhony spíše v historických parcích a v městském prostoru je nahrazují takzvané kvetoucí louky. Problematika letniček spočívá v tom, že po odkvetení jsou odumřelé části rostliny odstraněny z místa pěstování a s nimi i rostlinou absorbované živiny.

Cílem této práce bylo kvantifikovat odběry makroprvků (N, P, K, S, Ca, Mg) vybraných druhů okrasných letniček, porovnat rozdíly odběru ze zahradnického substrátu a z několik let nehnojené zeminy, jež představuje podmínky výsadby v městském prostoru. Dalším cílem bylo pozorovat rozdíly odběrů mezi vybranými druhy okrasných letniček. Byl předpokládán výrazný rozdíl mezi odběrem ze zahradnického substrátu a ze zeminy, a také výrazný rozdíl mezi odběry vybraných druhů letniček.

Pokus probíhal ve skleníkových podmínkách a byly vybrány tyto druhy: *Centaurea cyanus*, *Calistephus chinensis*, *Nigella damascena*, *Papaver orientale* a *Lathyrus odoratus*, který nevyšel a byl nahrazen druhem *Escholzia californica*. Pokus byl založen 11.4. 2022 a rostliny byly sklizeny v době květu. Po sklizení rostlin byla pozorována dostupnost makroprvků v pěstebním médiu, koncentrace v rostlině a odběr makroprvků rostlinami.

Výsledky ukázaly vyšší odběr makroprvků ze substrátu oproti zemině, který byl prokázán u dusíku, fosforu, síry a hořčíku. Dále byl pozorován vliv druhu rostliny na odběr makroprvků, největší odběr byl prokázán u astry a chrpy a nejmenší u máku. V poslední řadě bylo diskutováno potenciální riziko deficitu makroprvků při periodickém pěstování stejných druhů letniček na stejném místě. Toto riziko bylo označeno jako malé a týkalo se pouze fosforu a síry. Ačkoli je dostupná řada studií o letničkách, tyto studie se zabývají kvalitativními faktory, jako jsou výška rostliny nebo barva květů, které jsou důležité při komercializaci okrasných rostlin. Do budoucna je proto třeba více se zabývat živinami v okrasných letničkách než pouze vizuálními faktory.

Klíčová slova: Makroprvky; Okrasné Letničky; Půda; Zahradnický substrát; Odběr živin

Macronutrients balance at ornamental annual plants growth in soil or garden growing substrate

Summary

Annual plants are for centuries common element of flowerbeds in urban areas, but recently they are being replaced by wildflower meadows. Problem of annual plant is in their removal after vegetation season, because with dead plant parts are removed valuable nutrients absorbed by the plants.

The aim of this study was to quantify macronutrients (N, P, K, S, Ca, Mg) uptake by selected species of ornamental annual plants and compare distinctions between uptake from gardening substrate and from a few years non-fertilized soil, which represent conditionals of typical urban area. Another objective was to compare differences among nutrients uptakes of selected annual species.

Experiment was conducted in greenhouse conditions and following species were selected: *Centaurea cyanus*, *Calistephus chinesis*, *Nigella damascena*, *Papaver orientale* and *Lathyrus odoratus*, which was later replaced by *Escholzia californica*, because of its fault emergence. The experiment was conducted on 11.4. 2022 and plants were harvested at flowering stage. After harvesting, macronutrients availability, concentration in plants and uptake were observed.

Results showed higher uptake from gardening substrate than from soil, this higher uptake was proven in case of nitrogen, phosphorus, sulfur and magnesium. Effect of plant species on macronutrients uptake was also observed, highest uptake appeared in *Centaurea* and *Calistephus* and lowest in *Papaver*. Last, but not least, potential risk of macronutrients deficit caused by periodical planting of same species of annual plants was discussed. This risk was described as low and was related only to phosphorus and sulfur. Although there is wide range of studies about annual plants, those studies analyze only visible factors as plant height or color of flowers, which are useful in commercialization of ornamental plants. More studies containing annual plants macronutrients uptake, concentration in plant and nutrients availability are needed to be done.

Keywords: Macronutrients; Ornamental annuals; Soil; Gardening substrate; Nutrients uptake

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 8 |
| Vědecká hypotéza a cíle práce..... | 9 |
| Literární rešerše..... | 10 |
| 1.1 Dusík | 10 |
| 1.1.1 Funkce..... | 10 |
| 1.1.2 Deficit..... | 11 |
| 1.2 Fosfor | 12 |
| 1.2.1 Funkce..... | 12 |
| 1.2.2 Deficit..... | 13 |
| 1.3 Draslík | 13 |
| 1.3.1 Funkce..... | 14 |
| 1.3.2 Deficit..... | 15 |
| 1.4 Síra | 15 |
| 1.4.1 Funkce..... | 16 |
| 1.4.2 Deficit..... | 17 |
| 1.5 Vápník | 18 |
| 1.5.1 Funkce..... | 19 |
| 1.5.2 Deficit..... | 19 |
| 1.6 Hořčík..... | 21 |
| 1.6.1 Funkce..... | 22 |
| 1.6.2 Deficit..... | 23 |
| 1.7 Makroprvky v okrasných rostlinách..... | 24 |
| Metodika..... | 26 |
| 1.8 Vegetační pokus | 26 |
| 1.8.1 Založení pokusu | 26 |
| 1.8.2 Sklizeň pokusu | 27 |
| 1.8.3 Zpracování vzorků a základní charakteristiky | 27 |
| 1.9 Laboratorní analýzy | 27 |
| 1.9.1 Stanovení aktivního pH a vodivosti | 27 |
| 1.9.2 Stanovení okamžitě přístupných makroprvků vodným výluhem | 27 |
| 1.9.3 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků metodou Mehlich 3..... | 28 |
| 1.9.4 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků metodou CAD..... | 28 |
| 1.9.5 Stanovení celkového obsahu N v rostlinách..... | 28 |
| 1.9.6 Stanovení celkového obsahu P, K, Ca, Mg a S v rostlinách..... | 28 |
| 1.10 Statistické vyhodnocení | 29 |

| | |
|--|----|
| Výsledky..... | 30 |
| 1.11 Vstupní rozbory..... | 30 |
| 1.12 Popisné charakteristiky | 31 |
| 1.13 Dusík, pH a vodivost | 34 |
| 1.14 Fosfor..... | 35 |
| 1.15 Draslík..... | 37 |
| 1.16 Síra | 39 |
| 1.17 Vápník..... | 41 |
| 1.18 Hořčík | 43 |
| 1.19 Výnos a odběr makroprvků z plochy | 44 |
| Diskuse..... | 46 |
| 1.20 Dusík..... | 46 |
| 1.21 Fosfor..... | 46 |
| 1.22 Draslík..... | 47 |
| 1.23 Síra | 48 |
| 1.24 Vápník..... | 48 |
| 1.25 Hořčík | 49 |
| 1.26 Potencionální riziko deficitu makroprvků..... | 49 |
| Závěr | 51 |
| Literatura | 52 |

Úvod

Letničky jsou rostliny, které dospívají a umírají během jedné vegetační sezóny. Jelikož umírají během stejné vegetační sezóny, kdy vyklíčily, musí nepříznivé podmínky přečkat v podobě semen. Tato životní strategie nám napovídá, že by mohly mít specifickou dynamiku vstřebávání živin z půdy, a to jak na začátku života, kdy musejí vyklíčit a vyrůst velice rychle aby byly konkurenceschopné, tak i na konci života, kdy musejí investovat živiny do tvorby semen.

Prvky, které rostlina potřebuje ve značném množství, se označují jako makroprvky, patří sem uhlík, kyslík a vodík, které se ukládají do karbohydrátů a tvoří až 96% sušiny rostlin. Dále sem patří dusík, fosfor, draslík, síra, vápník a hořčík. Každý prvek je spojován s určitými a různě důležitými procesy v rostlině, a proto lze předpokládat rozdílné zastoupení prvků v rostlině i rozdílné vyčerpávání z půdy.

Letničky jsou oblíbeným prvkem mnoha záhonů, a to městských i soukromých. V městských prostorech jich je často vysazováno velké množství, a to zpravidla každoročně a na stejná místa. Vysazování především stejných druhů na stejná místa by tak mohlo způsobit neúměrné odčerpávání konkrétního prvku nebo skupiny prvků z půdy. Přičteme-li fakt, že letničky jsou po odkvětu ze záhonu sklizeny a s nimi i živiny, může toto periodické sázení letniček vyústit v deficit makroprvků v půdě. Tyto deficity makroprvků by pak musely být kompenzovány přihnojováním letniček specifickými prvky.

Vědecká hypotéza a cíle práce

Hypotézy:

Lze předpokládat výrazné rozdíly mezi odběrem makroprvků ze zahradnického substrátu a z půdy.

Výrazné rozdíly budou pravděpodobně zjištěny i mezi jednotlivými druhy okrasných letniček.

Cíle:

Kvantifikovat odběr makroprvků vybranými druhy letniček.

Porovnat jednotlivé druhy letniček v souvislosti s odběrem makroprvků ze zahradnických substrátů nebo z půdy.

Vyhodnotit potenciální riziko vzniku deficitu makroprvků při periodickém pěstování daného druhu rostlin.

Literární rešerše

1.1 Dusík

Dusík je hned po kyslíku, vodíku a uhlíku, které tvoří uhlovodíky a většinu biomasy, nejzastoupenější prvek v rostlinách a představuje cca 2 % sušiny (Miller & Cramer, 2005). Je to jeden ze základních minerálních komponentů potřebných k růstu a vývoji. Rostliny přijímají dusík z půdy pomocí kořenů, a to jako nitrát (NO_3^-), amonné ionty (NH_4^+) nebo také v podobě organických sloučenin, například proteinů a aminokyselin (Paungfoo-Ionhienne et al., 2008; Schimel & Bennett, 2003). Ačkoli je atmosféra ze 78 % tvořena dusíkem, ve své stabilní plynné formě N_2 není pro rostliny dostupný. Určité druhy rostlin se adaptovaly, aby mohly tento vzdušný dusík využít, a navázali symbiotický vztah s bakteriemi v půdě, jež dokážou fixovat vzdušný dusík (Maathuis, 2009). Příkladem těchto druhů mohou být rostliny čeledi Fabaceae symbiotizující s bakteriemi rodu *Rhizobium* (Dovrat et al., 2020) nebo *Glycine max* s bakteriemi *Bradyrhizobium* a *Sinorhizobium* (D. N. Rodríguez-Navarro et al., 2011).

1.1.1 Funkce

Během životního cyklu rostliny projdou četnými změnami, jako je klíčení a přechod do autotrofního příjmu energie, přechod ze semenáčku do dospělce, a nakonec přechod do stavu zralosti. Tyto přechody během vývoje vyžadují přesné načasování, regulaci a přesné reakce na stav a změny okolí. Proto je nutný přísný management metabolismu a patřičné ukládání makroprvků, jako je dusík, který je tak spojován s regulací všech vývojových fází rostliny od embrya po reprodukci (Vidal et al., 2014). Dusík v kombinaci s uhlíkem a kyslíkem tvoří v rostlině aminokyseliny, základní stavební jednotky proteinů. Díky aminokyselinám může vzniknout protoplazma, která umožňuje buněčné dělení, a tedy i růst a vývoj rostliny. Všechny rostlinné enzymy jsou tvořeny proteiny, a proto je dusík tak důležitý pro enzymatické reakce. Dále je pak neméně důležitý pro fotosyntézu, jelikož dusík je nedílnou součástí molekul chlorofylu, jež je klíčový při fotosyntetických reakcích (Silva & Uchida, 2000). Další molekuly závislé na dusíku jsou purinové a pyrimidinové báze nukleotidů. Mimo tvorby nukleových kyselin jsou nukleotidy podstatné pro signalizaci, energetickou homeostázi a regulaci proteinů (Maathuis, 2009). Při nadměrné dostupnosti nitrátu dochází k jeho uložení do vakuol za účelem podpory turgoru (Maathuis, 2009; Näsholm et al., 2009). Rostlina musí stále vyhodnocovat dostupnost dusíku z okolí a patřičně reagovat. Kromě role živiny má nitrát i značnou roli signální (Bouguyon et al., 2015; Y. Y. Wang et al., 2018). Například protein NRT1.1 je nitrátový sensor s duální afinitou, dokáže reagovat na externí koncentrace nitrátu a ovlivňovat tak jeho příjem (Gojon et al., 2011; Ho et al., 2009).

Klíčivost a dormance semen je ovlivňována vnitřními i vnějšími podněty, mezi vnitřní se řadí hladina kyseliny abscisové a giberelinů (Kucera et al., 2005), mezi vnější se řadí například vlhkost půdy a z velké části dostupnost dusíku. Semena *Arabidopsis thaliana* vystavené vysoké koncentraci nitrátu nebo semena nitrátu přímo vystavená jsou méně dormantní než semena

vystavená menším koncentracím nebo semena namočená ve vodě (Alboresi et al., 2005), což naznačuje negativní korelaci mezi nitráty a dormancí semen.

Jako vegetativní fáze rostliny se zpravidla označuje čas od vytvoření semenáčku po dosažení reprodukční fáze rostliny. Tato je pak rozdělena do dvou podfází, a to juvenilní a dospělé (Huijser & Schmid, 2011; Poethig, 2013). Rozdíly mezi juvenilní a dospělou fází rostliny jsou morfologické, anatomické a fyziologické (Huijser & Schmid, 2011; Poethig, 2013). Například u *Arabidopsis thaliana* jsou juvenilní listy spíše kulaté s hladkými okraji a s trichomy na spodní straně listů. Naproti tomu dospělé listy jsou spíše vejčité se zoubkovanými okraji a trichomy na obou stranách listu (Abby Telfer, 1997; Chien & Sussex, 1996). Dalším rozdílem je, že ačkoli juvenilní rostlina dokáže tvořit pravé listy a pupeny, nedokáže reagovat na vnější podněty, které ovlivňují kvetení jako je například délka dne. Toto dokáže až v dospělosti, kdy je schopna reprodukce (Huijser & Schmid, 2011; Poethig, 2013). Nedostatek dusíku může spustit vyšší produkci microRNA miR156, která inhibuje přechod do dospělé fáze (Liu et al., 2013; S. Yu et al., 2013). Oproti tomu produkt fotosyntézy, glukóza, přechod do dospělé fáze podporuje, jelikož glukóza inhibuje produkci miR156 (Fischer et al., 2013; Liang et al., 2012; Pant et al., 2009). Toto tvrzení podporuje i zjištěná pozitivní korelace mezi dusíkem v rostlině a efektivitou fotosyntézy.

1.1.2 Deficit

Změny v obsahu v rostlině a dostupnost dusíku mohou změnit čas kvetení v závislosti na druhu. Podle Marín et al (2011) a Srikanth & Schmid (2011) dochází při nedostatku dusíku k předčasnému nebo ke zkrácenému kvetení, což může být vyloženo jako pokus uniknout před nepříznivými podmínkami do další generace. Například *Arabidopsis thaliana* rostoucí v půdě hojně na dusík kvetl o poznání později než jedinci rostoucí v půdě na dusík chudé. Podobně platí že rostliny rostoucí v deficitu dusíku mají obecně pomalejší vývoj (Lin & Tsay, 2017).

Je obecně známo, že při nižší dostupnosti dusíku mají rostliny znatelně omezený růst, a tudíž rostliny rostoucí na stanovišti s menší dostupností dusíku mají i menší biomasu než na stanovišti s větší dostupností dusíku. Hermans et al. (2006) popisuje, že v případě nižší dostupnosti dusíku rostliny investují velkou část biomasy do kořenů na úkor nadzemní části. V opačném případě, tedy při dostatku dusíku, investuje rostlina víc jak polovinu získaného dusíku do fotosyntetického aparátu. Můžeme tedy říci, že efekt nedostatku dusíku na množství biomasy je řízen především fotosyntézou, což podporuje i Li et al. (2013), jenž tvrdí že při nedostatku dusíku produkují rostliny výrazně méně chlorofylu, a to zejména ve svrchních listech.

Nedostatek dusíku se může projevit i viditelnými symptomy jako je chloróza, kdy jsou listy světle zelené až žluté a zbarvení se tvoří od špičky listu. V závislosti na závažnosti nedostatku dusíku může chloróza vyústit ve shazování starších listů až ve smrt jedince, což je způsobeno přesunem dusíku do mladších listů (Silva & Uchida, 2000).

1.2 Fosfor

Fosfor je nejvíce limitující prvek pro rostliny, na rozdíl od dusíku neexistuje atmosférická zásoba, která by mohla být přeměněna v použitelnou formu (Ezawa et al., 2002). Více než devadesát procent fosforu uloženého v půdě je fixováno, a je tak nevyužitelný pro rostliny. Časem, avšak velice pomalu, se fixovaný fosfor uvolňuje, a je rostlinám dostupný ve formě hydrogenfosforečnanových aniontů (HPO_4^{2-}) a dihydrogenfosforečnanových aniontů (H_2PO_4^-) (Silva & Uchida, 2000). Takto omezený přístup k fosforu dovedl rostliny k evolučním adaptacím, přes 90 % druhů rostlin si osvojilo mykorhizní symbiózu. Díky této symbióze získávají rostliny z houbových hyf až 80 % fosforu, a to i z větších vzdáleností, než sahá jejich kořenový systém (Maathuis, 2009). Jiné druhy se adaptovaly tvorbou klastrových kořenů, které mají větší povrch pro lepší příjem minerálních látek, a zároveň vylučují organické kyseliny, které rozpouštějí fosforečnan vápenatý na hydrogenfosforečnan a dihydrogenfosforečnan, jež jsou přijatelné pro rostlinu (Lambers et al., 2006; Maathuis, 2009). Pro rostliny bez specifických strategií, často z čeledí Brassicaceae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae a Urticaceae, je však dostupný pouze fosfor v těsné blízkosti kořenů nebo kořenového vlášení. Tyto rostliny pak často rostou na výživných stanovištích bohatých na fosfor, a často jsou zároveň nitrofilní (Lambers, 2022).

1.2.1 Funkce

Fosfor se zásadně podílí na koloběhu a ukládání energie ve formě a ADP (adenosintrifosfát), jeho protějšku ATP (adenosintrifosfát) i DNP (difosfopyridin nukleotid) a TNP (trifosfopyridin nukleotid) (Silva & Uchida, 2000). Při hydrolýze pyrofosfátové vazby ATP se uvolňuje cca 50 kJ/mol, což je hlavním mechanismem udržování energetické homeostáze. Kromě toho se ATP také podílí na dalších důležitých procesech, jako je například syntéza nukleových kyselin. Obdobou ATP coby energeticky bohatého fosfonukleotidu jsou UTP (uraciltrifosfát), GTP (guanintrifosfát) a CTP (cytosintrifosfát). UTP je energetickým zdrojem při syntéze škrobu, sacharózy a celulózy. CTP je pak energetickým zdrojem pro syntézu fosfolipidů. Mimo energetické molekuly tvoří nukleotidtrifosfáty páteř RNA a DNA (Maathuis, 2009).

Fosfolipidy jsou důležitou složkou tonoplastu, endoplazmatického retikula, Golgiho aparátu i jaderné, plazmatické a mitochondriální membrány. Dále mají signální roli při vývoji rostliny a při reakcích na stres (Cowan, 2006). Při nedostatku fosforu některé rostliny včetně *Arabidopsis thaliana* a *Hordeum vulgare* nahradily některé fosfolipidy lipidy bez fosforu (Andersson et al., 2003) a některé druhy z čeledi Proteaceae nahradily při vývoji listů fosfolipidy dokonce galaktololipidy a sulfolipidy (Lambers et al., 2012).

V rané fázi vývoje rostliny, tedy hned po vyklíčení, je potřeba velké množství fosforu v mladých buňkách pro jejich výkonný metabolismus a rychlé buněčné dělení, především v kořenových špičkách a výhoncích. Fosfor tak zajišťuje vývoj kořenového systému semenáčů a následně pak v dospělosti vývoj semen, plodů a významný je i při zahájení kvetení (Silva &

Uchida, 2000). V dospělosti při vývoji nových semen se ukládá velké množství fosforu do vakuol v komplexech myo-inositolových solí jako je například kyselina fytová (Maathuis, 2009).

1.2.2 Deficit

Deficit fosforu u rostlin může zapříčinit delší dospívání jedince i špatný vývoj plodu a semene. V důsledku velké spotřeby fosforu v rané fázi ontogeneze, může jeho deficit způsobit zpomalení až zastavení růstu jedince. Protože se fosfor v rostlině snadno transportuje, zapříčiňuje jeho deficit tmavé zeleno-modré zbarvení starších listů a při akutním deficitu i fialové zbarvení stonků a listů (Silva & Uchida, 2000). Další důsledek deficitu fosforu v rostlině je zásadní snížení efektivity fotosyntézy, pravděpodobně kvůli četným mezikrokům fotosyntetického procesu, jež vyžadují fosfát. Chloroplasty tak mají vysoké nároky na fosfor, které jsou za normálních podmínek uspokojeny díky trisafosfát-fosfátovému translokátoru (Maathuis, 2009).

Chen et al. (2018) zjistil, že jedinci druhu *Eustoma* rostoucí při nižší dostupnosti fosforu měli méně nodií, menší listovou plochu a delší kořeny než jedinci rostoucí při vyšší dostupnosti fosforu. Dále u jedinců rostoucích v nižší dostupnosti fosforu zjistil 80% redukci sušiny nadzemní části a 58% redukci sušiny kořenového systému, a tudíž i pokles poměru biomasy nadzemní části ku biomase kořenového systému. To odpovídá výsledkům (Mollier & Pellerin, 1999) a ukazuje, že nedostatek fosforu výrazně omezuje růst listů. Při nižší dostupnosti fosforu je nárok listů na asimiláty menší, a tudíž jsou asimiláty investovány do kořenového systému. Hermans et al (2006) prokázal, že deficit fosforu vede u rostlin ke změně distribuce uhlíku ve prospěch kořenového systému.

1.3 Draslík

Zemská kůra obsahuje 2,6 % draslíku a ten je tak jedním z nejtzastoupenějších prvků v půdě, avšak obsah draslíku v půdě se může lišit místo od místa, a to v závislosti na fyzikálních a chemických vlastnostech půdy (Maathuis, 2009). Draslík se v půdě obecně vyskytuje ve třech různých formách, a to ve vodorozpustné formě, výměnné formě a nevýměnné formě.

Většina draslíku v půdě, zhruba 98 %, existuje ve formě nevýměnné, a to jako pevně vázaný v minerálech, převážně ve slídách a živcích, ze kterých nejde vytěsnit roztoky neutrálních solí. Další nevýměnná forma jsou jílovité minerály jako illit a vermikulit, v jejichž mezivrstvách je draslík fixovaný. Dochází ke včlenění draselných kationtů do krystalické mřížky minerálů, a draslík tak funguje například jako spojnice lamel v tetraedrické vrstvě, jako je tomu u slíd. Bylo prokázáno, že krystalická mřížka illitu má prostor 1,56 nm, a po včlenění K^+ nebo jiných kationtů se sníží na 1,08 nm, čímž se mřížka uzavře a ionty se pevně váží. Při zvětrávání illitu některé takto vázané ionty migrují a jsou nahrazeny ionty o menším iontovém poloměru například Ca^{2+} , Na^+ a Mg^{2+} . Při degradaci minerálu se zvyšuje obsah vody a mřížka se rozpíná, dochází k úniku draselných kationtů. Předtím ale půda může působit jako konkurence pro rostliny, jelikož fixuje draselné kationty do nepřístupných forem (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2014).

Výměnnou formou draslíku jsou chápány draselné kationty vázané fyzikálně chemickou sorpcí na povrchu půdních koloidů, odkud mohou být vytěsněny roztoky neutrálních solí. Výměnný draslík je koncentrován především v jemných frakcích půdy, a to minerálních i organických. Jeho množství kolísá v závislosti na mineralogickém složení a druhu půdy, hnojení, stupni zvětrávání, druhu a koncentraci ostatních iontů, vodním režimu a půdní reakci. Z celkového draslíku v půdě tvoří výměnný draslík pouze asi 0,8 % v písčitéch půdách a až 3 % v humózních půdách například černozemích (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2014). Výměnný draslík je pro rostlinu velmi důležitý, jelikož takto vázané draselné kationty jsou převážně snadno přístupné, výrazně nezvyšují koncentraci solí v půdním roztoku a nepodléhají rychlému vyplavování. Rostliny ho přijímají buď přímo kontaktní výměnou za H^+ , nebo nepřímo prostřednictvím rovnovážného stavu mezi draslíkem v půdním roztoku a výměnným draslíkem (Kondratowicz-Maciejewska & Kobierski, 2011).

Vodorozpustný draslík zahrnuje především ve vodě rozpustné draselné soli jako KCl, K_2SO_4 , KNO_3 , K_2CO_3 a další. Draselné kationty mají v půdním roztoku velmi nízkou koncentraci a to od 0,02-0,1 mmol na 100 g půdy. Bylo zjištěno, že z celkového draslíku přístupného pro rostlinu tvoří vodorozpustný draslík pouze asi 1-10 %. Obsah vodorozpustného draslíku se mění v závislosti na typu jílovitých materiálů, obsahu vody v půdě, na druhu a koncentraci jiných kationtů a tak dále (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2014). Mezi zmíněnými formami draslíku v půdě platí rovnovážný stav s dynamickým charakterem. Během vegetační sezóny se tento rovnovážný stav narušuje odběrem živin rostlinami, hnojením, mineralizací, zvětráváním a vyplavováním živin, avšak po každém narušení se opět ustaluje (Reitemeier, 1951).

1.3.1 Funkce

Pro rostlinu je draslík velice důležitý, a to při metabolických reakcích, protože draselné kationty dokážou aktivovat široké spektrum enzymů. Draselné kationty se váží v dehydratované formě, pravděpodobně díky šesti kyslíkům derivovaných z karboxylové, karbonylové nebo hydroxylové skupiny. Tato vazba je velice selektivní, a draselné kationty nemohou být nahrazeny ostatními jako například sodný nebo lithný kationt. Mezi specifické enzymy aktivované draselnými kationty patří například vakuolární pyrofosfatáza, která akumuluje protony do lumen vakuoly. Dále pak draslík ovlivňuje také mnoho enzymů účastnících se metabolismu uhlíku, jako je pyruvátkináza, fosfofruktokináza nebo ADP-glukóza-pyrofosforyláza (Marschner, 2012). Vysoké koncentrace draselných kationtů jsou také třeba k syntéze proteinů v ribozomech. Tyto biochemické nároky na draselné kationty v buňkách jsou považovány za základy přísné homeostáze draselných kationtů v cytosolu (Maathuis & Sanders, 1994; Rodríguez-Navarro & Rubio, 2006). Draslík může také ovlivňovat metabolismus rostliny prostřednictvím transkripční a post-transkripční regulace metabolických enzymů (Amtmann et al., 2008).

Velkou roli má draslík při udržování turgoru a homeostáze vody, jelikož ovlivňuje otevírání a uzavírání průduchů, kterými je voda vypouštěna k ochlazení rostliny. Při fotosyntéze udržuje rovnováhu elektrického napětí v místě produkce ATP. Dále podporuje přesun asimilátů pro růst nebo pro ukládání do plodů a kořenů. V neposlední řadě bylo

zjištěno, že draslík podporuje odolnost rostlin před patogeny, zlepšuje velikost semen a zvyšuje kvalitu plodů (Silva & Uchida, 2000).

1.3.2 Deficit

Častým symptomem deficitu draslíku bývá chloróza na okraji listů, což se objevuje zprvu u starších listů, jelikož je draslík v rostlině jednoduše transportovatelný, což potvrzuje i Chen et al (2018) jenž popisuje, vliv nedostatku draslíku u druhu *Eustoma* na nižší počet nodií, redukcí výšky rostliny a listové plochy. Také byly pozorovány drobnější chlorotické skvrny a silná nekróza u spodních listů. Jelikož je draslík potřebný při fotosyntéze, jeho nedostatek může zapříčinit zpomalení až zastavení růstu. V některých případech jsou silně redukovány stonky a dochází k jejich ohýbání těsně nad zemí a pádu rostliny. Velikost semen a plodů je při nedostatku draslíku také menší (Silva & Uchida, 2000).

Několik autorů uvádí, že deficit draslíku má za následek menší plochu listů (Degl'Innocenti et al., 2009; Gerardeaux et al., 2010; Zhao et al., 2001). Gerardeaux et al. (2010) ukázal, že prodlužování listů kukuřice je limitováno omezeným vodním režimem rostliny řízeným draslíkem, a to z důvodu nedostatku draslíku.

Výsledky pokusu (Zhao et al., 2001) ukazují, že rostliny rostoucí v podmínkách s omezeným přístupem draslíku mají mnohem menší hodnotu asimilace vztáženou na plochu listů, a to pouze 23 % hodnoty kontrolní skupiny. Toto snížení hodnoty asimilace je spojeno s poklesem koncentrace chlorofylu v listech. U rostlin z prostředí s nedostatkem draslíku tvořila koncentrace chlorofylu v listech pouze 12 % koncentrace kontrolní skupiny. Peoples & Koch (1979) zjistili, že deficit draslíku nesnižuje aktivitu fotosytému I, fotosytému II ani enzymu Rubisco (ribolosa-1,5-bisfosfát-karboxyláza/oxygenáza), ale spíše redukuje tyto struktury samotné. Nebyl však pozorován rozdíl poměru chlorofylu A a chlorofylu B oproti kontrolní skupině, což naznačuje že koncentrace obou chlorofylů byla snížena zároveň v důsledku nedostatku draslíku. Obsah cukrů v listech rostlin rostoucích v nedostatku draslíku byl asi o 10 % menší než u kontrolní skupiny, zatímco obsah cukrů ve stonku rostlin rostoucích v deficitu draslíku byl signifikantně menší než u kontrolní skupiny. Nedostatek draslíku tak ovlivňuje transport asimilátů od zdroje k cílovému místu (Zhao et al., 2001).

1.4 Síra

Síra v půdě má původ ze tří hlavních zdrojů: zvětrávání hornin, atmosférické depozice a rozklad organické hmoty. Minerály jako sulfid železnatý, sulfid měďnatý a sulfid nikelnatý nebo sádrovec, chalkopyrit, anhydrit a baryt zvětrávají a uvolňují síru do půdy. Díky opadu listů je většina síry v půdě organického původu, vzniká rozkladem organické hmoty. Rostliny přijímají síru v podobě síranu (SO_4^{2-}) (Rai et al., 2020).

Hlavní přeměny síry zahrnují mobilizaci, imobilizaci a mineralizaci. Imobilizace, jakožto začlenění síry do buněk mikroorganismů, kompletně závisí na jejich populaci. Krátký životní cyklus mikroorganismů však znamená urychlení cyklu síry v půdě. Síra mikrobiální biomasy byla popsána jako nejaktivnější a rychle dostupný zdroj pro rostliny. Imobilizace probíhá

v minerální i organické vrstvě půdy a síra je často zabudována do organické hmoty pomocí kovalentních vazeb. Sírany dodávané do půdy mohou být rychle vstřebány a přeměněny na organické sloučeniny o malé molekulární hmotnosti jako jsou estery a fluvokyseliny (Rai et al., 2020).

Mobilizace je proces, kdy jsou velké organické sloučeniny síry mikrobiálně redukovány na menší sloučeniny, a to depolymerizací nebo odebráním sulfonátové skupiny z nerozpustných sloučenin síry. Mobilizace je důležitá, jelikož řídí mineralizaci síry poté, co je organická rozpustná síra přeměněna na anorganickou (Wang et al., 2006).

V atmosféře se nachází síra ve formě oxidu siřičitého (SO₂) nebo sirovodíku (H₂S), tam jsou díky oxidaci a přítomnosti vody přeměněny na kyselinu sírovou a sulfát, které jsou srážkami dopraveny na zem (Rai et al., 2020).

1.4.1 Funkce

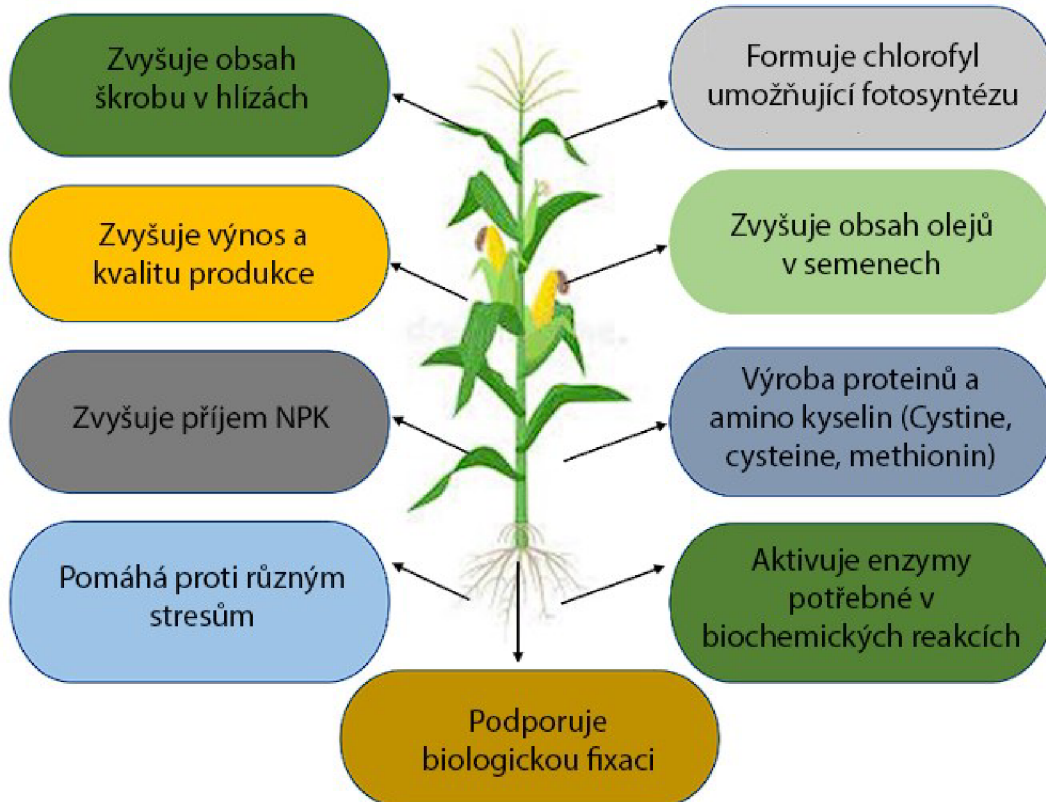
Většina síry se v rostlinách nachází ve formě aminokyselin cysteinu a methioninu. V cysteinu se síra objevuje jako sulfhydrylová skupina (-SH), tato skupina podléhá reversibilní oxidaci, a může tvořit kovalentní vazby -S-S- (sulfidické můstky) pokud je přítomna další sulfhydrylová skupina. Vznik a zánik těchto sulfidických můstků ovlivňuje terciální a kvarterní strukturu proteinů, a tím i jejich aktivitu (Maathuis, 2009).

Produkce glutathionu slouží jako mobilní přenašeč redukované síry, ale glutathion také slouží jako redoxní pufr, například jako reduktant při detoxifikaci reaktivních forem kyslíku (Foyer et al., 2007). Glutathion je také součástí některých fytochelatinů, které mají vysokou afinitu k těžkým kovům a arsenu, a pomáhají tak k detoxifikaci (Foyer et al., 2007). Byla zjištěna silná korelace mezi stresem způsobeným těžkými kovy a příjmem síry (Clemens, 2006). V poslední době byla snaha o zvýšení produkce fytochelatinů, aby byly rostliny odolnější vůči znečištění, například arsenem nebo kadmiovým kationtem, ale také ke zvýšení fytoimediačního potenciálu (Clemens, 2006). V nedávné době se objevily důkazy o tom, že fytochelatiny mohou hrát roli v nestresové homeostázi kovů u *Arabidopsis thaliana*, jelikož redukce syntézy fytochelatinů ovlivnila koncentraci zinečnatých kationtů v kořenech a celkovou homeostázi tohoto mikroprvku (Tennstedt et al., 2009).

Další funkce síry v rostlinách je v sulfolipidech, které můžeme v menším množství nalézt v thylakoidech chloroplastů (Narayan et al., 2022). Proč potřebují thylakoidní membrány zrovna tyto lipidy není doposud známo, ale je zde úvaha, že je tomu tak kvůli stabilizaci fotosyntetických komponentů (Ramani et al., 2004). Hladina sulfolipidů však není statická. Například nedostatek fosforu může jejich hladinu, potažmo jejich podíl, zvýšit. Nespecifické fosfolipázy a fosfatázy jsou zodpovědné za degradaci fosfolipidů, aby zvýšily koncentraci anorganického fosforu (Gaude et al., 2008; Ramani et al., 2004), zatímco transkripce sulfolipidové syntázy SQD1 rapidně roste, jako odpověď na nedostatek fosforu (Hammond et al., 2003). I další environmentální faktory mohou ovlivňovat poměr fosfolipidů a sulfolipidů. U několika halofytů (*Aster tripolium* a *Sesuvium portulacastrum*) se zvýšil obsah sulfolipidů při vystavení zasolení, zatímco u glykofytu *Arabidopsis thaliana* se jejich obsah

nezměnil, což naznačuje možné přispění k adaptivní výhodě (Ramani et al., 2004). Obecně shrnuje funkce síry v rostlině i Obrázek 1.

Role síry při růstu a vývoji rostliny



Obrázek 1 - Role síry při růstu a vývoji rostliny. Upraveno podle Narayan et al. (2022)

1.4.2 Deficit

V poslední době se nedostatek síry v půdě celosvětově zvýšil. Tento jev je přisuzován faktu, že se snížil přísun síry do půdy a zvýšil se její odběr. Snížení obsahu dodávané síry do půdy je primárně zapříčiněno používáním koncentrovaných hnojiv s malým nebo žádným obsahem síry (Scherer, 2001) a menším ukládáním síry z atmosféry (National Atmospheric Deposition Program, 2007). Zvýšený odběr síry zahrnuje dnešní intenzivní zemědělství, které se zaměřuje na co největší výnos, a tudíž je z půdy odebíráno více síry, která však není navracena (Ohio Department of Agriculture, 2006).

Deficit síry v půdě má zanedbatelný vliv na biomasu, ale zato velký vliv na její kvalitu (Etienne et al., 2018). Při nedostatku síry v půdě jsou v pšenici syntetizovány proteiny s menším obsahem síry jako například omega-gliadin a podjednotky gluteninu s vysoko molekulární hmotností, a to na úkor proteinů s vyšším obsahem síry (Hawkesford et al., 2016; Z. Yu et al., 2021). Bylo zjištěno, že nedostatek síry vede k poklesu syntézy Rubisca, jenž ovlivňuje asimilaci oxidu uhličitého (CO_2), což eventuelně vyústí ve zpomalenou syntézu karbohydrátů, což vede ke chloróze mladých listů (Cilbert et al., 1997; Hawkesford et al., 2016; Jobe et al., 2019; Z. Yu et al., 2021). Dále vede nedostatek síry ke snížení hydraulické vodivosti,

jakožto odpověď na nedostatek živin, který signalizuje kořenový systém pro nadzemní část rostliny (Karmoker et al., 1991; Mitchell, 2021).

Podle Silva & Uchida (2000) patří mezi symptomy deficitu síry chloróza mladších listů s lehce chlorotickou žilnatinou, ale například u citronu mohou tyto symptomy vykazovat první starší listy. Také byl pozorován zpomalený růst a zpožděné dospívání rostliny, dále pak to, že stonky byly tvrdé, tenké a dřevnatěly. Tyto symptomy deficitu síry jsou podobné symptomům deficitu dusíku, ale jsou mnohem častěji pozorovány v písčítých půdách chudých na organickou hmotu a podléhajícím častému vyluhování.

1.5 Vápník

Obsah vápníku v půdě kolísá mezi 0,15-6 %, ale střední hodnota je odhadována na 2 %. Nejvíce vápníku je obsaženo v karbonátových půdách a nejméně v půdách písčítých v humidních oblastech. Vápník se v půdě vyskytuje v různých sloučeninách, které můžeme podobně jako u draslíku rozdělit podle využitelnosti pro rostliny, a to na vápník výměnný, nevýměnný a vodorozpustný (Sparks, 2003).

Nevýměnný vápník se nachází jako stavební složka krystalové mřížky některých těžko rozpustných horninotvorných nerostů. Jedná se především o apatity, vápenaté alumosilikáty jako anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), a v malé míře též i některé jílové minerály jako montmorillonit ($(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Vápník takto vázaný v krystalové mřížce je uvolňován jen velice pomalu při zvětrávacích procesech a má tedy malý význam pro výživu rostlin. Do této skupiny nevýměnného vápníku jsou zařazeny i velmi slabě rozpustné sloučeniny jako uhličitán vápenatý (CaCO_3) a dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Uhličitán vápenatý je ve vodě prakticky nerozpustný, ale rozpustnost se zvyšuje ve vodě obsahující oxid uhličitý (CO_2) a to za tvorby hydrogenuhličitanu vápenatého ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Tato reakce má velký význam pro aktivitu vápenatých kationtů v půdním roztoku a pro úpravu půdních vlastností. Vzniklý hydrogenuhličitán vápenatý se stává součástí půdního roztoku, odkud jsou vápenaté kationty snadno přijímány rostlinami. Pokud dochází k intenzivní tvorbě primárního uhličitanu vápenatého, působí pak díky svému zásaditému charakteru na snižování kyselosti půdy a s kyselinou uhličitou tvoří důležitý půdní pufr (Sparks, 2003; White & Broadley, 2003).

Výměnný vápník v půdě zabírá asi 1-2 % vápníku nevýměnného, ale zároveň tvoří v sorpčně nasycených půdách 60-80 % všech výměnných kationtů. Výměnný vápník je v půdě poután fyzikálně chemicky na povrch půdních koloidů úměrně jejich sorpční kapacitě. Relativně více vápenatých kationtů absorbují organické koloidy ve srovnání s koloidy minerálními, ze kterých pak jílové minerály typu 2:1 jako montmorillonit více než jílové minerály typu 1:1 jako kaolinit. Výměnné vápenaté kationty jsou lehce dostupné pro rostlinu, a také významné pro tvorbu drobtovité struktury půdy (Dauer & Perakis, 2013; White & Broadley, 2003).

Malé množství vápníku v půdě je ve formě sloučenin rozpustných ve vodě, jenž představují soli vápníku a anionty některých kyselin, například chloridy a nitráty, hydrogenuhličitán vápenatý, dihydrogenfosforečnan vápenatý ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), ve vodě rozpustné cheláty vápníku, rozpustným podílem i uhličitán vápenatý a síran vápenatý a

podobně. Obsah vápenatých kationtů v půdním roztoku je v rovnováze s obsahem uhličitanu vápenatého v pevné fázi půdy. V půdách s nízkým obsahem uhličitanu vápenatého a nenasyceným sorpčním komplexem je tak koncentrace vápenatých kationtů v půdním roztoku nízká. Zředování koncentrace vápenatých kationtů v půdním roztoku je také zapříčiněno zvyšováním vlhkosti půdy a vertikální migrací samotných kationtů, tedy vyplavováním. Ačkoli jsou vápenaté kationty v půdním roztoku pro rostliny snadno přijatelné, mohou nastat interferenční jevy, které tento příjem omezují, zvláště pak antagonismus vápenatých kationtů a vodíkových, hořečnatých nebo draselných kationtů (Sarkar et al., 2008; Sparks, 2003).

1.5.1 Funkce

Na buněčné úrovni je funkce vápníku, tedy vápenatých kationtů, strukturální a také jako sekundární přenašeč. Vápenaté kationty snadno tvoří komplexy se záporně nabitými skupinami organických sloučenin jako jsou fosfáty a karboxylové skupiny fosfolipidů, proteinů a cukrů. Toto je ilustrováno v buněčné stěně rostlinné buňky, kdy jsou celulózní mikrofibrily spojovány křížmo pomocí glykanů a pektinů. Karboxylové skupiny protikladných pektinů mohou být elektrostaticky koordinovány pomocí vápenatých kationtů, což dává buněčné stěně pevnost. Podobnou roli mají vápenaté kationty také v buněčných membránách, kde koordinují fosfátové skupiny fosfolipidů. Tvorba těchto komplexů se odehrává převážně na vnější straně plazmatické membrány. Ztráta vápenatých kationtů z membrány ne jejich nahrazení jinými kationty rapidně narušuje integritu membrány (Maathuis, 2009).

Jelikož vápenaté kationty se sulfáty a fosfáty snadno tvoří nerozpustné soli, obsah volných vápenatých kationtů v cytoplazmě je udržován extrémně nízký, a to okolo 100 nmol/l. Díky tomu jsou vápenaté kationty ideální sekundární přenašeč a široké spektrum různých podnětů vyvolává rapidní změny v obsahu volných vápenatých kationtů v cytoplazmě, což zahrnuje i odpovědi na biotický i abiotický stres, stomatální regulaci a fyzické poškození (Mahouachi et al., 2006; McAinsh & Pittman, 2009). Dále mají vápenaté kationty důležitou roli při vývoji a růstu, a to v kořenových špičkách a vzrůstném vrcholu. Právě v těchto částech rostliny se nachází meristematická pletiva, ve kterých probíhá buněčné dělení. Vápenaté kationty pomáhají při formování mikrotubulů, přičemž ty jsou nezbytné pro pohyb chromozomů v anafázi (Tuteja & Mahajan, 2007).

1.5.2 Deficit

Jelikož se vápník v rostlině nepřemísťuje a není snadno pohyblivý, objevují se symptomy jeho nedostatku nejdříve u mladých listů, konkrétně v jejich špičkách. Špičky kořenů i listů hnědnou a pak odumírají (Chen et al., 2018; Silva & Uchida, 2000). Nedostatek vápníku u rostlin není často zřetelný, jelikož při jeho nedostatku v půdě dochází k její acidifikaci, což pak celkově omezuje růst a překryje projevy deficitu vápníku v rostlině. Dále se při nedostatku vápníku, který je potřebný pro pevnost buněčné stěny, mohou špatně vyvíjet listy, které mají spojené okraje, a při jejich rozvíjení se mohou potřhat. Také může docházet k zeslabování stonku, ve smyslu oslabení jeho struktury. V některých případech byly mladé listy vyduťte a

vrásčité, vzrostný vrchol poškozený, květní pupeny a květy opadávaly předčasně (Silva & Uchida, 2000).

Chen et al. (2018) pozorovali u druhu *Eustoma* při deficitu vápníku výraznou redukci kořenového systému, přičemž byly kořeny velmi husté a křehké. Dále sledovali porušení vzrostného vrcholu, jak bylo zmíněno výše, po kterém následovalo vyrašení postranních výrůstků s nekrotickými mladými listy (Chen et al., 2018), jak můžeme vidět na obrázku 2. Tyto poznatky se shodují i s dalšími experimenty provedenými na jiných druzích (Hao & Papadopoulos, 2003; Yeh et al., 2000). Vysoká vzdušná vlhkost zpomalovala přesun vápenatých kationtů do špiček mladých listů, což vyústilo ve spálené špičky listů při pěstování ve skleníku. Výrazné spálení konců listů u druhu *Eustoma* byly při 90% vzdušné vlhkosti pozorovány především jeden až dva týdny před výskytem květních pupenů, což naznačuje, že by se mohlo jednat o kompetici mezi květními pupeny a mladými listy o vápník, jak uvádí například Pressman et al. (1993). Příčina a míra deficitu vápníku by se však mohla lišit u mladých rostlin, jak uvádí Chen et al. (2018) a dospělých rostlin schopných reprodukce, jak uvádí Islam et al. (2004). Hmotnost sušiny nadzemní části rostlin byla při nedostatku vápníku redukována o 78 % a hmotnost sušiny kořenů o 72 % (Chen et al., 2018).



Obrázek 2 - Růst druhu *Eustoma* při deficitu různých makroprvků (bílý proužek = 10 cm). Upraveno podle Chen et. al. (2018)

1.6 Hořčík

Obsah hořčíku v půdě je velice proměnlivý, průměrný obsah je asi 0,4-0,6 % a závisí na minerálním složení matečné horniny. Vzhledem k obsahu hořčíku jsou nejdůležitější minerály hadec (29 %), magnezit (28,7 %), olivín (28 %), kieserit (17,5 %) a dále pak dolomit, kainit, vermikulit a chlorit, které obsahují cca 10-15 % hořčíku. Podobně jako u draslíku a vápníku lze hořčík rozdělit podle rozpustnosti na nevýměnný, výměnný a vodorozpustný hořčík (Mikkelsen, 2010).

Nevýměnný hořčík je obsažen v různých primárních a sekundárních minerálech. Zprimárních minerálů je velice pomalu uvolňován zvětráváním. 90-95 % hořčíku je obsaženo v silikátech, alumosilikátech, pyroxenech, hadci, biotitu a jiných. Při rozkladu silikátů dochází v půdě i k opačnému procesu (Mikkelsen, 2010). Část hořčíku vázaného v magnezitu (MgCO_3 nebo $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)$) a dolomitu ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)$) je možné považovat za hořčík nevýměnný, kvůli jeho nízké rozpustnosti ve vodě, i když snadněji zvětrává. Další součástí nevýměnné formy hořčíku

je hořčík vázaný v pevných vysokomolekulárních organických látkách, avšak jeho množství není velké (Christenson & Doll, 1977; Kidson et al., 1975).

Výměnný hořčík je nejvýznamnější částí hořčíku přijatelného pro rostliny. Z celkově sorbovaných iontů představuje hořčík asi 10-15 % sumy vázaných kationtů a jeho schopnost sorpce je nižší než u vápníku a vyšší než u draslíku. Hořčík by měl zaujímat třikrát větší část v sorpčním komplexu než draslík a tento poměr by neměl klesnout pod dvojnásobek hořčíku vůči draslíku. Množství hořčíku ve výměnné formě představuje asi 5-10 % z celkového hořčíku (Foster, 1951; Gransee & Führs, 2013; Mikkelsen, 2010).

Hořčík je ve své rozpustné formě obsažen v různých solích, jako chlorid hořečnatý ($MgCl_2$), hydrogenuhličitan hořečnatý ($Mg(HCO_3)_2$), dusičnan hořečnatý ($Mg(NO_3)_2$), síran hořečnatý ($MgSO_4$), dihydrogenfosforečnan hořečnatý a jiných, jež tvoří součást půdního roztoku, z něhož můžou být hořečnaté kationty přijímány rostlinami. Podobně jako u draslíku může však být hořčík začleněn do krystalové mřížky některých minerálů, jako je například montmorillonit, a stát se tak pro rostliny nepřijatelným. Jeho přijatelnost též ovlivňuje antagonistické působení dalších kationtů, například draselných, amonných, sodných a vápenatých (Yan & Hou, 2018).

1.6.1 Funkce

Nejvýznamnější funkce hořčíku v rostlinné buňce spočívá v jeho centrální pozici v molekule chlorofylu, kde je kovalentní vazbou vázán na čtyři atomy dusíku z porfyrinového prstence. Vložení hořečnatého kationtu do protoporfyrinu je možné díky Mg-chelatáze, složené z několika podjednotek patřících do AAA super rodiny proteinů (ATPázy spojené s různými buněčnými aktivitami) (Maathuis, 2009). V poslední době byla podrobně studována biochemie tohoto procesu (Axelsson et al., 2006; Sirijovski et al., 2008) a bylo zjištěno, že porfyrin vyvolává konformační změny v BchH podjednotce, které narušují porfyrinový prstenec a umožňují včlenění hořečnatého kationtu do molekulární struktury (Ankele et al., 2007). Protoporfyrin je sám o sobě důležitým signálním elementem při vývoji chloroplastů, během stresu se kumuluje v plastidech a negativně ovlivňuje transkripci fotosyntetických genů (Robinson et al., 2000). Dále má hořčík významnou roli při fotosyntéze, a to díky své schopnosti podporovat světelnou reakci ve stromatu chloroplastů. Zachycení světla a následný transport elektronů vede ke kumulaci vodíkových kationtů v lumen thylakoidů. Výsledný rozdíl nábojů je vyrovnáván tokem hořečnatých kationtů z lumen thylakoidů do stromatu (Maathuis, 2009).

Většina hořčíku v buňkách má zásadní roli jako kofaktor enzymů při stabilizaci nukleotidů a nukleových kyselin. Nejvýznamnější enzymatické reakce, při kterých je hořčík nepostradatelný, jsou ty, které jsou spojené s přenosem energie, fosforylací a defosforylací. Většina energie buňky je uložena ve vazbách vysokoenergetického esteru a pyrofosfátu, difosfátu a trifosfátu, jako jsou ADP a ATP. Uvolnění této energie enzymy jako jsou fosfotransferázy a ATPázy vyžaduje hořečnaté kationty, které tvoří můstek mezi atomy kyslíku dvou sousedních fosfátových skupin a atomem dusíku na katalytické části proteinu (Maathuis, 2009; Silva & Uchida, 2000).

Hořčík též snadno váže nukleové kyseliny, následkem čehož je bod tání DNA za přítomnosti hořečnatých kationtů výrazně vyšší (Robinson et al., 2000). V RNA má hořčík podobnou roli a pomáhá udržovat sekundární strukturu (Misra & Draper, 2000). Genová transkripce a translace proto bezprostředně závisí na správné hladině hořčíku (Maathuis, 2009; Silva & Uchida, 2000).

1.6.2 Deficit

Deficit hořčíku u rostlin může být dán nedostatkem hořčíku v půdě, přičemž půdy hodně zvětrávané, kyselé a písčité bývají nejčastěji chudé na hořčík, jelikož hořčík velice snadno podléhá vyplavování. Je známo, že v přítomnosti vysokého množství vápníku a hydrogenuhličitanu ve vápenatých půdách se příjem hořčíku rostlinami snižuje, a to díky kompetičnímu efektu, což pak vede k nedostatku hořčíku v rostlině (Cakmak & Kirkby, 2008; Farhat et al., 2015; Gransee & Führs, 2013). Také bylo zjištěno, že vznik uhličitanu hořečnatého (MgCO_3) v alkalických půdách snižuje dostupnost hořčíku pro rostliny (Broadley & White, 2010).

Jelikož je hořčík nedílnou součástí chlorofylu, jeho nedostatek způsobuje chlorózu listů mezi žilnatinou, avšak žilnatina sama je zelená, a to častěji u starších listů (Cakmak & Yazici, 2010). Řada dalších studií (Farhat et al., 2014; Hermans et al., 2004; Hermans & Verbruggen, 2005) podporuje toto tvrzení a dodává, že chloróza se tvoří ve starších listech a pak postupuje do mladších, později se tvoří nekrotické skvrny (Farhat et al., 2014). Tento jev je vysvětlen právě vysokou účastí hořčíku na syntéze chlorofylu, hlavního pigmentu zachytávajícího světlo. Nedostatek hořčíku tak způsobuje inhibici fotosyntézy a ukládání karbohydrátů, a tím i omezuje růst kořenů (Cakmak et al., 1994a, 1994b), stejně tak jako změnu struktury chloroplastu (Puech & Mehne-Jakobs, 1997). Podle Foyer & Noctor (2005) narušení bilance karbohydrátů mezi zdrojem a cílovým místem urychluje senescenci listů, a to prostřednictvím změny Mg-chelatázy, významného enzymu zodpovědného za včlenění hořčíku do protoporphyrinu IX, což je první krok při syntéze chlorofylu. Kumulace protoporphyrinu IX díky změně Mg-chelatázy podporuje tvorbu chlorózy (Cakmak & Kirkby, 2008), včetně redukce transportu elektronů při fotosyntéze, což vede k tvorbě kyslíkových radikálů (Cakmak & Kirkby, 2008; Hermans & Verbruggen, 2005).

Také bylo zjištěno, že přítomnost symptomů nedostatku hořčíku je úzce spojena s intenzitou světla. Vyšší intenzita světla také způsobuje chlorózu mezi žilnatinou listů, a to díky vyšší tvorbě kyslíkových radikálů v chloroplastech. Marschner & Cakmak (1989) pozorovali, že rostliny fazole (*Phaseolus vulgaris*) vystavené vysoké intenzitě světla a dostatku hořčíku neměly chlorózu listů, stejně tak jako rostliny vystavené nízké intenzitě světla a nedostatku hořčíku. Naopak rostliny vystavené vysoké intenzitě světla a nedostatku hořčíku projeví chlorózu velice rychle. Podle těchto autorů nebyla chloróza listů při vysoké intenzitě světla způsobena nízkou koncentrací hořčíku v listech, ale fotooxidativním poškozením chlorofylu a membránových lipidů. (Foyer & Noctor, 2005) potvrdili, že hořčíkový deficit může být zapojen do programovaného poškození buněk, spojeného s oxidativním poškozením chloroplastů. Podobný efekt byl zaznamenán u rostlin vystavených vysokým teplotám při

nedostatku hořčíku. Listy pšenice a kukuřice vykazovaly chlorózu mezi žilnatinou listů u starších listů při 25 °C a nedostatku hořčíku, tento efekt se zvýšil při 35 °C (Mengutay et al., 2013).

1.7 Makroprvky v okrasných rostlinách

Všechny živiny mají zásadní roli pro život rostliny a rostliny vykazují symptomy jako následek deficitu, nadbytku nebo nepoměru živin v rostlině. První změny v rostlině při jedné ze tří výše uvedených možností se projeví na molekulární úrovni, a to tvorbou sloučenin zabraňujících průběhu chemických reakcí, které pak ovlivňují změny v tkáních na buněčné úrovni a následují viditelné symptomy (Malavolta, 2008). Avšak rostliny jsou deficitem, nadbytkem nebo nepoměrem živin poškozeny daleko předtím, než jsou symptomy viditelné. Tyto symptomy mohou být charakteristické v závislosti na druhu, genotypu a míry deficitu, nadbytku nebo nepoměru živin a enviromentálních faktorech (Rosa et al., 2012). Navíc mohou být poškozeny různé části rostliny. V případě okrasných rostlin, krom efektu na produkci a produktivitu, tyto symptomy viditelně ovlivňují květy, popřípadě květenství a mohou signifikantně ovlivnit výslednou kvalitu produktu, což se promítne do výsledné obchodní ceny. Komerzializace květin a okrasných rostlin je neoddělitelně spojena s vysokou kvalitou produktu (Veatch-Blohm et al., 2012).

Pro většinu okrasných rostlin je živinou potřebnou pro kvalitu rostliny draslík. Je to mobilní prvek transportovaný floémem spolu se sacharózou, generující osmotický gradient mezi zdrojem a sinkem v rostliny, a to především při kvetení. Právě v této fázi jsou květy velice silný sink, což může vést k deficitu draslíku v rostlině a následkem toho i ke snížení obsahu sacharózy, což má neblahé účinky na květy (Barbosa et al., 2009). U druhu *Gerbera* je živina požadovaná v největším množství právě draslík, především v době květu (Guerrero et al., 2012; Ludwig et al., 2008; Mercury, 2002). U druhu *Chrysanthemum 'Puritan'* pěstovaného v květináčích bylo aplikováno hnojení draslíkem při koncentraci 400 mg/l, což vedlo ke zlepšení kvality rostlin, a to ve smyslu většího počtu listů, stonků na květináč a počtu a velikosti květenství (Michlovská Rodrigues et al., 2008), což demonstruje důležitost živin v závislosti na druhu.

Je důležité vzít v potaz, že příjem živin se může lišit v průběhu života rostliny, stejně tak jako jejich ukládání v různých formách a do různých orgánů rostliny. (Guerrero et al., 2012) zjistil, že pro živiny uložené v listech gerberky na konci vegetativní a generativní fáze platí sestupné pořadí jejich obsahů, jež je následující draslík, dusík, vápník, hořčík, fosfor a síra, zatímco pořadí živin uložených v květu je sestupně draslík, dusík, fosfor, vápník, síra a hořčík. U druhu *Aster ericoide* byly obsahy živin odebraných z půdy v následujícím pořadí sestupně draslík, dusík, fosfor, síra, hořčík a vápník (Camargo et al., 2005), což také potvrzuje různé nároky na živiny mezi druhy.

Při pěstování okrasných rostlin je velice důležitá výška rostliny i výška nebo délka květního stonku, jelikož právě tyto faktory ovlivňují cenu při komercializaci. Při zhodnocení dosavadní literatury se dá konstatovat, že živiny přímo spojené s výškou okrasných rostlin jsou všechny makroprvky a bor (Neto et al., 2015). Výška rostlin u druhu *Iris germanica* byla menší při

nedodání dusíku, vápníku a fosforu (Rosa et al., 2012). U druhu *Etlingera elatior* 'Jack' zapříčinil nedostatek boru, dusíku, draslíku a fosforu redukcí výšky rostliny a biomasy při počáteční fázi pěstování (Frazão et al., 2010). U okrasného banánovníku *Musa velutina* růst negativně ovlivnil nedostatek dusíku, fosforu, draslíku a hořčíku, nedostatek síry zmešil výšku rostliny (Pinho, 2007). Jelikož síra aktivuje a účastní se celé škály reakcí v rostlině, může její nedostatek výrazně omezit výšku rostliny (Neto et al., 2015).

Hnojení rostlin je jeden z faktorů určujících délku květní stonků. Délka květenství u *Heliconia psittacorum* x *H. spathocircinata*, 'Gold Torch' byla ovlivněna hlavně nedostatkem dusíku a draslíku, přičemž byly květenství těchto rostlin výrazně menší oproti rostlinám rostoucím v optimálních podmínkách (Castro et al., 2007). U okrasných rostlin je podstatnější kvalita produktu než celkový výnos (Neto et al., 2015).

Ne jenom nedostatek živin, ale i jejich nadbytek může ovlivnit kvalitu okrasných rostlin. Pozorování Boaretto & Moraes (2010) ukazuje efekt vyšší dávky dusíku a draslíku na délku stonku růže. Při těchto vyšších dávkách dusíku a draslíku byly stonky výrazně kratší, což je přisuzováno zvýšené elektrické vodivosti půdního roztoku způsobené právě zvýšeným hnojením (Neto et al., 2015). Tvar rostliny nebo jejího květenství je převážně ovlivněno genetickou výbavou dané rostliny, avšak nedostatek nebo nadbytek živin může způsobovat deformaci některých jejích částí (Marschner, 2012).

Zbarvení květů i listů je u okrasných rostlin hraje velkou roli při výběru produktu spotřebitelem (Marschner, 2012). Právě zbarvení rostlin, a především listů je přímo spojeno s výživou rostlin a nedostatkem živin. Jak bylo zmíněno výše, rostliny s nedostatkem dusíku mohou vykazovat žloutnutí listů, a to primárně starších, kvůli snížené syntéze chlorofylu (Malavolta, 2006). Květenství *Heliconia psittacorum* x *H. spathocircinata*, 'Gold Torch' pěstovaných při nedostatku dusíku měla světlejší barvu na rozdíl od rostlin rostoucích v kompletním spektru živin (Castro et al., 2007). Nedostatek fosforu se projevuje nafialovělým zbarvením listů, což je spojeno s větší syntézou antokyanů, které jsou za toto zbarvení zodpovědné (Tiaz et al., 2015). Podobné symptomy byly nalezeny u *Iris germanica* rostoucí v nedostatku fosforu (Rosa et al., 2012), avšak nebyly zaznamenány u okrasného zázvoru rostoucího v nedostatku fosforu (Coelho et al., 2012), což naznačuje rozdílné symptomy mezi různými druhy. Deficit draslíku je doprovázen chlorózou následovanou nekrotizací špiček a okrajů listů, zprvu se projevuje u starších listů (Faquin, 2005). Tyto symptomy byly pozorovány u *Zantedeschia aethiopica* (Neto et al., 2015), okrasného banánovníku (Pinho, 2007) a okrasného zázvoru (Coelho et al., 2012). Podobné symptomy jako u deficitu draslíku se objevují i u deficitu vápníku, tedy chloróza následovaná nekrotizací, avšak v tomto případě se symptomy nejprve projevují v mladých listech. Podobné symptomy pozorovali Coelho et al. (2012) u okrasného zázvoru a Frazão et al. (2010) u *Etlingera elatior*. Deficit hořčíku způsobuje nápadnou chlorózu mezi žilnatinou listu a deficit síry chlorózu na okrajích listů, a to prvotně u mladých listů (Faquin, 2005).

Zajímavá charakteristika, co se barvy květů týká, je změna barvy v závislosti na pH půdy. Pokud byla *Hydrangea macrophylla* pěstována v kyselejší půdě, byly její květy modré, zatímco v alkalické půdě byly její květy růžové (Yoshida et al., 2008, 2009).

Metodika

1.8 Vegetační pokus

Vegetační pokus s okrasnými letničkami byl založen 11.4.2022, jako druhy byly zvoleny mák východní Checkers (*Papaver orientale*), černucha damažská modrá (*Nigella damascena*), chrpa modrá (*Centaurea cyanus*), astra čínská (*Calistephus chinensis*) a hrachor vonný (*Lathyrus odoratus*), dále jen mák, černucha, chrpa, astra a hrachor. Semena hrachoru nevzešla, a proto byla dodatečně zařazena i sluncovka kalifornská (*Eschscholzia californica*), dále jen sluncovka. V tomto případě byl pokus založen 9.8.2022. Semena pocházela vždy od dodavatele SemenaOnline, s.r.o. (Praha 5, Česká republika).

1.8.1 Založení pokusu

Celý pokus probíhal ve sklenících katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze. K založení pokusu byly zvoleny květináče o objemu 3 litry (horní část 15x15 cm, spodní část 11x11 cm, výška 20 cm). Pro varianty se zeminou byla použita dlouhodobě nehnojená půda ze stanoviště Humpolec (49°33'15" N; 15°21'02" E). Zemina byla usušena, přeseta přes síto s velikostí otvorů 5 mm a uskladněna přibližně 1 rok. V době založení pokusu byla smíchána s pískem (EXPERT travní písek aktivátor kořenů, Forestina, Mnichov, Česká republika) v poměru 1:1 (1,8 kg + 1,8 kg na nádobu). Pro úpravu hodnoty pH vzniklé směsi byl použit vápnatý dolomit (36 % Ca; 10 % Mg - Agro CS, Říkov, Česká republika) v dávce 10 g na nádobu. Po týdnu od založení byl vzniklý substrát přihnojen roztokem dusičnanu amonného v dávce 0,5 g dusíku na nádobu. Tato dávka byla aplikována pipetou (rozpuštěná v 10 ml vody). Následovala zálivka pro lepší vsáknutí hnojiva do profilu.

Pro varianty se substrátem byl využit běžně dostupný zahradnický substrát (Zahradnický substrát s aktivním humusem, Agro CS, Říkov, Česká republika) s navázkou 1,00 kg na nádobu. Substrát nebyl po celou dobu vegetačního pokusu přihnojován. Vstupní vzorky substrátu i zeminy byly uloženy do mrazáku a skladovány při -18 °C.

Rostliny chrpy, černuchy, astry a sluncovky byly vysety v počtu 5 semen na nádobu, mák byl vyset v počtu 10 a více semen na nádobu. Po vzejití proběhlo následující jednocení: chrpa, černucha a sluncovka – 2 rostliny na nádobu, astra a mák – jedna rostlina na nádobu.

Všechny varianty byly založeny ve 4 opakováních, přičemž pozice nádob byla průběžně randomizována. Rostliny byly zalévány dle aktuální potřeby. Nádobu byly rovněž jednou za 2 týdny zváženy a zalaty na stejnou hmotnost. V průběhu pokusu (28.6.2023) proběhlo ošetření 0,03% roztokem přípravku Mospilan (AgroBio, Opava, Česká republika) proti molicím.

1.8.2 Sklizeň pokusu

Rostliny byly sklizeny vždy v době květu. Sklizeň pokusů s chrpou proběhla 16.6.2023, černucha byla sklizena 29.6.2023, astry a mák 31.8.2023 a později zasetá černucha 16.11.2023.

1.8.3 Zpracování vzorků a základní charakteristiky

Vstupní zeminy i substráty byly zamrazeny (-18 °C). Po sklizni pokusů byly nádoby vysypány, zeminy (substráty) byly promíchány a zbaveny větších kořenů. Poté bylo naváženo 50 gramů materiálu, který byl usušen (max. 40 °C) a následně analyzován vodným výluhem a výluhem Mehlich 3. Po usušení bylo na základě hmotnosti stanoveno procento sušiny. Současně byl zamražen i vzorek čerstvých zemín (substrátů) pro pozdější analýzu CAD, aby bylo zabráněno mineralizaci dusíku.

V případě rostlin byla vždy sklizena celá nadzemní biomasa. Ta byla zvážena a následně usušena (max. 40 °C) pro stanovení podílu sušiny. Suchá hmota rostlin byla následně namleta střížným mlýnem (SM 100, Retsch GmbH, Německo) na velikostní frakci menší než 1 mm. V případě menšího výnosu suché biomasy (černucha, mák a sluncovka) byly vzorky zpracovány na stejnou velikost kladívkovým mlýnkem IKA 10 basic (IKA Werke, Německo) určeným pro menší množství materiálu.

1.9 Laboratorní analýzy

1.9.1 Stanovení aktivního pH a vodivosti

Pro stanovení hodnoty pH byly naváženy 4 g suchého substrátu, který reagoval po dobu 2 hodin (1hod. třepání, 1 hod. ustálení) s 40 ml demineralizované vody v 50 ml plastových kyvetách. Po ustálení proběhlo měření aktivního pH a současně i vodivosti sondou (HANNAH instruments, HI991301, Rumunsko). Hodnota aktivního pH bude dále označována jako pH_{H2O}.

1.9.2 Stanovení okamžitě přístupných makroprvků vodným výluhem

Extrakty byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). Ke 4 g usušeného vzorku bylo doplněno 40 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 1 hodinu a následně filtrovány. Vzniklé extrakty byly analyzovány na obsah přístupných makroprvků optickým emisním spektrometrem s indukčně vázaným plazmatem (Varian VistaPro, Mulgrave, Austrálie), dále jen ICP-OES.

1.9.3 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků metodou Mehlich 3

Pro analýzy usušených vzorků zeminy (substrátu) byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich 1984) složený z CH_3COOH ($c=0,2$ mol/l), NH_4F ($c=0,015$ mol/l), HNO_3 ($c=0,013$ mol/l), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a ethylendiamintetraoctová kyselina (EDTA) ($c=0,001$ mol/l). Poměr materiálu a vyluhovadla činil 1:10 (3 g zeminy, 30 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 5 min. Suspenze byla následně zfiltrována. Ve filtrátu byl měřen obsah přístupných makroprvků pomocí ICP-OES.

1.9.4 Stanovení potenciálně přístupných makroprvků metodou CAD

Dostupnost či obsah vybraných půdních živin a prvků byla stanovena dle normy EN 13651. Tato evropská norma je určena pro stanovení živin a prvků extrahovatelných chloridem vápenatým a DTPA (diethylentriaminpentaoctová kyselina). Rozmražené vzorky zeminy (substrátu) byly extrahovány roztokem 0,01 mol/l CaCl_2 a 0,002 mol/l DTPA v poměru (pevná látka/kapalina) 1:10 (3 g/30 ml). Po 1 hodině třepání byly vzorky zfiltrovány a získané extrakty měřeny. Obsah amonného a nitrátového dusíku byl stanoven spektrofotometricky na přístroji SKALAR SAN^{PLUS}SYSTEM (Breda, Holandsko). Pro měření přístupných makroprvků (kromě Ca) byl využit ICP-OES.

1.9.5 Stanovení celkového obsahu N v rostlinách

Obsah dusíku byl stanoven po rozkladu koncentrovanou kyselinou sírovou dle Kjeldahla (ČSN 46 1011-18). Pro extrakci bylo naváženo 0,500 g suchého, jemně namletého materiálu. Toto množství bylo mineralizováno 10 ml koncentrované kyseliny sírové, za přítomnosti selenového katalyzátoru po dobu 1 hod při teplotě 400 °C. Mineralizovaný materiál byl následně měřen přístrojem Gerhardt Vapodest 50s (Königswinter, Německo).

1.9.6 Stanovení celkového obsahu P, K, Ca, Mg a S v rostlinách

Bylo naváženo 0,5 g ($\pm 0,005$ g) namletého rostlinného materiálu. Ten byl převeden do roztoku rozkladem na mokré cestě s pomocí mikrovlnné digesce (Ethos 1; MLS GmbH, Švýcarsko) v prostředí kyseliny dusičné a peroxidu vodíku. Získaný vzorek byl poté kvantitativně převeden do roztoku (finální objem 50 ml). V roztoku byl následně měřen obsah sledovaných prvků přístrojem ICP-OES. Pouze obsah draslíku byl měřen plamenovým atomovým absorpčním spektrometrem (F-AAS 280 FS, Mulgrave, Austrálie).

1.10 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky vypočtené v programu Microsoft Excel (Excel, 2019) a pokročilé statistické vyhodnocení (korelační analýza; ANOVA, Tukey test při $p < 0.05$) bylo realizováno prostřednictvím programu Statistica 12 (StatSoft, Inc., 2013).

Výsledky

V následující kapitole jsou uvedeny vstupní charakteristiky substrátů, včetně pH a vodivosti, výnosové charakteristiky, obsahy makroprvků v pěstebních médiích, v rostlinách a odběr makroprvků rostlinami. Pro větší přehlednost a srovnatelnost jsou obsahy makroprvků v pěstebních médiích uváděny vždy v mg/kg sušiny, stejně jako celkové obsahy těchto prvků v rostlinách. Odběr makroprvků je pak uváděn v mg na nádobu.

1.11 Vstupní rozbory

Hodnoty okamžitě přístupných makroprvků stanovené vodným výluhem byly ve všech případech vyšší u substrátu než u zeminy (Tabulka 1), nejmenší rozdíl byl u vápníku.

Tabulka 1 - Okamžitě přístupné makroprvky vstupních vzorků substrátu a zeminy získané vodným výluhem

| | P_{H2O} (mg/kg) | K_{H2O} (mg/kg) | Ca_{H2O} (mg/kg) | Mg_{H2O} (mg/kg) | S_{H2O} (mg/kg) |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Substrát | 417 | 1098 | 738 | 428 | 815 |
| Zemina | 0,00 | 47,6 | 294 | 27,2 | 7,13 |

Hodnoty potenciálně přístupných makroprvků stanovené metodou Mehlich 3 byly ve všech případech vyšší u substrátu než u zeminy (Tabulka 2), nejmenší rozdíl byl u vápníku, podobně jako u vodného výluhu.

Tabulka 2 - Potenciálně přístupné makroprvky vstupních vzorků substrátu a zeminy získané metodou Mehlich 3

| | P_{M3} (mg/kg) | K_{M3} (mg/kg) | Ca_{M3} (mg/kg) | Mg_{M3} (mg/kg) | S_{M3} (mg/kg) |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Substrát | 396 | 1811 | 5208 | 1647 | 460 |
| Zemina | 25,4 | 73,2 | 3862 | 195 | 17,8 |

Hodnoty potenciálně přístupných makroprvků stanovené metodou CAD byly ve všech případech vyšší u substrátu než u zeminy (Tabulka 3), nejmenší rozdíl byl u vápníku, podobně jako u předchozích dvou případů.

Tabulka 3 - Potenciálně přístupné makroprvky vstupních vzorků substrátu a zeminy získané metodou CAD

| | NO_{3CAT} (mg/kg) | P_{CAT} (mg/kg) | K_{CAT} (mg/kg) | Mg_{CAT} (mg/kg) | S_{CAT} (mg/kg) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Substrát | 273,2 | 299 | 899 | 538 | 168 |
| Zemina | 24,8 | 0,02 | 107 | 472 | 9,48 |

pH vstupních vzorků bylo vyšší u zeminy než u substrátu, elektrická vodivost byla vyšší u substrátu než u zeminy (Tabulka 4).

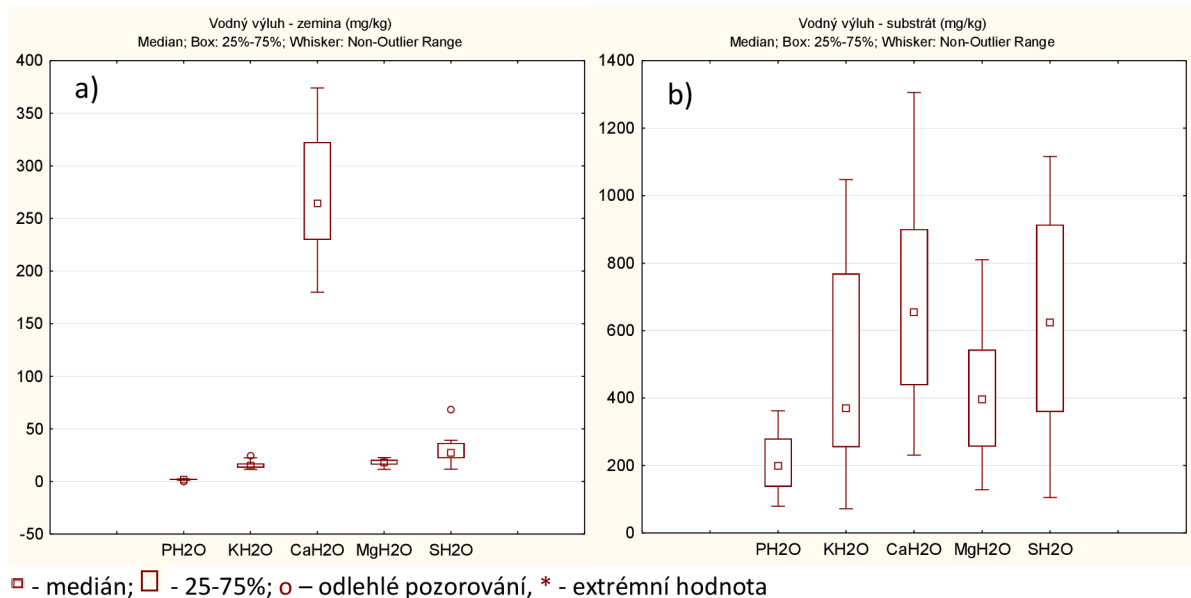
Tabulka 4 - pH a elektrická vodivost vstupních vzorků substrátu a zeminy

| | pH | EC (mS/cm) |
|-----------------|------|------------|
| Substrát | 4,96 | 1,12 |
| Zemina | 7,5 | 0,21 |

Pro úplnou bilanci živin byly provedeny i analýzy semen rostlin. Obsahy všech makroprvků se pohybovaly řádově v tisících mg/kg, avšak při přepočtu na výsevek byl vstup makroprvků osivem zanedbatelný.

1.12 Popisné charakteristiky

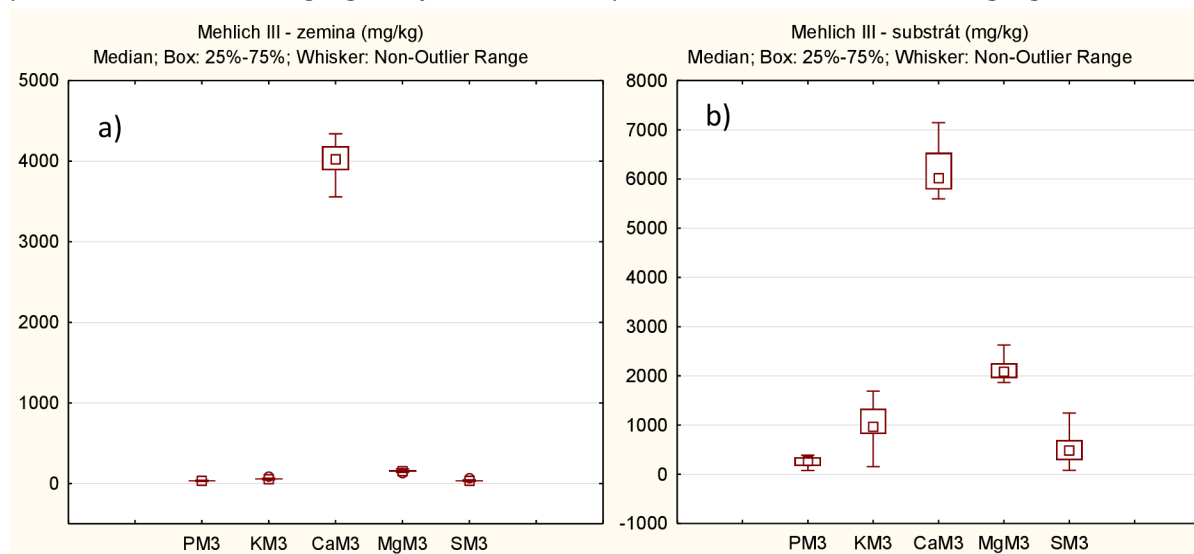
Popisné charakteristiky jsou znázorněny formou box-plotů, které uvádějí průměrné hodnoty, kvartily zahrnující většinu sledovaných (od 25 do 75 % výskytu) a celkový rozsah dat včetně odlehklých a extrémních pozorování. Jak můžeme vidět na obrázku 3a, okamžitě dostupné makroprvky v zemině byly naměřeny v poměrně malém množství. Výjimkou je vápník, který byl naměřen v rozmezí 170–370 mg/kg, naopak nejméně bylo naměřeno fosforu, a to přibližně do 3 mg/kg. Okamžitě přístupné makroprvky v substrátu (Obrázek 3b) byly naměřeny řádově ve stovkách mg/kg. Nejvíce bylo naměřeno rovněž vápníku, a to v rozmezí přibližně 230–1300 mg/kg a nejméně fosforu, přibližně 80–360 mg/kg



Obrázek 3 a, b – Vodný výluh: srovnání zeminy a substrátu

Potenciálně přístupné makroprvky v zemině stanovené metodou Mehlich 3 (Obrázek 4a) byly naměřeny řádově v desítkách mg/kg s výjimkou vápníku, který byl naměřen v rozmezí

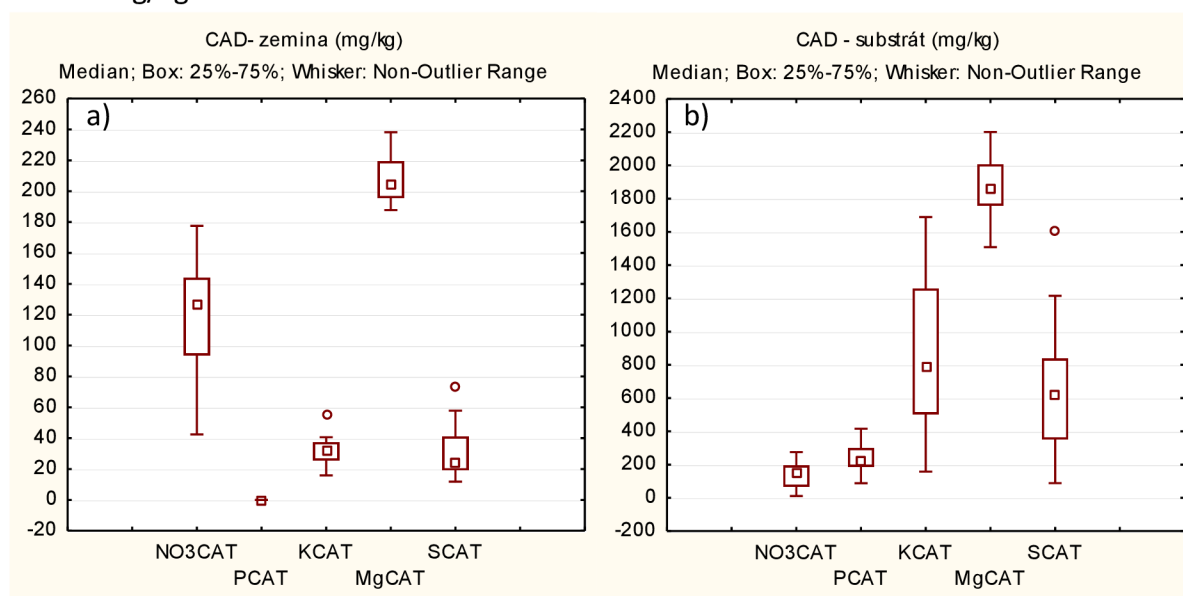
přibližně 3500-4300 mg/kg. Z potenciálně přístupných makroprvků v substrátu stanovených metodou Mehlich 3 (Obrázek 4b) bylo naměřeno rovněž nejvíce vápníku, a to v rozmezí přibližně 5600-7200 mg/kg a nejméně fosforu přibližně v rozmezí 80-390 mg/kg.



□ - medián; □ - 25-75%; ○ – odlehlé pozorování, * - extrémní hodnota

Obrázek 4 a, b – Metoda Mehlich 3: srovnání zeminy a substrátu

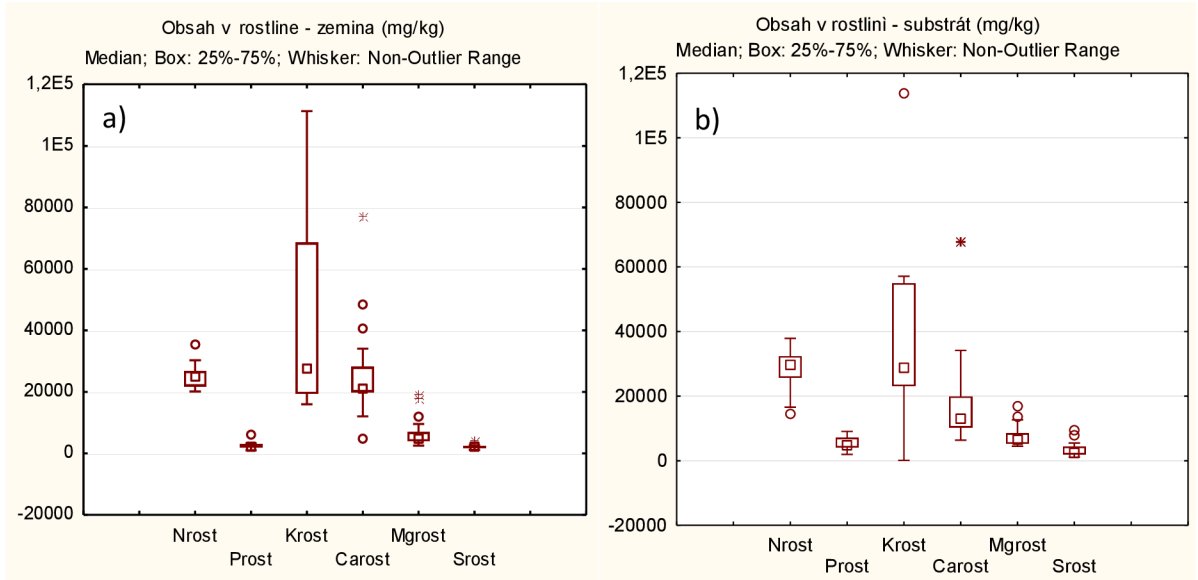
Obrázek 5a ukazuje potenciálně přístupné makroprvky v zemině stanovené metodou CAD, nejvíce bylo naměřeno hořčíku, a to v rozmezí přibližně 190-240 mg/kg. Potenciálně dostupný fosfor nebyl přístrojem ICP-OES detekovatelný. Z potenciálně přístupných makroprvků v substrátu stanovených metodou CAD (Obrázek 5b) bylo naměřeno rovněž nejvíce hořčíku, a to v rozmezí přibližně 1500-2200 mg/kg a nejméně nitrátu, a to v průměru do 300 mg/kg.



□ - medián; □ - 25-75%; ○ – odlehlé pozorování, * - extrémní hodnota

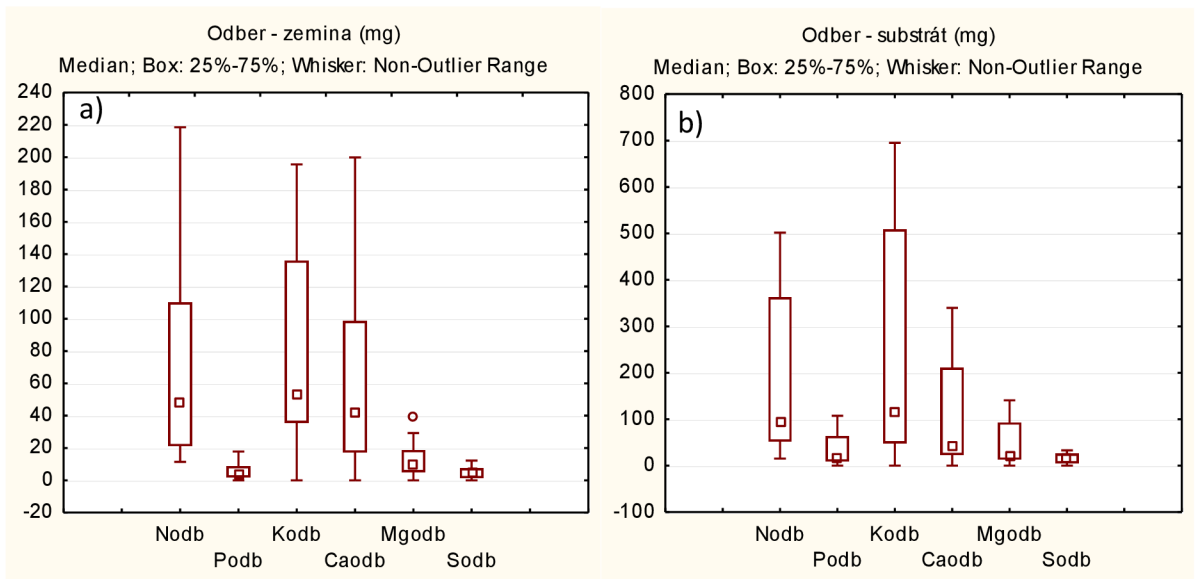
Obrázek 5 a, b – Metoda CAD: srovnání zeminy a substrátu

Z celkových obsahů makroprvků v rostlině bylo pro zeminu (obrázek 6a) naměřeno nejvíce draslíku, a to v rozmezí přibližně 18000-111000 mg/kg a nejméně fosforu přibližně v rozmezí 1400-6000 mg/kg. Výrazné rozdíly mezi opakováními jsou prezentovány řadou odlehlých i extrémních pozorování. Z celkových obsahů makroprvků v rostlině bylo pro substrát (Obrázek 6b) naměřeno nejvíce draslíku, a to v průměru do 55000 mg/kg a nejméně síry přibližně v rozmezí 100-4000 mg/kg.



□ - medián; ▭ - 25%-75%; ○ - odlehlé pozorování, * - extrémní hodnota
Obrázek 6 a, b – Obsahy makroprvků v rostlinách: srovnání zeminy a substrátu

Odběr makroprvků ze zeminy (Obrázek 7a) ukazuje že ze zeminy byly ve větším množství odebrány dusík, draslík a vápník, naopak fosfor hořčík a síra byly odebrány v menším množství. Obrázek 7b ukazuje, že ze substrátu byly ve větším množství odebrány dusík, draslík a vápník, naopak fosfor hořčík a síra byly odebrány v menším množství.



□ - medián; ▭ - 25%-75%; ○ - odlehlé pozorování, * - extrémní hodnota
Obrázek 7 a, b – Odběr makroprvků: srovnání zeminy a substrátu

1.13 Dusík, pH a vodivost

Hodnoty pH se pohybovaly mezi 5,12 a 7,58 (Tabulka 5). Byl zde pozorován jasný trend rozdílu pH substrátu a zeminy, kdy pH zeminy bylo vždy vyšší.

Hodnoty elektrické vodivosti se pohybovaly v rozmezí 0,15 – 1,29 mS/cm (Tabulka 5). Podobně jako u pH byl pozorován jasný trend rozdílu vodivosti substrátu a zeminy, kdy vodivost substrátu byla vždy vyšší.

Obsahy potenciálně dostupných nitrátů se pohybovaly v rozmezí 38,6 – 213 mg/kg (Tabulka 5). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u chrpy pěstované v substrátu i v zemině, a naopak průkazně nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy a máku pěstovaných v substrátu. Byl zde pozorován trend závislosti potenciálně dostupných nitrátů na druhu pěstovaných rostlin, kterému se však jako jediná vymyká černucha.

Celkové obsahy dusíku v rostlině se pohybovaly v rozmezí 17868 – 34404 mg/kg (Tabulka 5). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u astry pěstované v substrátu, naopak průkazně nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u máku pěstovaného rovněž v substrátu. Ostatní rozdíly neukazují na jednoznačný trend, avšak vyšší obsahy dusíku byly zpravidla naměřeny u rostlin pěstovaných v substrátu.

Odběr dusíku rostlinami se pohyboval v rozmezí 15,9 – 419 mg na nádobu (Tabulka 5). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u sluncovky pěstované v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u astry a chrpy pěstované v substrátu. Další rozdíly naznačují trend vlivu druhu i pěstebního média na odběr dusíku, kdy rostliny stejného druhu vykazovaly větší odběr dusíku při pěstování v substrátu.

Tabulka 5 - pH, vodivost, potenciálně dostupný nitrát, celkový obsah dusíku v rostlinách a odběr dusíku

| Varianta | pH | EC (mS/cm) | NO ₃ ⁻ CAD (mg/kg) | N _{rost} (mg/kg) | N _{odb} (mg) |
|---------------|-------------------|--------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Chrpa – Z | 7,53 ^b | 0,15 ^a | 45,4 ^a | 26158 ^{bcd} | 112 ^{cd} |
| Černucha – Z | 7,58 ^b | 0,17 ^a | 130 ^{bc} | 24362 ^{abc} | 48,1 ^{abc} |
| Astra – Z | 7,53 ^b | 0,18 ^a | 117 ^{bc} | 21390 ^{ab} | 133 ^d |
| Mák – Z | 7,58 ^b | 0,17 ^a | 151 ^{cd} | 28166 ^{bcde} | 20,8 ^a |
| Sluncovka – Z | 7,75 ^b | 0,18 ^a | 137 ^{bc} | 24500 ^{abc} | 15,9 ^a |
| Chrpa – S | 5,14 ^a | 0,87 ^{bc} | 38,6 ^a | 30947 ^{cde} | 349 ^e |
| Černucha – S | 5,12 ^a | 1,29 ^c | 213 ^d | 27089 ^{bcd} | 97,4 ^{bcd} |
| Astra – S | 5,30 ^a | 0,83 ^{bc} | 80,7 ^{ab} | 17867 ^a | 419 ^e |
| Mák – S | 5,33 ^a | 0,55 ^{ab} | 211 ^d | 34403 ^e | 29,0 ^{ab} |
| Sluncovka – S | 5,39 ^a | 0,88 ^{bc} | 150 ^{cd} | 31800 ^{de} | 61,7 ^{abcd} |

Regresní analýza pro dusík (Tabulka 6) neukazuje na vysvětlení obsahu a odběru dusíku potenciálně dostupným nitrátem.

Tabulka 6 - Lineární regrese pro dusík

| N | a | b | R ² |
|----------|-------|-------|----------------|
| rost:CAD | 23,4 | 23688 | 0,07 |
| odb:CAD | -1,24 | 286 | 0,32 |

($y = ax + b$)

Korelační analýza pro dusík (Tabulka 7) ukazuje signifikantní korelaci mezi odběrem dusíku a potenciálně dostupným nitrátem v pěstebním médiu a signifikantní korelaci mezi odběrem dusíku a obsahem dusíku v rostlině.

Tabulka 7 – Korelace pro dusík

| N | CAD | Rost | Odb |
|------|-------|-------|-------|
| CAD | 1 | 0,27 | -0,56 |
| Rost | 0,27 | 1 | -0,32 |
| Odb | -0,56 | -0,32 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.14 Fosfor

Obsahy okamžitě dostupného fosforu se pohybovaly v rozmezí 1,16 – 289 mg/kg (Tabulka 8). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy pěstované v substrátu. Byl pozorován trend rozdílu dostupnosti fosforu u substrátu a zeminy, kdy obsahy okamžitě dostupného fosforu byly vždy vyšší u substrátu.

Obsahy potenciálně dostupného fosforu získané metodou Mehlich 3 se pohybovaly v rozmezí 28,6 – 326 mg/kg (Tabulka 8). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny opět u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u chrpy pěstované v substrátu. Ostatní obsahy rovněž naznačují trend nižších obsahů potenciálně dostupného fosforu u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného fosforu získané metodou CAD se pohybovaly v rozmezí 0 – 297 mg/kg (Tabulka 8). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u rostlin pěstovaných v zemině (podobně jako tomu bylo u metody Mehlich 3) a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy a chrpy pěstovaných v substrátu. Byl pozorován trend rozdílu potenciálně dostupného fosforu u substrátu a zeminy, kdy obsahy potenciálně dostupného fosforu byly vždy průkazně vyšší u substrátu.

Celkové obsahy fosforu v rostlině se pohybovaly v rozmezí 1403 – 8413 mg/kg (Tabulka 8). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u astry pěstované v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u máku pěstovaného v substrátu. Hodnoty u rostlin pěstovaných v zemině a u astry pěstované v substrátu byly statisticky srovnatelné a zároveň průkazně nižší

než u zbylých rostlin pěstovaných v substrátu. Vyšší obsahy fosforu tak byly zpravidla naměřeny u rostlin pěstovaných v substrátu.

Odběr fosforu rostlinami se pohyboval v rozmezí 1,26 – 80,4 mg na nádobu (Tabulka 8). Průkazně nejvyšší hodnoty byly naměřeny u astry pěstované v substrátu, poté následovala chrpa pěstovaná rovněž v substrátu. Zbývající výsledky byly průkazně nižší a navzájem statisticky podobné.

Tabulka 8 - Fosfor: okamžitě dostupný, potenciálně dostupný, celkový obsah v rostlině a odběr

| Varianta | P _{H2O} (mg/kg) | P _{M3} (mg/kg) | P _{CAD} (mg/kg) | P _{rost} (mg/kg) | P _{odb} (mg) |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Chrpa – Z | 2,02 ^a | 34,3 ^a | 0,00 ^a | 2275 ^{ab} | 9,80 ^a |
| Černucha – Z | 1,16 ^a | 28,6 ^a | 0,00 ^a | 2293 ^{ab} | 4,58 ^a |
| Astra – Z | 1,87 ^a | 29,8 ^a | 0,00 ^a | 1403 ^a | 9,42 ^a |
| Mák – Z | 1,53 ^a | 32,1 ^a | 0,00 ^a | 4193 ^{abc} | 1,26 ^a |
| Sluncovka – Z | 2,01 ^a | 35,3 ^a | 0,00 ^a | 3087 ^{abc} | 1,95 ^a |
| Chrpa – S | 219 ^{bc} | 326 ^c | 288 ^c | 5394 ^c | 60,9 ^b |
| Černucha – S | 289 ^c | 294 ^c | 297 ^c | 4364 ^{bc} | 15,6 ^a |
| Astra – S | 168 ^b | 222 ^{bc} | 228 ^{bc} | 3422 ^{abc} | 80,4 ^c |
| Mák – S | 132 ^b | 133 ^{ab} | 150 ^b | 8413 ^d | 6,28 ^a |
| Sluncovka – S | 229 ^{bc} | 284 ^c | 230 ^{bc} | 5576 ^{cd} | 8,98 ^a |

Regresní analýza pro fosfor (Tabulka 9) ukazuje velmi silné vztahy okamžitě dostupného fosforu s potenciálně dostupným fosforem, a to pro metodu Mehlich 3 i CAD. Odběr a celkový obsah fosforu v rostlině byly vysvětleny okamžitě a potenciálně dostupným fosforem v pěstebním médiu pouze z malé části.

Tabulka 9 - Lineární regrese pro fosfor

| P | a | b | R ² |
|-----------------------|------|--------|----------------|
| H ₂ O:M3 | 1,05 | 32,32 | 0,91 |
| H ₂ O:CAD | 1,04 | 10,73 | 0,86 |
| rost:H ₂ O | 6,81 | 3189,2 | 0,13 |
| rost:M3 | 5,79 | 3065,8 | 0,12 |
| rost:CAD | 7,44 | 2990,9 | 0,22 |
| odb:H ₂ O | 0,09 | 10,75 | 0,15 |
| odb:M3 | 0,1 | 5,27 | 0,25 |
| odb:CAD | 0,11 | 6,74 | 0,3 |

($y = ax + b$)

Korelační analýza fosforu (Tabulka 10) ukazuje signifikantní korelaci mezi všemi proměnnými kromě vztahu mezi odběrem a celkovým obsahem fosforu v rostlině.

Tabulka 10 – Korelace pro fosfor

| P | H2O | M3 | CAD | Rost | Odb |
|------|------|------|------|------|------|
| H2O | 1 | 0,95 | 0,92 | 0,36 | 0,47 |
| M3 | 0,95 | 1 | 0,91 | 0,35 | 0,57 |
| CAD | 0,92 | 0,91 | 1 | 0,46 | 0,60 |
| Rost | 0,36 | 0,35 | 0,46 | 1 | 0,17 |
| Odb | 0,47 | 0,57 | 0,60 | 0,17 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.15 Draslík

Obsahy okamžitě dostupného draslíku se pohybovaly v rozmezí 13,4 – 868 mg/kg (Tabulka 11). Průkazně nejnižší a signifikantně podobné hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině a u chrpy pěstované v substrátu, naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy pěstované v substrátu. Ostatní obsahy ukazují na trend nižších obsahů okamžitě dostupného draslíku u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného draslíku získané metodou Mehlich 3 se pohybovaly v rozmezí 53,3 – 1510 mg/kg (Tabulka 11). Průkazně nejnižší a signifikantně podobné hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy pěstované v substrátu. Byl pozorován jednoznačný trend nižších obsahů potenciálně dostupného draslíku u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného draslíku získané metodou CAD se pohybovaly v rozmezí 27,1 – 1475 mg/kg (Tabulka 11). Průkazně nejnižší a signifikantně podobné hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy pěstované v substrátu. Ostatní obsahy naznačují trend nižších obsahů potenciálně dostupného draslíku u zeminy.

Celkové obsahy draslíku v rostlině se pohybovaly v rozmezí 18956 – 80688 mg/kg (Tabulka 11). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u astry a černuchy pěstovaných v zemině i v substrátu a byly signifikantně podobné, což může naznačovat trend vlivu druhu na odběr draslíku. Naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u sluncovky pěstované v zemině. Rovněž ostatní obsahy naznačují vliv druhu rostlin.

Odběr draslíku rostlinami se pohyboval v rozmezí 19,4 – 607 mg na nádobu (Tabulka 11). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u máku pěstovaného v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u chrpy a astry pěstovaných v substrátu. Ostatní obsahy naznačují trend vlivu druhu rostlin i pěstebního média na odběr draslíku.

Tabulka 11 - Draslík: okamžitě dostupný, potenciálně dostupný, celkový obsah v rostlině a odběr

| Varianta | K _{H2O} (mg/kg) | K _{M3} (mg/kg) | K _{CAD} (mg/kg) | K _{rost} (mg/kg) | K _{odb} (mg) |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Chrpa – Z | 13,6 ^a | 66,8 ^a | 27,1 ^a | 35145 ^{ab} | 151 ^b |
| Černucha – Z | 17,8 ^a | 54,9 ^a | 36,0 ^a | 19739 ^a | 39,2 ^{ab} |
| Astra – Z | 16,9 ^a | 53,3 ^a | 28,8 ^a | 18956 ^a | 120 ^{ab} |
| Mák – Z | 15,4 ^a | 55,6 ^a | 33,5 ^a | 64500 ^{ab} | 19,4 ^a |
| Sluncovka – Z | 15,0 ^a | 54,9 ^a | 32,8 ^a | 80688 ^b | 52,2 ^{ab} |
| Chrpa – S | 143 ^a | 608 ^b | 359,3 ^{ab} | 53647 ^{ab} | 607 ^c |
| Černucha – S | 868 ^c | 1510 ^d | 1475 ^e | 26740 ^a | 97,0 ^{ab} |
| Astra – S | 320 ^{ab} | 833 ^{bc} | 556 ^{bc} | 21521 ^a | 506 ^c |
| Mák – S | 486 ^b | 1134 ^{cd} | 1108 ^{de} | 49940 ^{ab} | 36,9 ^{ab} |
| Sluncovka – S | 625 ^{bc} | 1137 ^{cd} | 946 ^{cd} | 46398 ^{ab} | 60,7 ^{ab} |

Regresní analýza pro draslík (Tabulka 12) ukazuje velmi silné vztahy mezi okamžitě dostupným draslíkem a potenciálně dostupným draslíkem, a to pro metodu Mehlich 3 i CAD. Odběr a celkový obsah draslíku v rostlině téměř vůbec nebyly vysvětleny okamžitě a potenciálně dostupným draslíkem v pěstebním médiu.

Tabulka 12 – Lineární regrese pro draslík

| K | a | b | R ² |
|-----------------------|--------|--------|----------------|
| H ₂ O:M3 | 0,54 | 45,54 | 0,89 |
| H ₂ O:CAD | 0,57 | 12,45 | 0,93 |
| rost:H ₂ O | -15,82 | 43733 | 0,03 |
| rost:M3 | -6,08 | 43327 | 0,01 |
| rost:CAD | -5,61 | 42550 | 0,01 |
| odb:H ₂ O | -0,05 | 180,51 | 0,01 |
| odb:M3 | 0,04 | 146,34 | 0,01 |
| odb:CAD | -0,02 | 176,29 | 0 |

$(y = ax + b)$

Korelační analýza draslíku (Tabulka 13) ukazuje signifikantní korelaci okamžitě a potenciálně dostupného draslíku v pěstebním médiu.

Tabulka 13 – Korelace pro draslík

| K | H2O | M3 | CAD | Rost | Odb |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H2O | 1 | 0,94 | 0,97 | -0,17 | -0,02 |
| M3 | 0,94 | 1 | 0,96 | -0,12 | 0,16 |
| CAD | 0,97 | 0,96 | 1 | -0,11 | -0,01 |
| Rost | -0,17 | -0,12 | -0,11 | 1 | 0,02 |
| Odb | -0,02 | 0,16 | -0,01 | 0,02 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.16 Síra

Obsahy okamžitě dostupné síry se pohybovaly v rozmezí 24,2 – 964 mg/kg (Tabulka 14). Průkazně nejnižší a signifikantně podobné hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině a u máku pěstovaného v substrátu, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u chrpy pěstované v substrátu. Ostatní obsahy ukazují na trend nižších obsahů okamžitě dostupné síry u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupné síry získané metodou Mehlich 3 se pohybovaly v rozmezí 31,2 – 858 mg/kg (Tabulka 14). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u černuchy pěstované v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u chrpy pěstované v substrátu. Ostatní rozdíly naznačují trend vyšších obsahů potenciálně dostupné síry v substrátu.

Obsahy potenciálně dostupné síry získané metodou CAD se pohybovaly v rozmezí 20 – 987 mg/kg (Tabulka 14). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u astry a chrpy pěstovaných v substrátu. Ostatní obsahy naznačují trend nižších obsahů potenciálně dostupné síry u zeminy.

Celkové obsahy síry v rostlině se pohybovaly v rozmezí 1192 – 7592 mg/kg (Tabulka 14). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u astry a chrpy pěstovaných v zemině a astry pěstované v substrátu, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u máku pěstovaného v substrátu. Ostatní rozdíly neukazují na jednoznačný trend.

Odběr síry rostlinami se pohyboval v rozmezí 0,92 – 28,1 mg na nádobu (Tabulka 14). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u máku pěstovaného v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u astry a chrpy pěstovaných v substrátu. Ostatní rozdíly neukazují na jednoznačný trend.

Tabulka 14 - Síra: okamžitě dostupná, potenciálně dostupná, celkový obsah v rostlině a odběr

| Varianta | S _{H2O} (mg/kg) | S _{M3} (mg/kg) | S _{CAD} (mg/kg) | S _{rost} (mg/kg) | S _{odb} (mg) |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Chrpa – Z | 35,2a | 44,8 ^{ab} | 48,9 ^a | 1797 ^a | 7,67 ^b |
| Černucha – Z | 25,3a | 31,2 ^a | 20,0 ^a | 2295 ^{ab} | 4,53 ^{ab} |
| Astra – Z | 35,3a | 43,5 ^{ab} | 45,6 ^a | 1362 ^a | 7,74 ^b |
| Mák – Z | 24,2a | 32,2 ^{ab} | 20,4 ^a | 3077 ^{ab} | 0,92 ^a |
| Sluncovka – Z | 27,4a | 35,9 ^{ab} | 21,5 ^a | 2282 ^{ab} | 1,47 ^{ab} |
| Chrpa – S | 964c | 857,9 ^e | 968 ^c | 2259 ^{ab} | 25,4 ^d |
| Černucha – S | 619bc | 412 ^{bcd} | 502 ^b | 3973 ^b | 14,1 ^c |
| Astra – S | 863bc | 782 ^{de} | 987 ^c | 1192 ^a | 28,13 ^d |
| Mák – S | 180a | 123 ^{abc} | 171 ^{ab} | 7592 ^c | 5,81 ^{ab} |
| Sluncovka – S | 531b | 473 ^{cd} | 569 ^{bc} | 2734 ^{ab} | 3,96 ^{ab} |

Regresní analýza síry (Tabulka 15) ukazuje silné vztahy okamžitě dostupné síry s potenciálně dostupnou sírou, a to pro metodu Mehlich 3 i CAD. Dále je podstatně vysvětlen odběr síry okamžitě dostupnou sírou a potenciálně dostupnou sírou měřenou metodou CAD.

Tabulka 15 – Lineární regrese pro síru

| S | a | b | R ² |
|-----------------------|-------|--------|----------------|
| H ₂ O:M3 | 0,85 | 1,82 | 0,91 |
| H ₂ O:CAD | 0,94 | 24,05 | 0,79 |
| rost:H ₂ O | -0,03 | 366,93 | 0,02 |
| rost:M3 | -0,03 | 434,77 | 0,02 |
| rost:CAD | -0,03 | 434,77 | 0,02 |
| odb:H ₂ O | 31,94 | 11,96 | 0,62 |
| odb:M3 | 27,95 | 4,99 | 0,6 |
| odb:CAD | 33,52 | 1,16 | 0,61 |

$(y = ax + b)$

Korelační analýza síry (Tabulka 16) ukazuje signifikantní korelaci všech proměnných kromě celkového obsahu síry v rostlině.

Tabulka 16 – Korelace pro síru

| S | H ₂ O | M3 | CAD | Rost | Odb |
|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| H ₂ O | 1 | 0,95 | 0,88 | -0,09 | 0,87 |
| M3 | 0,95 | 1 | 0,88 | -0,15 | 0,84 |
| CAD | 0,88 | 0,88 | 1 | -0,14 | 0,82 |
| Rost | -0,09 | -0,15 | -0,14 | 1 | -0,16 |
| Odb | 0,87 | 0,84 | 0,82 | -0,16 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.17 Vápník

Obsahy okamžitě dostupného vápníku se pohybovaly v rozmezí 248 – 952 mg/kg (Tabulka 17). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině a u máku pěstovaného v substrátu, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy a chrpy pěstovaných v substrátu. Ostatní obsahy neukazují na jednoznačný trend, avšak nižší hodnoty byly zaznamenány zpravidla u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného vápníku získané metodou Mehlich 3 se pohybovaly v rozmezí 3910 – 6762 mg/kg (Tabulka 17). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u sluncovky pěstované v substrátu. Byly pozorován jednoznačný trend nižších obsahů potenciálně dostupného vápníku u zeminy.

Celkové obsahy vápníku v rostlině se pohybovaly v rozmezí 10311 – 41012 mg/kg (Tabulka 17). Všechny naměřené hodnoty byly signifikantně podobné a nebyly mezi nimi zjištěny průkazné rozdíly. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u černuchy pěstované v substrátu, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u máku pěstovaného v zemině.

Odběr vápníku rostlinami se pohyboval v rozmezí 12,3 – 286 mg na nádobu (Tabulka 17). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u máku pěstovaného v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u astry pěstované v substrátu. Ostatní obsahy naznačují trend vlivu druhu na odběr vápníku, a trend vyššího odběru rostlin pěstovaných substrátu oproti rostlinám stejného druhu pěstovaných v zemině.

Tabulka 17 - Vápník: okamžitě dostupný, potenciálně dostupný, celkový obsah v rostlině a odběr

| Varianta | Ca _{H2O} (mg/kg) | Ca _{M3} (mg/kg) | Ca _{rost} (mg/kg) | Ca _{odb} (mg) |
|---------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Chrpa – Z | 258 ^a | 4185 ^a | 22101 ^a | 94,8 ^{bc} |
| Černucha – Z | 272 ^a | 4040 ^a | 17878 ^a | 34,6 ^{ab} |
| Astra – Z | 248 ^a | 3910 ^a | 24847 ^a | 134 ^{cd} |
| Mák – Z | 283 ^a | 4069 ^a | 41012 ^a | 12,3 ^a |
| Sluncovka – Z | 292 ^a | 3938 ^a | 33327 ^a | 22,3 ^{ab} |
| Chrpa – S | 821 ^b | 6257 ^{bc} | 17309 ^a | 194,8 ^d |
| Černucha – S | 952 ^b | 6090 ^{bc} | 10311 ^a | 37,0 ^{ab} |
| Astra – S | 616 ^{ab} | 6059 ^{bc} | 12064 ^a | 286 ^e |
| Mák – S | 358 ^a | 5746 ^b | 30276 ^a | 22,7 ^{ab} |
| Sluncovka – S | 691 ^{ab} | 6762 ^c | 26854 ^a | 34,8a ^b |

Regresní analýza vápníku (Tabulka 18) ukazuje částečné vztahy okamžitě dostupného vápníku s potenciálně dostupným vápníkem v pěstebním médiu. Odběr a celkový obsah vápníku v rostlině nebyly téměř vůbec vysvětleny okamžitě ani potenciálně dostupným vápníkem v pěstebním médiu.

Tabulka 18 - Lineární regrese pro vápník

| Ca | a | b | R ² |
|-----------------------|-------|--------|----------------|
| H ₂ O:M3 | 2,8 | 3763,9 | 0,55 |
| rost:H ₂ O | 0 | 558,68 | 0,05 |
| rost:M3 | -0,02 | 5469,5 | 0,05 |
| odb:H ₂ O | 0,75 | 413,76 | 0,05 |
| odb:M3 | 3,22 | 4824,1 | 0,07 |

($y = ax + b$)

Korelační analýza vápníku (Tabulka 19) ukazuje signifikantní korelaci pouze mezi okamžitě a potenciálně dostupným vápníkem.

Tabulka 19 – Korelace pro vápník

| Ca | H ₂ O | M3 | Rost | Odb |
|------------------|------------------|-------|-------|-------|
| H ₂ O | 1 | 0,71 | -0,23 | 0,32 |
| M3 | 0,71 | 1 | -0,23 | 0,30 |
| Rost | -0,23 | -0,23 | 1 | -0,16 |
| Odb | 0,32 | 0,30 | -0,16 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.18 Hořčík

Obsahy okamžitě dostupného hořčíku se pohybovaly v rozmezí 16 – 578 mg/kg (Tabulka 20). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u černuchy a chrpy pěstovaných v substrátu. Byl pozorován jednoznačný trend nižších obsahů okamžitě dostupného hořčíku u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného hořčíku získané metodou Mehlich 3 se pohybovaly v rozmezí 144 – 2439 mg/kg (Tabulka 20). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u sluncovky pěstované v substrátu. Byl pozorován jednoznačný trend nižších obsahů potenciálně dostupného hořčíku u zeminy.

Obsahy potenciálně dostupného hořčíku získané CAD se pohybovaly v rozmezí 201 – 1952 mg/kg (Tabulka 20). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly všeobecně u rostlin pěstovaných v substrátu. Byl pozorován jednoznačný trend vyšších obsahů potenciálně dostupného hořčíku u substrátu.

Celkové obsahy hořčíku v rostlině se pohybovaly v rozmezí 3321 – 13690 mg/kg (Tabulka 20). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny u černuchy pěstované v zemině, a naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u máku pěstovaného v substrátu. Ostatní obsahy neukazují na jednoznačný trend.

Odběr hořčíku rostlinami se pohyboval v rozmezí 3,74 – 121 mg na nádobu (Tabulka 20). Průkazně nejnižší hodnoty byly naměřeny všeobecně u rostlin pěstovaných v zemině, máku a sluncovky pěstovaných v substrátu. Naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u astry pěstované v substrátu. Ostatní obsahy naznačují vliv druhu rostliny na odběr hořčíku.

Tabulka 20 - Hořčík: okamžitě dostupný, potenciálně dostupný, celkový obsah v rostlině a odběr

| Varianta | Mg _{H2O} (mg/kg) | Mg _{M3} (mg/kg) | Mg _{CAD} (mg/kg) | Mg _{rost} (mg/kg) | Mg _{odb} (mg) |
|---------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Chrupa – Z | 16,0 ^a | 165 ^a | 202 ^a | 4688 ^{abc} | 20,2 ^a |
| Černucha – Z | 19,5 ^a | 150 ^a | 201 ^a | 3321 ^a | 6,50 ^a |
| Astra – Z | 17,6 ^a | 160 ^a | 213 ^a | 4342 ^{ab} | 25,3 ^a |
| Mák – Z | 20,0 ^a | 160 ^a | 217 ^a | 12459 ^{bcd} | 3,74 ^a |
| Sluncovka – Z | 17,6 ^a | 144 ^a | 209 ^a | 11530 ^{cd} | 7,76 ^a |
| Chrupa – S | 496 ^c | 2117 ^b | 1850 ^b | 7565 ^{abcd} | 85,3 ^b |
| Černucha – S | 578 ^c | 2157 ^b | 1952 ^b | 5399 ^{abc} | 19,4 ^a |
| Astra – S | 367 ^{bc} | 2048 ^b | 1722 ^b | 5102 ^{abc} | 121 ^c |
| Mák – S | 207 ^{ab} | 1924 ^b | 1926 ^b | 13690 ^d | 10,6 ^a |
| Sluncovka – S | 424 ^{bc} | 2439 ^c | 1860 ^b | 8884 ^{abcd} | 12,8 ^a |

Regresní analýza hořčíku (Tabulka 21) ukazuje vztahy okamžitě dostupného hořčíku potenciálně dostupným hořčíkem, a to pro metodu Mehlich 3 i CAD. Odběr hořčíku byl značně vysvětlen potenciálně dostupným hořčíkem v pěstebním médiu změřeným metodou CAD.

Tabulka 21 – Lineární regrese pro hořčík

| Mg | a | b | R ² |
|----------|-------|--------|----------------|
| H2O:M3 | 3,61 | 365,5 | 0,74 |
| H2O:CAD | 2,92 | 404,38 | 0,7 |
| rost:H2O | 0 | 222,64 | 0 |
| rost:M3 | 0,03 | 934,58 | 0,01 |
| rost:CAD | 0,03 | 805,99 | 0,02 |
| odb:H2O | 2,6 | 134,93 | 0,17 |
| odb:M3 | 11,81 | 777,48 | 0,2 |
| odb:CAD | 3,61 | 365,5 | 0,74 |

Korelační analýza hořčíku (Tabulka 22) ukazuje signifikantní korelaci mezi všemi proměnnými kromě celkového obsahu hořčíku v rostlině.

Tabulka 22 - Korelace pro hořčík

| Mg | H2O | M3 | CAD | Rost | Odb |
|------|-------|------|------|-------|-------|
| H2O | 1 | 0,85 | 0,83 | -0,04 | 0,51 |
| M3 | 0,85 | 1 | 0,98 | 0,12 | 0,51 |
| CAD | 0,83 | 0,98 | 1 | 0,15 | 0,47 |
| Rost | -0,04 | 0,12 | 0,15 | 1 | -0,15 |
| Odb | 0,51 | 0,51 | 0,47 | -0,15 | 1 |

(průkazné korelace při $p < 0,05$ jsou označeny červeně)

1.19 Výnos a odběr makroprvků z plochy

Výnos čerstvé hmoty nadzemních částí sklizených rostlin (Tabulka 23) se pohybovala v rozmezí 2,45 – 92,4 g. Průkazně nejvíce nadzemní biomasy vytvořily astra a chrpa pěstované v substrátu, a naopak nejméně nadzemní biomasy vytvořil mák pěstovaný v zemině i v substrátu. Byla pozorována rozdílná tvorba biomasy u různých druhů.

Obsah sušiny (Tabulka 23) se pohyboval v rozmezí 9,77 – 51,5 %. Průkazně nejvíce sušiny vytvořil mák pěstovaný v substrátu a nejméně sušiny vytvořily sluncovka a chrpa pěstované v substrátu a sluncovka pěstovaná v zemině. Sluncovka, astra a chrpa vytvořily vyšší podíl

sušiny při pěstování v zemině, zatímco mák a černucha vytvořili vyšší podíl sušiny při pěstování v substrátu.

Tabulka 23 – Výnosy čerstvé hmoty a sušiny

| Varianta | Čerstvá hmota (g) | Sušina (g) | Sušina (%) |
|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Chrpa – Z | 22,1 ^c | 4,30 ^{bc} | 19,7 ^{ab} |
| Černucha – Z | 9,28 ^{abc} | 1,98 ^{ab} | 21,3 ^{ab} |
| Astra – Z | 19,3 ^{bc} | 6,18 ^c | 33,9 ^{ab} |
| Mák – Z | 2,45 ^a | 0,78 ^a | 40,6 ^{ab} |
| Sluncovka – Z | 6,45 ^{ab} | 0,64 ^a | 9,93 ^a |
| Chrpa – S | 79,8 ^d | 11,3 ^d | 14,3 ^a |
| Černucha – S | 15,1 ^{abc} | 3,60 ^{abc} | 23,9 ^{ab} |
| Astra – S | 92,4 ^d | 23,7 ^e | 25,6 ^{ab} |
| Mák – S | 2,73 ^a | 0,85 ^{ab} | 51,5 ^b |
| Sluncovka – S | 19,8 ^{bc} | 1,95 ^{ab} | 9,77 ^a |

Pro lepší představu odběru při reálné výsadbě byl změřený odběr živin přepočítán na odběr vztažený na plochu, tedy na 1 m² (Tabulka 24). Odběr vztažený k ploše byl spočítán podle výsadbových sponů, které uvádějí Hertle et al. (1995), kteří však uvádějí spony pro trvalky podle výšky jejich habitu. Počty rostlina na 1 m² proto byly zdvojnásobeny, jelikož letničky se vysazují zpravidla hustěji, protože bývají menšího vzrůstu a není třeba počítat s místem pro jednotlivé rostliny do dalších let jako je tomu u trvalek.

Největší odběry vykazovaly astra a chrpa, což je dáno tím, že měly největší výnosy. Hned po nich měla největší odběr černucha, což také souhlasí s jejím výnosem.

Tabulka 24 - Odběr makroprvků ze zeminy na m²

| Druh | N (mg/m ²) | P (mg/m ²) | K (mg/m ²) | Ca (mg/m ²) | Mg (mg/m ²) | S (mg/m ²) |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Chrpa | 1347 | 118 | 1813 | 1137 | 242 | 92,1 |
| Černucha | 962 | 91,6 | 783 | 693 | 130 | 90,6 |
| Astry | 1592 | 113 | 1436 | 1613 | 303 | 92,9 |
| Mák | 249 | 15,1 | 232 | 148 | 44,9 | 11,1 |
| Sluncovka | 317 | 39,1 | 1044 | 446 | 155 | 29,4 |

Diskuse

1.20 Dusík

Výsledky naznačují vliv pěstebního média i druhu rostlin na odběr dusíku. Co se týká vlivu pěstebního média, mohli jsme pozorovat jasné rozdíly už u vstupních vzorků, kdy bylo v substrátu naměřeno přibližně desetkrát větší množství potenciálně dostupných nitrátů než u zeminy. Celkové obsahy dusíku v rostlině také naznačují tento vliv, neboť vyšší hodnoty byly zaznamenány zpravidla u rostlin pěstovaných v substrátu, kdy byly vyšší dostupnost nitrátů, což se shoduje s výsledky Bennett et al. (1989) a Kätterer et al. (1997), kteří pozorovali vyšší odběr dusíku při jeho vyšší dostupnosti. Dále potvrzuje vliv pěstebního média i to, že všechny druhy vykazovaly průměrně větší odběr dusíku v případě, že byly pěstované v substrátu oproti zemině, kde byly průměrné odběry nižší. V neposlední řadě je vliv pěstebního média naznačen signifikantní korelací mezi odběrem a potenciálně dostupnými nitráty i celkovým obsahem dusíku v rostlině. Lineární regrese však ukazuje, že odběr je vysvětlen potenciálně dostupnými nitráty pouze ze 32 %.

Z výsledků analýzy variance je pravděpodobný i vliv rostliny na obsah potenciálně přístupných obsahů nitrátů v pěstebním médiu. Nejméně potenciálně dostupných nitrátů bylo naměřeno u chrpy pěstované v substrátu i zemině, následovala astra sluncovka a nejvíce potenciálně dostupných nitrátů bylo zaznamenáno u máku. Černucha se tomuto trendu vymykala. Tyto výsledky se shodují s výsledky odběru dusíku rostlinami, kdy měly druhy opačné pořadí, což značí že při vyšším odběru zůstalo v pěstebním médiu méně potenciálně dostupného dusíku.

V průběhu experimentu došlo k poruše přístroje na měření amonného dusíku v substrátu a tyto výsledky tak nejsou k dispozici. Ačkoli jsou naznačeny jisté trendy, otázkou zůstává, jak silné by byly tyto trendy i v případě dostupnosti dat o amonném dusíku, neboť je známo, že různé druhy rostlin preferují dusík v různých formách, jak potvrzují Wang & Macko (2011).

1.21 Fosfor

U fosforu lze sledovat jasný trend závislosti obsahu fosforu na druhu pěstebního média. Tomuto trendu napovídají již vstupní vzorky, kdy bylo naměřeno výrazně více okamžitě dostupného i potenciálně dostupného fosforu v substrátu než v zemině. Vzorky změřené po sklizni experimentu tento trend potvrzují, jelikož u okamžitě dostupného i potenciálně dostupného fosforu (pro metodu Mehlich 3 i CAD) bylo změřeno výrazně menší množství u zeminy než u substrátu. U metody CAD bylo naměřené množství potenciálně dostupného fosforu v zemině dokonce pod hranicí detekce přístroje ICP-OES. Tento jev je pravděpodobně způsoben srážením volného hydrogenfosforečnanu na hydrogenfosforečnan vápenatý

v roztoku CAD. I celkové obsahy fosforu v rostlině ukazují, že všechny druhy měly přibližně dvakrát vyšší obsah fosforu, pokud byly pěstované v substrátu než ty, jenž byly pěstované v zemině. Průměrné odběry všech druhů pěstovaných v zemině a černuchy, máku a sluncovky pěstovaných v substrátu jsou signifikantně podobné a neukazují tak jasně na trend rozdílných odběrů ze zeminy nebo ze substrátu. V případě detailnějšího hodnocení, můžeme u rostlin stejného druhu pozorovat vždy menší průměrný odběr fosforu ze zeminy než ze substrátu. V neposlední řadě tento trend potvrzuje signifikantní korelace odběru i celkového obsahu fosforu v rostlině s okamžitě i potenciálně dostupným fosforem v pěstebním médiu. Všechny tyto výsledky se shodují s prací Asher & Loneragan (1967), kteří provedli pokus s osmi druhy jednoletých rostlin, pěstovaných v zemině a zkoumali odběr a obsah fosforu v rostlinách při různých koncentracích dostupného fosforu. Jejich výsledky ukazují vyšší odběr i celkový obsah fosforu v rostlině při vyšší dostupnosti fosforu. Dále také pozorovali větší výnos čerstvé biomasy i sušiny při větším množství dostupného fosforu. V neposlední řadě pozorovali výrazný rozdíl obsahu fosforu v rostlině mezi zkoumanými druhy, tento rozdíl se zvyšoval s rostoucím množstvím dostupného fosforu.

1.22 Draslík

V případě draslíku byl pozorován výrazný rozdíl mezi substrátem a zeminou také již u vstupních rozborů, jak tomu bylo i u předchozích dvou makroprvků, s tím, že v zemině bylo výrazně méně okamžitě i potenciálně dostupného draslíku. Tento trend dále potvrzují posklizňové rozbory, kdy byly výrazně nižší obsahy okamžitě dostupného draslíku naměřeny u rostlin pěstovaných v zemině. Stejně tak tomu bylo i u potenciálně dostupného draslíku, a to jak pro metodu Mehlich 3, tak i pro metodu CAD. Co se týká celkových obsahů draslíku v rostlině je trend vlivu pěstebního média také naznačen, jelikož astra, černucha i chrpa měly průměrně vyšší obsah draslíku při pěstování v substrátu než v zemině. Mák a sluncovka se tomuto trendu vymykaly. V neposlední řadě je tento trend potvrzen odběrem draslíku, kdy všechny druhy měly větší odběr při pěstování v substrátu než při pěstování v zemině. Vyšší odběr draslíku může být kromě vyšší dostupnosti způsoben i nižším pH substrátu, jelikož příjem draslíku se snižuje se s vyšším pH, jak uvádí Kirkby (1979). Ačkoli z výsledků analýzy variance vyplývá signifikantní vliv pěstebního média na obsah draslíku, korelace mezi okamžitě i potenciálně dostupným draslíkem a celkovým obsahem i odběrem draslíku rostlinami nebyly signifikantní. Podobně tomu bylo i u lineární regrese, kdy celkový obsah i odběr draslíku rostlinami byl vysvětlen okamžitě i potenciálně dostupným draslíkem pouze z 1 %.

Vliv druhu rostliny na obsah draslíku v substrátu je naznačen u okamžitě přístupného draslíku, kdy mezi rostlinami pěstovanými v zemině i v substrátu bylo zaznamenáno nejmenší množství u chrpy a největší u černuchy. Silněji je tento trend naznačen u potenciálně dostupného draslíku změřeného metodou CAD, kdy jak v případě zeminy, tak i substrátu měly výsledky druhů stejné posloupnosti. Nejvíce potenciálně dostupného draslíku bylo zaznamenáno u černuchy pak následoval mák, sluncovka, astra a nejméně bylo naměřeno u chrpy. Signifikantní rozdíly pak byly zaznamenány mezi druhy pěstovanými v substrátu. Určitý

náznak vlivu druhu rostliny lze pozorovat i u celkových obsahů draslíku v rostlině, astra pěstovaná v zemině i v substrátu vykazovala jedny z nejmenších množství draslíku. Naopak mák pěstovaný v zemině i v substrátu obsahoval zpravidla nejvíce draslíku. U samotného odběru je vliv druhu rostliny poměrně zřetelný - největší odběr měla chrpa, následovala astra a sluncovka, naopak nejmenší odběr byl zaznamenán u máku. Rozdíly odběru draslíku různými druhy rostlin potvrzuje i Barber (1985), který pozoroval že jílek vytrvalý (*Lolium perenne*) odebral o dvě třetiny méně draslíku, než odebral jetel luční (*Trifolium pratense*). Tento jev zdůvodňuje jinými nároky na živiny u různých druhů, a také jinou stavbou kořenového systému.

1.23 Síra

U síry byly stejně jako v případě předchozích makroprvků sledovány výrazné rozdíly mezi substrátem a zeminou u vstupních rozborů, kdy zemina vykazovala výrazně menší množství okamžitě i potenciálně dostupné síry. U posklizňových rozborů byl u okamžitě dostupné síry pozorován jasný trend nižších obsahů v zemině. Ačkoli průměrný obsah u máku pěstovaného v substrátu byl signifikantně podobný obsahům v rostlinách pěstovaných v zemině, byl přesto několikanásobně vyšší. Obsahy potenciálně dostupné síry také vykazovaly trend výrazně vyšších obsahů v substrátu oproti zemině, jak v případě metody Mehlich 3, tak i CAD. Celkové obsahy síry v rostlině nevykazovaly vliv pěstebního média, což vylučuje s poznatky Kowalska (2005), která pozorovala závislost obsahu síry v rostlině na dostupnosti síry u rajčete, tedy při vyšší koncentraci dostupné síry byl obsah síry v rostlině rajčete vyšší. Podobné výsledky pozorovali i (Mishu et al., 2013). Výsledky odběru síry potvrzují vliv pěstebního média, neboť všechny druhy měly vyšší odběr při pěstování v substrátu oproti zemině. Dále tento trend potvrzuje lineární regrese, kdy je odběr síry vysvětlen okamžitě i potenciálně dostupnou sírou alespoň ze 60 %. V neposlední řadě tento trend potvrzuje signifikantní korelace mezi odběrem a okamžitě i potenciálně dostupnou sírou.

Vliv druhu rostliny na obsah síry je naznačen u okamžitě dostupné i potenciálně dostupné síry. V případě substrátu i zeminy byly nejvyšší obsahy okamžitě i potenciálně dostupné síry zaznamenány vždy u astry a chrpy a nejnižší zpravidla u máku a černuchy, přičemž sluncovka se pohybovala uprostřed. Jasněji je tento trend zřetelný u celkových obsahů síry v rostlině, kdy nejnižší obsahy byly naměřeny u astry pěstované jak v substrátu, tak v zemině, hned po ní následovala chrpa též v obou variantách. Vliv druhu rostliny na odběr síry je patrný, jelikož astra a chrpa měly v obou variantách vyšší odběr než mák a sluncovka.

1.24 Vápník

U vstupních rozborů byl pozorován jednoznačný rozdíl dostupnosti vápníku mezi zeminou a substrátem, kdy bylo v zemině méně okamžitě i potenciálně dostupného vápníku. U posklizňových rozborů byl pozorován jednoznačný vliv pěstebního média, kdy bylo zaznamenané množství okamžitě i potenciálně dostupného vápníku nižší v zemině než

v substrátu. U celkových obsahů vápníku v rostlině je naznačen vlivu pěstebního média, přičemž obsahy vápníku u stejných druhů byly vždy nižší u substrátu. Dále tento trend nepotvrzují ani výsledky analýzy variance nebo korelační analýza, což se shoduje s výsledky Loneragan & Snowball (1969a), kteří tvrdí že příjem vápníku je jen relativně málo ovlivněn jeho dostupností.

Vliv druhu rostliny na obsah vápníku byl pozorován u celkových obsahů vápníku v rostlině. Ačkoli byly obsahy všech zkoumaných variant signifikantně podobné, mák a sluncovka měly vyšší obsahy vápníku než černucha, astra a chrpa, a to v případě zeminy i substrátu. Dále byl pozorován vliv druhu rostliny na odběr vápníku, kdy byl u astry a chrpy zaznamenán větší odběr vápníku než u máku, sluncovky a černuchy, a to v případě zeminy i substrátu. Tento trend potvrzují Loneragan & Snowball (1969b), kteří zkoumali příjem vápníku mezi osmnácti různými druhy a došli k závěru, že příjem vápníku je z většiny ovlivněn druhem rostliny.

1.25 Hořčík

Vstupní rozbory jako ve všech předchozích případech vykazovaly jasný rozdíl v dostupnosti hořčíku mezi substrátem a zeminou, přičemž dostupnost v zemině byla nižší. Posklizňové rozbory ukazují jednoznačný trend nižší dostupnosti okamžitě i potenciálně dostupného hořčíku v zemině, což by mohlo znamenat i nižší odběr. Vliv pěstebního média je pozorovatelný u celkových obsahů hořčíku v rostlině, kdy kromě sluncovky všechny druhy vykazovaly vyšší obsah hořčíku při pěstování v substrátu. Vliv pěstebního média na odběr hořčíku je patrný, jelikož všechny druhy vykazovaly vyšší odběr hořčíku při pěstování v substrátu oproti zemině. Tento trend dále potvrzuje signifikantní korelace odběru hořčíku s okamžitě i potenciálně dostupným hořčíkem v pěstebním médiu a výsledky analýzy variance, kdy je odběr hořčíku vysvětlen potenciálně dostupným hořčíkem (CAD) ze 74 %.

U okamžitě ani potenciálně dostupného hořčíku nebyl pozorován vliv druhu rostliny. Naopak vliv druhu rostliny byl pozorován u celkových obsahů hořčíku v rostlině, kdy mák a sluncovka vykazovaly vyšší obsah hořčíku než černucha astra a chrpa, a to jak v substrátu, tak i v zemině. Vliv druhu rostliny byl pozorován i u odběru hořčíku, kdy astra a chrpa vykazovaly vyšší odběry než mák, sluncovka a černucha, a to jak v zemině, tak i v substrátu. Tento trend svými výsledky potvrzuje Todd (1961), který pozoroval rozdíly v odběru hořčíku mezi pěti druhy lučních rostlin, kdy nejvyšší odběr vykazoval jetel luční (*Trifolium pratense*) a naopak nejmenší bojínek luční (*Phleum pratense*).

1.26 Potencionální riziko deficitu makroprvků

Při periodickém pěstování letniček, zvláště pak stejného druhu, na stejném místě může teoreticky dojít k deficitu potřebných živin. Živiny absorbované rostlinami jsou totiž se sklizením odumřelých částí rostlin po vegetační době z místa většinou odstraněny. Marschner, 2012) uvádí průměrné koncentrace makroprvků potřebné pro správný růst rostlin (Tabulka 25). Pokud tyto srovnáme s koncentracemi rostlin pěstovaných v zemině, můžeme pozorovat,

že pod uváděné hodnoty klesla pouze koncentrace fosforu u astry, a to zhruba na 75 % uvedené hodnoty. Ostatní makroprvky se pohybovaly nad zmiňovanými hodnotami, nejbližší k nim se však pohyboval již zmíněný fosfor a síra. To by mohlo znamenat potenciální riziko deficitu těchto makroprvků, s čímž souhlasí i výsledky dalších studií (Ågren et al., 2012; Vitousek et al., 2010), které uvádějí fosfor jako jeden z nejvíce limitujících prvků pro rostliny.

Rostliny při experimentu nevykazovaly jednoznačné symptomy deficitu makroprvků uvedených v literární rešerši. I když se koncentrace makroprvků ve zkoumaných rostlinách pohybovaly nad hodnotami uvedenými Marschnerem, hnojení v případě zeminy je pravděpodobně na místě, a to z důvodu vyšší tvorby biomasy, barvitějších květů a obecného plnění okrasné funkce.

Tabulka 25 - Průměrné koncentrace makroprvků potřebné ke správnému růstu rostlin, upraveno podle Marschner (2012)

| Makroprvek | N | K | Ca | Mg | P | S |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| (mg/kg) | 15000 | 10000 | 5000 | 2000 | 2000 | 1000 |

Závěr

Tato práce se zabývala odběrem makroprvků okrasnými letničkami ze zahradnického substrátu a z dlouhodobě nehnojené zeminy, která představuje zeminu pro běžnou parkovou výsadbu. Bylo použito pět druhů okrasných letniček, pro které byl kvantifikován odběr makroprvků a následně byly porovnány rozdíly odběru mezi oběma druhy pěstebních médií. Dále byly pozorovány také rozdíly mezi odběry samotných druhů rostlin. Vliv pěstebního média a druhů rostlin byly porovnány prostřednictvím jejich hodnoty pH, elektrické vodivosti, okamžitě i potenciálně přístupných makroprvků v pěstebním médiu a celkového obsahu makroprvků v rostlinách.

Zahradnický substrát a zemina před založením experimentu vykazovaly značné rozdíly v dostupnosti živin, elektrické vodivosti i pH. Zahradnický substrát vykazoval mnohem větší dostupnost makroprvků než zemina, což potvrdila i téměř 6krát vyšší elektrická vodivost; pH substrátu bylo nižší (4,96) než u zeminy (7,5).

Posklizňové rozbory ukázaly vliv pěstebního média na odběr makroprvků rostlinami, tento trend byl prokázán u dusíku, fosforu, síry a hořčíku, a to vždy s vyšším odběrem rostlin pěstovaných v zahradnickém substrátu. U draslíku a vápníku byl tento trend naznačen analýzou variance, ale nebyl prokázán lineární regresí ani korelační analýzou. V experimentu byl dále pozorován vliv druhu rostliny na odběr makroprvků, a to u dusíku, draslíku, síry, vápníku i hořčíku. Nejvyšší odběry byly zaznamenány u astry a chrpy a nejmenší zpravidla u máku. Rozdíly mezi odběry různých druhů jsou pravděpodobně způsobeny různými nároky na živiny nebo různým habitem druhů, jelikož rostliny s větším habitem potřebují zpravidla více živin k vytvoření biomasy.

Pro lepší porovnání s reálnými výsadbami byl kvantifikován rovněž odběr makroprvků na jednotku plochy. Dále bylo také zhodnoceno riziko vzniku deficitu makroprvků při periodickém pěstování okrasných letniček na stejném místě. Toto riziko bylo vyhodnoceno jako možné pouze v případě fosforu a síry, což odpovídá vysoké limitaci rostlin právě fosforem. Hnojení bylo spíše než jako prevence vzniku deficitu makroprvků doporučeno pro zlepšení okrasné funkce rostlin v jinak chudé zemině.

Většina dostupné literatury týkající se okrasných rostlin se zabývá spíše vizuálním hodnocením rostlin jako je jejich výška, počet větvíček, kvalita a barva květů a květenství, počet nódíí a velikost listů, nikoli dostupností živin, jejich koncentrací v rostlině nebo odběrem. Bylo proto obtížné porovnat pozorované výsledky, a lze tedy konstatovat, že do budoucna je třeba provést více studií na toto téma. Jedním z důvodů je i to, že letničky se poslední dobou vrací do městských prostor, a to v podobě kvetoucích lučních společenstev.

Literatura

- Abby Telfer, K. M. B. and R. S. P. (1997). Phase change and the regulation of trichome distribution in *Arabidopsis thaliana*. *Development*, 124, 645–654.
- Ågren, G. I., Wetterstedt, J. Å. M., & Billberger, M. F. K. (2012). Nutrient limitation on terrestrial plant growth - modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. *New Phytologist*, 194(4), 953–960. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04116.x>
- Alboresi, A., Gestin, C., Leydecker, M. T., Bedu, M., Meyer, C., & Truong, H. N. (2005). Nitrate, a signal relieving seed dormancy in *Arabidopsis*. *Plant, Cell and Environment*, 28(4), 500–512. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01292.x>
- Amtmann, A., Troufflard, S., & Armengaud, P. (2008). The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 682–691. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01075.x>
- Andersson, M. X., Stridh, M. H., Larsson, K. E., Liljenberg, C., & Sandelius, A. S. (2003). Phosphate-deficient oat replaces a major portion of the plasma membrane phospholipids with the galactolipid digalactosyldiacylglycerol. *FEBS Letters*, 537(1–3), 128–132. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(03\)00109-1](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(03)00109-1)
- Ankele, E., Kindgren, P., Pesquet, E., & Strand, Å. (2007). In vivo visualization of Mg-protoporphyrinIX, a coordinator of photosynthetic gene expression in the nucleus and the chloroplast. *Plant Cell*, 19(6), 1964–1979. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.048744>
- Asher, C. J., & Loneragan, J. F. (1967). RESPONSE OF PLANTS TO PHOSPHATE CONCENTRATION IN SOLUTION CULTURE. *Soil Science*, 103(4), 225–233.
- Axelsson, E., Lundqvist, J., Sawicki, A., Nilsson, S., Schröder, I., Al-Karadaghi, S., Willows, R. D., & Hansson, M. (2006). Recessiveness and dominance in barley mutants deficient in Mg-chelatase subunit D, an AAA protein involved in chlorophyll biosynthesis. *Plant Cell*, 18(12), 3606–3616. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.042374>
- Barber, S. A. (1985). *Potassium Availability at the Soil-Root Interface and Factors Influencing Potassium Uptake*.
- Barbosa, J. G., Barbosa, M. S., Muniz, M. A., & Grossi, J. A. (2009). Nutrição mineral e adubação de plantas ornamentais. *Informe Agropecuário*, 30, 16–21.
- Bennett, J. M., Mutti, L. S. M., Rao, P. S. C., & Jones, J. W. (1989). Interactive Effects of Nitrogen and Water Stresses on Biomass Accumulation, Nitrogen Uptake, and Seed Yield of Maize. *Field Crops Research*, 19, 297–311.
- Boaretto, A. E., & Moraes, F. M. (2010). *Contribuição da Nutrição Adequada para Qualidade dos Alimentos*.
- Bouguyon, E., Brun, F., Meynard, D., Kubeš, M., Pervent, M., Leran, S., Lacombe, B., Krouk, G., Guiderdoni, E., Zazímalová, E., Hoyerová, K., Nacry, P., & Gojon, A. (2015). Multiple mechanisms of nitrate sensing by *Arabidopsis* nitrate transceptor NRT1.1. *Nature Plants*, 1. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.15>
- Broadley, M. R., & White, P. J. (2010). Eats roots and leaves. Can edible horticultural crops address dietary calcium, magnesium and potassium deficiencies? *Proceedings of the Nutrition Society*, 69(4), 601–612. <https://doi.org/10.1017/S0029665110001588>
- Cakmak, I., Hengeler, C., & Marschner, H. (1994a). Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 45, Issue 278). <http://jxb.oxfordjournals.org/>
- Cakmak, I., Hengeler, C., & Marschner, H. (1994b). Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and

- magnesium deficiency. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 45, Issue 278).
<http://jxb.oxfordjournals.org/>
- Cakmak, I., & Kirkby, E. A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 692–704.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x>
- Cakmak, I., & Yazici, A. (2010). *Magnesium: A forgotten element in crop production Project4 View project QTL mapping for grain zinc and iron concentrations and zinc efficiency in a tetraploid and hexaploid wheat mapping populations View project*.
<https://www.researchgate.net/publication/291869977>
- Camargo, M. S., Mello, S. da C., Anti, G. R., & Carmello, Q. A. de C. (2005). Crescimento e absorção de nutrientes pelo Aster ericoides cultivado em solo sob estufa. *Horticultura Brasileira*, 23(2), 271–274.
- Castro, A. C. R. de, Loges, V., Santos da Costa, A., Felipe Arruda de Castro, M., Antônio Souza de Aragão, F., Gomes Willadino, L., & Manuel de Medeiros, D. (2007). Hastes florais de helicônia sob deficiência de macronutrientes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(9), 1299–1306.
- Chen, C. T., Lee, C. L., & Yeh, D. M. (2018). Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, or magnesium deficiency on growth and photosynthesis of Eustoma. *HortScience*, 53(6), 795–798. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12947-18>
- Chien, J. C., & Sussex, L. M. (1996). Differential Regulation of Trichome Formation on the Adaxial and Abaxial Leaf Surfaces by Gibberellins and Photoperiod in Arabidopsis thaliana (L.) Heynh. In *Plant Physiol* (Vol. 11).
- Christenson, D. R., & Doll, E. C. (1977). MAGNESIUM UPTAKE FROM EXCHANGEABLE AND NON-EXCHANGEABLE SOURCES IN SOILS AS MEASURED BY INTENSIVE CROPPING. *Soil Science*, 126(3), 166–168.
- Cilbert, S. M., Clarkson, D. T., Cambridge, M., Lambers, H., & John Hawkesford, M. (1997). SOA2 Deprivation Has an Early Effect on the Content of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase and Photosynthesis in Young Leaves of Wheat. In *Plant Physiol* (Vol. 11).
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. In *Biochimie* (Vol. 88, Issue 11, pp. 1707–1719).
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
- Coelho, V. A. T., Rodas, C. L., Coelho, L. C., Carvalho, J. G. de, Almeida, E. F. A., & Figueiredo, M. A. de. (2012). Caracterização de sintomas visuais de deficiências de macronutrientes e boro em plantas de gengibre ornamental. *Revista Brasileira de Horticultura Ornamental*, 18(1), 47–55.
- Cowan, A. K. (2006). Phospholipids as plant growth regulators. *Plant Growth Regulation*, 48(2), 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-5481-7>
- Dauer, J. M., & Perakis, S. S. (2013). Contribution of calcium oxalate to soil-exchangeable calcium. *Soil Science*, 178(12), 671–678. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000029>
- Degl'Innocenti, E., Hafsi, C., Guidi, L., & Navari-Izzo, F. (2009). The effect of salinity on photosynthetic activity in potassium-deficient barley species. *Journal of Plant Physiology*, 166(18), 1968–1981. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.06.013>
- Dovrat, G., Bakhshian, H., Masci, T., & Sheffer, E. (2020). The nitrogen economic spectrum of legume stoichiometry and fixation strategy. *New Phytologist*.
<https://doi.org/10.1111/nph.16543>

- Etienne, P., Sorin, E., Maillard, A., Gallardo, K., Arkoun, M., Guerrand, J., Cruz, F., Yvin, J. C., & Ourry, A. (2018). Assessment of sulfur deficiency under field conditions by single measurements of sulfur, chloride and phosphorus in mature leaves. *Plants*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/plants7020037>
- EXCEL. Microsoft Office Excel 2019. Microsoft office Enterprise 2019. USA.
- Ezawa, T., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2002). *P metabolism and transport in AM fungi*.
- Faquin, V. (2005). *Nutrição de plantas*. UFLA/FAEPE.
- Farhat, N., Rabhi, M., Krol, M., Barhoumi, Z., Ivanov, A. G., McCarthy, A., Abdelly, C., Smaoui, A., & Hüner, N. P. A. (2014). Starch and sugar accumulation in *Sulla carnosa* leaves upon Mg²⁺ starvation. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36(8), 2157–2165. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1592-y>
- Farhat, N., Sassi, H., Zorrig, W., Abdelly, C., Barhoumi, Z., Smaoui, A., & Rabhi, M. (2015). Is excessive Ca the main factor responsible for Mg deficiency in *Sulla carnosa* on calcareous soils? *Journal of Soils and Sediments*, 15(7), 1483–1490. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1101-y>
- Fischer, J. J., Beatty, P. H., Good, A. G., & Muench, D. G. (2013). Manipulation Of MicroRNA Expression To Improve Nitrogen Use Efficiency. In *Plant Science* (Vol. 210, pp. 70–81). <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.05.009>
- Foster, M. D. (1951). The importance of exchangeable magnesium and cation-exchange capacity in the study of montmorillonitic clays. *American Mineralogist*, 36, 717–730.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005). Redox Homeostasis and Antioxidant Signaling: A Metabolic Interface between Stress Perception and Physiological Responses. *The Plant Cell*, 17, 1866–1875. www.plantcell.org
- Foyer, C. H., Noctor, G., & van Emden, H. F. (2007). An evaluation of the costs of making specific secondary metabolites: Does the yield penalty incurred by host plant resistance to insects result from competition for resources? *International Journal of Pest Management*, 53(3), 175–182. <https://doi.org/10.1080/09670870701469146>
- Frazão, J. E. M., de Carvalho, J. G., de Pinho, P. J., Oliveira, N. P., Coelho, V. A. T., & de Melo, S. C. (2010). Nutritional deficiency in torch ginger (*Etilingera elatior* (Jack) R. M. Smith): Effect on dry matter production and biometrical index. *Ciencia e Agrotecnologia*, 34(2), 294–299. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542010000200004>
- Gaude, N., Nakamura, Y., Scheible, W. R., Ohta, H., & Dörmann, P. (2008). Phospholipase C5 (NPC5) is involved in galactolipid accumulation during phosphate limitation in leaves of *Arabidopsis*. *Plant Journal*, 56(1), 28–39. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.2008.03582.x>
- Gerardeaux, E., Jordan-Meille, L., Constantin, J., Pellerin, S., & Dingkuhn, M. (2010). Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by potassium deficiency in *Gossypium hirsutum* (L.). *Environmental and Experimental Botany*, 67(3), 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.09.008>
- Gojon, A., Krouk, G., Perrine-Walker, F., & Laugier, E. (2011). Nitrate transceptor(s) in plants. *Journal of Experimental Botany*, 62(7), 2299–2308. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq419>
- Gransee, A., & Fühns, H. (2013). Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368(1–2), 5–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y>
- Guerrero, A. C., Fernandes, D. M., & Ludwig, F. (2012). Acúmulo de nutrientes em gérbera de vaso em função de fontes e doses de potássio. *Horticultura Brasileira*, 30, 201–208.

- Hammond, J. P., Bennett, M. J., Bowen, H. C., Broadley, M. R., Eastwood, D. C., May, S. T., Rahn, C., Swarup, R., Woolaway, K. E., & White, P. J. (2003). Changes in gene expression in Arabidopsis shoots during phosphate starvation and the potential for developing smart plants. *Plant Physiology*, *132*(2), 578–596.
<https://doi.org/10.1104/pp.103.020941>
- Hao, X., & Papadopoulos, A. P. (2003). Effects of calcium and magnesium on growth, fruit yield and quality in a fall greenhouse tomato crop grown on rockwool. *Can. J. Plant Sci*, *83*, 903–912.
- Hawkesford, M. J., Kopriva, S., & de Kok, L. J. (2016). *Nutrient Use Efficiency in Plants*.
<http://www.springer.com/series/6193>
- Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., & Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? In *Trends in Plant Science* (Vol. 11, Issue 12, pp. 610–617). <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.10.007>
- Hermans, C., Johnson, G. N., Strasser, R. J., & Verbruggen, N. (2004). Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: Acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta*, *220*(2), 344–355.
<https://doi.org/10.1007/s00425-004-1340-4>
- Hermans, C., & Verbruggen, N. (2005). Physiological characterization of Mg deficiency in Arabidopsis thaliana. *Journal of Experimental Botany*, *56*(418), 2153–2161.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eri215>
- Hertle, B., Kiermeier, P., & Nickigová, M. (1995). *Zahradní květiny: Kvetoucí jsou nejkrásnější...* (1st ed.). Svojtka a Vašut.
- Ho, C. H., Lin, S. H., Hu, H. C., & Tsay, Y. F. (2009). CHL1 Functions as a Nitrate Sensor in Plants. *Cell*, *138*(6), 1184–1194. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.07.004>
- Huijser, P., & Schmid, M. (2011). The control of developmental phase transitions in plants. In *Development* (Vol. 138, Issue 19, pp. 4117–4129). <https://doi.org/10.1242/dev.063511>
- Islam, N., Patil, G., Torre, S., & Gislerød, H. R. (2004). Effects of relative air humidity, light, and calcium fertilization on tipburn and calcium content of the leaves of *Eustoma grandiflorum*. *European Journal of Horticultural Science*, *69*(1), 29–36.
- Jobe, T. O., Zenzen, I., Rahimzadeh Karvansara, P., & Kopriva, S. (2019). Integration of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in transition from C3 to C4 photosynthesis. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 70, Issue 16, pp. 4211–4221). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz250>
- Karmoker, J. L., Clarkson, D. T., Sakcr, L. R., Rooney, J. M., & Purvcs, J. v. (1991). Sulphate deprivation depresses the transport of nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. In *Planta* (Vol. 185).
- Kätterer, T., Eckersten, H., Andrén, O., & Pettersson, R. (1997). Winter wheat biomass and nitrogen dynamics under different fertilization and water regimes: application of a crop growth model. In *Ecological Modelling* (Vol. 102).
- Kidson, E. B., Anne Hole, F., & Metson, J. (1975). Magnesium in New Zealand soils: Iii availability of non-exchangeable magnesium to white clover during exhaustive cropping in a pot trial. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, *18*(4), 337–349.
<https://doi.org/10.1080/00288233.1975.10421056>
- Kirkby, E. A. (1979). Maximizing calcium uptake by plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *10*(1–2), 89–113. <https://doi.org/10.1080/00103627909366881>

- Kondratowicz-Maciejewska, K., & Kobierski, M. (2011). zawartość przyswajalnych form magnezu, fosforu i potasu w glebie pod wpływem zmianowania i nawożenia. *Journal of Elementology*, 16(4), 543–553. <https://doi.org/10.5601/jelem.2011.16.4.04>
- Kowalska, I. (2005). Effects of sulphate level in the nutrient solution on plant growth and sulphur content in tomato plants. *Folia Horticulturae*, 91–100.
- Kucera, B., Cohn, M. A., & Leubner-Metzger, G. (2005). Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. *Seed Science Research*, 15(4), 281–307. <https://doi.org/10.1079/ssr2005218>
- Lalitha, M., & Dhakshinamoorthy, M. (2014). Forms of soil potassium-A review. *Agricultural Reviews*, 35(1), 64. <https://doi.org/10.5958/j.0976-0741.35.1.008>
- Lambers, H. (2022). *Annual Review of Plant Biology Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants*. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720>
- Lambers, H., Cawthray, G. R., Giavalisco, P., Kuo, J., Laliberté, E., Pearse, S. J., Scheible, W. R., Stitt, M., Teste, F., & Turner, B. L. (2012). Proteaceae from severely phosphorus-impooverished soils extensively replace phospholipids with galactolipids and sulfolipids during leaf development to achieve a high photosynthetic phosphorus-use-efficiency. *New Phytologist*, 196(4), 1098–1108. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04285.x>
- Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. J., & Veneklaas, E. J. (2006). Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany*, 98(4), 693–713. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
- Li, D., Tian, M., Cai, J., Jiang, D., Cao, W., & Dai, T. (2013). Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings. *Plant Growth Regulation*, 70(3), 257–263. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9797-4>
- Liang, G., He, H., & Yu, D. (2012). Identification of Nitrogen Starvation-Responsive MicroRNAs in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS ONE*, 7(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048951>
- Lin, Y. L., & Tsay, Y. F. (2017). Influence of differing nitrate and nitrogen availability on flowering control in *Arabidopsis*. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 68, Issue 10, pp. 2603–2609). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx053>
- Liu, T., Li, Y., Ren, J., Qian, Y., Yang, X., Duan, W., & Hou, X. (2013). Nitrate or NaCl regulates floral induction in *Arabidopsis thaliana*. *Biologia (Poland)*, 68(2), 215–222. <https://doi.org/10.2478/s11756-013-0004-x>
- Loneragan, J. F., & Snowball, K. (1969a). Calcium requirements of plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 20(3), 465–478.
- Loneragan, J. F., & Snowball, K. (1969b). Rate of calcium absorption by plant roots and its relation to growth. *Australian Journal of Agricultural Research*, 20(3), 479–490.
- Ludwig, F., Fernandes, D. M., Mota, P. R. D., & Villas Bôas, R. L. (2008). Macronutrientes em cultivares de gérbera sob dois níveis de fertirrigação. *Horticultura Brasileira*, 26, 68–73.
- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979:. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10:1361-1369.
- Maathuis, F. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>

- Maathuis, F., & Sanders, D. (1994). Cell Biology Mechanism of high-affinity potassium uptake in roots of *Arabidopsis thaliana* (energized K⁺ transport/K⁺-H⁺ cotaspWrt/current/voltage analysis). *Cell Biology*, *91*, 9272–9276. <https://www.pnas.org>
- Mahouachi, J., Socorro, A. R., & Talon, M. (2006). Responses of papaya seedlings (*Carica papaya* L.) to water stress and re-hydration: Growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance. *Plant and Soil*, *281*(1–2), 137–146. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3935-3>
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas* (Editora Agronômica Ceres, Ed.).
- Malavolta, E. (2008). O futuro da nutrição de plantas, tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais. *Informações Agronômicas*, *121*, 1–10. www.ipni.net
- Marín, I. C., Loef, I., Bartetzko, L., Searle, I., Coupland, G., Stitt, M., & Osuna, D. (2011). Nitrate regulates floral induction in *Arabidopsis*, acting independently of light, gibberellin and autonomous pathways. *Planta*, *233*(3), 539–552. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1316-5>
- Marschner, H., & Cakmak, I. (1989). High Light Intensity Enhances Chlorosis and Necrosis in Leaves of Zinc, Potassium, and Magnesium Deficient Bean (*Phaseolus vulgaris*) Plants. *Journal of Plant Physiology*, *134*(3), 308–315. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80248-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80248-2)
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.X0001-5>
- McAinsh, M. R., & Pittman, J. K. (2009). Shaping the calcium signature. In *New Phytologist* (Vol. 181, Issue 2, pp. 275–294). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02682.x>
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* *15*:1409–1416.
- Mengutay, M., Ceylan, Y., Kutman, U. B., & Cakmak, I. (2013). Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. *Plant and Soil*, *368*(1–2), 57–72. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1761-6>
- Mercury, G. (2002). *Gerbera cultivation in greenhouse*.
- Michlovská Rodrigues, T., Ribeiro Rodrigues, C., Paiva, R., Faquin, V., Duarte de Oliveira Paiva, P., & Vilela Paiva, L. (2008). Levels of potassium in fertirrigation interfering in the growth/development and quality of chrysanthemum. *Ciência e Agrotecnologia*, *4*, 1168–1175.
- Mikkelsen, R. (2010). Soil and Fertilizer Magnesium. *Better Crops*, *96*(2).
- Miller, A. J., & Cramer, M. D. (2005). /2, Root Physiology-from Gene to Function. *And Soil*, *274*(1), 1–36. <https://doi.org/10.1007/sl>
- Mishu, H. M., Ahmed, F., Rafii, M. Y., Golam, F., Latif, M. A., & Rahman, Z. (2013). Effect of sulphur on growth, yield and yield attributes in onion (*Allium cepa* L.). In *AJCS* (Vol. 7, Issue 9).
- Misra, V. K., & Draper, D. E. (2000). Mg²⁺ binding to tRNA revisited: The nonlinear Poisson-Boltzmann model. *Journal of Molecular Biology*, *299*(3), 813–825. <https://doi.org/10.1006/jmbi.2000.3769>
- Mitchell, S. C. (2021). Nutrition and sulfur. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 96, pp. 123–174). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.02.014>
- Mollier, A., & Pellerin, S. (1999). Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 50, Issue 333). <https://academic.oup.com/jxb/article/50/333/487/537714>

- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A. K. (2022). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. In *Plant Signaling and Behavior*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Näsholm, T., Kielland, K., & Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*, *182*, 31–48.
- National Atmospheric Deposition Program. (2007). *Annual data summary for site OH 71*. <https://nadp.slh.wisc.edu/wp-content/uploads/2021/05/2007as.pdf>
- Neto, E. A. R., Furtini Boldrin, K. V., & Mattson, N. S. (2015). Nutrition and Quality in Ornamental Plants. *Ornamental Horticulture*, *21*(2), 139–150.
- Ohio Department of Agriculture. (2006). *Ohio agricultural statistics annual report 2005*.
- Pant, B. D., Musialak-Lange, M., Nuc, P., May, P., Buhtz, A., Kehr, J., Walther, D., & Scheible, W. R. (2009). Identification of nutrient-responsive Arabidopsis and rapeseed microRNAs by comprehensive real-time polymerase chain reaction profiling and small RNA sequencing. *Plant Physiology*, *150*(3), 1541–1555. <https://doi.org/10.1104/pp.109.139139>
- Paungfoo-Ionhienne, C., Lonhienne, T. G. A., Rentsch, D., Robinson, N., Christie, M., Webb, R. I., Gamage, H. K., Carroll, B. J., Schenk, P. M., & Schmidt, S. (2008). Plants can use protein as a nitrogen source without assistance from other organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(11), 4524–4529.
- Peoples, T. R., & Koch, D. W. (1979). Role of Potassium in Carbon Dioxide Assimilation in *Medicago sativa* L. In *Plant Physiol* (Vol. 63).
- Pinho, P. J. de. (2007). *Deficiências nutricionais em bananeira ornamental (Musa velutina h. Wendl. & Drude): Alterações químicas e morfológicas e caracterização de sintomas visuais*. Universidade Federal de Lavras.
- Poethig, R. S. (2013). Vegetative phase change and shoot maturation in plants. In *Current Topics in Developmental Biology* (Vol. 105, pp. 125–152). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396968-2.00005-1>
- Pressman, E., Shaked, R., & Arcan, L. (1993). The Effect of Flower-Inducing Factors on Leaf Tipburn Formation in Chinese Cabbage. *Journal of Plant Physiology*, *141*(2), 210–214. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80762-5](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80762-5)
- Puech, L., & Mehne-Jakobs, B. (1997). Histology of magnesium deficient Norway spruce needles influenced by nitrogen source. *Tree Physiology*, *17*, 301–310.
- Rai, A., Singh, A. K., Mishra, R., Shahi, B., Rai, V. K., Kumari, N., Kumar, V., Gangwar, A., Sharma, R. B., Rajput, J., Kumari, N., Kumar, S., Anal, A. K. D., Rai, S., Sharma, S., Bahuguna, A., Arvind, ., Kumar, M., Kumar, A., & Singh, S. (2020). Sulphur in Soils and Plants: An Overview. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 66–70. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2020/v21i1030209>
- Ramani, B., Zorn, H., & Papenbrock, J. (2004). Quantification and Fatty Acid Profiles of Sulfolipids in Two Halophytes and a Glycophyte Grown under Different Salt Concentrations. In *Z. Naturforsch* (Vol. 59). <http://www.znaturforsch.com>
- Reitemeier, R. F. (1951). Soil Potassium. *Advances in Agronomy*, *3*, 113–164.
- Robinson, H., Gao, Y.-G., Sanishvili, R., Joachimiak, A., & H-J Wang, A. (2000). Hexahydrated magnesium ions bind in the deep major groove and at the outer mouth of A-form nucleic acid duplexes. In *Nucleic Acids Research* (Vol. 28, Issue 8).
- Rodríguez-Navarro, A., & Rubio, F. (2006). High-affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*, *57*(5), 1149–1160. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj068>

- Rodríguez-Navarro, D. N., Margaret Oliver, I., Albareda Contreras, M., & Ruiz-Sainz, J. E. (2011). Soybean interactions with soil microbes, agronomical and molecular aspects. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(1), 173–190. <https://doi.org/10.1051/agro/2010023>
- Rosa, Y. B. C. J., Silva, E. F., Fonseca, I. C., Silva, , Juslei Figueiredo, Rosa Junior, E. J., Rosa, D. B. C., & Sorgato, J. C. (2012). Crescimento e sintomas de deficiência nutricional em *Iris germanica* L. decorrentes da omissão de macronutrientes. *Revista Agrarian*, 5, 303–309.
- Sarkar, R., Basavaraj, B., & Kar, S. (2008). Iron and calcium availability to groundnut plants as affected by calcium carbonate and water levels in calcareous soil. *Journal of Crop Improvement*, 21(2), 209–220. <https://doi.org/10.1080/15427520701885782>
- Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production-invited paper. In *European Journal of Agronomy* (Vol. 14). www.elsevier.com/locate/eja
- Schimmel, J. P., & Bennett, J. (2003). NITROGEN MINERALIZATION CHALLENGES OF A CHANGING PARADIGM. *America, June 2000*, 2101–2117. <http://www.mendeley.com/research/relationships-among-species-traits-separating-levels-response-identifying-linkages-abundances/>
- Silva, J., & Uchida, R. (2000). Essential Nutrients for Plant Growth: Nutrient Functions and Deficiency Symptoms. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*, 31–55.
- Sirijovski, N., Lundqvist, J., Rosenbäck, M., Elmlund, H., Al-Karadaghi, S., Willows, R. D., & Hansson, M. (2008). Substrate-binding model of the chlorophyll biosynthetic magnesium chelatase BchH subunit. *Journal of Biological Chemistry*, 283(17), 11652–11660. <https://doi.org/10.1074/jbc.M709172200>
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press.
- Srikanth, A., & Schmid, M. (2011). Regulation of flowering time: All roads lead to Rome. In *Cellular and Molecular Life Sciences* (Vol. 68, Issue 12, pp. 2013–2037). <https://doi.org/10.1007/s00018-011-0673-y>
- StatSoft Inc. 1984 – 2013 (2023): Statistica, version 12
- Tennstedt, P., Peisker, D., Böttcher, C., Trampczynska, A., & Clemens, S. (2009). Phytochelatase synthesis is essential for the detoxification of excess zinc and contributes significantly to the accumulation of zinc. *Plant Physiology*, 149(2), 938–948. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127472>
- Tiaz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.).
- Todd, J. R. (1961). Magnesium in forage plants I. Magnesium contents of different species and strains as affected by season and soil treatment. In *J. Agric. Sci* (Vol. 56).
- Tuteja, N., & Mahajan, S. (2007). Calcium Signaling Network in Plants An Overview. In *Plant Signaling & Behavior* (Vol. 2, Issue 2). <http://www.landesbioscience.com/journals/psb/abstract.php?id=4176>
- Veatch-Blohm, M. E., Malinowski, M., & Keefer, D. (2012). Leaf water status, osmotic adjustment and carbon assimilation in colored calla lilies in response to saline irrigation. *Scientia Horticulturae*, 144, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.06.036>
- Vidal, E. A., Moyano, T. C., Canales, J., & Gutiérrez, R. A. (2014). Nitrogen control of developmental phase transitions in *Arabidopsis thaliana*. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 65, Issue 19, pp. 5611–5618). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru326>

- Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., & Chadwick, O. A. (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. In *Ecological Applications* (Vol. 20, Issue 1).
- Wang, J., Solomon, D., Lehmann, J., Zhang, X., & Amelung, W. (2006). Soil organic sulfur forms and dynamics in the Great Plains of North America as influenced by long-term cultivation and climate. *Geoderma*, 133(3–4), 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.003>
- Wang, L., & Macko, S. A. (2011). Constrained preferences in nitrogen uptake across plant species and environments. *Plant, Cell and Environment*, 34(3), 525–534. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02260.x>
- Wang, Y. Y., Cheng, Y. H., Chen, K. E., & Tsay, Y. F. (2018). Nitrate Transport, Signaling, and Use Efficiency. In *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 69, pp. 85–122). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040056>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. In *Annals of Botany* (Vol. 92, Issue 4, pp. 487–511). <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Yan, B., & Hou, Y. (2018). Effect of Soil Magnesium on Plants: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/2/022168>
- Yeh, D. M., Lin, L., & Wright, C. J. (2000). Effects of mineral nutrient deficiencies on leaf development, visual symptoms and shoot-root ratio of *Spathiphyllum*. *Scientia Horticulturae*, 86, 223–233.
- Yoshida, K., Ito, D., Shinkai, Y., & Kondo, T. (2008). Change of color and components in sepals of chameleon hydrangea during maturation and senescence. *Phytochemistry*, 69(18), 3159–3165. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.02.024>
- Yoshida, K., Mori, M., & Kondo, T. (2009). Blue flower color development by anthocyanins: From chemical structure to cell physiology. In *Natural Product Reports* (Vol. 26, Issue 7, pp. 884–915). <https://doi.org/10.1039/b800165k>
- Yu, S., Li, C., Zhou, C. M., Zhang, T. Q., Lian, H., Sun, Y., Wu, J., Huang, J., Wang, G., & Wang, J. W. (2013). Sugar is an endogenous cue for juvenile-to-adult phase transition in plants. *ELife*, 2013(2). <https://doi.org/10.7554/eLife.00269>
- Yu, Z., She, M., Zheng, T., Diepeveen, D., Islam, S., Zhao, Y., Zhang, Y., Tang, G., Zhang, Y., Zhang, J., Blanchard, C. L., & Ma, W. (2021). Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content. *Communications Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02458-7>
- Zhao, D., Oosterhuis, D. M., & Bednarz, C. W. (2001). Influence of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chlorophyll Content, and Chloroplast Ultrastructure of Cotton Plants. *Photosynthetica*, 93, 103–109.

