

Mendelova univerzita v Brně

Agromická fakulta

Ústav agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin



**Agromická
fakulta**

**Mendelova
univerzita
v Brně**



**Vliv deficitní výživy na růst, vývoj a aktivitu
kořenového systému kukuřice seté (*Zea mays*, L.)**

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petr Škarpa, Ph.D.

Vypracovala:

Marie Nádvorníková

Brno 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zpracovatelka: **Marie Nádvorníková**
Studijní program: Rostlinolékařství
Obor: Rostlinolékařství
Název tématu: **Vliv deficitní výživy na růst, vývoj a aktivitu kořenového systému kukuřice seté (Zea mays, L.)**
Rozsah práce: 30 – 40 stran

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literárního přehledu na zadané téma
2. Založení nádobového experimentu formou hydroponie s roztoky s deficitem živin (vybrané makrobiogenní prvky)
3. Hodnocení vývoje a růstu kořenového systému při deficitu vybraných živin v počátečních fázích vývoje kukuřice (velikost kořene, velikost kořenového vlášení – fotodokumentace) a stanovení aktivní části kořenového systému kukuřice na základě měření elektrické kapacity kořenů LCR-metrem (ECL-131D)
4. Sledování nadzemních částí rostlin (zejména projevů deficitu makrobiogenních prvků), výnos sušiny nadzemní i kořenové hmoty, a rovněž jejich chemickou analýzu (ARR).
5. Navržení metody statistického zpracování



Seznam odborné literatury:

1. RYANT, P. a kol. Multimediální učební texty z výživy a hnojení polních plodin. [online]. 2004. URL: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin.
2. ZIMOLKA, J. a kol. *Kukuřice : hlavní a alternativní užitkové směry*. 1. vyd. Praha: Profi Press, 2008. 200 s. ISBN 978-80-86726-31-1.
3. Blackwell Synergy [online]. 2007. URL: <http://www.blackwell-synergy.com/action/showJournals?type=1>.
4. CAB Abstracts [online]. 2007. URL: <http://web5s.silverplatter.com/webspirs/start.ws?customer=mendel>.
5. Web of Science [online]. 2007. URL: <http://portal.isiknowledge.com/portal.cgi?DestApp=WOS&Func=Frame>.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Datum zadání bakalářské práce:


říjen 2013


Termín odevzdání bakalářské práce:


duben 2015


Marie Nádvoříková
Autorka práce




Ing. Petr Škarpa, Ph.D.
Vedoucí práce


prof. Ing. Jaroslav Hlušek, CSc.
Vedoucí ústavu


prof. Ing. Ladislav Zeman, CSc.
Děkan AF MENDELU

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci „Vliv deficitní výživy na růst, vývoj a aktivitu kořenového systému kukuřice seté (*Zea mays*, L.)“ vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petru Škarpovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady, podporu a čas strávený při vypracování této bakalářské práce.

ABSTRAKT

Cílem nádobového experimentu bylo zjištění vlivu deficitní výživy makrobiogenními prvky na růst a vývoj kořenového systému kukuřice seté (*Zea Mays*, L.). Jako modelová plodina byl použit hybrid kukuřice SY ONDINA. Pokus byl založen formou hydroponických kultur, kukuřice byla po naklíčení semen pěstována v roztocích s deficitem P, N, K, Ca, S, Mg a roztoku s úplným obsahem živin (kontrolní varianta). V průběhu pokusu byla u rostlin odebraných v pravidelných intervalech 7 dnů stanovena hmotnost sušiny kořenů a nadzemní části, obsah živin v rostlině a velikost kořenového systému. Z výsledků rozboru rostlin se projevilo antagonistické i synergické působení mezi sledovanými prvky. Největší redukce hmotnosti kořenového systému kukuřice se projevila u rostlin s absencí draslíku a hořčíku. Utváření kořenů, které je možné posuzovat podle délky a plochy kořenového systému, bylo velmi omezeno deficitem vápníku, dusíku, hořčíku, ale i draslíku. Nejnižších hodnoty elektrické kořenové kapacity byly zaznamenány u rostlin deficitních na draslík a vápník.

Klíčová slova: kukuřice, kořenový systém, hydroponie, hmotnost, příjem živin, struktura kořenů, elektrická kořenová kapacita

ABSTRACT

The aim of hydroponic cultivation experiment was the determination of the influence of deficient nutrition on the maize (*Zea Mays*, L.) growth and root system. The model crop was maize hybrid SY ONDINA. The experiment had six deficient variants (P, N, K, Ca, S, Mg) and variant with all nutrients (control variant). During the experiment were taking plants at an interval of 7 days. The dry matter of root and stem was weighed, the content of nutrition and the size of root system were set. The antagonism and synergism between elements were showed. The bigger reduction of root dry mass had plants with potassium and calcium deficiency. The plants with deficient (especially deficiency of calcium, nitrogen, magnesium and potassium) had very restricted root structure. The lowest value of root electrical capacitancy had plants with potassium and calcium deficiency.

Key words: maize, root system, hydroponic cultivation, root and stem dry mass, supply of nutrition, root structure, root electrical capacitancy

OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	9
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED	10
3.1	Kukuřice.....	10
3.1.1	Historie.....	10
3.1.2	Botanická a biologická charakteristika	10
3.1.3	Anatomická a morfologická charakteristika	12
3.1.4	Růst a vývoj rostliny	14
3.1.5	Nároky na prostředí	14
3.2	Kořenový systém.....	16
3.2.1	Stavba kořene.....	16
3.2.2	Příjem živin kořeny.....	17
3.3	Výživa a hnojení	19
3.3.1	Dusík.....	19
3.3.2	Fosfor	22
3.3.3	Draslík.....	23
3.3.4	Vápník.....	24
3.3.5	Hořčík	26
3.3.6	Síra.....	27
4	MATERIÁL A METODIKA	29
5	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	35
5.1	Vliv deficitu živin na hmotnost sledovaných rostlin.....	35
5.2	Vliv deficitu živin na anorganický rozbor rostlin (ARR)	39
5.3	Vliv deficitu živin na délku a plochu kořenového systému	43
5.4	Vliv deficitu živin na elektrickou kořenovou kapacitu	47
6	ZÁVĚR.....	50
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
8	SEZNAM TABULEK, GRAFŮ A OBRÁZKŮ	59
8.1	Seznam tabulek	59
8.2	Seznam grafů.....	59
8.3	Seznam obrázků	60

1 ÚVOD

Kukuřice setá (*Zea Mays*, L.) je plodina poskytující velmi rozmanité možnosti využití. Její význam spočívá ve výživě lidí, je také krmnou, průmyslovou a energetickou plodinou, používá se i v konzervářském průmyslu. Je považována za velmi atraktivní plodinu, v posledních letech je patrný nárůst její pěstební plochy, zejména pak silážní kukuřice, která se využívá jako krmivo, ale především jako plodina vhodná pro produkci obnovitelných zdrojů energie.

Kukuřice má mohutný kořenový systém, který je velmi důležitým orgánem pro příjem vody a živin. Je nezbytné, aby půdy, ve kterých rostlina roste, byly schopny vytvořit optimální podmínky pro jeho správný rozvoj. Mezi významné faktory ovlivňující růst a vývoj kořenového systému patří bezesporu výživa. Ta je postavena zejména na optimalizaci půdní kyselosti a obsahu přístupných makrobiogenních prvků.

Z výsledků agrochemického zkoušení zemědělských půd ČR vyplývá, že v půdách dochází vlivem absence hnojení některými makrobiogenními živinami k poklesu jejich přístupných forem, které jsou ve výživě rostlin nepostradatelné. Jejich nedostatek způsobuje omezený růst nejen kořenů, ale i nadzemních částí rostlin, čímž negativně ovlivňuje výnos a kvalitu produkce.

Předložená práce by měla přispět k poznání účinku deficitní výživy kukuřice seté (*Zea Mays*, L.) na růst a aktivitu jejího kořenového systému.

2 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce, která svým zaměřením přispívá ke studiu výživy a hnojení kukuřice, si klade za cíl zjistit účinek deficitní výživy makrobiogenními prvky na růst a vývoj kořenového systému a nadzemní části rostlin kukuřice seté (*Zea mays* L.). Vychází z výsledků vegetačního pokusu založeného formou hydroponie ve fytotronech Ústavu agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin, AF Mendelovy univerzity v Brně.

Konkrétními cíli jsou:

- vypracování literárního přehledu na zadané téma,
- vyhodnocení vlivu deficitní výživy ve vegetačním pokusu s kukuřicí setou.

Vědecké hypotézy byly koncipovány následovně:

- 1) Absence makrobiogenního prvku ve výživě kukuřice se projeví jeho deficitem v rostlině, a to jak v kořenech, tak v nadzemních částech rostlin.
- 2) Absence makrobiogenního prvku ve výživě kukuřice povede k redukcii hmotnosti nadzemní části rostlin.
- 3) Absence makrobiogenního prvku ve výživě kukuřice sníží elektrickou kapacitu (velikost) kořenového systému kukuřice.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 Kukuřice

3.1.1 Historie

Za původní domovinu kukuřice jsou považovány tropické a subtropické oblasti Jižní a Střední Ameriky. Zimolka et al. (2008a) tvrdí, že kukuřice patří k rostlinám, u kterých doposud není známa divoká forma. Šašková (1993) uvádí, že pravděpodobně vznikla z plané, dnes již vyhynulé kukuřice s rozpadavým větvenem, která rostla na planinách Jižní a Střední Ameriky. Nicméně Smith (1995) uvádí, že žádné plané formy kukuřice nebyly nalezeny.

Za konkrétnější místo, kde byla kukuřice domestikována, se považuje Mexiko a Peru. Je zajímavé, že pro Maye a Aztéky měla kukuřice velký význam, v hrobech Inků byly nalezeny zrnka kukuřice a byl také objeven chrám zasvěcený bohyni kukuřice. Do Evropy byla přivezena Kolumbem koncem 15. století. Zpočátku byla kukuřice zejména v západní Evropě pěstována pouze jako okrasná. K prvnímu rozvoji pěstování kukuřice na našem území došlo po první světové válce, větší význam dostává pěstování kukuřice až po druhé světové válce, a to zejména díky rozšíření hybridní šlechtěné kukuřici. Kukuřice se stala jednou z hlavních krmných plodin, takže po poklesu stavu skotu počátkem devadesátých let její výměry v České republice klesaly, nyní je však zájem o pěstování této plodiny velmi velký (Šašková, 1993, Zimolka et al., 2008a). O významnosti této plodiny svědčí také fakt, že se pěstuje ve více zemích než ostatní běžné obilniny (Læg Reid, Bøckman, Kaarstad, 1999). Podle Situační a výhledové zprávy (2014) produkce kukuřice neustále stoupá, za posledních devatenáct let je více než 8x vyšší než v roce 1994.

3.1.2 Botanická a biologická charakteristika

Kukuřice (*Zea Mays*) je jednoletá a jednodomá rostlina. Patří do podtřídy jednoděložných (*Monokotyledonae*), řádu lipnicokvětých (*Poales*), čeledi lipnicovitých (*Poaceae*), skupiny kukuřicovitých (*Maydeae*) (Zimolka et al., 2008a).

Druhy kukuřice je možno podle charakteru endospermu zrna rozčlenit na convariety (poddruhy), jak uvádějí Zimolka et al. (2008b).

Kukuřice obecná, tvrdá (*Zea mays* convar. *indurata*, syn. *vulgaris*) má tvrdé, lesklé, okrouhlé zrno. Moučnatý endosperm je jen ve střední části zrna. Mívá nižší výnos. Schlegel (2010) uvádí, že tento poddruh obsahuje oproti ostatním velmi málo škrobu.

Kukuřice koňský zub (*Zea mays* convar. *identata*, syn. *dentiformis*) má zrno klínového tvaru a moučnatý endosperm dosahuje až k hornímu okraji zrna. Odrůdy jsou pozdější, ale výnosnější. Většina hybridů kukuřice pěstovaných v dnešní době pochází z kukuřice obecné a koňského zubu.

Kukuřice polozubovitá (*Zea mays* convar. *aorista*, syn. *semiindentata*) je přechodná forma mezi kukuřicí koňským zubem a kukuřicí obecnou. Endosperm zrna je více moučnatý než u koňského zubu.

Kukuřice pukancová (*Zea mays* convar. *evarta*, syn. *microsperma*) má drobné zrno s tvrdým a sklovitým endospermem. Podle tvaru zrna se dále rozlišuje kukuřice rýžová a perlová. Výskyt moučnatého endospermu je ojedinělý.

Kukuřice cukrová (*Zea mays* convar. *saccharata*) se vyznačuje svrasklým zrnem se sklovitým endospermem. Jako zelenina se sklízí ve voskové zralosti.

Kukuřice škrobnatá (*Zea mays* convar. *amylacea*) je typická zrnem s vysokým obsahem škrobu a nízkým obsahem bílkovin. Využívá se ve škrobárnách a lihovarnickém průmyslu.

Kukuřice vosková (*Zea mays* convar. *ceratina*) má zrno s matným povrchem připomínajícím vosk, vzhledem i tvrdostí je zrno podobné kukuřici obecné. Škrob tohoto poddruhu má jiné složení než u ostatních poddruhů, využívá se pro technické účely (Schlegel, 2010).

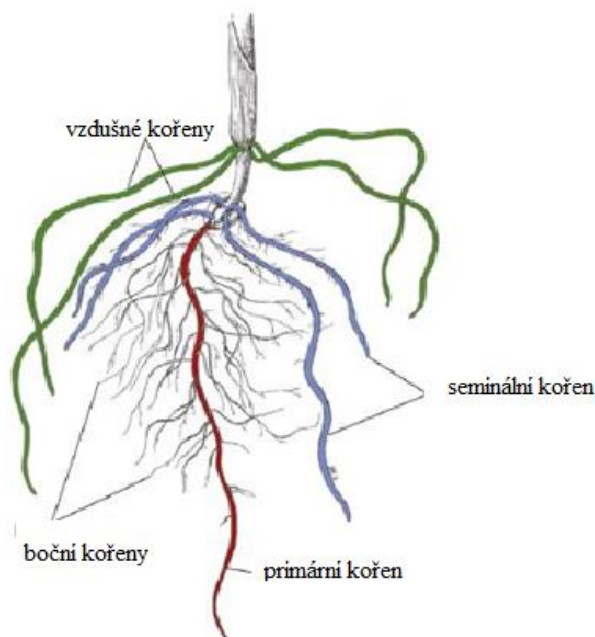
Zvláštními formami kukuřice je kukuřice škrobnato-cukrová (*Zea mays* convar. *amylesaccharata*) a kukuřice pestrolistá (*Zea mays japonica*), která je považována za okrasnou rostlinu (Zimolka et al. 2008b).

3.1.3 Anatomická a morfologická charakteristika

Kořen

Kukuřice má mohutný svazčitý kořenový systém (obr. 1) a delší období příjmu živin, je schopna dobře využívat živiny obsažené v půdě a dokáže získat vodu i z poměrně velké hloubky (Vaněk et al., 2002). Většina jemných kořínků se nachází v orniční vrstvě do 20 cm, provazčité kořeny mohou pronikat dle podmínek stanoviště 1,5 - 3 metry hluboko (Zimolka et al., 2008a). Skládanka (2006) uvádí, jestliže je vysoká hladina spodní vody, sahá kořenový systém do hloubky 0,3 - 0,4 m. Kořenová soustava kukuřice je složena z primárního kořínku, bočních klíčnicích kořenů, mezokotylových a sekundárních podzemních i nadzemních vzdušných kořenů (Zimolka et al., 2008b).

Vzdušné kořeny, které vyrůstají z nadzemních uzlů stébla, rostlinu chrání před polehnutím a pokud jsou v kontaktu s kyprou půdou, mohou se také podílet na výživě (Skládanka, 2006, Zimolka et al., 2008a). Význam bočních kořenů je podstatný jen do vytvoření adventivních kořenů na vyšších člancích stébla. V počátečním růstovém období se kořeny tvoří velmi rychle. Obvykle v prvních čtyřech týdnech po vzejití, v době, kdy jsou vytvořeny dva až tři listy kukuřice, zakořeňuje do hloubky 300 - 400 mm (Zimolka et al., 2008a).



Obr. 1: Stavba kořene kukuřice (Hochholdinger, Tuberosa, 2009)

Stéblo

Stéblo je děleno kolénky (nody) na články (internodia). Obvykle je rozděleno na 8 - 10 článků. Je válcovité, hladké a jeho výška je závislá na dané odrůdě, v našich podmínkách to může být od 1,2 m do 3 m. Směrem nahoru se zužuje. Aby bylo dostatečně pevné, je vyplněno dřevem. Na vrcholu stébla vyrůstá samčí květenství – lata (Skládanka, 2006, Zimolka et al., 2008a).

Listy

Z kolének rostou protistojné, dlouze kopinaté listy s širokou čepelí, která může být na okrajích mírně zvlněna. Zvlnění je způsobeno rychlejším růstem okraje čepele. Na horní straně jsou listy jemně obrvené, na spodní jsou hladké. Mohutná listová pochva je tvořena pouze krátkým jazýčkem, ouška chybějí. Jazýček stéblo objímá, uzavírá prostor mezi ním a listovou pochvou, a podle některých autorů je také schopen zabránit průniku vody do listové pochvy (Skládanka, 2006, Zimolka et al., 2008a).

Zimolka et al. (2008a) popisují listy jako žlábkovité a směřující šikmo vzhůru, díky čemuž je kukuřice schopna zachytit i nepatrné srážky. Na listech se také vyskytuje velké množství průduchů.

Květ

Stavba květenství kukuřice je odlišná než u většiny lipnicovitých druhů. Tvoří květy jednopohlavné, jednodomé, které jsou sestavené po dvou do klásků. Samčí prašnickové květy vytváří klásky seskupené do laty (panicula), samičí květy pestíkové tvoří palici (spadix). Lata jsou na vrcholu rostliny, palice se obvykle vyskytuje ve střední části stébla, vyrůstá z úžlabí listů (Šašková, 1993, Zimolka et al., 2008a).

Velikost a tvar laty jsou považovány za charakteristické znaky, každá volně opylená rostlina kukuřice by měla mít jinou velikost a tvar paniculy. Palice má svoji osu, která je tvořena vřetenem. V jamkách na vřetenu se nachází samičí klásky, které jsou párovitě uskupeny do podélných řad. Na konci semeníku je dlouhá, nitkovitá čnělka. Palice je chráněna obalovými listeny, z kterých vyčnívají čnělky. Nejdříve kvete palice, lata začíná kvést o 1 – 5 dní později, konec kvetení se překrývá. Opylení probíhá pomocí větru (Skládanka, 2006, Šašková, 1993, Zimolka et al., 2008a). Šašková (1993) uvádí,

že pyl může být za příznivých podmínek přenesen až na vzdálenost 3 km. Skládanka (2006) tvrdí, že vyšší teploty a nižší vzdušná vlhkost urychlují odumírání pylových zrn.

Plod

Plod kukuřice je nažka. Semeno pokrývá hladké oplodí. Tvar závisí na druhu kultivaru. Obilky z jednoho klasu nemívají stejnou hmotnost. Barva zrna může být rozmanitá, nejčastěji je žlutá, mohou se ale vyskytovat i fialové, černé nebo skvrnitě zrna (Zimolka et al., 2008a). HTS se pohybuje v rozmezí 300 – 350 g (Skládanka, 2006). Zimolka et al. (2008a) píše, že převládající složkou jsou sacharidy (glycidy), hlavně škrob, na nějž připadá 60 - 70 %, na cukry 1,5 - 5 %, na dextriny 1 - 6 %, obsah vlákniny činí nejvýše 2 %.

3.1.4 Růst a vývoj rostliny

Sledování růstových a vývojových změn kukuřice se podle Zimolky et al. (2008a) rozděluje na dvě základní období: vegetativní (klíčení, vzcházení, příp. odnožování) a generativní (sloupkování, metání, kvetení, tvorba zrna a zrání). Nejčastěji se pro hodnocení vývoje využívají kódy DC a BBCH.

Počáteční růst kukuřice je pozvolný. Doba klíčení závisí na teplotě a vlhkosti, při optimálních podmínkách může kukuřice vzejít za 4 - 5 dnů. Klíčení začíná při minimálně 6 °C (Skládanka 2006, Zimolka et al., 2008a). Po vzejití kukuřice zakořeňuje poměrně dlouho. Pro tvorbu vegetativních orgánů je třeba teplot okolo 10 °C, generativní orgány se tvoří při teplotách kolem 12 °C. Optimální teplota pro první fáze růstu je 20 °C a pro rozvoj kořenového systému 24 °C. Kukuřice velmi málo odnožuje, u některých hybridů se tato schopnost vůbec nevyskytuje. Za 50 - 60 dnů po výsevu nastává období metání lat a mléčné zralosti. Laty rozkvétají od středu a uvolňování pylu trvá 4 - 5 dní, záleží na podmínkách daného prostředí. Schopnost opylování blizny je poměrně dlouhá, až 25 dnů, oproti tomu životnost pylu je pouze několik dní (Skládanka, 2006).

3.1.5 Nároky na prostředí

Kukuřice je jednoletá rostlina typu C4, je tedy schopna využít přijaté živiny na tvorbu výnosu efektivněji než většina ostatních zemědělských plodin (Zimolka et al.,

2008a). Oproti C3 rostlinám je také odlišný způsob asimilace oxidu uhličitého (Kincl, Krpeš, 2000).

U C4 rostlin je fixace CO₂ katalyzována enzymem PEP-karboxylázou (fosfoenolpyruvátkarboxyláza) za vzniku čtyřuhlíkaté sloučeniny oxalacetátu. Fixace CO₂ probíhá dvakrát, atmosférický CO₂ je nejdříve fixován v buňkách mezofylu v cytoplazmě. Vzniká oxalacetát, který se dále podle druhu rostliny mění na malát nebo asparát. Odtud je transportován do buněk pochev cévních svazků, kde je dekarboxylací uvolněn CO₂. Uvolněný CO₂ je posléze znovu fixován Calvinovým cyklem (Zimolka et al., 2008a). Díky tomuto systému probíhá prvotní fixace i při nízkých koncentracích CO₂ a průběh fixace je rychlejší než u C3 rostlin. Dochází také k potlačení fotorespirace (Kincl, Krpeš, 2000).

Kukuřice je teplomilný druh. Zimolka et al. (2008a) uvádějí, že nejvhodnější oblasti pro pěstování kukuřice na zrno jsou ty, kde se průměrná roční teplota pohybuje mezi 9 až 10 °C a teplota za vegetační období duben – září je v rozmezí 16,5 – 17 °C. Kukuřice se řadí mezi krátkodenní druhy, její růst podporují teplejší noci (Schlegel, 2010). Pokud se den prodlužuje, kukuřice urychluje svůj vývoj a intenzitu růstu. Naopak kratší den urychluje kvetení, ale rostlina je nižší a má méně listů (Skládanka, 2006).

Kukuřice je náročná na vláhu, potřeba vody se liší v jednotlivých růstových fázích. Největší požadavky na vláhu jsou v období mezi metáním a mléčnou zralostí, voda je v této době důležitý faktor ovlivňující tvorbu zrn (Faměra, 1997). Dle Zimolky et al. (2008a) dešťové srážky v našich podmínkách pokryjí potřebu vláhy přibližně ze 70 %, zbytek by měl být zajištěn doplňkovou závlahou.

Nevyhovují jí zamokřené těžké půdy, vhodnější jsou středně těžké půdy. Vyhovují jí půdy hluboké, které ale nejsou štěrkovité, pH v rozmezí 5,6 - 7 (Zimolka et al, 2008a). Podle požadavků na agrotechniku a hnojení se kukuřice řadí k okopaninám, vyhovuje jí tedy organické hnojení. Mezi vhodné předplodiny patří ty, které zanechávají větší množství posklizňových zbytků. Nejvhodnější jsou jeteloviny nebo organicky hnojené okopaniny (Faměra, 1997). Zimolka et al. (2008a) uvádějí jako další vhodné předplodiny také olejninu nebo luskovinu. Nejčastěji je však kukuřice řazena mezi dvě obilniny jako zlepšující plodina.

3.2 Kořenový systém

3.2.1 Stavba kořene

Kořen se dělí na 3 hlavní části – pokožku, primární kůru a centrální válec. Kořenová pokožka (rhizodermis) je tvořena jednou vrstvou buněk, nemá kutikulu. Z pokožkových buněk se tvoří kořenové vlásky (Procházka et al., 2009). Kincl, Krpeš (2000) popisují buněčnou stěnu kořenových vlásků jako bobtnavý systém. Vývin kořenových vlásků velmi závisí na provzdušnění půdy. Jejich životnost je omezená, během vývoje rostliny se neustále obnovují (Richter, 2004).

Primární kůra (cortex) je mnohvrstevná a dělí se na 3 vrstvy. Vnější vrstva (exodermis) nahrazuje odumřelou pokožku, může být tvořena jednou anebo více vrstvami buněk. Je důležitá u jednoděložných rostlin, které sekundárně netloustnou (Kincl, 1997, Slavíková, 2002). Na exodermis navazuje střední vrstva kořene (mezodermis), kde se u jednoděložných rostlin často tvoří sklerenchym (Procházka et al., 2009). Vnitřní vrstva (endodermis) je obvykle jednovrstevná a vyskytují se v ní Casparyho proužky, které díky ukládání ligninu a suberinu působí jako ochrana proti zpětnému pohybu vody z cévních svazků. Pohyb vody do cévních svazků kořene zabezpečují propustné buňky (Slavíková, 2002).

Střední válec (stéle) tvoří vodivý systém a dřev. Vodivý systém je ohraničen pericyklem (perikambium), v kterém se zakládají postranní kořeny a adventivní pupeny. Vodivý systém tvoří radiální svazky cévní (Procházka et al., 2009).

Podélně je kořen rozdělen na zóny. Na kořenovou čepičku (kalyptru) navazuje dělivá (meristemická) zóna, dále prodlužovací (elongační) zóna, kde probíhá prodlužovací růst buněk (Kincl, 1997). Richter (2004) uvádí, že kukuřice má růstovou zónu 7 - 8 mm. Následuje absorpční zóna, ve které se vyskytuje kořenové vlášení, a zóna s plně diferencovanými trvalými pletivy (Lack, Evans, 2005).

Kořenová čepička se neustále obnovuje, její životnost je zhruba týden (Lack, Evans, 2005). V buňkách kořenové čepičky se nachází diktyozómy, které vytváří sliz. Funkcí slizu je usnadnit pronikání kořene půdou, zlepšit přilnavost k půdním částicím a může na sebe vázat ionty při výměně z půdy. Také ovlivňuje rozpustnost některých minerálních sloučenin a vývoj půdní mikroflóry (Richter, 2004).

Růst, vývoj kořene a jeho schopnost absorbovat a translokovat živiny ovlivňuje zejména provzdušnění půdy, dostupnost vláhy, teplota a také nedostatek živin (Baligar et al., 1998, Mengel et al., 2001). Deficitní výživa ovlivňuje zejména morfologii kořene, jeho tloušťku a délku, hustotu postranních kořenů a počet kořenových vlásků (Fageria, 2013).

3.2.2 Příjem živin kořeny

Richter (2004) uvádí, že příjem živin probíhá ve všech mladých částech kořenů, velkou mírou se na něm podílí oblast kořenového vlášení. Podle Vose (1990) má laterální větvení kořene a množství kořenových vlásků výrazný vliv na celkovou výživu. Příjem živin je také regulován dostupností živin a konkrétní fází vývoje (Fageria, 2013).

Živiny se ke kořenům mohou dopravovat kontaktní výměnou, ke které dochází mezi povrchem kořenů a povrchem půdních koloidů. Uvolňované H^+ z kořene je přímo vyměňováno za kationty půdních koloidů (Richter, 2004). Tento mechanismus je tedy velmi ovlivňován činností kořenového systému dané rostliny a pro celkový příjem živin není významný (Slamka, 2011). Hlavní význam pro dopravování živin má ale objemový tok a difúze. Při objemovém toku probíhá transport konvenčním tokem vody z půdního roztoku do kořene. Při kontaktu mezi ionty a povrchem kořene dochází buď k akumulaci iontů na povrchu kořene, nebo k jejich absorpci (Slamka, 2011). Přijatelnost živin v půdním roztoku se odvíjí od mnoha faktorů, ovlivňuje ho transpirace rostlin, půdní faktory jako teplota půdy, obsah vody či vzduchu v půdě a další (Kincl, Krpeš, 2000). Ovlivňuje ji také chemický potenciál iontů v půdním roztoku, pohyblivost iontů, koncentrace a aktivita iontů v půdním roztoku, teplota půdy a její kapacita pro vázání iontů a další (Richter, 2004). Difúze se uskutečňuje na principu přesunu iontů z místa s vyšší koncentrací do místa s nižší koncentrací (Slamka, 2011).

Mezi ionty v půdním roztoku a poutanými ionty existuje dynamická rovnováha, díky které jsou ionty po odčerpání rostlinou doplňovány z organických látek, krystalových mřížek a sorpčních vazeb (Richter, 2004). Na její udržení má vliv zejména koncentrace vodíkových iontů v půdě neboli pH (Kincl, Krpeš, 2000).

Samotný příjem živin kořeny může probíhat absorpcí iontů živin z půdního roztoku, při které jsou ionty přijímány přímo z půdního roztoku (Richter, 2004). Další mechanismem je výměnná absorpce adsorbovaných živinných iontů, kdy je výměna iontů na povrchu jílových a humusových částic podporována činností kořene, který uvolňuje H^+ a HCO_3^- jako produkty vydýchaného CO_2 (Kincl, Krpeš, 2000). Může také docházet k zpřístupňování živin vázaných v půdní zásobě pomocí H^+ iontů a organických kyselin vylučovaných z kořene. Ze zpřístupněných živin se vytvoří chelátové komplexy, které kořeny snadno přijímají. Intenzita vylučování H^+ iontů a organických kyselin je ovlivněna rychlostí respirace, která závisí na dostupnosti kyslíku a sacharidů kořenům (Richter, 2004).

Transport vody a minerálních látek z kořenového vlášení do vodivých drah kořene může probíhat apoplastickou nebo symplastickou cestou. Apoplast probíhá přes rhizodermis a primární kůru, zastavuje se u endodermis, přes kterou může probíhat pouze symplast. Symplast probíhá pomocí plazmodesmat (Kincl, Krpeš, 2000). V kořeni jsou živiny z půdního roztoku pomocí transportních bílkovin přeneseny přes membránu plazmalemu a poté jsou aktivně vloženy do xylému (Procházka et al., 2009).

3.3 Výživa a hnojení

Kukuřice je typická velmi pomalým počátečním růstem a malým příjmem živin. Na produkci jedné tuny zrna potřebuje 25 kg N, 8 kg P₂O₂ a 20 kg K₂O. Orientační potřeba hnojení N, P, K je 100 - 150 kg N, 20 - 70 kg P₂O₂ a 90 - 100 kg K₂O (Zimolka et al., 2008b). Rostliny přijímají živiny ve formě malých molekul bez elektrického náboje nebo ve formě kladně nebo záporně nabitých iontů (Richter, 2004).

3.3.1 Dusík

Tvoří součást aminokyselin, bílkovin, nukleových kyselin, chlorofylu, enzymů a dalších látek, významně tedy ovlivňuje růstové procesy a odolnost rostlin k chorobám (Huber, Thompson, 2009). Jeho obsah v rostlinách závisí na vývojových fázích a druhu orgánu. Na počátku vývoje bývá dusík obsažen ve vysokém množství, s tvorbou biomasy jeho obsah klesá (Richter, 2004).

Rostlina přijímá dusík ze dvou forem, jako NO₃⁻ a NH₄⁺ ionty (Richter, 2004). Význam těchto forem je závislý na jejich oxidaci. Zda bude pro růst a výnos rostliny lepší příjem dusíku v amonné nebo nitrátové formě je ovlivněno mnoha faktory (Kirkby, 1981).

Za normálních podmínek má nitrát pro výživu rostlin hlavní význam. Je obsažen v rostlině mobilně, může být skladován ve vakuole (Beever, Hageman, 1969, Evans, Nason, 1953). Kořeny ho přijímají aktivně ve směru elektrochemického gradientu. Lepší příjem nitrátového dusíku je při kyseljším pH. Je také zjištěno, že amonný iont inhibičně ovlivňuje příjem nitrátové formy. Aminokyseliny a ionty H⁺ jako produkty asimilace NH₄⁺ zvyšují v cytoplazmě aciditu, a tím mohou v kořenových buňkách omezit přenos iontů NO₃⁻ přes membránu (Richter, 2004).

Před metabolickým využitím nitrátu musí proběhnout redukce nitrátu. Ta je složena z redukce NO₃⁻ na NO₂⁻ a z další redukce NO₂⁻ na NH₃. Reakce probíhají za účasti enzymů nitrátoreduktázy a nitritoreduktázy, jsou také závislé na přítomnosti redukujících látek (NADPH) a energie (ATP) (Procházka et al. 2009). Richter (2004) dále uvádí, že při jednostranné výživě NO₃⁻ je zvýšená syntéza organických iontů a tím je stimulován příjem kationtů, a to především Ca²⁺ a K⁺. Činnost nitrátoreduktázového systému je ovlivněna několika faktory, světlo je jedním z nejdůležitějších činitelů. Bylo zjištěno,

že pokud je rostlina přenesena ze světla do tmy, aktivita nitrátreduktázy je potlačena. K potlačení aktivity dojde i přesto, že NO_3^- je přítomen v dostatečném množství. Dochází tedy k akumulaci nitrátů.

U většiny rostlinných druhů probíhá redukce nitrátu jak v kořenech, tak ve stoncích. Pokud ale bude vnější zdroj výživy dusíkem nízký, větší část dusíku bude redukována v kořenech (Hawkesford et al., 2012). Míra redukce nitrátu je ovlivněna několika faktory: dostupností dusíku v půdě, druhem a stářím rostliny (Andrews, 1986) nebo také teplotou. Bylo prokázáno, že při teplotách kořenů kolem $30\text{ }^\circ\text{C}$ nastává intenzivnější příjem NO_3^- , ale zároveň se snižuje aktivita nitrátreduktázy. Průběh asimilace nitrátů závisí také na minerální výživě, zejména ji ovlivňuje příjem molybdenu. Pokud má rostlina deficit Mo, dochází ke kumulaci nitrátů a snížení aktivity nitrátreduktázy. Dále je asimilace nitrátu ovlivněna příjmem Mg, který redukci nitrátů snižuje, naopak příjem Ca a Na ji zvyšuje (Richter, 2004).

Amoniakální forma dusíku může být pro rostlinu toxická, míra toxicity ovšem závisí na rostlinném druhu a na růstových podmínkách (Hawkesford et al., 2012). Richter (2004) uvádí, že příjem kationtové formy dusíku není dosud plně objasněn. Názory se liší v tom, jestli je dusík přijímán jako NH_4^+ kationt nebo ve formě neutrální molekuly NH_3 .

Je předpoklad, že zejména při vyšším pH je NH_3 přijímán přednostně. Výhodou výživy amoniakálním dusíkem je malý požadavek na potřebu energie během asimilace NH_4^+ . Při asimilaci probíhá pouze odštěpení H^+ z kationtu (Matula, 1977, Richter, 2004). Vzniklé H^+ ionty snižují pH vnějšího prostředí. Při zásaditém pH živného roztoku je toxicita NH_4^+ zvýšena a kořeny mohou být poškozeny už při nižších koncentracích. Výživa amoniakálním dusíkem také zapříčiňuje nižší příjem většiny iontů, zejména kationtů Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ a organických iontů (Richter, 2004).

Nadzemní části rostlin disponují omezenou kapacitou pro protony, NH_4^+ se tedy musí asimilovat v kořenech. Následně je dusík ve formě aminokyselin a amidů transportován xylémem do nadzemních orgánů. Transport NO_3^- z kořenů do nadzemních orgánů závisí na aktivitě nitrátreduktázy. U vyšších rostlin je dusík translokován zejména v aminokyselinách a nitrátech (Richter, 2004).

S využitím dusíku se pojí princip reutilizace. Jde o transaminační metabolismus, díky kterému je možný vratný přenos aminoskupin přes mnoho meziproduktů. Dusík, který již byl součástí organický látek, může být tedy snadno dále metabolizován (Richter, 2004).

Deficience dusíku

Už krátkodobý nedostatek dusíku se projeví na růstu celé rostliny, zejména nadzemní orgány mají omezený růst, omezí se vývoj kořenového systému i vývoj semen (Barker, Bryson, 2007). Rostliny jsou slabé s bledě zelenými až žlutými listy, na kterých se objevuje typické „věčko“ (obr. 2), které směřuje k bazální části listu (Zimolka et al., 2008a). Jestliže výživa dusíkem je přerušena, dusík ze starších listů je translokován do mladších rostlinných orgánů. Z tohoto důvodu u rostlin rostoucích při deficienci N se objevují symptomy nedostatku dusíku předně u starších listů (Hawkesford et al., 2012). Při dlouhotrvajícím deficitu dusíku spodní listy zasychají (Richter, 2004) a rostlina také začne měnit strukturu kořenového systému. Zvýší tvorbu postranních kořenů, aby zvýšila svůj příjem dusíku (Hawkesford et al., 2012). Kořeny se tedy více větví v těch oblastech půdy, kde se nachází více dusíku (Scott-Russel, 1977). Množství dusíku ovlivňuje také velikost palic, hmotnost a počet zrn v palici, což ve výsledku negativně ovlivňuje výnos (Plénet, Cruz, 1997, Richter, 2004).

Při přehnojení dusíkem dochází k prodloužení vegetační doby, rostliny jsou tmavě zelené a snižuje se klíčivost zrn (Zimolka et al., 2008a). U přehnojených rostlin je také vyšší výskyt chorob (Richter, 2004).



Obr. 2: Symptomy deficience N (Taylor, 2013)

3.3.2 Fosfor

Fosfor je důležitým prvkem pro přenos a uchování energie. Účastní se fotosyntézy a dýchání. Je také nazýván prvkem plodnosti (Procházka et al., 2009). Fosfor má významnou úlohu při fosforylačních reakcích fotosyntézy. Ortofosforečnanový anion v důsledku své vysoké afinity k elektronům odčerpává energii elektronů a tato energie se ukládá v makroergických vazbách sloučenin typu ATP. Fosfor má v rostlině nejen energetickou funkci, je také významnou stavební složkou. Podílí se na stavbě nukleových kyselin, je složkou enzymů oxidativního charakteru (FAD, CoA, NAD, NADP, atd.), aktivovaných aminokyselin, fosfoglyceridů, fosfolipidů a dalších látek (Dvořák, 1976, Matula, 1977).

Rostlinami je fosfor přijímán ve formě aniontů H_2PO_4^- nebo HPO_4^{2-} . Příjem nastane, pokud je vyšší koncentrace P v cytoplazmě než obsah P v živném prostředí, fosfor je tedy přijímán aktivně proti koncentračnímu gradientu. Intenzita příjmu P závisí na obsahu kyslíku v živném prostředí, světle, teplotě, poměru H_2PO_4^- ku HPO_4^{2-} a na přítomnosti Ca^{2+} , NO_3^- a BO_3^{3-} . Příjem P výrazně inhibují také OH^- ionty (Richter, 2004).

Fosfor se vyznačuje vysokou reutilizační schopností a rovněž se řadí mezi vysoce pohyblivé prvky. Richter (2004) uvádí, že rychlost P v xylému je asi 200 cm.hod^{-1} . Rostliny mohou fosfor uchovávat v rezervních formách, a to jako fytin (Lott et al., 2000) nebo jako anorganický polyfosfát (Seufferheld and Curzi, 2010). Polyfosfáty se vyskytují ve vakuolách a při jejich štěpení dochází k uvolnění energie (Richter, 2004).

Nároky na výživu fosforem jsou významné již v počátečních stádiích růstu, kdy rostlina získává fosfor zejména ze zásob fytinu v semeni a také ze snadno přístupných forem P z vnějšího prostředí (Matula, 1977, Richter, 2004).

Deficience fosforu

Deficit fosforu může mít velký vliv na rostlinu zejména ve dvou kritických obdobích. První období je na počátku růstu, kdy se začíná tvořit kořenový systém, a druhé v době objevení se laty až kvetení (Richter, 2005). V období kvetení nastává translokace fosforu do palic, při jeho nedostatku v této fázi by nastalo nedostatečné ozrnění palic. Při nízkém obsahu fosforu se na špičkách a okrajích listů objevuje antokyanové zbarvení, které lze vidět na obrázku 3, při velkém nedostatku se rozšíří po

celých listech a také na stéblech. Rovněž je omezen růst kořenového systému a tvoří se méně nadzemní fytomasy (Zimolka et al., 2008a). Při dlouhodobém nedostatku fosforu může dojít k nadměrnému prodlužovacímu růstu kořenů (Anuradha, Narayana, 1991). Při nízkých teplotách dochází k omezenému příjmu fosforu, proto se doporučuje startovací hnojení nebo hnojení „pod patu“ (Richter, 2005).

Zimolka et al. (2008a) uvádí, že k přehnojení fosforem běžně nedochází. Při jeho vyšším množství v půdě může ale dojít k omezení příjmu zinku.



Obr. 3: Symptomy deficiencie P (IPNI, 2014)

3.3.3 Draslík

Významně se podílí na průběhu fotosyntézy a dýchání. V chloroplastech zajišťuje optimální stav pro průběh enzymatických reakcí a také reguluje mechanismus otevírání a zavírání stomat. Během osvětlení rostliny se draslík hromadí ve svěracích buňkách průduchů a naopak za tmy ho ubývá. Při transportu draslíku do svěracích buněk nastává otevření průduchů a zpětný transport způsobuje jejich uzavření (Richter 2004). Velká koncentrace draslíku je také vyžadována při syntéze polypeptidů na ribozomech (Wyn Jones, Pollard, 1983).

Rostlina umí přijímat draslík jako monovalentní kation. Při nižších koncentracích ho přijímá aktivně, při vyšších koncentracích je přijímán pasivně. Zvyšující se koncentrace K snižuje příjem Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Zn^{2+} , Mn^{2+} a stimuluje příjem NO_3^- , $H_2PO_4^-$, Cl^- , SO_4^{2-} . Příjem draslíku je pozitivně ovlivňován vnějšími faktory, jako je přístup vzduchu, teplota půdy nebo intenzita osvětlení (Richter, 2004). Nejvyšší nároky na draslík má kukuřice v době květu (Vaněk, 2002). Draslík je v rostlině pohyblivý,

může být reutilizován. Má také velkou schopnost průniku přes buněčné membrány, ovlivňuje osmotickou hodnotu a bobtnání koloidů (Matula, 1977, Richter, 2004).

Deficience draslíku

Richter (2004) uvádí, že hladina draslíku je v buňkách poměrně vysoká a obvykle se draslík vyplavuje ve stresových situacích (nízké teploty, sucho). Již mírný nedostatek draslíku může způsobit omezení tvorby bílkovin, tuků, cukru a škrobu v rostlinách (Anac, Colakoglu, 1995, Zimolka et al., 2008a). Symptomy se nejprve objevují na starších listech, dochází na nich k zasychání okrajů, které postupně v prouzcích nekrotizují a spojují se do velkých ploch (obr. 4). U kukuřice se tento nedostatek projevuje „véčkem“, které směřuje k apikální části. Nastává špatné vyžrávání pletiv, buněčné stěny jsou méně pevné, objevuje se zhoršená odolnost vůči suchu a nízkým teplotám (Zimolka et al. 2008a). Mohou se vyskytnout špatně ozrněné palice (Richter, 2005). Rostliny s nedostatkem draslíku jsou také náchylnější k patogenům a škůdcům (Atmann et al., 2008).

Přehnojení draslíkem se může projevit vedlejšími antagonistickými nebo synergickými účinky (Richter, 2004).



Obr. 4: Symptomy deficience K (IPNI, 2014)

3.3.4 Vápník

Vápník ve formě pektátů tvoří důležitou stavební složku buněčných stěn, které zpevňuje. Významný vliv má také na růst kořenových vlásků a pylové láčky, která netvoří typickou celulózni stěnu (Dvořák, 1976). Příjem vápníku je tedy nezbytný pro normální růst kořenového systému a listů (Rahman, Punja, 2009). Velký vliv má také na stabilizaci buněčných membrán a buněčné stěny (Willats et al., 2001). Richter (2004)

uvádí, že vápník stabilizuje jejich strukturu, prostorové uspořádání a tím i permeabilitu. Významně ovlivňuje stabilitu a integritu pletiv, což má vliv na skladovatelnost plodů.

Dalším významem vápníku je jeho konformační a stabilizační vliv na bílkovinu, vápník je také schopen neutralizovat a vázat některé organické kyseliny, zejména kyselinu šťavelovou. Tato vlastnost způsobuje významný detoxikační efekt vápníku. Rostlina vápník přijímá po celý svůj vývoj (Matula, 1977, Richter, 2004).

Vápník je přijímán ve formě Ca^{2+} aktivně kořeny pomocí elektrochemického gradientu přes biologické membrány. Nízké koncentrace vápníku jsou přijímány pod metabolickou kontrolou, vysoké koncentrace pasivně. Příjem vápníku je ovlivněn anionty, největší vliv má NO_3^- , pak Cl^- a nejmenší SO_4^{2-} . Při zvýšeném obsahu kationtů je jeho příjem omezen (Richter 2004).

Bylo také zjištěno, že nižší vlhkost pozitivně ovlivňuje příjem vápníku, vyšší vlhkost naopak příjem snižuje. Vápník je v rostlině nepohyblivý, neprobíhá tedy reutilizace. Účastní se metabolismu, podílí se na enzymatických reakcích jako přenašeč signálů a je potřebný pro udržení struktury buněčných membrán (Richter, 2004).

Deficience vápníku

Nejvýznamnějším projevem deficitu vápníku je omezená tvorba kořenového systému. Špičky kořenů odumírají, tvorba kořenového vlášení je omezená a boční kořeny se nevyvíjejí. Porost postižených rostlin je nízký, na listech je znatelná chloróza, která později způsobuje hákovité ohnutí nerozvinutých čepelí (obr. 5), a nastává odumírání vegetačního vrcholu (Zimolka et al., 2008a).



Symptomy se mohou také objevit na stonku, odkud se rozšiřují směrem ke kořenům. (Richter, 2004) Nedostatek vápníku v pozdějším období zvyšuje nebezpečí sterility pylu. Rostliny mohou mít sterilní pyl, pylová zrna jsou malá a zasychají (Richter, 2005, Zimolka et al., 2008). Při přehnojení vápníkem je ovlivněn příjem ostatních iontů, zejména Fe, Mn a Zn (Richter, 2004).

Obr. 5: Symptomy deficience Ca (IPNI, 2014)

3.3.5 Hořčík

V rostlině je hořčík důležitou složkou chlorofylu, ve kterém je navázán v porfytinovém jádře. Dále se vyskytuje jako sůl Mg-oxalacetát, jako fytin nebo sorpčně vázaný iont (Richter, 2004). Kromě stavební funkce je hořčík také aktivátorem enzymů, aktivuje například enzymy spojené s energetickým metabolismem, které se podílejí na fosforylacích (Cowan, 2002, Matula, 1977). Podílí se také na zabudování dusíku do aminokyselin (Richter, 2005) a je také nezbytný pro průběh syntézy proteinů (Sperrazza and Spremulli, 1983). Hořčík také vyrovnává pH reakci tak, aby spadala do optimálního fyziologického rozpětí (Hawkesford et al., 2012).

Rostliny přijímají hořčík pasivně ve formě kationtu Mg^{2+} . Příjem je antagonisticky ovlivněn zejména ionty K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , H^+ , naopak pozitivně na příjem hořčíku působí nitrát. V rostlině je transportován ve formě chelátů (Richter, 2004).

Deficience hořčíku

Rostlina potřebuje rovnoměrný přísun hořčíku po celou dobu vegetace (Zimolka et al., 2008a). Nedostatek hořčíku ohrožuje průběh fotosyntézy, tvorbu bílkovin a negativně ovlivňuje procesy energetického metabolismu rostliny (Hawkesford et al., 2012). U obilnin může nedostatek hořčíku také ovlivnit syntézu škrobu (Beringer and Forster, 1981).

Deficit hořčíku narušuje strukturu chloroplastů (Kincl, Krpeš, 2000), nastává abnormální tvorba pigmentů, vznikají barevné skvrny a také chlorózy s barevnými okraji (obr. 6). U trav se na listech objevují typická světlá místa a tmavá nervatura, takzvaná pruhovitost listů. Chloróza se dále může začít vyskytovat od špiček listů a od kraje listů se šíří k jeho středu, nebo se objevuje mezi nervy v blízkosti středního žebra a postupně se šíří ke krajům (Richter, 2004). Příznaky se nejdříve objevují u starších listů. Listy jsou křehké a předčasně opadávají. Při velkém nedostatku hořčíku rostliny později zrají a porost je nevyrovnaný (Zimolka et al., 2008a).

Při vysokých koncentracích hořčíku je redukována délka hlavního kořene, velikost postranních kořenů a kořenového vlášení je rovněž zmenšena. Dochází také k redukcii nadzemní hmoty (Richter, 2004).



Obr. 6: Symptomy deficiencie Mg (Brown, 2009)

3.3.6 Síra

Síra je složkou vitamínu thiaminu a koenzymu A, je také důležitá pro esterifikaci organických kyselin a metabolismus tuků. Je součástí esenciálních aminokyselin cysteinu a methioninu (Matula, 1977).

Rostlinou je přijímána převážně kořeny ve formě aniontu SO_4^{2-} , některé rostliny ji mohou také přijímat nadzemními částmi z atmosféry, a to ve formě SO_2 (Hawkesford, 2003). Richter (2004) uvádí, že síra přijímaná ve formě síranu má větší vliv na tvorbu hmoty než síra ve formě oxidu siřičitého. Příjem a transport síry v rostlině vyžaduje energii a probíhá pomocí bílkovinného přenašeče (Clarkson, Hawkesford, Davidian, 1993). Příjem síry není citlivý na pH prostředí, je ale ovlivněn přítomností aniontů v půdním roztoku. Nitráty příjem síry stimulují, chloridové, fosfátové a selenátové anionty působí na příjem imhibičně. Než je síra rostlinou využita a zabudována do organických látek, musí být redukována. Prvním stálým produktem, v němž je síra přítomna v redukované a přítom organicky vázané formě, je cystein. Ve formě cysteinu vstupuje síra do bílkovin, glutathionu, do sirných derivátů typu aliinu a alicinu nebo je donorem skupiny SH pro další syntézy (Richter, 2004).

Deficience síry

Nedostatek síry se u rostlin může projevovat zvýšeným obsahem nitrátů, které nejsou převáděny na amoniakální dusík. V rostlinách dochází k omezení tvorby sirných aminokyselin (cystein, methionin) a také proteosyntézy, čímž je ovlivněna celková produkce rostliny (Zimolka et al., 2008a). Při nedostatku síry dochází ke snížení

hydraulické vodivosti kořenového systému, zmenšení průduchů a k poklesu fotosyntézy (Karmoker et al., 1991). Burke et.al. (1986) i Dietz (1989) se shodují, že typickým znakem deficiencie síry je drastické snížení chlorofylu v listech. Nedostatek síry bývá často zaměňován za projevy nedostatku dusíku, jehož symptomy jsou velmi podobné. U rostlin s deficiencí síry se žloutnutí listů objeví nejdříve podél žilnatiny (Oenema, Postma, 2003). K žloutnutí listů dochází nejdříve u vývojově nejmladších (obr. 7), protože síra není v rostlině mobilní. Listy jsou celkově menší a užší. Při dlouhodobém nedostatku může nastat deformace a špatné ozrnění palic (Richter, 2004, Zimolka et al., 2008a).

Vysoký obsah SO_2 je pro rostliny toxický. Listy rostliny, která je vystavena vysoké koncentraci SO_2 , od špiček žloutnou a postupně odumírají (Richter, 2004).



Obr. 7: Symptomy deficiencie S (IPNI, 2014)

4 MATERIÁL A METODIKA

Ve fytotroních Ústavu agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin AF MENDELU byl v roce 2014 založen přesný nádobový pokus formou hydroponie, v kterém byl sledován vliv deficitní výživy vybraných makrobiogenních prvků na rozvoj kořenového systému a vývoje nadzemní části rostlin kukuřice seté (*Zea mays*, L.). V experimentu bylo hodnoceno 7 variant s rozdílným složením živných roztoků, jak ukazuje tabulka 1.

Tab. 1: Schéma pokusu

č. varianty	živný roztok
1	úplný
2	deficitní dusíkem
3	deficitní fosforem
4	deficitní draslíkem
5	deficitní hořčíkem
6	deficitní vápníkem
7	deficitní sírou

Roztoky byly připraveny dle metodiky Hoaglanda a Arnona (1939), jak uvádí tabulka 2.

Tab. 2: Navážky chemikálií v g na 1 litr roztoku dle Hoaglanda a Arnona (1939)

chemikálie	roztok						
	úplný	deficitní					
		N	P	K	Mg	Ca	S
Ca (NO ₃) ₂	0,821	-	1,231	1,231	0,821	-	0,821
KNO ₃	0,506	-	-	-	0,506	1,518	0,506
K ₂ SO ₄	-	0,871	0,861	-	0,436	-	-
KH ₂ PO ₄	0,136	-	-	-	0,136	0,136	0,136
Ca (H ₂ PO ₄) ₂	-	0,117	-	0,117	-	-	-
CaSO ₄ · 2H ₂ O	-	0,344	-	-	-	-	-
MgSO ₄	0,12	0,06	0,241	0,241	-	0,241	-
Mg(NO ₃) ₂	-	-	-	-	-	-	0,296
koncent.	1,583	1,392	2,343	1,589	1,899	1,895	1,759
pH	4,57	5,2	7,4	5,2	5,3	5,3	5,2

Při založení pokusu bylo do všech živných roztoků přidáno železo, ve formě 0,5 % roztoku vinanu železitého v dávce 5 ml na nádobu (Laštůvka, Minář, 1967). V průběhu realizace vodních kultur bylo sledováno pH roztoku, které mělo u všech nádob setrvalý stav po celou dobu pokusu.

Jako modelová plodina byla do nádobového experimentu použita kukuřice setá odrůdy SY ONDINA (dvouliniový hybrid společnosti Syngenta se zrnem typu koňský zub a vysokým obsahem škrobu, rostliny jsou středně vysoké s nelámavým stonkem, kořenová soustava dobře vyvinuta, FAO 290 zrno). (Syngenta, 2014)

Před založením pokusu v nádobách byla kukuřice vložena na naklíčení do laboratorních klíčidel v termínu 13. 6. 2014. Po naklíčení kukuřice na délku kořene cca 3 cm byly klíčenci vloženi do vegetačních nádob s vodní kulturou (2 nádoby pro každou variantu). Jako nádoby byly využity skleněné akvária o objemu 11 l. Akvária byla obalena Al folií, zamezující průchod světla (obr. 8). V každém akváriu bylo kultivováno 6 rostlin. Roztoky byly v nádobách provzdušňovány (vzduchovací motorek pro akvária) po dobu 5 minut v pravidelných časových intervalech (3 hodiny).

Nádoby byly umístěny ve fytotronech v regulovaném teplotním, vlhkostním a světelném režimu (teplota: 8 – 20 hod. 23 °C, 20 – 8 hod. 18 °C; vlhkost: 8 – 20 hod. 55 %, 20 – 8 hod. 70 %; světelný režim: 8 – 20 hod. 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 20 – 8 hod. 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). V průběhu experimentu byly v pravidelných intervalech 7 dnů odebrány 3 rostliny z každé varianty, v termínech uvedených v tabulce 3: 1. odběr - 26. 6. 2014, 2. odběr - 3. 7. 2014, 3. odběr - 10. 7. 2014 a 4. odběr - 17. 7. 2014. Obrázek 9 dokumentuje rostliny v posledním odběru.

Tab. 3: Termíny jednotlivých odběrů

1. odběr	26. 6. 2014
2. odběr	3. 7. 2014
3. odběr	10. 7. 2014
4. odběr	17. 7. 2014



Obr. 8: Založení nádobového pokusu (vlastní foto)



Obr. 9: Rozdíly mezi jednotlivými variantami ve 4. odběru (vlastní foto)

Okamžitě po odběru byla u rostlin kukuřice stanovena elektrická kapacita kořenového systému (Chloupek, 1977, Dalton, 1995). Po stanovení kapacity kořenů LCR metrem byly rostliny rozděleny na kořen a nadzemní část. Následně byla zhodnocena velikost kořenového systému analýzou obrazu a po naskenování kořenů byla u nadzemních částí a kořenů v jednotlivých odběrech stanovena sušina. Z důvodu nedostatku rostlinného materiálu v počáteční fázi vývoje kukuřice byl u 2. – 4. odběru proveden anorganický rozbor rostlin (ARR), a to u 2. odběru z celé rostliny, u 3. a 4. odběru zvláště u kořenů a nadzemní části. V rámci ARR byly zjištěny obsahy N, P, K, Ca a Mg. Obsah síry nebyl proveden s ohledem na vysokou finanční nákladnost analýz.

Elektrická kořenová kapacita

Kapacita kořenového systému byla měřena přístrojem LCR METER 131D při frekvenci 1 kHz v jednotkách nF (nanofarady) v destilované vodě (v láhvi dle Woulfa) (obr. 10). Na rostlinu se připevnila jedna elektroda (kleště) (obr. 11) a druhá elektroda se zasunula do konstantní polohy u dna nádoby. V takto vzniklém obvodu procházel mezi



kořenovým systémem a vodou střídavý proud a bylo možné změřit paralelní kapacita (C_p). Tímto způsobem lze zjistit jen živou část kořene, protože v ní probíhá polarizace živých membrán nebo živých buněk, takže vykazuje určitou elektrickou aktivitu na membránách mezi buňkami.

Obr. 10: Stanovení elektrické kapacity kořenového systému (vlastní foto)



Obr. 11: Uchycení rostlin pro stanovení elektrické kapacity kořenového systému (vlastní foto)

Analýza obrazu kořenového systému

Pro posuzování architektury kořenového systému v různých podmínkách je používána metoda měření kořenového systému prostřednictvím analýzy obrazu vyplavených a naskenovaných kořenů (Dostál et al., 2010). Touto metodou byly zjištěny údaje o celkové délce a ploše kořenového systému.

Ihned po odebrání se vzorky připravily na analýzu, rozdělily se na dílčí vzorky a byly rozprostřeny na plastový rámeček v tenké vodní vrstvě (2 - 3 mm). Je důležité, aby se kořeny co nejméně překrývaly. Kořeny byly naskenovány (skener Epson Perfection 700 Photo) a následně analyzovány programem WinRHIZO, verze Basic (Régent Instruments Inc., Quebec, Kanada). Délka a průměr kořenů se hodnotí statistickou metodou Tennant. Takto analyzované kořeny byly vysušeny a poté zváženy.

Anorganický rozbor rostlin

Před ARR byly vzorky rostlinné hmoty vysušeny při teplotě 50 °C, rozemlety na mlýnku a homogenizovány. Takto připravená rostlinná hmota byla mineralizována na mokré cestě v mikrovlnném uzavřeném systému v prostředí H₂SO₄ and H₂O₂ (Zbiral a kol. 2005) v přístroji Ethos 1 (Milestone S.r.l., Sorisole, Itálie). Koncentrace dusíku byla z mineralizátu stanovena v opakování metodou dle Kjeldahla na přístroji

KjeltecTM 2300 (FOSS Analytical, Dánsko). Obsahy draslíku, vápníku a hořčíku byly z mineralizátu stanoveny v opakování metodou atomové absorpční spektrofotometrie (AAS) na přístroji ContrAA 700 (Analytik Jena AG, Jena, Německo). Obsah fosforu byl stanoven po spálení rostlinné hmoty kolorimetricky na přístroji UV/VIS spektrofotometr ATI Unicam 8625 (Cambridge, Velká Británie). S ohledem na velkou spotřebu vzorku (mineralizátu) při analýze P nebylo stanovení provedeno v opakování.

Statistické hodnocení

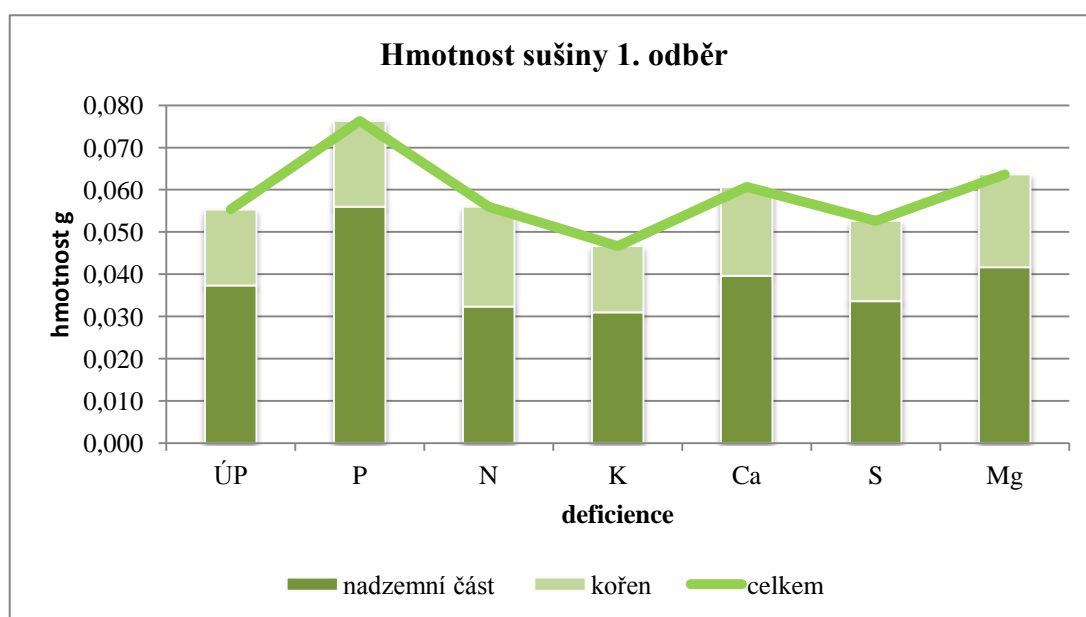
Pro statistické hodnocení obsahu vybraných živin v nadzemní části a kořenech (N, K, Ca, Mg), elektrické kapacity kořenového systému a kořenového obrazu byl použit program Statistica 9 CZ. Vliv deficitu živin na aktivitu a tvorbu kořenového systému byl hodnocen jednofaktorovou analýzou variance (ANOVA). Rozdíly mezi jednotlivými variantami byly hodnoceny následným testováním dle Fishera (LSD test) při 95 % ($p < 0,05$) hladině významnosti.

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Vliv deficitu živin na hmotnost sledovaných rostlin

V uvedených grafech (graf 1 - 4) jsou zaznamenány hmotnosti sušiny jedné rostliny sledovaných variant. Jako kontrolní rostliny byly brány rostliny z úplného roztoku (ÚP).

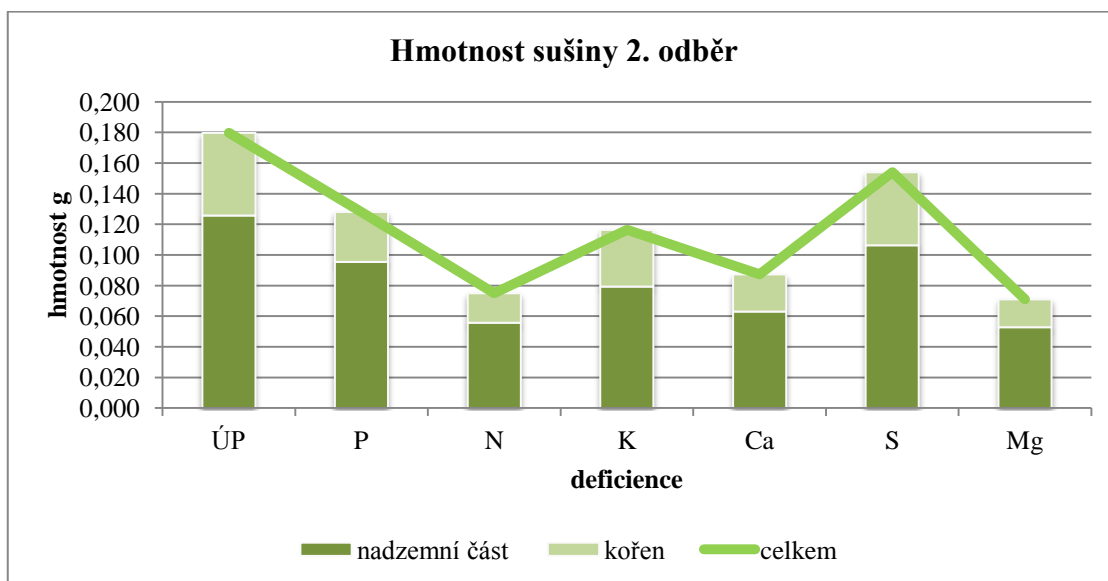
V 1. odběru byly rozdíly v hmotnosti sušiny mezi jednotlivými variantami nejmenší (graf 1), nejnižší hmotnost měla rostlina deficitní na draslík. Naopak nejvyšší hodnota sušiny byla zjištěna u rostliny s deficitem fosforu, která byla oproti kontrole vyšší o 37,9 %. Větší hmotnost než kontrola měla také rostlina deficitní na vápník a hořčík.



Graf 1: Hmotnost sušiny 1. Odběr

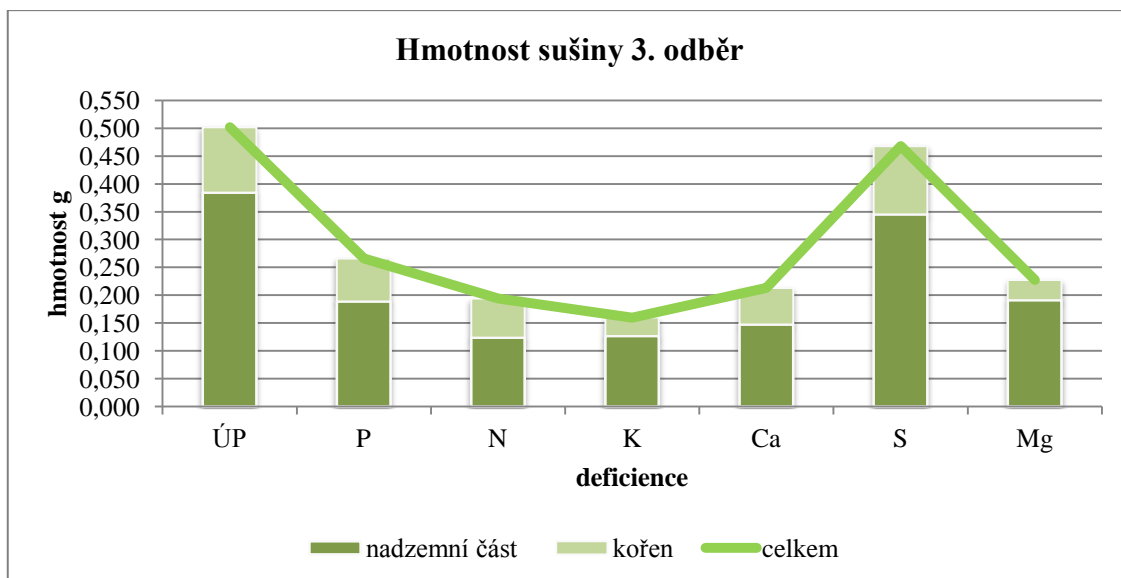
V porovnání s kontrolou byla v rámci 2. odběru (graf 2) zjištěna nižší hmotnost sušiny u rostlin s deficitem dusíku, vápníku a také hořčíku. K hodnotám sušiny kontrolní rostliny se nejvíce blížila rostlina s deficitem síry. Z grafu je také patrné, že podíl sušiny kořenového systému na celkové hmotnosti rostliny se oproti 1. odběru snížil. Velikost kořenů prokazatelně souvisí s rozdílným příjmem živin (Baligar et al., 1998). V porovnání s hmotností sušiny kořenového systému kontrolní rostliny byly zaznamenány výrazně nižší hodnoty u rostlin deficitních na dusík (o 64,2 %), hořčík (o 58,1 %) a také vápník (o 49,9 %). Gruber et al. (2013) uvádějí, že v experimentu

zabývající se vlivem deficitní výživy na kořenový systém huseníčku byl růst kořenů a stonku také inhibovat nedostatečnou výživou hořčíkem.



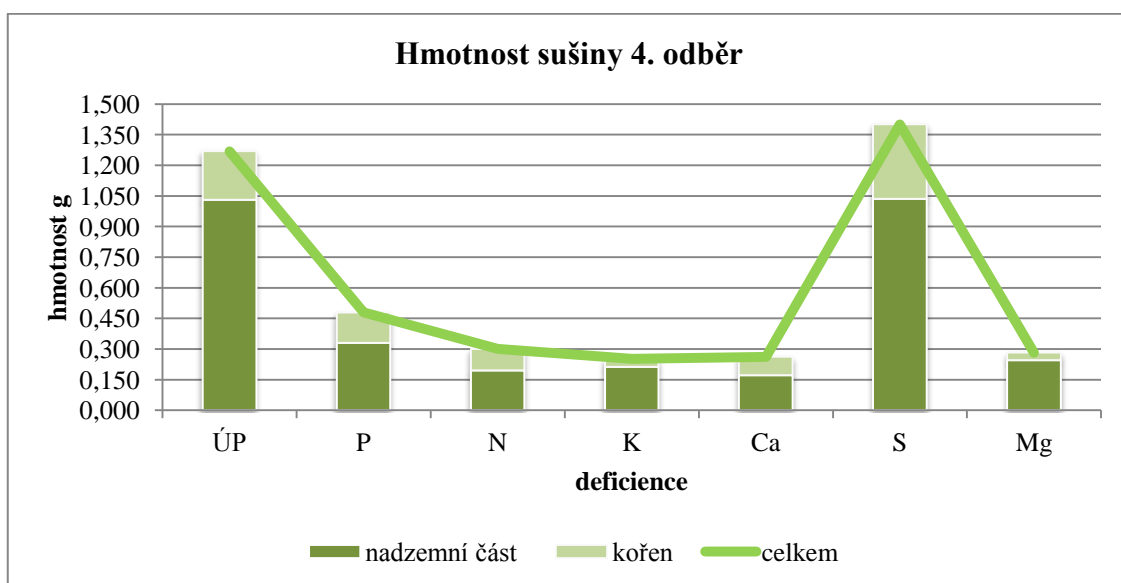
Graf 2: Hmotnost sušiny 2. odběr

Z grafu 3 lze vidět výraznou redukci celkové hmotnosti sušiny rostlin oproti kontrole, snížení se projevilo zejména u rostlin s deficitem dusíku, draslíku, vápníku a také hořčíku. Sušina kořenového systému byla oproti kontrole nejvíce snížena u varianty deficitní draslíkem (o 71,7 %), u varianty deficitní na vápník byla snížena o 41,5 %. Baligar et al. (1998) uvádějí, že rostliny s nedostatečnou výživou K a Ca redukují růst kořenů, čemuž odpovídají získané výsledky. Naopak u rostliny deficitní na síru byla hmotnost kořene oproti kontrole nepatrně zvýšena (o 4,2 %), také celková hmotnost sušiny se nejvíce blíží hmotnosti kontrolní rostliny.



Graf 3: Hmotnost sušiny 3. odběr

Ve 4. odběru (graf 4) se opět projevila výrazná pokles hodnot celkové hmotnosti sušiny u téměř všech variant, pouze varianta s deficitem síry převyšuje hmotnost celkové sušiny kontrolní rostliny (o 10,4 %). Také sušina kořenového systému rostliny deficitní na síru je vyšší oproti kontrole (o 52,8 %), přičemž sušina nadzemní části je téměř shodná, nicméně Kutz et al. (2002) uvádějí, že u rostlin s deficitem S dochází k redukci hmotnosti. Nedostatek dusíku omezuje buněčné dělení a dochází ke zpomalení růstu rostlin (Uchida, 2000), ve 4. odběru byla hmotnost nadzemní části u varianty deficitní na N oproti kontrole nižší o 81,1 %.



Graf 4: Hmotnost sušiny 4. odběr

Z tabulky 4 je zřejmé, že u žádné z pozorovaných variant nebyla v průběhu měření zaznamenána vyšší hmotnost sušiny kořenů než nadzemní části. Lze také vidět, že hmotnost sušiny celé rostliny se u každé varianty v průběhu experimentu zvyšovala. Během sledování byl zaznamenán nízký nárůst hmotnosti kořene u rostlin deficitních na hořčík (1,7krát vyšší hmotnost kořenů ve 4. odběru v porovnání s hmotností 1. odběru), draslík (2,5krát), zatímco největší nárůst hmotnosti kořenů byl u deficitu síry (19,2krát). Hmotnost nadzemní části rostlin nekorelovala s hmotností kořenů pouze v prvním odběru ($r = 0,2245$, $p = 0,628$), v ostatních odběrech byly dílčí hmotnosti sušiny sledovaných částí rostlin průkazně závislé ($r = 0,8510 - 0,9629$, $p = 0,015 - 0,001$). Při porovnání všech deficitních variant byl nejnižší nárůst v produkci nadzemní hmoty zaznamenán na variantě s deficitem vápníku.

Tab. 4: Hmotnost sušiny 1 rostliny v gramech

varianta		1. odběr	2. odběr	3. odběr	4. odběr
ÚP	nadzemní část	0,037	0,126	0,384	1,030
	kořen	0,018	0,054	0,118	0,239
	celkem	0,055	0,180	0,502	1,269
def P	nadzemní část	0,056	0,095	0,189	0,330
	kořen	0,020	0,033	0,077	0,149
	celkem	0,076	0,128	0,266	0,479
def N	nadzemní část	0,032	0,056	0,124	0,195
	kořen	0,024	0,019	0,070	0,106
	celkem	0,056	0,075	0,194	0,300
def K	nadzemní část	0,031	0,079	0,127	0,212
	kořen	0,016	0,037	0,033	0,040
	celkem	0,047	0,116	0,160	0,252
def Ca	nadzemní část	0,040	0,063	0,147	0,171
	kořen	0,021	0,024	0,066	0,091
	celkem	0,061	0,087	0,213	0,262
def S	nadzemní část	0,034	0,106	0,345	1,035
	kořen	0,019	0,048	0,123	0,365
	celkem	0,053	0,154	0,468	1,400
def Mg	nadzemní část	0,042	0,053	0,191	0,245
	kořen	0,022	0,018	0,036	0,037
	celkem	0,064	0,071	0,227	0,282

5.2 Vliv deficitu živin na anorganický rozbor rostlin (ARR)

Anorganický rozbor rostlin byl proveden u rostlin ve 2., 3., a 4. odběru, u rostlin z 1. odběru nemohl být realizován z důvodu nedostatku rostlinného materiálu. Ve 2. odběru byl zjištěn obsah živin pouze v celé rostlině (směsném vzorku), také kvůli nedostatku rostlinné hmoty. Rovněž obsahu dusíku byl stanoven v souvislosti s nedostatkem sušiny rostlin pouze u vybraných vzorků. Jako kontrolní rostliny byly opět brány rostliny z úplného roztoku.

Z výsledků analýz rostlinné hmoty je jasné patrný deficit makrobiogenních živin na variantách s jejich absencí v živném roztoku, jak prezentují zvýrazněné hodnoty v tabulkách 5 - 9. Pokles obsahů živin na deficitních variantách byl velmi variabilní. Zatímco obsah fosfor v celé rostlině (2. odběr) se na variantě s jeho deficitem snížil v porovnání s variantou kontrolní o více než $\frac{1}{2}$, obsah draslíku na variantě s jeho nedostatkem dosáhl pouze 5,8 % obsahu varianty úplné. Podobně tomu bylo i u varianty s absencí Ca (8,1 %). Ve 3. odběru byl obsah vápníku u rostlin s jeho deficitem v nadzemní části roven 3,4 % obsahu kontroly, v kořenech dosahoval 23 % kontroly. Varianta deficitní na hořčík obsahovala 36 % hořčíku kontroly u nadzemních částí a 28,3 % u kořenů. Obsah dusíku u rostlin ze 4. odběru byl u nadzemní části 20,8 % a u kořenů 24,7 % obsahu kontrolních rostlin.

Draslík působí antagonisticky na příjem hořčíku (Edwards, Pedersen, 1986) a vápníku (Grimme et al., 1975), což potvrzují i výsledky tohoto experimentu. Jak je patrné, zejména z tabulek 5, 8 a 9, rostliny deficitní na hořčík a vápník vykazovaly zvýšený obsah draslíku. Například ve 4. odběru byl obsah draslíku v nadzemní části i kořenech rostlin s deficitem vápníku a hořčíku vyšší než na variantě kontrolní, u varianty deficitní na Ca o 15,7 %, u deficitu Mg o 13,7 %. Antagonismus byl z výsledků ARR dokázán rovněž mezi vápníkem a hořčíkem. Mnoho autorů uvádí, že vysoká koncentrace vápníků inhibuje příjem hořčíku (Lasa et al., 2000, Carvajal, Martínez, 1999, Schwartz, Bar-Yosef, 1983) Ve 2. odběru a u nadzemní části ze 3. a 4. odběru byl obsah hořčíku na variantě s nedostatkem Ca více než dvojnásobný oproti kontrole. Obsah hořčíku v kořenech byl také průkazně vyšší ($p \leq 0,05$) než u kontroly, v porovnání s kontrolou je ve 3. odběru zvýšen o 24 %, ve 4. o 39,3 %. Antagonistický

vztah mezi těmito prvky se projevil i opačně, u varianty s deficitem hořčíku se vyskytoval v porovnání s ostatními variantami vyšší obsah vápníku.

Obsah Mg a Ca v rostlinách deficitních na dusík dosahoval v průběhu všech odběrů výrazně nižších hodnot, ve 3. odběru byl jejich obsah v kořenech dokonce nižší než u rostlin, které byly z roztoků deficitních na tyto prvky. Obsah Mg byl v tomto odběru oproti variantě s deficitem hořčíku nižší o 12,9 %, obsah Ca byl oproti variantě s deficitem vápníku nižší o 43,7 %. Lasa et al. (2000) i Richter (2004) píší, že nitrátová forma dusíku podporuje příjem hořčíku, ve variantě s absencí dusíku tedy nebyl příjem Mg podpořen.

Množství vápníku ovlivňuje příjem fosforu (Griffin, Jurinak, 1973), obsah fosforu byl ve 2. odběru (tab. 5) nejvýrazněji zvýšen u rostlin s deficitem vápníku (oproti kontrole o 32,3%), také varianty s deficitem dusíku, síry a hořčíku převyšovaly kontrolu.

Tab. 5: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v rostlině kukuřice (2. odběr)

varianta	obsah živin v % abs. sušiny				
	N	P	K	Mg	Ca
ÚP	4,880 ^b ± 0,221	0.796	7,655 ^c ± 0,031	0,250 ^d ± 0,002	0,945^d ± 0,004
def P	4,496 ^a ± 0,063	0.378	7,887 ^d ± 0,029	0,242 ^c ± 0,001	0,746 ^c ± 0,004
def N	*	0.937	7,420 ^b ± 0,037	0,138 ^b ± 0,001	0,276 ^b ± 0,001
def K	4,537 ^a ± 0,271	0.643	0,446^a ± 0,002	0,347 ^f ± 0,003	1,054 ^e ± 0,009
def Ca	*	1.053	8,490 ^f ± 0,006	0,505 ^g ± 0,002	0,077^a ± 0,000
def S	4,794 ^{ab} ± 0,103	0.856	7,864 ^d ± 0,049	0,281 ^e ± 0,000	0,758 ^c ± 0,010
def Mg	4,666 ^{ab} ± 0,006	0.924	8,102 ^e ± 0,022	0,091^a ± 0,001	1,029 ^e ± 0,017

* pro rozbor nebylo dostatečné množství rostlinné hmoty

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d, e – písmena u obsahů živin – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

Ve 3. odběru byl proveden zvlášť rozbor nadzemní části (tab. 6) a kořene (tab. 7). Krom rostlin s deficitem fosforu převyšoval obsah tohoto prvku v nadzemních částech všech deficitních variant jeho množství ve variantě kontrolní, u rostlin deficitních na draslík až o 63,2 %. Vyšší hodnoty obsahu P oproti kontrole byly zaznamenány i v kořenové části, a to u rostlin s nedostatkem dusíku (36,6 %) a draslíku (32,2 %).

V nadzemní části byl prokazatelně zvýšen ($p \leq 0,05$) obsah Mg v rostlinách s deficitem síry, a to o 15 % oproti kontrole. V kořenové části byl také v porovnání s kontrolou zvýšen obsahu draslíku u rostlin s deficitem síry (o 14,8 %).

Tab. 6: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v nadzemní části rostlin kukuřice (3. odběr)

varianta	obsah živin v % abs. sušiny				
	N	P	K	Mg	Ca
ÚP	4,930 ^d ± 0,002	0,804	9,009 ^e ± 0,045	0,212 ^c ± 0,002	1,106 ^e ± 0,003
def P	4,497 ^b ± 0,030	0,254	8,265 ^c ± 0,016	0,226 ^d ± 0,001	1,036 ^d ± 0,002
def N	1,179^a ± 0,032	0,823	7,141 ^b ± 0,038	0,113 ^b ± 0,002	0,387 ^b ± 0,002
def K	4,497 ^b ± 0,025	1,312	0,723^a ± 0,004	0,835 ^g ± 0,006	2,349 ^f ± 0,015
def Ca	*	0,869	9,153 ^f ± 0,010	0,545 ^f ± 0,006	0,038^a ± 0,000
def S	4,692 ^c ± 0,034	0,831	8,326 ^c ± 0,017	0,244 ^e ± 0,002	0,802 ^c ± 0,001
def Mg	4,649 ^c ± 0,036	0,975	8,902 ^d ± 0,029	0,060^a ± 0,001	1,026 ^d ± 0,011

* pro rozbor nebylo dostatečné množství rostlinné hmoty

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d, e, f – písmena u obsahů živin – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

Tab. 7: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v kořenech rostlin kukuřice (3. odběr)

varianta	obsah živin v % abs. sušiny				
	N	P	K	Mg	Ca
ÚP	*	0,919	8,239 ^d ± 0,016	0,321 ^d ± 0,003	1,109 ^d ± 0,014
def P	*	0,209	7,002 ^b ± 0,028	0,190 ^c ± 0,002	0,644 ^c ± 0,004
def N	*	1,250	7,027 ^b ± 0,037	0,088 ^a ± 0,001	0,145 ^a ± 0,002
def K	*	1,215	1,135^a ± 0,003	0,682 ^f ± 0,004	2,099 ^f ± 0,013
def Ca	*	0,787	7,770 ^c ± 0,033	0,398 ^e ± 0,004	0,258^b ± 0,002
def S	3,528 ± 0,018	0,995	9,466 ^e ± 0,078	0,328 ^d ± 0,001	0,665 ^c ± 0,003
def Mg	*	0,914	7,661 ^c ± 0,039	0,101^b ± 0,001	1,487 ^e ± 0,017

* pro rozbor nebylo dostatečné množství rostlinné hmoty

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d, e, f – písmena u obsahů živin – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

Ve 4. odběru byly zaznamenány nejvyšší hodnoty obsahu dusíku u nadzemní části (tab. 8) rostlin deficitních na vápník (oproti kontrole zvýšení o 14 %). Největší zvýšení obsahu fosforu v nadzemních částech měly rostliny s nedostatkem draslíku, jehož obsah byl oproti kontrole vyšší o 58 %.

Tab. 8: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v nadzemní části rostlin kukuřice (4. odběr)

varianta	obsah živin v % abs. sušiny				
	N	P	K	Mg	Ca
ÚP	4,466 ^c ± 0,022	0,870	9,070 ^d ± 0,075	0,202 ^c ± 0,002	1,063 ^f ± 0,011
def P	3,814 ^b ± 0,035	0,206	8,440 ^c ± 0,025	0,249 ^d ± 0,003	0,996 ^d ± 0,005
def N	0,928^a ± 0,001	0,920	7,682 ^b ± 0,011	0,092 ^b ± 0,000	0,274 ^b ± 0,003
def K	4,564 ^f ± 0,012	1,374	0,733^a ± 0,001	0,889 ^f ± 0,008	2,378 ^g ± 0,014
def Ca	5,088 ^g ± 0,026	0,870	9,939 ^f ± 0,026	0,569 ^c ± 0,006	0,062^a ± 0,000
def S	4,117 ^c ± 0,019	0,838	8,956 ^d ± 0,055	0,243 ^d ± 0,002	0,914 ^c ± 0,002
def Mg	4,277 ^d ± 0,009	1,061	9,448 ^e ± 0,026	0,058^a ± 0,000	1,030 ^c ± 0,002

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d, e, f, g – písmena u obsahů živin – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

Tab. 9: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v kořenech rostlin kukuřice (4. odběr)

varianta	obsah živin v % abs. sušiny				
	N	P	K	Mg	Ca
ÚP	4,501 ^d ± 0,043	0,786	7,140 ^c ± 0,031	0,313 ^d ± 0,003	0,850 ^e ± 0,004
def P	2,919 ^b ± 0,024	0,134	6,411 ^b ± 0,030	0,215 ^c ± 0,002	0,520 ^c ± 0,001
def N	1,113^a ± 0,029	1,163	7,136 ^c ± 0,025	0,083 ^a ± 0,001	0,092 ^a ± 0,001
def K	*	0,815	0,971^a ± 0,003	0,666 ^f ± 0,002	1,715 ^g ± 0,008
def Ca	*	0,856	8,263 ^f ± 0,058	0,436 ^c ± 0,004	0,148^b ± 0,000
def S	4,172 ^c ± 0,062	0,935	7,550 ^d ± 0,018	0,315 ^d ± 0,001	0,593 ^d ± 0,002
def Mg	*	0,730	8,117 ^c ± 0,046	0,094^b ± 0,000	1,305 ^f ± 0,005

* pro rozbor nebylo dostatečné množství rostlinné hmoty

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d, e, f, g – písmena u obsahů živin – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

5.3 Vliv deficitu živin na délku a plochu kořenového systému

V rámci analýzy obrazu kořenového systému byla stanovena délka a plocha kořenů. Jako kontrolní rostliny jsou brány rostliny z úplného roztoku (ÚP).

V 1. odběru (tab. 10) nebyl u získaných hodnot délky a plochy kořene zjištěn mezi jednotlivými variantami statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$). Největší délka i plocha kořenů byla zjištěna u varianty s deficitem Ca, v porovnání s kontrolou byla hodnota délky větší o 29,8 % a hodnota plochy o 20,4 %. V tomto odběru nebyly rozdíly mezi jednotlivými variantami tak velké jako během skenování dalších odběrů.

Tab. 10: Délka (cm) a plocha (cm²) kořenového systému v 1. odběru rostlin

varianta	délka cm	rel %	plocha cm ²	rel %
ÚP	155,915 ^a ± 31,715	100	8,858 ^a ± 1,388	100
def P	150,401 ^a ± 55,923	96,5	8,709 ^a ± 2,228	98,3
def N	187,886 ^a ± 35,901	120,6	10,344 ^a ± 1,342	116,8
def K	138,507 ^a ± 23,534	88,9	7,541 ^a ± 0,810	85,1
def Ca	202,305 ^a ± 18,564	129,8	10,668 ^a ± 1,138	120,4
def S	173,858 ^a ± 20,824	111,4	9,339 ^a ± 0,178	105,4
def Mg	166,897 ^a ± 56,309	107,1	9,779 ^a ± 2,571	110,4

Následné testování (Fisherův LSD test) - a – délky a plochy – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

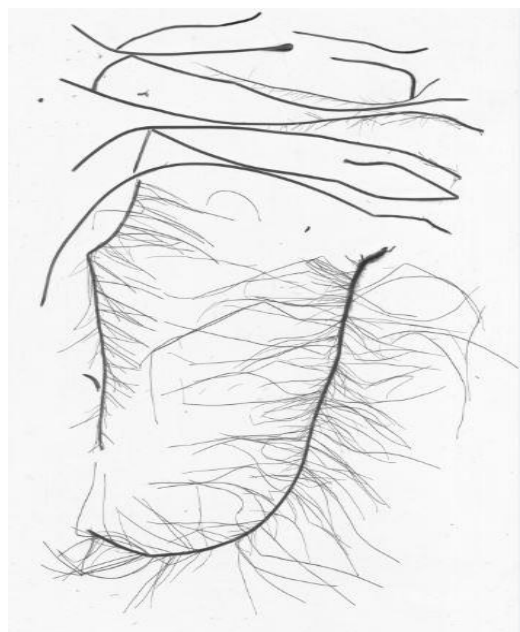
Rozdíly v délce a ploše kořenů mezi variantami v rámci 2. odběru (tab. 11) jsou signifikantní ($p \leq 0,05$). V tomto odběru kořenový systém žádné rostliny vypěstované při nedostatečné výživě nepřevyšoval svou délkou nebo plochou kontrolní rostliny. Ze všech pozorovaných variant měly nejkratší kořeny rostliny deficitní na dusík (oproti kontrole byly o 68,8 % kratší) a jejich kořeny měly také nejmenší plochu (v porovnání s kontrolou nižší o 62,6 %). Plocha kořenů rostlin deficitních na dusík se ve 2. odběru oproti 1. odběru snížila, u všech ostatních variant byl zaznamenán vzestup. Krouk et al. (2010) uvádějí, že při absenci N nedochází k tvorbě bočních kořenů, takže celková plocha kořenového systému bude snížena. Nejmenší rozdíly mezi kořeny kontroly a všemi deficitními variantami byly zaznamenány u rostlin s absencí síry (obr. 12, 13), délka kořenů byla oproti kontrole nižší o 15,6 % a plocha byla nižší o 17,1 %. Kořenový

system rostlin s deficitem S dosahuje velké hustoty, ale bývá snížena délka kořenů. (Kutz et al., 2002; Lopez-Bucio et al., 2003).

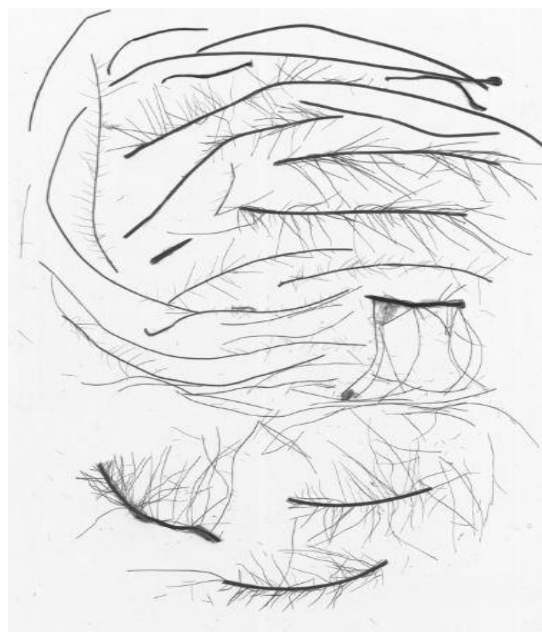
Tab. 11: Délka (cm) a plocha (cm²) kořenového systému v 2. odběru rostlin

varianta	délka cm	rel %	plocha cm ²	rel %
ÚP	663,382 ^d ± 91,553	100	26,461 ^d ± 2,627	100
def P	432,718 ^{bc} ± 99,016	65,2	16,492 ^{bc} ± 3,620	62,3
def N	207,132 ^a ± 17,372	31,2	9,909 ^a ± 0,879	37,4
def K	385,031 ^{abc} ± 21,347	58,0	15,950 ^{abc} ± 0,665	60,3
def Ca	306,531 ^{ab} ± 29,159	46,2	14,179 ^{ab} ± 0,729	53,6
def S	559,751 ^{cd} ± 79,435	84,4	21,933 ^{cd} ± 2,039	82,9
def Mg	241,904 ^a ± 14,529	36,5	13,445 ^{ab} ± 2,246	50,8

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d – délky a plochy – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.



Obr. 12: Sken kořenů kontrolních rostliny, 2. odběr (vlastní sken)



Obr. 13: Sken kořenů rostliny s deficitem S, 2. odběr (vlastní sken)

Ve 3. skenování (tab. 12) jsou mezi variantami patrné rozdíly v délce i ploše, větší délky dosahují kořeny rostliny z úplného roztoku a rostlin vypěstovaných v roztocích deficitních na fosfor a síru. U těchto rostlin byly také zaznamenány vyšší hodnoty plochy kořenů. Plocha kořenového systému je výrazně ovlivněna jeho větvením, deficit

P tedy neměl negativní vliv na větvení kořenů, což také ve svých studiích zaznamenali Lopez-Bucio et al. (2003) a Perez-Torres et al. (2008). Nejmenší délku i plochu měly kořeny rostlin deficitních na draslík, délka byla oproti kontrole nižší o 67,9 %, plocha o 67,6 %.

Tab. 12: Délka (cm) a plocha (cm²) kořenového systému v 3. odběru rostlin

varianta	délka cm	rel %	plocha cm ²	rel %
ÚP	1804,713 ^b ± 206,599	100	65,702 ^c ± 6,877	100
def P	1089,236 ^a ± 79,555	60,4	42,014 ^{ab} ± 2,884	63,9
def N	733,091 ^a ± 28,882	40,6	27,705 ^a ± 1,607	42,2
def K	579,651 ^a ± 70,823	32,1	21,319 ^a ± 2,909	32,4
def Ca	796,725 ^a ± 264,853	44,1	33,991 ^a ± 10,125	51,7
def S	1852,937 ^b ± 397,815	102,7	62,541 ^{bc} ± 13,476	95,2
def Mg	585,244 ^a ± 85,490	32,4	24,489 ^a ± 4,683	37,3

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d – délky a plochy – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

V posledním 4. odběru (tab. 13) dosáhly největší délky a plochy kořeny rostlin deficitních na síru, hodnota délky je v porovnání s kontrolou větší o 51,3 % a plocha o 63,9 %. Relativně malý vliv absence S na morfologii kořenového systému zaznamenali v rámci svého experimentu i Gruber et al. (2013). Naopak nejmenší plochu i délku vykazovaly opět rostliny deficitní na draslík, hodnota délky byla o 70,8 % než kontrola a plocha byla nižší o 72 %. Absence draslíkem měla podobné působení i na kořenový systém huseníčku, u kterého se také rostliny s deficitem K vyznačovaly sníženou délkou kořenů (Gruber et al., 2013). Rostliny s nedostatkem draslíku omezují růst postranních kořenů, které velmi ovlivňují celkovou délku kořenového systému (Hackett, 1967).

Během všech odběrů měly v porovnání s kontrolou statisticky průkazně kratší ($p \leq 0,05$) kořeny a redukce délky a plochy kořenů byla zjištěna u rostlin vypěstovaných v podmínkách absence Ca, N, Mg a K. Marschner a Richter (1974) uvádějí, že nedostatek Ca narušuje prodlužovací růst buněk, a proto dochází ke snížení délky kořenů. Naopak hodnoty srovnatelné s kontrolou nebo dokonce vyšších než u kontroly byly zaznamenány u rostlin s deficitem síry a fosforu. Gruber et al. (2013) dospěli

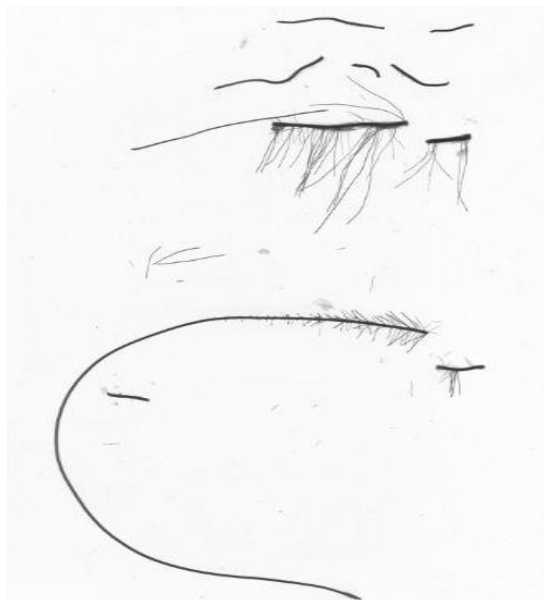
k podobnému závěru, uvádí, že deficit Mg silně ovlivnil délku kořenů, zatímco deficit P měl pouze nepatrný vliv na jejich délku.

Tab. 13: Délka (cm) a plocha (cm²) kořenového systému v 4. odběru rostlin

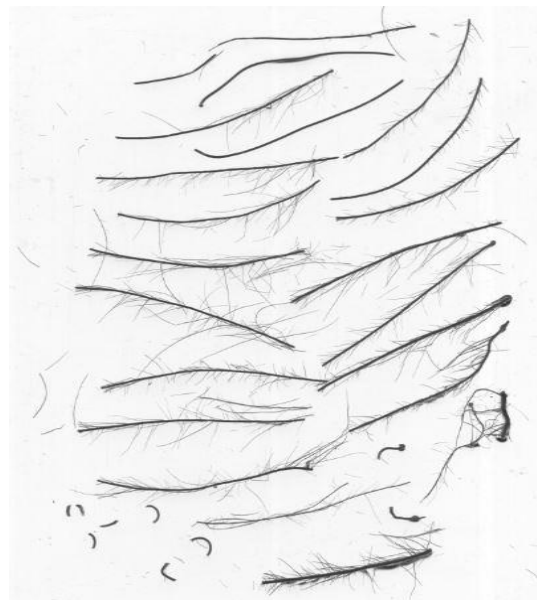
varianta	délka cm	rel %	plocha cm ²	rel %
ÚP	2680,612 ^c ± 346,086	100	90,111 ^c ± 12,127	100
def P	2006,463 ^{bc} ± 212,401	74,9	69,520 ^{bc} ± 5,668	77,1
def N	988,265 ^{ab} ± 178,919	36,9	38,548 ^{ab} ± 7,931	42,8
def K	783,778 ^a ± 33,645	29,2	25,055 ^a ± 1,580	27,8
def Ca	865,875 ^a ± 78,723	32,3	42,174 ^{ab} ± 5,676	46,8
def S	4055,793 ^d ± 836,421	151,3	147,720 ^d ± 27,229	163,9
def Mg	816,156 ^a ± 73,259	30,4	31,651 ^a ± 2,843	35,1

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d – délky a plochy – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

Ze získaných hodnot jsou patrné změny délky a plochy kořenů v průběhu odběrů, z obrázků 14 a 15 lze vidět rozdíl výrazný nárůst kořenového systému rostlin deficitních na dusík mezi 1. a 4. odběrem.



Obr. 14: Sken kořenů rostliny s deficitem K, 1. odběr (vlastní sken)



Obr. 15: Sken kořenů rostliny s deficitem K, 4. odběr (vlastní sken)

5.4 Vliv deficitu živin na elektrickou kořenovou kapacitu

Při měření elektrické kapacity kořenového systému byly jako kontrolní rostliny brány opět rostliny z úplného roztoku (ÚP).

Elektrická kapacita kořenů (EKK) kontrolních rostlin byla v 1. odběru rostlin nejvyšší ze všech sledovaných variant. Její hodnota (0,096 nF) byla statisticky průkazně vyšší ($p \leq 0,05$) v porovnání s měřením zaznamenaným u kořenového systému rostlin deficitních na draslík a síru.

Podobně i ve 2. odběru byly získané hodnoty EKK u kontroly nejvyšší. V porovnání s touto variantou byla velikost kořenů rostlin vypěstovaných v deficitních roztocích statisticky průkazně ($p \leq 0,05$) nižší, a to o 25,3 % (varianty deficitní na P) až 57 % (rostliny deficitní na vápník). Rostliny s deficitem Ca mají omezený prodlužovací růst kořenů (Pilbeam, Morley, 2007), proto byly hodnoty EKK u této varianty velmi nízké. EKK rostlin s absencí vápníku byla jako jediná ze sledovaných variant snížena i oproti předchozímu odběru, a to o 17,9 %.

Hodnota kapacity u varianty deficitní na draslík se ve 3. odběru oproti předchozímu odběru mírně snížila. Kapacita kořenů kontrolních rostlin byla výrazně vyšší než kapacita rostlin z deficitních roztoků, kromě varianty s absencí P, kde však rozdíl mezi nimi nebyl statisticky průkazný ($p \leq 0,05$). Rozdíly ve velikosti kořenového systému mezi kontrolní variantou a kombinacemi deficitními na N, K, Ca, Mg a S se v porovnání s předchozími odběry prohlubovaly.

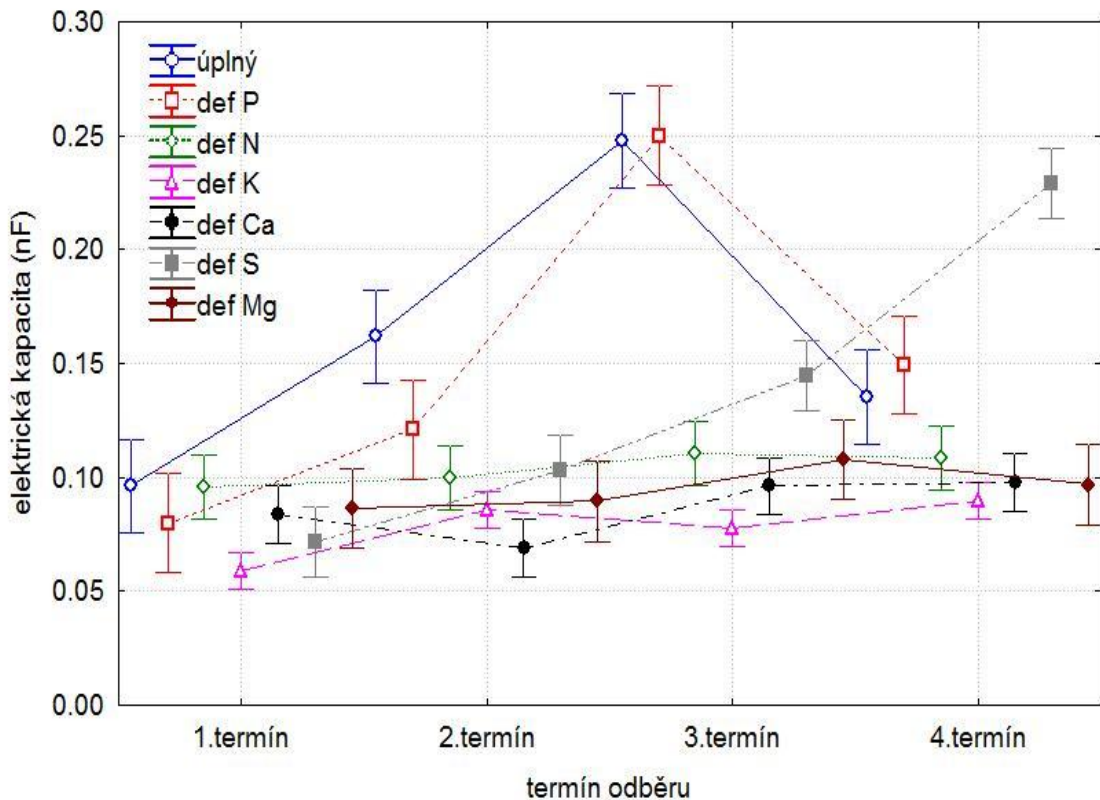
Tab. 14: Hodnoty kapacity kořenového systému rostlin naměřené LCR metrem (nF)

	1. odběr	2. odběr	3. odběr	4. odběr
ÚP	0,096 ^c ± 0,009	0,162 ^d ± 0,010	0,248 ^d ± 0,012	0,135 ^{bc} ± 0,009
def P	0,080 ^{bc} ± 0,008	0,121 ^c ± 0,012	0,250 ^d ± 0,006	0,149 ^c ± 0,014
def N	0,096 ^c ± 0,005	0,100 ^b ± 0,004	0,111 ^b ± 0,005	0,109 ^{ab} ± 0,011
def K	0,059 ^a ± 0,004	0,086 ^{ab} ± 0,002	0,078 ^a ± 0,004	0,090 ^a ± 0,005
def Ca	0,084 ^{bc} ± 0,005	0,069 ^a ± 0,002	0,096 ^{ab} ± 0,008	0,098 ^a ± 0,008
def S	0,072 ^{ab} ± 0,003	0,103 ^{bc} ± 0,003	0,145 ^c ± 0,011	0,229 ^d ± 0,009
def Mg	0,087 ^{bc} ± 0,007	0,090 ^b ± 0,005	0,108 ^b ± 0,011	0,097 ^a ± 0,009

Následné testování (Fisherův LSD test) - a, b, c, d – kapacity – mezi variantami není statisticky průkazný rozdíl ($p \leq 0,05$) v případě, jsou-li písmena stejná.

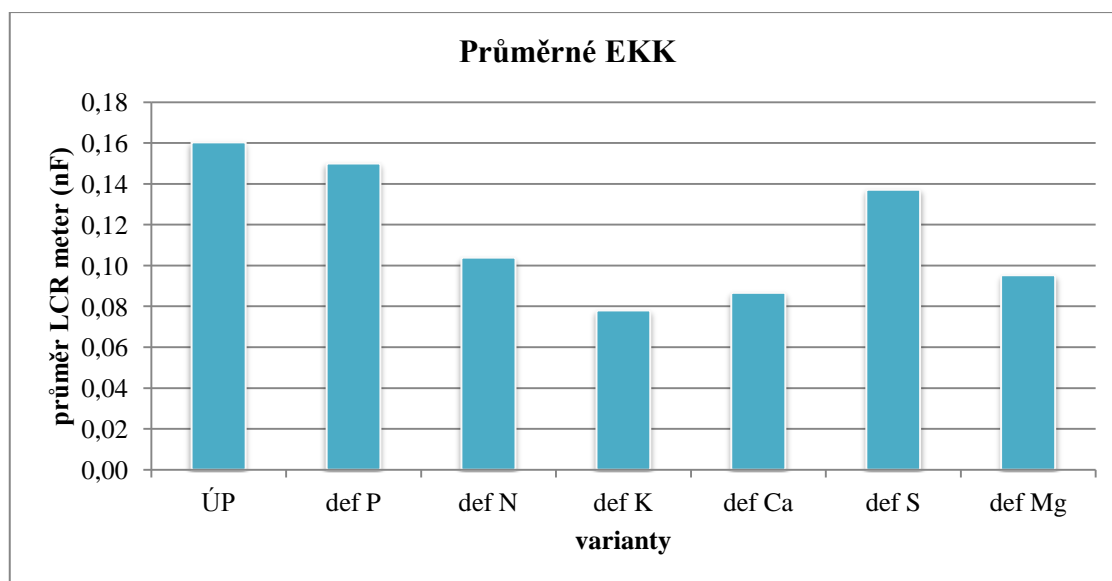
Ve 4. odběru se trend postupného zvyšování rozdílů v EKK naměřených mezi variantou ÚP a variantami deficitními zastavil, přičemž z tabulky 14 je patrné jejich výrazné snížení. Navíc byla v této fázi zjištěna EKK kontrolních rostlin průkazně nižší ($p \leq 0,05$) než u rostlin deficitních na síru, kde byla velikost kořenů, vyjádřena EKK, vyšší o 70 %. Nejnižší kapacitu měly kořeny rostlin deficitních na K, Ca a Mg.

Ve sledovaném období 4 odběrů je z grafu 5 patrné postupné zvyšování EKK pouze u varianty deficitní na S, které bylo signifikantní ($p \leq 0,05$). Kapacita kořenů rostlin pěstovaných na kontrolní variantě a variantě s absencí P rostla do 3. odběru, v posledním odběru došlo k jejich průkazné ($p \leq 0,05$) redukci. Na variantách deficitních na N a Mg byly rozdíly v EKK mezi sledovanými termíny měření statisticky neprůkazné ($p \leq 0,05$).



Graf 5: Vývoj elektrické kořenové kapacity (nF) v průběhu odběrů

Z průměrných hodnot EKK uvedených v grafu 6 je patrné, že rostliny pěstované v úplném roztoku a roztoku deficitním na P vytvořily signifikantně největší kořenový systém. Baligar et al. (1998) uvádějí, že nedostatečná výživa fosforem má za následek zvětšení délky kořenů, může mít také vliv na zvýšení plochy kořenového vlášení a sekundárního větvení kořenového systému. Kořeny rostlin s deficitem P budou tedy vykazovat vyšší hodnotu EKK. Naopak nejmenší hodnoty EKK, podle kterých lze posuzovat velikost kořenového systému, byly naměřeny na variantách s absencí K a Ca. Podobně i kořeny slunečnice s deficiencí draslíku vykazovaly malé zvýšení hodnot EKK (Škarpa, 2011).



Graf 6: Průměrné hodnoty elektrické kořenové kapacity (nF) v průběhu odběrů

6 ZÁVĚR

Deficitní výživa makrobiogenními prvky se u kukuřice projevila snížením růstu jak kořenů, tak nadzemní části rostlin. K největší redukci hmotnosti kořenového systému v průběhu experimentu vedla absence hořčíku a draslíku. Naopak nejmenší vliv na hmotnost kořenů i nadzemní části kukuřice měl deficit síry, kdy se hmotnost rostlin z této varianty nejvíce blížily kontrole. V průběhu odběrů byla nejnižší produkce nadzemní hmoty u varianty deficitní na vápník.

Absence makrobiogenních živin se výrazně projevila na jejich obsahu v rostlinách. Bylo zjištěno antagonistické působení vápníku a hořčíku na příjem draslíku, u rostlin deficitních na hořčík a vápník byl zaznamenán zvýšený obsah draslíku. Antagonismus byl také patrný ve vztahu mezi hořčíkem a vápníkem. U varianty deficitní na dusík byl zaznamenán nižší obsah vápníku a hořčíku, což potvrzuje jejich synergické působení při příjmu a utilizaci.

Architektura kořenů vyjádřena délkou a plochou kořenového systému, byla nejvíce redukována při deficitu vápníku, dusíku, hořčíku a také draslíku. U variant s deficitem síry a fosforu se délka a plocha kořenů nejvíce blížila rostlinám vypěstovaných v úplném roztoku. Podle měření elektrické kořenové kapacity vytvořily největší kořenový systém rostliny pěstované v úplném roztoku a z roztoku s deficitem fosforu. Nejmenší kořenový systém měly rostliny s absencí draslíku a vápníku.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Amtmann, A., Troufflard, S., Armengaud, P. (2008): The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiol Plant*, 133.4: 682-691
- Anac, D., Colakoglu, H. (1995): Current situation of K fertilization in Turkey. In: K. Mengel, K. Krauss, (eds.): K Availability of Soils in West Asia and North Africa – Status and Perspectives. Basel: International Potash Institute, 235–247
- Andrews, M. (1986): The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 9.7: 511-519
- Anuradha, M., Narayanan, A. (1991): Promotion of root elongation by phosphorus deficiency. *Plant Soil*, 163.2: 273-275
- Baligar, V. C., Fageria, N., Elrashidi, M. A. (1998): Toxicity and nutrient constraints on root growth. *Hort Science* 3: 960-965
- Barker, A. V., Bryson, G. M. (2007): Nitrogen. In: Barker, A. V., Pilbeam, D. J. (eds.): Handbook of Plant Nutrition. CRC Press, Boca Raton, 613 s.
- Beevers, L. H., Hageman, R. H. (1969): Nitrate reduction in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 20:495–522
- Beringer, H., Forster, H. (1981): Einfluss variierter Mg-Ernährung auf Tausendkorngewicht und P-Fraktionen des Gerstenkorns. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 144.1: 8-15
- Brown, CH. (ed.) (2009): Agronomy Guide for Field Crops. Queen's Printer for Ontario, Toronto, 320s.
- Burke, J. J., Holloway, P., Dailing, M. J. (1986): The effect of sulfur deficiency on the organization and photosynthetic capability of wheat leaves. *J. Plant Physiol.*, 125,3: 371-375
- Carvajal, M., Martínez, V., Cerdá, A. (1999): Influence of magnesium and salinity on tomato plants grown in hydroponic culture. *J. Plant Nutr.* 22:177–190.

- Clarkson, D. T., Hawkesford, M. J., Davidian, J. C. (1993): Membrane and long-distance transport of sulfate. In: De Kok, L. J., Stulen, I., Rennenberg, H., Brunold, C., Rauser, W. (eds.): *Sulfur Nutrition and Sulfur Assimilation in Higher Plants: Regulatory, Agricultural and Environmental Aspects*. SPB Academic Publishing, The Hague, 3–19
- Cowan, J. A. (2002): Structural and catalytic chemistry of magnesium dependent enzymes. *Biometals*, 15.3: 225-235
- Dalton, F. N. (1995): In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods, *Plant and Soil.*, 173, 157 – 165.
- Dietz, K. - J. (1989): Recovery of spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency. *J. Plant Physiol.* 134.5: 551-557
- Dvořák, M. (1976): Fyziologie rostlin speciální. Metabolismus minerálních látek u rostlin. UK Praha, 173s
- Edwards, J. H., Pedersen, J. F. (1986): Growth and magnesium uptake of tall fescue lines at high and low potassium levels. *J. Plant Nutr.* 9(12):1499–1518.
- Evans, H. J., Nason, A. (1953): Pyridine nucleotide nitrate reduction from extracts of higher plants. *Plant Physiol.*, 28:233–254
- Fageria, N. K. (2013): *The Role of Plant Roots in Crop Production*. CRC Press, Boca Raton, 451s, ISBN: 978-1-4398-6737-2
- Faměra, O. (1997): Obilniny. In: Šroller et al.: *Speciální fytotechnika-rostlinná výroba*, Ekopress s.r.o., Praha, 205s, ISBN: 80-86119-04-1
- Griffin, R. A., Jurinak, J. J. (1973): The interaction of phosphate with calcite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37.847–850.
- Grimme, H., von Braunschweig, L. C., Nemeth, K. (1975): K, Mg and Ca interactions as related to cation uptake and yield. *Büntehof Abs.* 4:7–8, 1975
- Gruber, B. D., Giehl, R. F., Friedel, S., von Wiren, N. (2013): Plasticity of the Arabidopsis root system under nutrient deficiencies. *Plant Physiol* 163:161-179

- Hackett, C. (1967): Effects of nutrition on two varieties. *New Phytol.* 67. 287-289
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E., de Kok, L. J., Stulen, I. (2007): Sulphur. In: Barker, A. V., Pilbeam, D. J. (eds.): Handbook of Plant Nutrition. CRC Press, Boca Racon, 613 s.
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Møller I. S., White P. (2012): Functions of Makronutrients. In: Marschner, P. (ed.): Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). Academic Press, 135-189.
- Hawkesford, M. J. (2003): Transporter gene families in plants:the sulphate transporter gene family – redundancy or specialization? *Physiol. Plant*, 117.2: 155-165
- Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1939): The water culture method for growing plant without soil. *Agr. Exp. Sta. Berkeley Cal. Circ.* 347.
- Hochholdinger, F., Tuberosa, R. (2009): Genetic and genomic dissection of maize root development and Architecture. *Current Opinion in Plant Biology* 2009, 12:172–177
- Huber, D. M., Thompson, I. A. (2009): Nitrogen and Plant Disease. In: Datnoff L. E., Elmer W. H., Huber D. M. (eds.): Mineral Nutrition and Plant Disease. The American Phytopathological Society, St. Paul, 31-44
- Chloupek, O. (1977): Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance, *Plant and Soil.* 48: 525 – 532
- Chloupek, O., Dostál, V., Středa, T., Psota, V., Dvořáčková, O. (2010): Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size, *Plant Breeding.* 129: 630 – 636
- International Plant Nutrition Institute (2014): Crop Nutrient Deficiency Image Collection
- Karmoker, J. L., Clarkson, D. L., Saker, L. R., Rooney, J. M., Purves, J. V. (1991): Sulphate deprivation depresses the transport of nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. *Planta*, 185.2: 269-278

- Kincl, L. (1997): Rostlinné orgány. In: Kincl, L., Kincl, M., Jakrlová, J.: Biologie rostlin. Fortuna, Olomouc, 112s, ISBN 80-7168-364-7
- Kincl, M., Krpeš, V. (2000): Základy fyziologie rostlin. Ostrava Montanex, 221 s, ISBN: 80-7225-041-8
- Kirkby, E. A. (1981): Plant growth in relation to nitrogen supply. In: Clarke, F. E., Rosswall, T. (eds.): Terrestrial Nitrogen Cycles, Processes, Ecosystem Strategies and Management Impacts. Eco Bull, Stockholm, 249-267.
- Krouk, G., Lacombe, B., Bielach, A., Perrine-Walker, F., Malinska, K., Mounier, E., Hoyerova, K., Tillard, P., Leon, S., Ljung, K., Zazimalova, E., Benková, E., Nacry, P., Gojon, A. (2010): Nitrate-regulated auxin transport by NRT1.1 defines a mechanism for nutrient sensing in plants. *Dev Cell* 18: 927-937
- Lack, A., Evans, D. (2005): Plant Biology. Taylor & Francis Group, New York, 351s, ISBN 0-415-35643-1
- Lægreid, M., Bøckman, O. C., Kaarstad, O. (1999): Agriculture, Fertilizers and the Environment. CABI Publishing, Wallingford, 294 s, ISBN 0-85199-358-3
- Lasa, B., Frechilla, S., Aleu, M., González-Moro, Lamsfus, B. C., Aparicio-Tejo, P. M. (2000): Effects of low and high levels of magnesium on the response of sunflower plants grown with ammonium and nitrate. *Plant Soil* 225:167–174.
- Laštůvka, Z., Minář, J. (1967): Metoda vodních kultur vyšších rostlin. Univerzita J. E. Purkyně, Brno, 83 s
- López-Bucio, J., Cruz-Ramirez, A., Herrera-Estrella, L. (2003): The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Curr Opin Plant Biol* 6: 280-287
- Lott, J. N. A., Ockenden, I., Raboy, V., Batten, G. D. (2000): Phytic acid and phosphorus in crop seeds and fruits: a global estimate. *Seed Sci. Res.*, 10.01: 11-33
- Marschner, H., Richter, C. (1974): Calcium-transport in roots of maize and bean seedlings. *Plant Soil* 40: 18

- Matula, J. (1977): Výživa rostlin. Institut výchovy a vzdělávání MZVŽ ČSR, Praha, 181s
- Mengel, K., Kirkbay, E. A., Kosegarten, H., Appel, T. (2001): Principles of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 849s, ISBN: 978-1-4020-0008-9
- Ministerstvo zemědělství (2015): Situační a výhledová zpráva – obiloviny 2014. [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: www.eagri.cz
- Oenema, O., Postma, R. (2003): Managing sulphur in agrosystems. In: Abrol, Y. P., Ahmad, A. (eds.): Sulphur in Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 398 s, ISBN 1-4020-1247-0
- Pérez-Torres, C. A., López-Bucio, J., Cruz-Ramirez, A., Ibarra-Laclette, E., Dharmasiri, S., Estelle, M., Herrera-Estrella, L. (2008): Phosphate availability alters lateral root development in Arabidopsis by modulating auxin sensitivity via a mechanism involving the TIR1 auxin receptor. *Plant Cell* 20: 3258-3272
- Pilbeam, D. J., Morley P. S. (2007): Calcium. In: Barker, A. V., Pilbeam, D. J. (eds.): Handbook of Plant Nutrition. CRC Press, Boca Raton, 613 s.
- Plénet, D., Cruz, P. (1997): Maize and Sorghum. In: Lemaire, G. (ed.): Diagnosis of the Nitrogen Status in Crop. Springer Verlag, Berlín, 239 s, ISBN 3-540-62223-3
- Procházka, S. et al. (2009): Botanika – Morfologie a fyziologie rostlin. MZLU v Brně, 242s, ISBN 978-80-7375-125-8
- Rahman, M., Punja, Z. K. (2009): Calcium and Plant Disease. In: Datnoff L. E., Elmer W. H., Huber D., M. (eds.): Mineral Nutrition and Plant Disease. The American Phytopathological Society, St. Paul, 79-94
- Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Draslík In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-26]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Dusík In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-22]. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Fosfor In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-26]. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Hořčík In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-25]. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Síra In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-25]. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Biogenní prvky, Vápník In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-02-24]. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Richter, R. (2004): Příjem živin. In: Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščáková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/index.htm

Ryant, P., Richter, R., Poulík, Z., Hřivna, L. (2005): Multimediální učební texty z výživy a hnojení polních plodin. [online]. MZLU Brno, [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/index.htm

Scott-Russel, R. (1977): Plant Root Systems: Their Function and Interaction with the Soil. McGraw-Hill, London, 298 s

- Seufferheld, M., Curzi, M. (2010): Recent discoveries on the roles of polyphosphates in plants. *Plant Mol. Biol. Rep.*, 28.4: 549-559
- Schlegel, R. H. J. (2010): Dictionary of Plant Breeding. CRC Press, Boca Raton, 571s, ISBN: 978-1-4398-0242-7
- Schwartz, S., Bar-Yosef, B. (1983): Magnesium uptake by tomato plants as affected by Mg and Ca concentration in solution culture and plant age. *J. Agron.* 75(2):267–272
- Skládanka, J. (2006): Multimediální učební texty píceinářství. [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z:http://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/picniny/sklady.php?odkaz=kukurice.html
- Slamka, P. (2011): Příjem živin rostlinami. In: Kováčik, P. et al.: *Agrochémia a výživa rastlín*. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 153s, ISBN 978-80-552-0710-0
- Slavíková, Z. (2002): *Morfologie rostlin*. Karolinum, Praha, 218s, ISBN 80-246-0327-6
- Smith, C. W. (1995): *Crop Production – Evolution, History and Technology*. John Wiley & Sons, New York, 469s, ISBN: 0-471-07972-3
- Sperrazza, J. M., Spremulli, L. L. (1983): Quantification of cation binding to wheat germ ribosomes: influences on subunit association equilibria and ribosome activity. *Nucleic Acid Res*, 11.9: 2665- 2679
- Syngenta, 2014. [online]. [cit. 2015-04-6].
Dostupné z: <http://www3.syngenta.com/country/cz/cz/syngenta/pruvodce-produkty/osiva/kukurice/Pages/sy-ondina.aspx>
- Šašková, D. (1993): *Tráva a obilí*. Artia a.s a Granit s.r.o., Praha, 64s, ISBN 80-85805-03-0
- Škarpa, P. (2011): The effect of insufficient nutrition on the development of the sunflower (*Helianthus annuus*, L.) root system.
- Taylor, R. (2013): Impact of Flooded and Saturated Soil Conditions on Field Crops. *Weekly Crop Update* 21:14-16

- Uchida, R. (2000): Essential Nutrients for Plant Growth. Nutrient Functions and Deficiency Symptoms. In: Silva, J. A., Uchida, R. (eds): Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture. University of Hawaii at Manoa
- Vaněk, V. et al. (2002): Výživa a hnojení polních a zahradních plodin. Martin Sedláček, Praha, 132 s, ISBN 80-902413-7-9
- Vose, P. B. (1990): Plant Nutrition Relationships at the whole-plant level. In: Baligar, V. C., Duncan, R. R. (eds): Crops as Enhancers of Nutrient Use. Academic Press, San Diego, 65-80
- Willats, W. G. T., McCartney, L., Mackie, W., Knox, J. P. (2001): Pectin: cell biology and prospect for functional analysis. *Plant Molecular Biology*, 47, 9-27
- Wyn Jones, R. G., Pollard, A. (1983): Proteins, enzymes and inorganic ions. In: Läuchli A., Bielecki R. L. (eds.): Inorganic Plant Nutrition. Springer, New York, 528– 562
- Zbiral, J. a kol. (2005): Analýza rostlinného materiálu JPP. ÚKZUZ, 192 s.
- Zimolka, J. et al. (2008a): Kukuřice – hlavní a alternativní užitkové směry. Profi Press s.r.o., Praha, 200 s, ISBN 978-80-86726-31-1
- Zimolka, J. et al. (2008b): Speciální produkce rostlinná – Rostlinná výroba. MZLU v Brně, 245s, ISBN 978-80-7375-230-9

8 SEZNAM TABULEK, GRAFŮ A OBRÁZKŮ

8.1 Seznam tabulek

Tab. 1: Schéma pokusu.....	29
Tab. 2: Navážky chemikálií v g na 1 litr roztoku dle Hoaglanda a Arnona (1939).....	29
Tab. 3: Termíny jednotlivých odběrů	30
Tab. 4: Hmotnost sušiny 1 rostliny v gramech	38
Tab. 5: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v rostlině kukuřice (2. odběr)	40
Tab. 6: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v nadzemní části rostlin kukuřice (3. odběr)	41
Tab. 7: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v kořenech rostlin kukuřice (3. odběr).....	41
Tab. 8: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v nadzemní části rostlin kukuřice (4. odběr)	42
Tab. 9: Obsah živin (N, P, K, Ca, Mg) v kořenech rostlin kukuřice (4. odběr).....	42
Tab. 10: Délka (cm) a plocha (cm ²) kořenového systému v 1. odběru rostlin	43
Tab. 11: Délka (cm) a plocha (cm ²) kořenového systému v 2. odběru rostlin	44
Tab. 12: Délka (cm) a plocha (cm ²) kořenového systému v 3. odběru rostlin	45
Tab. 13: Délka (cm) a plocha (cm ²) kořenového systému v 4. odběru rostlin	46
Tab. 14: Hodnoty kapacity kořenového systému rostlin naměřené LCR metrem (nF)..	47

8.2 Seznam grafů

Graf 1: Hmotnost sušiny 1. Odběr	35
Graf 2: Hmotnost sušiny 2. odběr	36
Graf 3: Hmotnost sušiny 3. odběr	37
Graf 4: Hmotnost sušiny 4. odběr	37
Graf 5: Vývoj elektrické kořenové kapacity (nF) v průběhu odběrů.....	48
Graf 6: Průměrné hodnoty elektrické kořenové kapacity (nF) v průběhu odběrů	49

8.3 Seznam obrázků

Obr. 1: Stavba kořene kukuřice (Hochholdinger, Tuberosa, 2009).....	12
Obr. 2: Symptomy deficiencie N (Taylor, 2013).....	21
Obr. 3: Symptomy deficiencie P (IPNI, 2014)	23
Obr. 4: Symptomy deficiencie K (IPNI, 2014).....	24
Obr. 5: Symptomy deficiencie Ca (IPNI, 2014)	25
Obr. 6: Symptomy deficiencie Mg (Brown, 2009).....	27
Obr. 7: Symptomy deficiencie S (IPNI, 2014)	28
Obr. 8: Založení nádobového pokusu (vlastní foto)	31
Obr. 9: Rozdíly mezi jednotlivými variantami ve 4. odběru (vlastní foto)	31
Obr. 10: Stanovení elektrické kapacity kořenového systému (vlastní foto).....	32
Obr. 11: Uchycení rostlin pro stanovení elektrické kapacity kořenového systému (vlastní foto).....	33
Obr. 12: Sken kořenů kontrolních rostliny, 2. odběr (vlastní sken).....	44
Obr. 13: Sken kořenů rostliny s deficitem S, 2. odběr (vlastní sken)	44
Obr. 14: Sken kořenů rostliny s deficitem K, 1. odběr (vlastní sken)	46
Obr. 15: Sken kořenů rostliny s deficitem K, 4. odběr (vlastní sken)	46