

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Výživa plodové zeleniny makroprvky**

**Bakalářská práce**

**Kseniia Kasatonova**

**Zahradnictví (HORTIB)**

**doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.**

© 2023/24 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Výživa plodové zeleniny makroprvky" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28.04.2024

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za podrobné vysvětlení principu psaní bakalářské práce, trpělivost, kterou projevil během zpracování dané rešerše a podporu, kterou vždycky vykazuje svým studentům. Dále bych chtěla upomenout svou rodinu a DiS. Irinu Bondarevou, kteří vykazovaly nekonečnou trpělivost během mého studia.

# Výživa plodové zeleniny makroprvky

## Souhrn:

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo shrnout aktuální poznatky o výživě plodové zeleniny makroprvky.

Makroprvky jsou minerální látky, které se v živém organismu vyskytují ve velkém množství. Z hlediska rostlin jsou za makroprvky považovány následující: dusík (N), fosfor (P), draslík (K), vápník (Ca), hořčík (Mg), síra (S).

Jednotlivé podkapitoly literární rešerše jsou zaměřené na význam každého daného makroprvku ve výživě plodové zeleniny. Poukazují na jejich formy v půdě a příjem jednotlivých živin rostlinami. Dále jsou zmíněny funkce vybraných živin v rostlině, jejich role pro optimální podmínky růstu a vývoje. Koncem každé podkapitoly jsou popsány důsledky nadbytku nebo nedostatku konkrétního prvku. Literární přehled je u každého prvku ukončen charakteristikou hnojiv obsahujících dané makroprvky s jejich stručným popisem a možnostmi využití.

Z literárního přehledu lze konstatovat, že plodová zelenina je typická svou náročností na živiny. K jejímu hnojení je tak třeba přistupovat velmi zodpovědně a je třeba zohlednit zejména její náročnost na hořčík, a naopak citlivost na chlór a přímé vápnění. Pro zvýšení kvality produkce lze doporučit nešetřit na organických hnojivech.

**Klíčová slova:** Hnojení rostlin; Živiny; Půda; Rostlina; Makroprvky.

# **Nutrition of fruiting vegetables with macro-nutrients**

## **Summary:**

The main aim of this bachelor thesis was to summarize the current knowledge on the nutrition of fruiting vegetables with macro-elements.

Macronutrients are minerals that occur in large quantities in living organisms. In terms of plants, the following are considered macronutrients: nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulphur (S).

The individual subsections of the literature review focus on the importance of each macronutrient in the nutrition of fruiting vegetables. They point out their forms in the soil and the uptake of each nutrient by plants. Furthermore, the functions of the selected nutrients in the plant and their role for optimal growth and development conditions are mentioned. At the end of each subchapter, the consequences of an excess or deficiency of a particular element are described. For each element, the literature review concludes with the characteristics of fertilisers containing the macro-elements in question, with a brief description and their possible uses.

The literature review shows that fruiting vegetables are typically nutrient-intensive. Its fertilisation must therefore be approached very responsibly, taking into account, in particular, its demand for magnesium and, conversely, its sensitivity to chlorine and direct liming. In order to increase the quality of production, it is advisable not to skimp on organic fertilisers.

**Keywords:** Plant fertilization; Nutrients; Soil; Plant; Macroelements.

## **Obsah**

<b>1 Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Cíl práce .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Dusík</b>	
3.1.1. Význam dusíku ve výživě plodové zeleniny.....	10
3.1.2. Dusík v půdě.....	10
3.1.3. Dusík v rostlině.....	13
3.1.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku dusíku u plodové zeleniny.....	13
<b>3.2 Fosfor</b>	
3.2.1. Význam fosforu ve výživě plodové zeleniny.....	15
3.2.2. Fosfor v půdě.....	16
3.2.3. Fosfor v rostlině.....	18
3.2.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku fosforu u plodové zeleniny.....	18
<b>3.3 Draslík</b>	
3.3.1. Význam draslíku ve výživě plodové zeleniny.....	20
3.3.2. Draslík v půdě.....	20
3.3.3. Draslík v rostlině.....	23
3.3.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku draslíku u plodové zeleniny.....	24
<b>3.4 Vápník</b>	
3.4.1. Význam vápníku ve výživě plodové zeleniny.....	26

3.4.2. Vápník v půdě.....	27
3.4.3. Vápník v rostlině.....	28
3.4.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku vápníku u plodové zeleniny .....	29
<b>3.5 Hořčík</b>	
3.5.1. Význam hořčíku ve výživě plodové zeleniny.....	31
3.5.2. Hořčík v půdě.....	32
3.5.3. Hořčík v rostlině.....	33
3.5.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku hořčíku u plodové zeleniny.....	34
<b>3.6 Síra</b>	
3.6.1. Význam síry ve výživě plodové zeleniny.....	35
3.6.2. Síra v půdě.....	36
3.6.3. Síra v rostlině.....	39
3.6.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku síry u plodové zeleniny.....	40
<b>4 Závěr.....</b>	<b>42</b>
<b>5 Literatura .....</b>	<b>43</b>

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na důležitý aspekt zemědělství a zahradnictví – výživu plodové zeleniny, konkrétně na vliv makroprvků. Makroprvky jsou chemické prvky, které se vyskytují v živých organismech ve velkém množství a hrají klíčovou roli ve vývoji a růstu rostlin. Bez přítomnosti makroelementů v půdě a rostlinách by živočichové prakticky nemohli existovat. Daná práce je zaměřena na analýzu způsobu, kterým makroprvky ovlivňují kvalitu a výnos plodové zeleniny a jak se projeví u rostlin různé koncentrace každého elementu. Rešerše by měla umožnit lepší porozumění roli každého z vybraných prvků v životním cyklu zelenin a shrnout základní informace o daném prvku.

Práce se skládá z několika hlavních částí. Po stručném úvodu následují cíle práce. Hlavní část představuje literární přehled spojující historické i aktuální poznatky v oblasti výživy rostlin.

Tato rešerše má za cíl přispět k lepšímu porozumění vybraného tématu a může sloužit jako užitečný zdroj informací pro zemědělce, zahradníky a vědeckou komunitu zabývající se výživou rostlin.



## **2 Cíl práce**

- Přehledně shrnout zásadní poznatky o výživě plodové zeleniny makroprvky se zaměřením na aktuální situaci.
- Popsat projevy nedostatku nebo nadbytku každého prvku s návrhem řešení situace.

## 3 Literární rešerše

### 3.1. Dusík

#### 3.1.1. Význam dusíku ve výživě plodové zeleniny

N je jednou z hlavních složek organických sloučenin jako jsou aminokyseliny, bílkoviny a nukleové kyseliny. Jeho nedostatek zpožďuje fenologický vývoj ve vegetativních a reprodukčních fázích (Fathi, Zeidali 2021). Fathi et al. (2016) uvádí že přidání správného množství dusíku rostlinám může výrazně zvýšit jejich biomasu. Studium efektivity využití dusíku v plodinách má zásadní význam pro řešení problémů spojených s degradací životního prostředí, potravinovou bezpečností a změnou klimatu, a to jak z hlediska socioekonomického, tak i technologického (Zhang et al. 2015; Lu et al., 2019). Jelikož je N jedním z nejvíce spotřebovávaných prvků, hraje zásadní roli při jeho asimilaci a přenosu do rostoucích orgánů (Fathi, Zeidali 2021).

Rajčata potřebují na začátku svého vývoje více dusíku. Je známo, že dusík je důležitým prvkem při tvorbě všech rostlinných orgánů. Správné hnojení dusíkem zvyšuje a urychluje tvorbu vegetativních a reprodukčních orgánů, respektive výnos. Je třeba poznamenat, že různé odrůdy vyžadují různé množství dusíku. Ty s bujným vegetativním růstem vyžadují více dusíku než ty s menším vegetativním růstem.

Dostatečný nebo mírně zvýšený přísun dusíku cuketám pomáhá zvýšit výnos plodů skoro dvojnásobně, optimalizuje bilanci vitamínů a sacharidů uvnitř plodů, čímž zlepšuje chuťově a aromatické vlastnosti zeleniny. Správné hnojení dusíkem zvyšuje obranyschopnost cuket proti plísním (Jasinovskaya 2022).

Lilek je poměrně náročný na kvalitu půdy. Dusík urychluje růst rostlin, a plody se proto objevují a dozrávají dříve. Nedostatek dusíku oslabuje celou rostlinu (od kořenů až po vrchol) a způsobuje předčasné žloutnutí a opadávání listů (Kamalov 2023).

#### 3.1.2. Dusík v půdě

Škarpa (2010) a Vaněk et al. (2012) uvádějí že dusík se nachází v půdě v převážné míře ve formě organické (98-99 %). Jen malá část je obsažena ve formě minerální ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , příp.  $\text{NO}_2^-$ ). Dusík vázaný v organické formě představuje zásobní formu N, kterou rostliny mohou využívat až po mineralizaci. Obsah minerálního dusíku v půdě značně kolísá v závislosti na intenzitě mineralizace, amonizace a nitrifikace (Škarpa 2010). Celkový obsah dusíku v půdě se běžně pohybuje v rozmezí 0,1-0,2 %, což představuje v ornici 3000-6000 kg N/ha (Vaněk et al. 2012).

Dusík v půdě podléhá různým přeměnám. Jsou to procesy mineralizační, kdy z organických látek (je v nich soustředěna převážná část půdního N) je uvolňován  $\text{NH}_3$  a ten je většinou dále oxidován na  $\text{NO}_3^-$ . Obě formy dusíku jsou zdrojem N pro rostliny. V klimatických podmínkách ČR v biologicky činných půdách přijímají rostliny většinu N ve formě  $\text{NO}_3^-$ . Podmínky, kdy převažují hlavně mineralizační nebo imobilizační procesy, nejsou zatím dostatečně objasněny, a proto jsou velké potíže s možností usměrňování těchto pochodů, a tím i využití výsledků analýz půd na obsah minerálního N pro praktickou výživu rostlin dusíkem a omezení ztrát N z půd. Významným způsobem jsou tyto procesy ovlivňovány obsahem C a jeho formami v půdě, dále poměrem C:N, oxidačně-redukčními podmínkami, vlhkostními a teplotními poměry a řadou dalších podmínek a jejich vzájemnou kombinací. Je zřejmé, že dominantní je průběh hydrotermických podmínek (Vaněk et al. 1997).

Níže je uveden základní přehled přeměn dusíku v půdě:

#### **a) Amonizace**

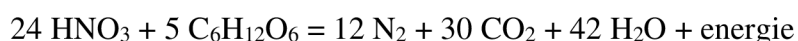
Proces odštěpení amoniaku z aminokyselin, případně amidů, který probíhá v aerobním i anaerobním (oxidačním i redukčním) prostředí. Amoniak vzniklý rozkladem organických dusíkatých sloučenin je zdrojem N pro mikroorganismy, část může být zdrojem N pro rostliny, případně jako kationt  $\text{NH}_4^+$ , je v půdě sorbován na půdní koloidy (Vaněk et al. 2012).

#### **b) Nitrifikace**

Nitrifikace je oxidační proces, kdy je amonný dusík postupně oxidován autotrofními mikroorganismy až na  $\text{N-NO}_3^-$ . Proces je velmi citlivý na vnější podmínky, je výrazně ovlivňován jako většina biologických procesů hydrotermickými podmínkami. Při teplotách pod  $5\text{ }^\circ\text{C}$  téměř ustává. Vyžaduje dostatek vzduchu v půdě a slabě kyselou až neutrální reakci půdy. Je také ovlivněn koncentrací solí v půdě a druhem hnojiva (Vaněk et al. 1997).

#### **c) Denitrifikace**

Denitrifikace je naopak redukční proces, kdy nitráty jsou za přítomnosti organických látek redukovány na oxidy dusíku až elementární dusík. V našich podmínkách převažuje denitrifikace působená fakultativně anaerobními mikroorganismy, které během rozkladu využívají kyslík nitrátů. Lze ji sumárně znázornit takto :



Podmínkou průběhu denitrifikace je nedostatek kyslíku v půdě, přítomnost nitrátů a dostatek lehce dostupných organických látek (oxidují se na oxid uhličitý a uvolňuje se energie) a samozřejmě řada dalších podmínek jako např. vyšší hodnoty pH, redox potenciál apod. Rozhodujícím faktorem průběhu denitrifikace je omezená aerobiosa, která je většinou působena vyšším obsahem vody v půdě (Vaněk et al. 1997).

## d) Imobilizace

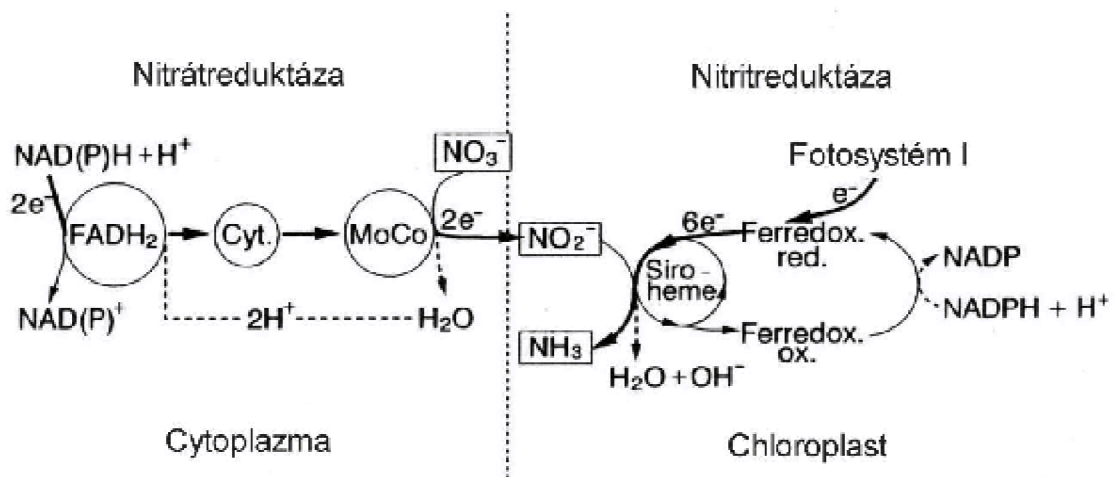
V půdách probíhají současně i opačné procesy - imobilizace, kdy jsou minerální formy dusíku vázány mikroorganismy a zabudovány do organických sloučenin (Vaněk et al. 1997).

## Příjem dusíku

Za normálních podmínek má nitrát pro výživu rostlin největší význam. Kořeny ho přijímají aktivně ve směru elektrochemického gradientu. V protikladu s příjmem je výdej  $\text{NO}_3^-$  procesem pasivním. Nitrátový dusík je přijímán při pH kyselejších. Při pH 6,8 se příjem  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  v rostlinách může vyrovnat. Amonný iont působí inhibičně na příjem nitrátové formy.

Dříve než může být nitrát metabolizován, je třeba jej redukovat na  $\text{NH}_3$ . Tento proces zvaný redukce nitrátů sestává ze dvou etap, a to z redukce  $\text{NO}_3^-$  na  $\text{NO}_2^-$  a z další redukce  $\text{NO}_2^-$  na  $\text{NH}_3$ . Obecně uznávaný mechanismus asimilace  $\text{NO}_3^-$  zelenými rostlinami na světle uvádí obrázek č 1.

**Obrázek č. 1. Schéma asimilace nitrátů v buňkách listu (Beevers, Hageman a Warner, Kleinhofs, 1995)**



Enzymy, které se účastní tohoto procesu jsou nitrátreduktáza a nitritreduktáza. Nitrátreduktáza sestává z flavinproteinu (FAD) a Mo. Aktivitu nitrátreduktázového systému ovlivňuje řada faktorů, z nichž světlo má velmi důležitou úlohu. Přenesením rostlin ze světla do tmy je aktivita nitrátreduktázy potlačena i tehdy, je-li  $\text{NO}_3^-$  přítomen v dostatečném množství. Tento účinek spolu s poklesem redukční síly je hlavní příčinou akumulace nitrátu při nižší intenzitě světla.

Akumulace nitrátu může často probíhat i jako důsledek nízké intenzity osvětlení a vysokého hnojení nitráty. Asimilaci nitrátu ovlivňuje i teplota. Bylo prokázáno, že při teplotách kořenů kolem  $30\text{ }^\circ\text{C}$  dochází k intenzivnímu příjmu  $\text{NO}_3^-$ , ale snižuje se aktivita nitrátreduktázy (Richter 2004).

### 3.1.3. Dusík v rostlině

Obsah dusíku v rostlině má široké rozpětí od 0,5 % do 7,1 % a liší se dle druhu rostliny. Přisun dusíku během vegetace rostlin je nerovnoměrný. V počáteční fázi s nedostatečně vyvinutým kořenovým systémem rostliny spotřebovávají zanedbatelné množství dusíku. V průběhu růstu se spotřeba dusíku rostlinami výrazně zvyšuje, a silně závisí na druhu pěstované plodiny (Zavalin, Sokolov 2019). Intenzita příjmu N se výrazně zvyšuje v období maximálního růstu rostlinné biomasy (Lu et al. 2019). Po období tvorby reprodukčních orgánů se zásobování rostlin dusíkem z půdy oslabuje a další vývoj reprodukčních orgánů je způsoben především redistribucí. Na konci vegetace rostlin dochází k úbytku dusíku spojenému s odumíráním a opadem listů a plodů (Zavalin, Sokolov 2019).

Úloha dusíku v rostlinách je rozmanitá, neboť ovlivňuje celou řadu procesů (Balík et al. 2012). Dusík je nedílnou součástí aminokyselin, resp. bílkovin, nukleových kyselin, enzymů, hormonů, reguluje a stimuluje vegetativní a reprodukční vývoj a ovlivňuje příjem dalších živin (Fageria et al. 2013). Dusík je často označován jako „motor růstu a produkce“, proto při zvyšování jeho obsahu v půdě (hnojením, mineralizací organické hmoty apod.) dochází ke zvyšování výnosů (Černý et al. 2023). Dusík významně ovlivňuje výšku rostlin, suchou hmotnost výhonů, počet lat a HTS (hmotnost tisíce semen) (Fageria et al. 2013).

Dusík má významnou roli při vytváření a udržování fotosynteticky aktivní plochy listů. Zásobování dusíkem během vegetativního růstu zvyšuje listovou pokrývnost (LAI - leaf area index) i rychlost růstu rostliny, což vede k vyššímu počtu listů, větví a ve výsledku také semen na rostlině.

To je prokázáno výsledky mnoha pokusů v polních i řízených podmínkách, které se zabývají vztahy mezi dávkou (přístupností) dusíku, intenzitou fotosyntézy a denní asimilací CO<sub>2</sub>. Dostatečné hnojení dusíkem přispívá mírně na zvýšení intenzity fotosyntézy, ale silně pozitivně na produktivitu díky vyšší LAI a delšímu období fotosyntézy. To platí také v pozdějším období růstu (po kvetení), kdy se ještě uplatňuje plocha šešulí (PAI - pod area index) a plocha mladých listů na větvích. Tyto orgány mají také značný význam při využití dusíku. Z vědeckých studií, polních pokusů a analýz rozborů rostlin v zemědělské praxi jednoznačně vyplývá, že většina dusíku je rostlinami přijímána v období do plného kvetení (Černý et al. 2023). Fotosyntetický aparát rostlin je silně závislý na přítomnosti dusíku, a to nejen jako součásti chlorofylu (Bassi et al. 2018). Fotosyntéza je pro rostliny nejdůležitějším procesem pro růst a produkci biomasy, a proto je hnací silou tvorby výnosů (Chen et al. 2018).

Přítomnost tohoto prvku vždy zvyšuje růst a výkonnost rostlin tím, že dodává potřebnou vodu. Rovněž dostatek N v půdě stimuluje tvorbu nových listů z terminálního meristému stonku a postranních pupenů starších listů. V konečném důsledku zvyšuje výnos nadzemních částí (Fathi 2020).

### 3.1.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku dusíku u plodové zeleniny

#### a) Nedostatek dusíku

Nedostatek dusíku výrazně omezuje růst celé rostliny (Richter 2004; Fathi et al. 2013; Cherlinka 2022). Podle stupně nedostatku N se mění barva nejstarších listů od bledě zelené do žluté. Při silném nedostatku dusíku list od spodu odumírá, a někdy i odpadne. Listy nižších pater obvykle

trpí nedostatkem N dříve, protože se z nich N přemísťuje, aby udržel vývoj mladších listů, plodů a semen. To někdy vede ke klamnému dojmu rychlého dozrání.

Výrazné změny jsou i v morfologii kořenů. Kořen se málo větví (roste do délky). Poměr hmoty kořenů ku nadzemní biomase se zvyšuje.

Nedostatek dusíku u tykvovitých plodin (okurky, cukety, patizony, melouny atd.) se projevuje tenkými tuhými pletivy, bledě zelenými nebo nažloutlými listy. Plody u okurek se nepravidelně rozrůstají a stávají se buď tenkými, nebo s rozšířenou květní špičkou, barva plodů je žlutá se zelenohnědým nádechem. Okurky jsou velmi citlivé na chemické složení půdy, takže na nedostatek dusíku reagují rychle následujícími příznaky:

- plody a listy ztrácejí barvu - jsou světle zelené;
- na vrcholcích plodů se objevují zobákovité výhonky;
- spodní část listů žloutne;
- přestávají se vyvíjet květy a stonky (Cherlinka 2022).

Nedostatek dusíku u rajčat se projevuje zpomalením růstu a ztrátou zelené barvy. Jako první trpí mladé listy v horní části rostliny. Stávají se tenkými a malými a stonky tvrdými a vláknitými. Plody, zejména na spodní straně, získávají tmavě červený odstín. Nedostatek dusíku také způsobuje, že květní pupeny rajčat odumírají nebo se stávají malými a dřevnatými, v důsledku toho rostlina přestává plodit. Žilnatina listů, zejména na spodní straně, ztrácí normální zelenou barvu a postupně se zbarvuje do červena. Někdy získávají červený nádech i stonky listů, které jsou tenčí a pevnější než obvykle. Pupeny a květy žloutnou a opadávají, protože zmenšená listová plocha není schopna syntetizovat organické látky. Červené a zelené plody mají světlejší barvu než obvykle. Rostliny rajčat s nedostatkem dusíku mají zvýšenou náchylnost k chorobě šedé hniloby (Cherlinka 2022).

## **Odstranění nedostatku dusíku**

Zemědělci běžně aplikují velké množství dusíkatých hnojiv, protože pouze 30-50 % dusíku je přístupných pro rostliny v důsledku různých ztrát v systému půda-rostlina a protože dusík je v rostlině běžně čtvrtým nejzastoupenějším prvkem (Fageria 2002). K uspokojení této vysoké poptávky po N používají pěstitelé na celém světě každoročně přibližně 120 milionů tun dusíkatých hnojiv (Yadav et al. 2017).

## **Rozdělení dusíkatých hnojiv podle Vaněk et al. (2012)**

Dusíkatá hnojiva rozlišujeme podle formy dusíku následovně:

- Dusík ledkový (dusičnanový, nitrátový) - hnojiva běžně označovaná jako ledek, ledek vápenatý, Ca-Nsol, ledek horečnatý. Jsou to hnojiva dobře rozpustná ve vodě, aniont  $\text{NO}_3^-$  není v půdě sorbován, nachází se v půdním roztoku a proto jsou tato hnojiva vhodná k přihnojování během vegetace v menších dávkách.

- Dusík amonný - síran amonný a bezvodý amoniak. Poskytují rostlinám kationt  $\text{NH}_4^+$ , jenž je sorbován v půdě, je tudíž poměrně málo pohyblivý. Hnojiva s touto formou dusíku jsou vhodná k základnímu hnojení, tedy před setím a výsadbou.
- Dusík amidový a kyanamidový (organický) - močovina a dusíkaté vápno.
- Dvě a více forem dusíku - hlavním představitelem je ledek (dusičnan) amonný  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , a hnojiva z něho vyráběná - ledky amonné s vápencem, dolomitem či sírou (LAV, LAD, LAS), v posledních letech i hnojivo DASA a hnojivo DAM (směsný roztok dusičnanu amonného a močoviny), obsahující tři formy dusíku. Hnojiva této skupiny zaujímají na trhu největší podíl, a to přes 70 % (okolo 30 % LAV a dalších 30 % DAM).
- Pozvolně působící dusík s postupným uvolňováním hnojiva lze dále rozdělit na obalovaná a pozvolně rozpustná.

## b) Nadbytek dusíku

Nadměrné hnojení rajčat dusíkem způsobuje příliš silný vegetační vývoj, křehké stonky, tmavě zelené a lámavé listy. Zvyšuje se riziko napadení houbovými chorobami a škůdci, opoždí se tvorba plodů a snižuje se celkový výnos. Horní část stonku je silná a vodnatá a horní listy jsou menší a deformované.

## 3.2. Fosfor

### 3.2.1. Význam fosforu ve výživě plodové zeleniny

Fosfor hraje klíčovou roli ve výživě plodové zeleniny, protože je nezbytný pro mnoho důležitých biologických procesů Hlušek (2004). Jednou z jeho hlavních funkcí je podpora růstu a vývoje rostlin. Fosfor je klíčovým stavebním prvkem pro DNA, RNA a ATP, což jsou základní molekuly nezbytné pro buněčné dělení, růst a metabolismus (Lambert 2022). Bez dostatečného přísunu P mají rostliny oslabený růst a vývoj, což má za následek nižší výnosy a horší kvalitu plodů (Danica 2019).

Fosfor je například důležitým prvkem ve výživě melounů. Amirov et al. (2023) ve svých pokusech zjistil, že zvýšení hladiny fosforu v půdě s přidáním draslíku zdvojnásobuje výnos plodů a jejich kvalita závisí z 90 % na správném poměru N:P:K.

Ve správném vývoji plodů u čeledi *Solanaceae* hraje fosfor také důležitou roli. Odpovídá za zrychlení vývoje květů a plodů, posílení stonků, což je velmi důležité proto aby rostlina byla schopna udržet na vyšší hmotnost plodů.

Hlavní podíl fosforu využívají rajčata v počátečních fázích růstu, kdy si ho ukládají do svých pletiv. Díky P je množství dusíku v rostlinách vyrovnané. Fosfor je pro rajčata důležitý ve všech fázích vývoje rostlin. Tento prvek je nezbytný pro růst, urychluje metabolické procesy v semenáčcích a podporuje produkci životně důležité energie. Dobře hnojená rajčata se lépe vyvíjejí, rychleji rostou a vytvářejí silný kořenový systém (Mezhak 2019).

Kamalov (2023) uvádí, že rovněž papriky vyžadují velkou pozornost z hlediska hnojení fosforem. Nedostatek P výrazně omezí metabolismus a nedojde tak k dostatečnému vývoji plodů.

### 3.2.2. Fosfor v půdě

Fosfor patří mezi makrobiogenní prvky a je druhým nejdůležitějším prvkem ve výživě rostlin. Ve vzduchu se nachází jen v nepatrném množství, a proto je jeho hlavním zdrojem matečná hornina. Nejvíce se ho nachází v primárním minerálu - apatitu. Ke ztrátám fosforu v půdě dochází převážně povrchovým smyvem a sklizní rostlinných produktů (Bajerová 2020).

Obsah fosforu v minerální formě tvoří více než polovinu celkového obsahu fosforu v zemědělských půdách. Většina jeho minerálních sloučenin je ve vodě nerozpustná, a proto je pro rostliny nepřístupná (Richter et al. 1999). Anorganický fosfor je celkově jedním z nejméně dostupných makroživin v mnoha suchozemských a vodních ekosystémech (Hallama et al. 2019).

Podle Lambers a Plaxton (2015) je anorganický fosfát nezbytná makroživina, hrající klíčovou roli v přenosu energií a metabolické regulaci a zároveň slouží jako klíčová složka ve stavbě biomolekul (fosfolipidy, nukleové kyseliny, fosforylované cukry a adenyláty). Spohn a Scheluss (2019) ve svých studiích uvádějí, že přidání anorganického fosforu do půdy zvyšuje celkové mineralizační schopnosti půdy.

Celkové množství fosforu v půdě kolísá od 0,01-0,15 % (Ivanič et al. 1984; Baier a Baierová 1985; Vaněk et al. 2012). Vyšší obsah P vykazují většinou půdy s vyšším obsahem organické hmoty, zatímco půdy lehké s malým obsahem organické hmoty mají obsah P nízký. Převážná část celkového P v půdách je pro rostliny nepřijatelná (Vaněk et al. 2012; Akimova 2023).

Fosfor se v půdě vyskytuje ve třech formách. Z praktického hlediska si lze fosfor v půdě představit jako tři "rezervoáry":

- roztok
- snadno extrahovatelný, nazývaný také aktivní fosfor (fosfor adsorbovaný vnějšími povrchy)
- obtížně extrahovatelný, tzv. vázaný (pevně vázaný nebo adsorbovaný na vnitřním povrchu).

#### a) Fosfor v půdním roztoku

Fosforu ve formě půdního roztoku je velmi málo a obvykle je ho obsaženo asi kolem kilogramu na hektar. V této formě je tvořen směsí anorganického a organického fosforu, přičemž anorganický P představuje většinu půdního roztoku. Rostliny přijímají fosfor především v ortofosforečnanové formě. Fosfor ve formě půdního roztoku je důležitý, protože z něj rostliny přijímají P a je to jediný stav prvku, který má měřitelnou mobilitu (Polyakova 2022). Většina fosforu přijímaného plodinami během vegetačního období se přes půdu ke kořenům dostane jen z okolí několika milimetrů a méně. Rostoucí plodina by rychle vyčerpala rozpustný fosfor, pokud by nebyl doplňován z aktivního a fixního rezervoáru.



## **b) Aktivní fosfor**

Fosfor v pevné fázi se snáze uvolňuje do půdního roztoku s vodou obklopující půdní částice. Jak rostliny přijímají fosfáty, jejich koncentrace v roztoku se snižuje a část z aktivního fondu se uvolňuje. Protože fosforu v půdním roztoku je málo, jde aktivní zásoba hlavním zdrojem dostupného fosforu pro plodiny (Polyakova 2022). Schopnost aktivního P doplňovat fosfor do půdního roztoku činí půdu úrodnější. Aktivní podíl P obsahuje anorganický fosfát, který se váže (nebo je adsorbován) na malé částice v půdě. Dále jdou fosforečnany, které reagují s prvky, jako je vápník nebo hliník, za vzniku částečně rozpustných pevných látek, a organický fosfor, který je snadněji mineralizován (Akimova 2023). Adsorbované fosforečnanové ionty se udržují na aktivních místech, na povrchu půdních částic (Lambers 2022). Množství fosforečnanů adsorbovaných půdou se zvyšuje s rostoucím množstvím fosforečnanů v roztoku a naopak, dokud nedojde k rovnovážnému stavu. Když ve většině půd dosáhne koncentrace P v roztoku 60 až 90 mg/l (nebo 90 mg/kg), půda již nemůže pojmout více fosforu, protože většina sorpčních míst je obsazena. Půdní částice mohou v závislosti na podmínkách působit jako zdroj nebo sorbent fosfátů z okolí (Polyakova 2022).

## **c) Pevně vázaný fosfor**

Tato forma představuje anorganické sloučeniny fosfátů, které jsou málo rozpustné (nebo téměř nerozpustné), a organické sloučeniny, které jsou odolné vůči mineralizaci půdními mikroorganismy. Fosfáty v tomto fondu mohou zůstat v půdě po mnoho let, aniž by byly dostupné rostlinám, a mohou tak mít velmi malý vliv na úrodnost půdy. Mezhak (2019) udává že anorganické sloučeniny fosforečnanů fixovaného P mají krystalickou strukturu a jsou méně rozpustné než sloučeniny považované za část aktivního P. V půdě dochází k velmi pomalé přeměně mezi pevně vázaným a aktivním fosforem (Akimova 2023).

## **Příjem fosforu**

Jak uvádí ve svém výzkumu Polyakova (2022), fosfor se v půdě vyskytuje v organické i anorganické (minerální) formě a jeho rozpustnost v půdě je nízká. Mezi fosforem v pevné fázi v půdě a fosforem v půdním roztoku existuje rovnováha. Rostliny mohou asimilovat pouze fosfor rozpuštěný v půdním roztoku, a protože většina fosforu v půdě existuje jako stabilní chemické sloučeniny, je pro rostliny v daném okamžiku dostupné pouze malé množství fosforu.

Když kořeny rostlin odebírají fosfor z půdního roztoku, část fosforu adsorbovaného pevnou fází se uvolňuje do půdního roztoku, aby se udržela rovnováha. Druhy sloučenin fosforu, které se vyskytují v půdě, jsou určeny především pH půdy a druhem a množstvím minerálů v půdě. Minerální sloučeniny fosforu obvykle obsahují hliník, železo, mangan a vápník.

Rostliny přijímají fosfor z půdního roztoku ve formě ortofosforečnanového iontu: buď  $\text{HPO}_4^{2-}$  nebo  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Poměr, v jakém jsou tyto dvě formy absorbovány, závisí na pH půdy, přičemž při vyšším pH půdy je absorbováno více  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Ozanne 1980; Tlustoš et al. 2002; Vaněk et al. 2012). Pohyblivost fosforu v půdě je velmi omezená, takže kořeny rostlin mohou přijímat fosfor pouze z bezprostředního okolí. Příjem P a jeho akumulace kořeny je spojená s jeho inkorporací do nízkomolekulárních sloučenin (estery kyseliny fosforečné, fosforylované cukry, volné nukleotidy). Příjem P výrazně inhibují také OH ionty (Richter 2004).

### 3.2.3. Fosfor v rostlině

Hlavním úkolem fosforu je podporovat přenos živin do všech rostlinných orgánů a pletiv. Během intenzivního růstu si mnoho rostlin udržuje hladinu 0,3 až 0,5 % P v sušině. Fosfor také hraje roli při transportu a ukládání energie ve formě ATP, což je klíčové pro metabolické procesy, jako je fotosyntéza, dýchání a tvorba sacharidů (Ivanič et al. 1984). Díky tomu pomáhá fosfor zlepšovat odolnost rostliny vůči stresu a podporuje tvorbu silných stonků a větvení, což může vést k lepšímu výnosu a kvalitě plodů (například u rajčat, paprik, lilků a cuket). Kromě toho posiluje kořenový systém rostlin, což je klíčové pro absorpci vody a živin z půdy. Silné a zdravé kořeny pomáhají rostlinám lépe odolávat stresu a chorobám, což přispívá k celkovému zdraví a výnosům plodů (Danica 2019).

Rostliny potřebují značné množství fosforu již v počátečních stádiích růstu. Nejprve ho získávají ze semene a později z přijatelných forem z vnějšího prostředí. V této fázi vývoje ještě nemá rostlina dostatečně vyvinutý kořenový systém, a proto má velký význam množství přijatelného fosforu v blízkosti nově se tvořících kořenů. Právě počátek vegetace je považován za kritické období příjmu fosforu u rostlin. Jedním z mikroorganismů, které jsou schopny uvolňovat fosfor do přijatelných forem je bakterie *Bacillus megaterium*. Po její aplikaci na půdu ve formě postřiku dojde ke zvýšení množství přijatelného fosforu v půdě (Bajerová 2020).

Ve svém výzkumu Michalache et al. (2020) zjistili, že zvýšení hladiny fosforu při hnojení rajčat vedlo ke zvýšení hladiny lykopenu v plodech. Lykopen je hlavní červené barvivo v rajčatech a některých dalších druzích zeleniny a ovoce. Pro člověka jsou rajčata hlavním zdrojem lykopenu. V čerstvých plodech dosahuje jeho obsah až 83 %, ale liší se v závislosti na druhu a stáří rostliny, podmínkách prostředí a typu hnojiva.

### 3.2.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku fosforu u plodové zeleniny

#### a) Nedostatek fosforu

Nedostatek fosforu se u rostlin projevuje méně často. Většinou se jedná o latentní nedostatek - na rostlinách nejsou zřetelné žádné zjevné příznaky nedostatku této živiny, ale pokud je jeho obsah v rostlinách nízký, nemohou probíhat všechny biochemické funkce na potřebné úrovni. Kritické období pro příjem P rostlinami je počátek vegetace, kdy zvláště za chladného, případně suchého počasí je výrazné ztížení příjem P (Vaněk et al. 2012). Při nedostatku fosforu rostliny rajčat špatně asimilují dusík, v důsledku čehož se zastavuje jejich růst, opožděje se tvorba a zrání plodů, listy jsou modrozelené a stonky fialově hnědé. Květy jsou drobné, plody často vadné, mají menší velikost a horší chuť. Listy mohou mít červenohnědou barvu. Fosfor je pro rajčata nezbytný zejména na začátku vegetace pro dobré zakořenění a před květem. Fosforečnany, které rostliny v tomto období využijí, jsou pak využité pro tvorbu plodů (Express Agro Journal 2020).

U okurky začínají příznaky nedostatku fosforu na mladších listech. Horní listy jsou menší a získávají tmavě zelenou barvu. Nedostatek fosforu vede současně k nedostatku dusíku a chloróze starých a později i mladých listů, na kterých se objevují vodnaté skvrny, které po zaschnutí hnědnou, listy předčasně odumírají (Danica 2019).

### **Odstranění nedostatku fosforu**

Prvním krokem je analýza pH půdy. Pokud je pH příliš vysoké nebo příliš nízké, může to ovlivnit dostupnost fosforu pro rostliny. Další možností je použití fosforečných hnojiv.

### **Rozdělení fosforečných hnojiv podle Vaněk et al. (2012):**

V hnojivech je fosfor obsažen ve formě fosforečnanů, nejčastěji vápenatých, vykazujících rozdílnou rozpustnost. Působení hnojiva v půdě a využití P rostlinami je značně závislé právě na rozpustnosti dodávaných sloučenin. Podle rozpustnosti rozlišujeme hnojiva:

- s fosforem rozpustným ve vodě (superfosfáty, Amofos aj.) a v kyselině citronové (citrofosfát, většina NPK hnojiv aj.).
- s fosforem nerozpustným - celkovým (mleté fosfáty).

Organická hnojiva, jako je kompost nebo hnůj, mohou také poskytnout fosfor rostlinám a lze je doporučit k plodové zelenině. Tyto přírodní zdroje fosforu postupně uvolňují živiny do půdy, což může dlouhodobě zlepšit obsah fosforu a zlepšit jeho dostupnost (Express Agro Journal 2020). Mezi tím je třeba udržovat režim zavlažování, což pomáhá fosforu dostávat se ke kořenům rostlin a zvyšuje jeho dostupnost.

### **b) Nadbytek fosforu**

Pokud je fosforu nadbytek, zpomaluje se buněčný metabolismus, rostliny jsou citlivé na nedostatek vody a hůře vstřebávají živiny jako železo, zinek a draslík. V důsledku toho listy žloutnou, opadávají a vegetační doba rostliny se snižuje. Příliš vysoké množství fosforu v půdě může vést k intoxikaci rostlin fosforečnanem, což může způsobit poškození kořenů (Kamalov 2023). Kromě toho, nadbytek fosforu může způsobit akumulaci solí v půdě, což může negativně ovlivnit osmotickou rovnováhu rostlin a vést k osmotickému stresu. Nadbytek fosforu v rostlinách může mít také velmi negativní dopad na životní prostředí (McGill, Cole 1981).

Obohacování hydrosféry fosforem používaným při celosvětové produkci potravin ohrožuje kvalitu vody, biologickou rozmanitost a funkci různých ekosystémů (McDonald et al. 2016; Campbell et al. 2017). V některých řekách a jezerech v rozvinutých regionech došlo v důsledku snížení vypouštění odpadních vod ke snížení obsahu P (European Environment Agency 2015).

### 3.3. Draslík

#### 3.3.1. Význam draslíku ve výživě plodové zeleniny

Draslík je jednou z živin, které rostliny spotřebovávají v největším množství. Je důležitý především při transportu vody a tvorbě květů, což má vliv na kvalitu plodů a jejich strukturu (například, u rajčat, paprik a cuket). Draslík podporuje tvorbu pevných a silných stonků, transpiraci vody, fotosyntézu a zvyšuje odolnost rostlin proti chorobám. Je nezbytný pro tvorbu škrobu v bramborách. Dostatečný přísun draslíku pomáhá bramborám vyvíjet se rovnoměrně a má pozitivní vliv na jejich chuť a texturu.

Účinek draslíku na živé organismy je poměrně dobře prostudován. Draslík díky své účasti na fungování více než 60 enzymových systémů, podporuje vstřebávání minerálních složek rostlinami, jejich přeměnu na organické látky při fotosyntéze a transport syntetizovaných produktů pletivy (Prokošev 2005). Není náhodou, že akademik A.E. Fersman nazval draslík základem života.

Vlivem draslíku je regulována jedna z nejdůležitějších podmínek pro život rostlin, transpirace nebo vodní režim. Pouze při dostatečném obsahu draslíku v pletivech je zajištěno optimální fungování průduchů, které řídí schopnost zadržovat vodu, což má vliv na kvalitu plodů a snižuje riziko popraskání plodů (Koleboshina et al. 2016). Díky tomu je turgor buněčných stěn stabilizován a odolnost rostlin vůči suchu, chladu a mrazu je zachována. Draslík je kritickou rostlinnou živinou, která určuje kvalitu plodin a zvyšuje produkční výnosy (Wang et al. 2022).

Hlavními prvky minerální výživy rajčat jsou draslík, dusík a fosfor a z vedlejších prvků vápník, hořčík a síra. Draslík je makroživinou, kterou rostliny rajčat spotřebovávají nejvíce. Tento prvek je pro rostliny nezbytný zejména v období růstu plodů. Při nedostatku tohoto prvku se na okrajích listů objeví žlutohnědé tečky, listy se začnou kroutit a poté odumírají. Draslík zlepšuje chuť plodů, dodává dužnině sladkost a zvětšuje velikost plodů. Kromě toho plody rajčat potřebují také sekundární prvky, jako je vápník, hořčík a síra (Express Agro Journal 2020).

Lilky jsou velmi citlivou kulturou. Nedostatek K se projevuje ztrátou barvy plodů a zpomalením jejich růstu. K maximálnímu příjmu draslíku dochází v období zrání lilku, protože draslík hraje důležitou roli v kvalitě plodů. Draslík má pozitivní vliv na chuť, odolnost vůči chorobám, skladovatelnost a přepravitelnost (Kamalov 2023).

#### 3.3.2. Draslík v půdě

Nejvíce draslíku obsahují obdělávané půdy mírného pásma, nejchudší jsou laterity a podzoly. V podmínkách ČR se udává rozmezí celkového obsahu K v ornici 0,04-2,9 % K. Nejbohatší na draslík jsou zpravidla jílovité půdy (Koleboshina et al. 2016). Shin (2014) zmiňuje že dostupnost draslíku je však na zemědělských půdách často omezená, a v důsledku toho se snižují výnosy a kvalita plodin. Zlepšení účinnosti příjmu a transportu draslíku, a také jeho využití v rostlinách, je proto důležité pro udržitelnost zemědělství.

Draslík nacházející se v půdě v různých sloučeninách, je možno rozdělit z hlediska přístupnosti pro rostliny a druhu vazby do tří skupin:

### a) Nevýměnný draslík

Do této skupiny řadíme všechny sloučeniny obsahující draslík, z nichž ho nelze vytěsnit roztoky neutrálních solí (Richter 2007; Vaněk et al. 2012). Tento podíl tvoří více než 95 % z veškerého K v půdě. Jsou to:

- draslík pevně vázaný v krystalové mřížce silikátových minerálů (primárních i sekundárních),
- fixovaný draslík,
- organicky vázaný draslík

Ze silikátových minerálů řadíme do skupiny primárních minerálů živce, slídy (muskovit, ortoklas, biotit, sanidín, albit aj.). V živcích je draslík poután v meziprostoru Si-Al-O mřížky. Z jílových minerálů jsou to zvláště illit (4-7 % K), glaukonit (3-7 % K), vermiculit (0-2 % K), chlorit (0-1 % K), montmorillonit (0-0,5 % K).

Druhou formou nevýměnného draslíku v půdě je draslík „fixovaný“. Pod pojmem „fixace“ rozumíme schopnost půdy vázat dodaný draslík nebo draslík uvolňovaný postupným zvětráváním nebo mineralizací organické hmoty. U jílových minerálů (illit, vermiculit, méně montmorillonit) dochází k včlenění K do krystalové mřížky jílových minerálů (Mengel, Kirkby 1987). U slíd a u minerálů typu 2:1 se draslík nachází v tetraedrické vrstvě. Rentgenovou strukturní analýzou bylo prokázáno, že mřížka illitu má prostor 1,56 nm, která po vniknutí  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$  se sníží na 1,08 nm a tím se otevřená mřížka opět uzavře a ionty se pevně váží.

Zvětráváním illitu část takto vázaných iontů migruje a je nahrazena kationty s menším iontovým poloměrem ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ). Tím se minerál degraduje, snižuje se obsah K, zvyšuje se obsah vody a mřížka expanduje. Draselným hnojením dochází k postupnému doplňování na původní hodnotu. Na některých půdách, přestože se normálně hnojí draslíkem, ale zvláště tam, kde se dlouhodobě nehnojí touto živinou, pozorujeme na rostlinách příznaky jejího nedostatku (Prokoshev 2005; Richter 2007). Půda zde může působit jako konkurent rostlin tím, že dodávané K ionty fixuje do forem nepřístupných rostlinám. K tomuto stavu dochází, když zásoba K vázaná exogenně je vyčerpána a rezervy K na okrajových pozicích jsou rovněž odčerpány (tak vzniká z illitu vermiculit). Jestliže se aplikuje draselné hnojivo do půdy s vysokým obsahem illitu nebo vermiculitu, pak je tento K-iont rychle zabudován do intralamelárních vrstev ochuzených o tento prvek (fixace) (Richter 2007). Přitom zaujmou mezivrstvy opět původní odstup a uvolňují fixovaný draslík pouze v malém množství do půdního roztoku. Prakticky to znamená, že nehnojíme rostliny, ale dosycujeme půdy (Richter 2004). Až je fixační kapacita draslíkem dosycena, může pak docházet k uzavření interlamelárního prostoru, a pak se mohou draslíkem dosycovat povrchové pozice, které zajistí rostlinám přístupný K. To je také důvod proč některé půdy (spraše) vyžadují k udržení půdní zásoby téměř neustálý přísun tohoto prvku. Metodika doporučuje, je-li při rozboru zeminy zjištěno méně než 0,25 mg K na 1 g jílu, výrazně zvýšit hnojení draslíkem. Fixaci a uvolňování K v půdách ovlivňuje druh půdy, mineralogické a zrnitostní

složení, sorpční kapacita, kationtové složení roztoku, obsah organických látek. Množství fixovaného  $K^+$  je na některých půdách vyšší než množství draslíku výměnného. S klesajícím pH půdy se fixace  $K^+$  snižuje. Důvodem snížení fixace je, že v kyselých půdách jsou  $H^+$  vázány na nosiče sorpce a mohou být jen těžko vyměněny za  $K^+$ . Proto vyvápněním těchto půd se fixace draslíku zvyšuje (Richter 2007).

Vysoký obsah humusu sníží fixaci  $K^+$ , neboť koloidní humusové látky vytváří na povrchu jílových minerálů jemnou vrstvu, bránící proniknutí  $K^+$  (nebo  $NH_4^+$ ) do interlamelárního prostoru. Fixace draslíku je rozdílná i vzhledem k půdnímu typu a druhu. Černozemě vykazují vyšší schopnost fixace než půdy podzolové. Z hlediska výživy rostlin draslíkem se proto doporučuje stanovit tzv. mobilní draselnou rezervu, která představuje množství nevýměnného K, které během krátké doby může přejít do forem využitelných rostlinami (Prokoshev 2005).

Organicky vázaný draslík představuje v půdě jen velmi malý podíl z jeho celkové zásoby. Podle Scheffer a Schachtschabel (2010) jde hlavně o draslík biologicky vázaný mikroorganismy stejně jako draslík vázaný v odumřelých rostlinných zbytcích stává se přístupným pro rostliny teprve po jejich mineralizaci.

## **b) Výměnný draslík**

Pod tímto pojmem se rozumí ionty  $K^+$  vázané fyzikálně chemickou sorpcí na povrchu půdních koloidů, odkud mohou být vytěsněny roztoky neutrálních solí.

Obsah výměnného draslíku je soustředěn přednostně v jemných frakcích půdy, minerálních i organických. Jeho množství velmi kolísá v závislosti s druhem a mineralogickým složením půdy, stupněm zvětrání, hnojením, druhem a koncentrací ostatních iontů, reakcí půdy a vodním režimem. Výměnný draslík představuje pouze asi 0,8 % (u písčitéch půd) a až 3 % (u půd humózních - černozemě) z veškerého draslíku v půdě. Obsah draslíku z celkové výměnné kapacity činí 2-7 %. Při vysokém obsahu K dochází k redukci příjmu  $Mg^{2+}$ , a proto v KVK by měl být poměr  $Mg:K$  alespoň 3x větší.

Výměnný draslík má pro výživu rostlin mimořádný význam, neboť takto vázané  $K^+$  jsou z převážné části snadno přístupné, nepodléhají rychlému vyplavení ani výrazněji nezvyšují koncentraci solí v půdním roztoku. Výměnný draslík přijímají rostliny buď přímo kontaktní výměnou za  $H^+$ , nebo nepřímo přes rovnovážný stav mezi draslíkem v půdním roztoku a draslíkem výměnným. V průběhu vegetace se obsah výměnného i rozpustného draslíku v půdě snižuje.

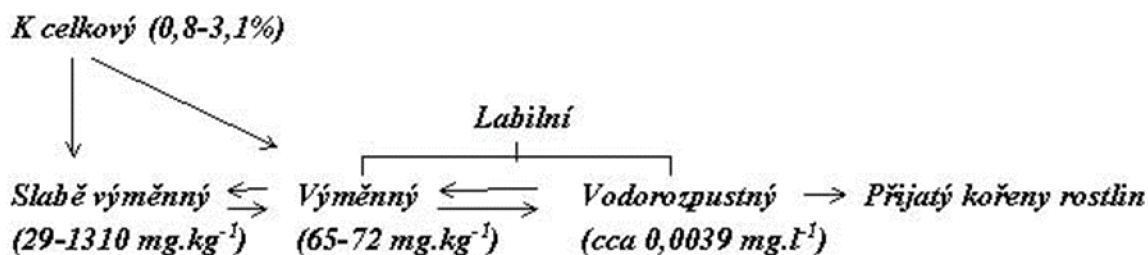
Stanovení obsahu přístupného draslíku v půdách ČR je prováděno na základě zjištění obsahu výměnného draslíku (Richter 2007).

## **c) Draslík vodorozpustný**

Představuje v půdě především ve vodě rozpustné draselné soli ( $KCl$ ,  $K_2SO_4$ ,  $KNO_3$ ,  $K_2CO_3$  apod.). Ionty  $K^+$  jsou ve vodním roztoku v hydratovaném stavu (2,5 molekuly  $H_2O$ . 1 iont  $K^+$ ). Koncentrace  $K^+$  v půdním roztoku je velmi nízká a pohybuje se od 0,02-0,1 mmol na 100 g půdy. Je zjištěno, že podíl draslíku rozpustného ve vodě činí asi 1-10 % z draslíku výměnného. Obsah draslíku vodorozpustného je závislý na obsahu vody v půdě, na typu jílových minerálů, na druhu a koncentraci jiných kationtů apod. Jeho množství se mění během vegetace odčerpáváním  $K^+$  rostlinami, mineralizací a hnojením.

Mezi formami draslíku v půdě platí rovnovážný stav, který má dynamický charakter. Průběžně se narušuje odběrem živin, hnojením, vyplavováním živin, mineralizací a zvětráváním. Po každém porušení se znovu ustaluje. Názorně to dokumentuje následující obrázek č.2.:

**Obrázek č. 2: Dynamika půdního draslíku (Russel 1988)**



Množství odčerpaného K sklizněmi činí v průměru 80-250 kg/ha. O intenzitě vyplavení draslíku rozhoduje sorpční kapacita půdy, úroveň a rozdělení srážek. Roční ztráty činí 13-60 kg K na ha, přitom se na nich výrazněji uplatňuje povrchový smyv (Richter 2007).

### Příjem draslíku

Draslík je přijímán rostlinami jako kationt  $K^+$ . Jeho příjem se uskutečňuje jak aktivně (převládá při nižších koncentracích K v půdním roztoku), tak pasivně. Při vysokých koncentracích K v půdním roztoku převažuje pasivní příjem K, může docházet ke zvýšenému příjmu K a jeho hromadění v pletivech rostlin, což je nazýváno „luxusní konzum“ a vede k omezení příjmu jiných kationtů (Na, Mg, Ca). Vlastní příjem K je kromě jeho koncentrace v půdním roztoku ovlivňován výrazně vlhkostí, teplotou a intenzitou slunečního záření (Vaněk a kol. 2012).

Příjem draslíku je výrazně ovlivňován interakcemi antagonistického charakteru. Zvyšující se koncentrace K snižuje příjem  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  a stimuluje příjem  $NO_3^-$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ . Z kationtů je nejméně ovlivněn příjem  $NH_4^+$  vzhledem k velikosti hydratovaného poloměru u obou iontů. Na příjem K pozitivně působí i řada vnějších podmínek (přístup vzduchu, teplota půdy, intenzita osvětlení) (Richter 2004).

### 3.3.3. Draslík v rostlině

V rostlině je draslík velmi pohyblivý. Charakteristickým rysem pro  $K^+$  je vysoká schopnost průniku buněčnými membránami. Draslík zasahuje do celé řady metabolických procesů (Balík 1993).

Významná je jeho účast v procesu fotosyntézy a dýchání. Podporuje tvorbu cukru, syntézu škrobu a pozitivně ovlivňuje metabolismus dusíku. Koncentrace draslíku v rostlinách se pohybuje mezi 2 – 6 %. Nejvyšších hodnot dosahuje ve fázi kvetení a v období dozrávání dochází k jeho snížení v důsledku vylučování do živného prostředí (Richter 2004). V rostlinných strukturách se draslík nachází především ve formě iontů. Proto se například po teplém dlouhém letním dešti, zejména v noci,

vyplavuje do půdy značné množství draslíku. Díky své vysoké pohyblivosti se draslík v rostlině v případě potřeby redistribuje a zajišťuje fungování nově rostoucích stonků, listů a generativních orgánů na úkor odumírajících částí. Degradace pletiv rostlin, obvykle hnědnutí spodních listů, je jistým příznakem nedostatku draslíku. Bez K v rostlinných strukturách je iontová rovnováha narušena, elektrické potenciály buněčných membrán jsou oslabeny a transport vody, iontů a četných metabolitů je dezorganizovaný (Prokošev 2005).

Koncentrace draslíku v rostlinách se pohybuje mezi 2-6 %. Nejvyšších hodnot dosahuje ve fázi kvetení a v období dozrávání dochází k jeho snížení v důsledku vylučování do živného prostředí. Na draslík mají největší nároky okopaniny, jeteloviny, luskoviny, olejníky, přádné rostliny a relativně nejmenší obiloviny. Draslík je základní makroživinou živých buněk a je nejhojnějším kationtem v cytosolu (Wang et al. 2018).

V rostlině je draslík velmi pohyblivý a transportuje se jak bazipetálně, tak akropetálně. Charakteristickým rysem pro  $K^+$  je vysoká schopnost průniku buněčnými membránami. Pro metabolismus buňky je důležitý  $K^+$  cytoplazmy, kde se nachází 100-200 mM draslíku. Ve vakuolách se nachází jako  $KNO_3$ ,  $KCl$  nebo  $K$ -malát, jeho obsah se mění od 10 do 200 mM nebo až 500 mM v buňkách stomat a plní zde osmotickou funkci. Hladina draslíku je v buňkách poměrně vysoká a obvykle se  $K^+$  vyplavuje ve stresových situacích pro rostliny (nízké teploty, sucho aj.). Draslík má vysokou reutilizační schopnost. Proto se příznaky nedostatku projeví na starších listech. K zasahuje do celé řady metabolických procesů. Významná je jeho účast v procesu fotosyntézy a dýchání, kde má dominantní postavení ve světelné fázi. U izolovaných chloroplastů zvýšený obsah  $K^+$  ve vnějším prostředí (kolem 100mM) zvýšil fixaci  $CO_2$  na trojnásobek (Prokošev 2005). Význam K pro fotosyntézu spočívá v tom, že vytváří v chloroplastech také potřebný optimální stav pro průběh enzymatických reakcí. Zvýšený obsah draslíku v listech na druhé straně snižuje respiraci  $CO_2$ . Právě vysoká respirace listů je typickým projevem deficiencie draslíku. Draslík dále pozitivně ovlivňuje metabolismus dusíku. Při jeho nedostatku stoupá obsah aminokyselin a amidů a omezuje se syntéza bílkovin. Rovněž stabilita bílkovin je při jeho nedostatku snížena a urychluje se jejich rozklad na jednodušší N-sloučeniny. Reguluje mechanismus otevírání a zavírání stomat. Za osvětlení se draslík hromadí ve svěracích buňkách průduchů a naopak za tmy ho ubývá. Transport  $K^+$  do svěracích buněk vede k otevření průduchů a zpětný transport k jejich uzavření (Richter 2007).

### 3.3.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku draslíku

#### a) Nedostatek draslíku

Typické symptomy nedostatku draslíku u zelenin podle Hlušek et al. (2002):

- rostliny mají světle zelené listy a opožďují růst,
- zhoršují se chuťové vlastnosti,
- nedostatek draslíku se promítá do potravního řetězce,
- drobné plody a jejich špatné vybarvení,
- snížená skladovatelnost.



Nedostatek draslíku snižuje syntézu organických látek a zvyšuje respiraci, čímž se omezuje energetický stav rostliny. Draslík zasahuje do tvorby cukru a do syntézy škrobu, což se projevuje při transportu a přeměnách vytvořených cukrů.

Při deficienci K je omezen transport cukrů z listů do bulev (cukrovka) a zvyšuje se obsah redukcujících cukrů, a tím je blokován citrátový cyklus (Richter 2004). Důsledkem toho je narušení syntézy sacharidů, tvorba tenčích buněčných stěn, řidších pletiv, a tím je snížena odolnost obilovin proti poléhání i ochrana proti parazitům. Při nedostatku  $K^+$  se zvyšuje aktivita polyfenoloxidáz a dochází k rychlejšímu tmavnutí brambor na řezných plochách při jejich zpracování, což negativně ovlivní kvalitu lupínků, kaše a hranolků.

Podle Vaňek et al. (2012) nedostatek draslíku se u rostlin může projevit i na stanovištích s jeho relativním dostatkem, jestliže jsou nepříznivé podmínky pro jeho příjem (sucho, chlad apod.). Většinou se mírný nedostatek K promítne do omezené tvorby vysokomolekulárních látek, jako jsou bílkoviny a sacharidy, přičemž se v rostlinách hromadí nízkomolekulární organické látky (aminokyseliny, amidy, jednoduché sacharidy apod.). Výraznější nedostatek K se projevuje zaschnutím okraje spodních listů, předčasným vadnutím nebo žloutnutím listů a nektrózou pletiv.

Kromě dlouhodobého nedostatku mohou kořeny rostlin vykazovat přechodný nedostatek draslíku kvůli prostorové heterogenitě a časovým odchylkám v dostupnosti této živiny. Hlavním zdrojem heterogenity půdy jsou často samotné kořeny rostlin, jejichž transportní aktivita  $K^+$  vytváří zóny se zvýšeným nebo sníženým obsahem živin (Ashley 2006).

Experimenty Koleboshina et al. (2016) ukázaly, že použití granulovaného chloridu draselného v technologii pěstování melounů umožňuje získat úrodu vysoce kvalitních, ekologicky bezpečných produktů. Nejvyšší kvalitativní ukazatele u melounů byly zjištěny při aplikaci pod porosty plného minerálního hnojiva (NPK) s dvojnásobnou dávkou granulovaného chloridu draselného.

Kamalov (2023) uvádí že cukety spotřebují velké množství draslíku. Sazenice by měly být hnojeny jakmile se objeví první listy. Draslík pomáhá plodům asimilovat oxid uhličitý a podílí se na syntéze bílkovin, což napomáhá tvorbě velkých květů a hustých stopek plodů. Cukety vyžadují měsíční přihnojování. Příznaky nedostatku draslíku u cuket:

- křehké listy a stonky
- pomalá tvorba plodů
- téměř žádná květenství
- zvadlé listy
- plody jsou velmi malé a pokryté žlutými skvrnami

### **Odstranění nedostatku draslíku**

Nejrychlejším způsobem, jak dodat rostlinám draslík, je za pomoci ve vodě rozpustného draselného hnojiva. Velké množství rychle dostupného draslíku obsahují především tzv. PK boostery, hnojivové směsi pro podporu kvetení, uhličitán draselný ( $KHCO_3$ ), síran draselný ( $K_2SO_4$ ), hydrogen fosforečnan ( $KH_2PO_4$ ), křemičitan draselný ( $K_2SiO_3$ ). Výborným zdrojem draslíku pro rostliny jsou výtažky z mořských řas a výluh z dřevného popela.

Podle výsledků biochemické analýzy vedlo použití minerálních hnojiv ke zvýšení obsahu dusičnanů v plodech, ale ve všech studovaných variantách pokusů byly získány plody vysoké kvality (Koleboshina et al. 2016).

## Rozdělení draselných hnojiv podle Vaněk et al. (2012)

Podle doprovodného aniontu rozlišujeme dva typy draselných hnojiv:

- chloridová (účinnou složkou je chlorid draselný (KCl). Patří sem draselné soli, Korn-Kali, Kamex. Převážná část K je dodávána v této skupině hnojiv)
- síranová (účinnou složkou je síran draselný (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)). Patří sem síran draselný a tzv. kalimagnezii - sírany horečnaté a draselné. Dodáme tak draslík, ale i síru. Jsou určena pro rostliny nesnášející chlor).

### b) Projevy nadbytku draslíku

Hlušek et al. (2002) a Vaněk et al. (2012) uvádějí že přehnojení zeleniny draslíkem vede k jeho takzvanému "luxusnímu příjmu" a může se projevit antagonistickými nebo synergickými účinky. Nadbytečné množství K brzdí příjem hořčíku, vápníku, zinku, manganu atd. a vyvolává symptomy jejich deficience. Přehnojení naopak podporuje příjem nitrátového dusíku a chlóru. Taký může vyvolávat zvýšenou náchylnost k poléhání a vyvrácení rostlin. Nadbytek K<sup>+</sup> iontů v živném prostředí brzdí příjem Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> aj. a v důsledku toho na rostlině se mohou projevit příznaky jejich nedostatku. Naopak zvyšuje se příjem Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aj. U některých rostlin zvýšený obsah draslíku v prostředí stimuluje tvorbu látek fytoestrogenní povahy (jetel, chmel, krmná kapusta, jílek vytrvalý aj.), které ovlivňují reprodukční procesy živočichů (Kolesnichenko, Kulibin 2004).

## 3.4. Vápník

### 3.4.1. Význam vápníku ve výživě plodové zeleniny

Vápník je nezbytnou součástí výživy plodové zeleniny. U rajčat, paprik, cuket a lilků dostatečný přísun Ca zabraňuje objevení černých skvrn na spodní straně plodů (Zahradnictví 2008). Vysoký obsah vápníku snižuje náchylnost rostlin k chorobám. Pomáhá udržovat pevnost buněčných stěn plodů, což snižuje jejich náchylnost k rozpadu pletiv. To je zvláště důležité u plodové zeleniny jako jsou rajčata, papriky nebo okurky, kde nedostatek vápníku může vést k měkkosti plodů a jejich snadnému rozpadu a následnému vstupu chorob. Vápník dále zvyšuje odolnost rostlin proti některým chorobám, zejména proti hnilobě plodů. Dostatečný přísun vápníku tak může snížit riziko chorob a pomoci udržet plody zdravé (Baier, Baierová 1985).

Pouze 15 % veškerého vápníku spotřebovaného rostlinou se dostane do plodů. Proto v plodech velmi snadno dochází k nedostatku vápníku, zejména v období rychlého růstu, což vede k různým fyziologickým poruchám, například k odumírání špiček plodů, které je u zeleniny často definováno jako vrcholová hniloba. Plody rostlin s nedostatkem vápníku jsou menší, nemají výraznou chuť, mohou se přestat vyvíjet na konci kvetení a špatně se skladují (Danica 2018).

### 3.4.2 Vápník v půdě

Celkový obsah vápníku vykazuje značné rozdíly a pohybuje se mezi 0,15-6 % i když střední obsah je odhadován na 2 %. Nejméně vápníku obsahují půdy písčité v humidnějších oblastech a nejvíce půdy karbonátové. Vápník je nepostradatelným prvkem, který působí významně na utváření a udržení příznivých fyzikálních, chemických a biologických vlastností půdy (Šetlík et al. 2004; Tei et al. 2017; Černý et al. 2021; Xiaohang et al. 2022). Má pozitivní vliv na sorpci a rozpustnost živin, na změnu půdní reakce (pH), kladně ovlivňuje strukturu půdy (pórovitost, průsak vody), omezuje rozpustnost těžkých kovů, neutralizuje některé škodlivé kyseliny, zvláště kyselinu šťavelovou (Bajerová 2020) a podporuje aktivitu mikroorganismů (Fertislab cz. 2022). Ca reguluje vodní rovnováhu, váže půdní kyseliny, zlepšuje rozpustnost mnoha sloučenin v půdě. Černý et al. (2021) uvádí že Ca podporuje vstřebávání důležitých živin rostlinami a ovlivňuje dostupnost řady makro- a mikroprvků pro rostliny. S rostoucím množstvím vápníku v půdě se zvyšuje přísun amonných a molybdenových iontů do rostliny, ale klesá pohyblivost manganu, zinku a boru.

Ve většině případů je vápník stejně důležitý jako dusík. Potřeba vápníku se zvyšuje od období kvetení a růstu až do sklizně. Pravidelné aplikace vápníku jsou proto nutné po celou sezónu (Express Agro Journal 2020). Přiměřený obsah Ca v půdním roztoku zaručuje dobrý průběh většiny biologických, chemických i fyzikálních procesů, včetně vytváření dobrých podmínek pro růst kořenů a zásobování rostlin Ca. Je také zárukou harmonického příjmu ostatních iontů kořeny rostlin (Vaněk et al. 2012). V půdě se vápník vyskytuje v různých sloučeninách, které s ohledem na jejich význam pro výživu rostlin rozdělujeme na:

#### a) Vápník nevýměnný

V této formě se nachází jako stavební složka krystalové mřížky některých těžce rozpustných horninotvorných nerostů. Jsou to především alumosilikáty vápenaté (anorthit), apatity a v malé míře i některé jílové minerály (montmorillonit). Vápník vázaný v krystalové mřížce je uvolňován jen velmi pomalu v průběhu zvětrávacích procesů a má tedy pro bezprostřední výživu rostlin malý význam. Do skupiny nevýměnného vápníku řadíme také velmi slabě rozpustné sloučeniny:  $\text{CaCO}_3$  - uhličitan vápenatý a  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  – uhličitan vápenato- hořečnatý neboli dolomit. Nevýměnným vápníkem rozumíme také vápník poutaný v půdě biologicky v tělech rostlin, živočichů a mikroorganismů (Richter 2007).

#### b) Výměnný vápník

Představuje v půdě asi 1-2 % vápníku nevýměnného, ale přitom jeho množství činí v sorpčně nasycených půdách 60-80 % všech výměnných kationtů. Výměnný vápník je poután hlavně fyzikálně chemicky na povrchu půdních koloidů, a to úměrně jejich sorpční kapacitě. Organické koloidy adsorbují relativně více  $\text{Ca}^{2+}$  než koloidy minerální, z nich jílové minerály typu 2:1 (montmorillonit) více než jílové minerály typu 1:1 (kaolinit). Ionty  $\text{Ca}^{2+}$  ve výměnné formě jsou pro rostliny lehce přístupné a zvláště významné pro tvorbu drobtovité struktury.

Z uvedeného vyplývá, že vápník v půdě není pouze důležitým biogenním elementem. Jeho působení v půdě je mnohostranné a proto značně složité. Podle způsobu, kterým jsou ionty  $\text{Ca}^{2+}$  v půdě vázány, projevuje se jejich vliv na průběh celé řady reakcí (Vaněk et al. 1997).

### **Příjem vápníku**

Jak popisují Atkinson et al. (1980) a Černý et al. (2021), vápník je přijímán ve formě  $\text{Ca}^{2+}$  aktivně kořeny pomocí elektrochemického gradientu přes biologické membrány. Příjem vápníku ovlivňují anionty, největší vliv má  $\text{NO}_3^-$ , pak  $\text{Cl}^-$  a nejmenší  $\text{SO}_4^{2-}$ . Naopak zvýšený obsah kationtů jeho příjem omezuje a působí v řadě  $\text{H}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{K}^+$  (Richter 2007). Rovněž vnější podmínky ovlivňují příjem tohoto prvku. Při nižší vlhkosti je přijímáno více Ca, zatímco při vyšší vlhkosti je jeho příjem nižší a převažuje příjem  $\text{K}^+$ . Online zdroj Fertislab.cz (2022) uvádí že rostliny přijímají vápník výhradním transportním systémem přes xylém, díky čemuž je vápník méně pohyblivým elementem uvnitř rostliny. Proto rostliny vyžadují jeho pravidelný přísun z vnějšího prostředí po celé vegetační období.

Množství vápníku v rostlině je ovlivněno zejména podmínkami stanoviště, druhem plodiny, stářím a jednotlivými orgány rostliny a kondicí transportního systému (Černý et al. 2021).

### **3.4.3 Vápník v rostlině**

Vápník přijímá rostlina během celého svého vývoje. Nároky na Ca neodpovídají vždy vztahu k půdní reakci. Například obiloviny potřebují málo, ale odlišují se v nárocích na pH - ječmen a pšenice nesnášejí nízké hodnoty pH, zatímco oves a žito jsou k nim tolerantní. Naopak bramborám, vličmu bobu a lupině se daří na kyselejších stanovištích, ale požadují velké množství vápníku. Nejvíce vápníku se nachází ve vegetativních orgánech. Hlízy brambor obsahují 7 % z celkového vápníku, zatímco v lodyze je až 93 %. Zrno kukuřice má 3,4 % a ostatní části 96,6 %. Mezi všemi živinami potřebnými pro růst a vývoj rostlin je vápník nezbytným prvkem. Na jedné straně hraje vápník důležitou roli v různých fyziologických funkcích rostlin, jako je regulace růstu a vývoje rostlin a reakce na různé biologické a abiotické stresy (Hochmal et al. 2015; Kudla et al. 2018; Černý et al. 2021). Na druhé straně je důležitou složkou buněčné stěny a membrán, čímž pomáhá udržovat normální strukturu a funkci buněk a snižuje nebo oddaluje poškození buněčné membrány (Hocking et al. 2016). Ca zároveň reguluje mitózu rostlinných buněk řízením prostorové a časové distribuce iontů vápníku nebo jejich receptorů (kalmodulin), což pozitivně koreluje se spotřebou organického uhlíku (Hepler 1994; Pan et al. 2022).

Podle Černý et al. (2021) více vápníku odčerpávají dvouděložné rostliny než jednoděložné. Jelikož vápník není významně translokován do semen, zůstává ve vedlejších produktech a po sklizni je většina vápníku zapravena zpět do půdy. Větší export vápníku z pozemku je pouze u plodin, kde odvážíme celou nadzemní biomasu (např. víceleté pícniny, silážní kukuřice). Přestože je vápník do semen ukládán málo, tvoří významnou složku některých zásobních organických látek (například fytinu).

Přibližně 90 % vápníku v rostlině se nachází v buněčných stěnách, kde je vazebným faktorem. Střední lamela je složena především z pektátů vápenatého a hořečnatého. Má dále význam pro

strukturu membrán a tvorbu vřeténka při mitose. Větší množství vápníku bývá uloženo ve vakuole ve formě solí: šřavelanu, uhličitanu, síranu nebo fosforečnanu (Šetlík et al. 2004). Ovlivňuje metabolismus sacharidů a bílkovin. Potřeba tohoto prvku se projevuje v raných obdobích růstu, protože je nezbytný pro stavbu rostliny (Černý et al. 2021). Nedostatek vápníku brzdí zpracování a vstřebávání rezervních živin (škrob, bílkoviny), které využívají sazenice, mladé listy a rostoucí výhonky.

Množství daného prvku v sušině se v rostlinách pohybuje v rozmezí 0,4-1,5 % v závislosti na druhu rostliny, orgánu a jeho stáří. Jeho obsah je však hlavně závislý na jeho hladině v půdním roztoku. Přijatý vápník je translokován xylémem (Šetlík et al. 2004; Černý et al. 2021). Transport je však velmi omezen, protože je značně adsorbován anionty. Vápník se účastní nepřímo řady enzymatických reakcí soustředěných v membránách a nejbližším okolí zejména jako významný přenašeč signálů ve spojení s kalmodulinem a dalšími bílkovinami poutajícími  $\text{Ca}^{2+}$ .

Vápník je prakticky nepohyblivý floémem, ve kterém je příliš mnoho vazebných míst, na kterých dochází snadno k jeho imobilizaci. Z tohoto důvodu nemůžeme u Ca hovořit o jeho reutilizaci. Proto rostliny vyžadují jeho pravidelný přísun z vnějšího prostředí po celé vegetační období (Richter 2007).

Vápník sehrává důležitou úlohu v metabolismu rostliny (Richter 2004):

- ovlivňuje semipermeabilitu buněčných membrán a stěn buněk. V membránách je vázán na negativní náboje (hlavně pektiny) a stabilizuje jejich strukturu, prostorové uspořádání, a tím i permeabilitu. Jde o funkci specifickou pro vápník, nenahraditelnou žádnými dvojmocnými kationty (Mn ani Sn).
- má konformační a stabilizační vliv na bílkovinu. Slučuje-li se s bílkovinami biokatalytického typu, může pozměnit její tvar a aktivitu, a zároveň ji chránit proti proteolytickým enzymům.
- je stavební látkou. Formou pektátu zpevňuje buněčné stěny. Podílí se na růstu buněk, které netvoří typickou celulózní stěnu (kořenové vlásky a pylové láčky), které bez Ca jinak vůbec nerostou.
- neutralizuje a váže některé organické kyseliny, zvláště kyselinu šřavelovou, což může mít detoxikační efekt. Tato funkce Ca bývá často považována za jednu z hlavních.
- významně ovlivňuje stabilitu a integritu pletiv, což má vliv na skladovatelnost plodů (jablka - pihovitost, rajčata, papriky)
- ovlivňuje aktivitu enzymů v rostlinách (invertázy, katalázy, nitrátoreduktázy aj.).

### 3.4.4 Projevy nedostatku nebo nadbytku vápníku u plodové zeleniny

#### a) Nedostatek vápníku

Nedostatek vápníku se velmi často vyskytuje u plodové zeleniny (rajčata, papriky, okurky). Nejznámější porucha zelenin je abiotická nekróza květního konce plodů rajčete. Za vlhkého počasí jsou nekrotické skvrny šedavé a mokré, někdy druhotně pokryté saprofytickými houbami, za sucha naopak zasychají, jsou vpadlé a téměř černé. Stejného původu je však i velmi častá abiotická nekróza květního konce plodů papriky. Někdy je nekrotizována celá špička plodu, jindy se na plodech vyskytují

okrouhlé skvrny. Ty jsou ale vždy na koncové (květní) části plodu a zásadně se nevyskytují na té polovině plodu, která je blíže ke stopce. U hlávkového salátu, zejména rychleného a u některých brukvovitých druhů zeleniny se deficiencie vápníku může projevit jako okrajová nekróza (spála) listů, která je v odborné zahraniční literatuře většinou označována anglickým termínem "tip burn". V těchto případech okraje listů hnědnou a zasychají. Růst nekrotizované části listů je zastaven, nepoškozené části oproti tomu v růstu pokračují. Tím postupně dochází k deformacím listů. Stejněho původu je hnědnutí a propadání středů růžic kvěťáku nebo abiotické hnědnutí poupat brokolice (Zahradnictví 2008).

U plodové zeleniny se nedostatek projevuje jako suchá hniloba konců plodů (hnědé měkké skvrny, zejména na konci plodů nebo na místech spojených s druhým plodem) (AgroBio Opava 2022). Chybějící množství Ca se především projevuje na kořenech; netvoří se kořenové vlásky, kořeny začínají zahnívat. Na kořenech se tvoří sliz a buňky se rozkládají, pletivo se přeměňuje na nestrukturní hmotu. Kořeny trpí nedostatkem tohoto prvku dříve než nadzemní orgány. Malé množství vápníku může vést k měkkosti plodů, jejich rozpadání nebo vadnutí listů. Další příznaky se objevují na mladých částech rostlin - zvláště listech. U mnoha druhů začínají okraje těsně za špičkami listů blednout. Vedle chlorózy je charakteristická zvláště chlorotická kropenatost mladších listů. Symptomy se prohlubují na mladších listech. Chlorózy vedou u některých rostlin (řepa, košťáloviny, tabák) k hákovitému zakřivení nerovinných čepelí. Jestliže listy neodumřou, tvoří se ve střední části čepele tmavé nekrózy. Chlorotickým a nekrotickým změnám předchází hnědnutí nervatury listů. Výrazněji se jeví poškození u stonků. Na hypokotylu se vyloučí kapka sekretu, hypokotyl se stává sklovitým a hnědne. Poškození se rozšiřuje dolů ke kořenům, pletivo hnědne, buňky se rozpadají, rostlina se na zaškrceném místě ohýbá. Výhony v paždí listů krmí a rostliny nabývají keřovitý vzhled. Reprodukční orgány jsou rovněž postiženy. Tvorba semen a plodů je silně bržděna, i když tvorba květů probíhá normálně. Pyl může být sterilní, semena jsou malá a zasychají (Richter 2004). I když se do půdy aplikují ve vodě rozpustná vápenatá hnojiva, není zaručeno, že plody dostanou tento prvek v potřebném množství, protože ionty vápníku nejsou reutilizovány, tj. neprecházejí z jedné části rostliny do druhé. Případně může být v půdě značné množství Ca, ale v důsledku nadměrných dávek dusíkatých nebo draselných hnojiv je ve formě, kterou rostliny nemohou asimilovat. Proto je pro rychlé řešení situace nutná listová aplikace rychle rozpustných vápenatých hnojiv, aby došlo k přímému vstřebávání prvku prostřednictvím listů (Danica 2018).

### **Odstranění nedostatku vápníku**

Základní preventivní ochranou proti všem uvedeným příznakům deficiencie vápníku je pravidelná a dostatečná závlaha. V průběhu celé vegetace by nikdy nemělo dojít k proschnutí kořenové soustavy. Nezbytná je též vyrovnaná výživa všemi důležitými živinami. Nikdy by nemělo docházet k přehnojování dusíkem; především na půdách bohatých na draslík je třeba i s touto živinou zacházet opatrně. Preventivně nebo při výskytu prvních příznaků je možné dodávat rostlinám vápník formou listové (foliární) aplikace (Danica 2018). Musí to však být vápník ve snadno přijatelné formě, kterou je především chlorid vápenatý, který se používá v koncentraci 0,5 %, nebo některým speciálním hnojivem, který tuto formu vápníku obsahuje (Zahradnictví 2008).

## Vápenaté hnojiva

Vaněk et al. (2012) uvádějí následující typy vápenatých hnojiv:

- oxidová (účinnou složkou je oxid vápenatý (CaO)). Patří sem pálené vápno (57-60 % Ca) a hydroxid vápenatý (Ca(OH)<sub>2</sub>)
- uhličitanová (účinnou složkou je CaCO<sub>3</sub>, případně směsi CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>)
- křemičitanová, kde je vápník vázán na kyselinu tetrahydrogenkřemičitou jako CaSiO<sub>4</sub>, a je součástí různých odpadních látek, hlavně strusek
- síranová - síran vápenatý, nepůsobí alkalizačně, je zdrojem Ca i S.

První tři skupiny hnojiv mají výrazný alkalizační vliv - využívají se k úpravě pH půd, zatímco síran vápenatý neovlivňuje pH půdy a používá se jako zdroj Ca a S, ale také jako hnojivo k odstraňování Na ze zasolených půd. Také další vápenaté sloučeniny mohou být zdrojem Ca pro rostliny. Je to ledek vápenatý a chlorid vápenatý (Kalkosan, Kalkosol), které se využívají i k mimokořenové aplikaci (Vaněk et al. 2012). Někdy postačí i postřik rostlin vhodně zředěnou rozpustnou frakcí ledku vápenatého (dusíkaté hnojivo s obsahem dusíku 15 %). Ten je určen k přihnojování všech plodin vyjma kyselomilných, rychle působí a snižuje kyselost půd. Tuto formu ledku však nesmíme zaměňovat s ledkem amonným s vápencem, který je v tomto směru neúčinný (Zahradnictví 2008).

### b) Projevy nadbytku vápníku

Vápník vytlačuje ze sorpčního komplexu železo a je pak nepřímou příčinou tzv. kalciové žloutenky (kalcioózy), ale omezuje i příjem hořčíku, fosforu a dalších živin rostlinami a současně nepříznivě ovlivňuje i růst rostlin nebo způsobuje nežádoucí urychlování rozkladu organických látek v půdě, včetně humusu, chlévského hnoje a zeleného hnojení.

Nadbytek Ca v půdě rostlinám v podstatě neškodí s výjimkou rostlin kalkofóbních. U některých rostlin podporuje nadbytek Ca srdéčkovou hnilobu (cukrovka), žloutnutí (réva vinná). Při přehnojení Ca je ovlivněn příjem jiných iontů (Fe, Mn, Zn) a narušuje se rovnováha živin.

Příliš vysoký obsah vápníku může také ovlivnit chuť a texturu ovoce a zeleniny. Může to vést k nežádoucím změnám v chuti a textuře (Danica 2018).

## 3.5. Hořčík

### 3.5.1. Význam hořčíku ve výživě plodové zeleniny

Hořčík má v plodové zelenině zásadní význam, neboť podporuje mnoho důležitých metabolických procesů. Jeho přítomnost pomáhá zajišťovat normální funkci chlorofylu, zajišťuje tvorbu energie při fotosyntéze. Hořčík také pomáhá zelenině zůstat zdravou tím, že omezuje riziko stresu z přehnojení dusíkem a pomáhá rostlině lépe absorbovat dusík, fosfor a železo z půdy. Daný

prvek je klíčový pro syntézu cukrů a proteinů. Jeho nedostatek může vést ke žloutnutí listů a oslabení rostlin, což má za následek menší plody, nižší výnos a horší chuť plodů.

Snížení obsahu chlorofylu kvůli nedostatečnému zásobování Mg v rostlinách vede ke klesnutí výnosů a šŕavnatosti plodů, zhoršení jejich textury a kvality. Při nedostatečném množství Mg zelenina více trpí škůdci a choroby.

Makroživina hořčík je pro rajčata nezbytná v době aktivního růstu plodů. Když na každé rostlině dozrávají plody spodního patra, je současně opylováno středního patra a aktivně se vyvíjí vegetační vrchol. Hořčík při tom hraje výraznou roli při tvorbě chlorofylu. Hořčík posiluje sazenice paprik. Pomáhá také vstřebávat fosfor a vápník. Fosfor pomáhá paprikám po přesazení rychleji se adaptovat na nové místo (Kamalov 2023).

### 3.5.2. Hořčík v půdě

Hořčík se v půdě vyskytuje ve velmi rozdílných koncentracích a v různých formách: rozpustné soli (síran, fosforečnan, chlorid i dusičnan), výměnný a nevýměnný hořčík nebo divaletní iont –  $Mg^{2+}$ . Celkový obsah hořčíku v půdě kolísá mezi 0,4 – 0,6 %, v půdách bohatých na dolomit ale může být až 10 % Mg (Vaněk et al. 2012). V půdě je hořčík přítomen ve formě různých minerálů (dolomit, vermikulit, illit, montmorillonit, chlorit aj.), ve výměnné formě v půdním sorpčním komplexu a v iontové formě v půdním roztoku. Kořeny rostlin mohou absorbovat rozpustný a výměnný hořčík, který musí přejít nejdříve do půdního roztoku.

Půdní roztok hořčíku obvykle obsahuje od 12 do 48 mg/l v půdách s promyvným režimem a od 48 do 195 mg/l v půdách s vyšší sorpční schopností (Voyevodina, Voyevodin 2015).

Typicky je hořčík transportován ke kořenům rostlin pomocí hmotnostního toku (tj. pohybem iontů směrem ke kořeni v konvekčním toku vody k povrchu kořene). Množství hořčíku, které se dostane ke kořenům rostlin průtokem je obvykle několik desítek krát větší než rychlost spotřeby Mg kořeny. V důsledku toho se hořčík může hromadit kolem kořenů rostlin (Richter 2004). V půdě se hořčík může vyskytovat ve třech základních skupinách: nevýměnný hořčík je přítomen v minerálech, primárních a sekundárních, kde tvoří stabilní nerozpustné sloučeniny, a dále v karbonátech ( $MgCO_3$  – anorganický dolomit). Z minerálů hořčík může být uvolněn procesem zvětrávání, ale také působením nízkých hodnot pH půdy (Richter 2007).

#### a) Nevýměnný hořčík

Nevýměnný hořčík je obsažen v nejrůznějších primárních a sekundárních minerálech. Z primárních minerálů je hořčík uvolňován velmi pozvolna jejich postupným zvětráváním. Z 90-95 % je hořčík obsažen v silikátech, alumosilikátech, pyroxénech, biotitu, serpentinu aj. Současně s rozkladem silikátů probíhá v půdě i proces opačný. Část hořčíku vázaného v dolomitu -  $CaMg(CO_3)_2$ , magnezitu -  $MgCO_3$  nebo  $Mg_3(PO_4)_2$  je možno, vzhledem k nízké rozpustnosti těchto sloučenin ve vodě, považovat rovněž za hořčík nevýměnný, i když snadněji zvětrává. Součástí nevýměnné formy je však také hořčík vázaný v pevných vysokomolekulárních organických látkách v půdě. Jeho množství není velké a představuje pouze několik kg/ha (Richter 2007).



## b) Výměnný hořčík

Výměnný hořčík tvoří nejvýznamnější část přijatelného Mg pro rostliny. Jeho podíl v sumě vázaných kationtů činí 10-15 % z celkově sorbovaných iontů a schopnost sorpce je vyšší než u K a nižší než u Ca. Hořčík má zaujímat 3x větší část v sorpčním komplexu než draslík a tento poměr by neměl klesnout pod 2 díly. Ve hmotnostním vyjádření (mg/kg zeminy) to odpovídá 1:1,1-1,6. Jeho množství ve výměnné formě představuje obvykle 5-10 % z celkového Mg (Richter 2007).

## c) Mg v rozpustné formě

V rozpustné formě se hořčík vyskytuje v různých solích, jako  $MgCl_2$ ,  $Mg(NO_3)_2$ ,  $Mg(HCO_3)_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $Mg(H_2PO_4)_2$  aj., tvořících součást půdního roztoku, z něhož může být ion  $Mg^{2+}$  rostlinami přijímán.

Může však také přecházet (obdobně jako K) do krystalové mřížky některých minerálů (montmorillonit) a stát se tak pro rostliny nepřijatelným. Přijatelnost hořčíku ovlivňuje také antagonistické působení jiných iontů ( $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  aj.) (Richter 2007).

## Příjem hořčíku

Hořčík je přijímán rostlinami jako kationt  $Mg^{2+}$  v menším množství než vápník. Na jeho přísunu ke kořenovému vlášení se podílí především tok půdního roztoku a v menší míře i růst kořenů. Hořčík je rostlinami přijímán pasivně. V příjmu  $Mg^{2+}$  existuje antagonistický vztah ke  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $H^+$ . Vzhledem k tomu, že draslík je v porovnání s ostatními kationty nejlépe přijímán (aktivní i pasivní transport) působí jeho nadbytek v živném prostředí negativně na příjem dalších kationtů, zvláště pak hořčíku (Richter 2007).

### 3.5.3. Hořčík v rostlině

Obsah Mg v rostlinách je v průměru 0,07 % jejich hmotnosti. Hořčík se přímo účastní fotosyntézy, dýchání, syntézy bílkovin a mnoha dalších fyziologických procesů. Pomáhá stabilizovat koloidní systémy, zvyšuje turgor buněk. Hořčík zasahuje do celé řady metabolických procesů v rostlině (Vaněk et al. 2012; Akanova et al. 2021). Velmi důležitá je jeho funkce v chlorofylu, kde je chelátově vázán v porfyrinovém jádře. Z celkového obsahu v rostlině je v chlorofylu vázáno 15-20 % Mg. Dokonce i v rostlinách deficitních na Mg není obsah Mg vázaného na chlorofyl větší než 30 % (Richter 2007).

Asi 10-15 % hořčíku obsaženého v rostlině je součástí chlorofylu, podíl hořčíku tvoří 2,7 % hmotnosti zeleného pigmentu. Funkce hořčíku v molekule chlorofylu jsou jedinečné a žádný jiný prvek jej nemůže nahradit, protože je nezbytný pro syntézu bezprostředního prekursoru chlorofylu - protoporfyrinu IX. Absorpce světla v červené oblasti spektra je dále spojena s přítomností hořčíku v molekule chlorofylu (Akanova et al. 2021).

Přísun Mg rostlinám přitom mohou výrazně ovlivnit konkurenční ionty jako draslík, amonný iont a mangan. Rostliny při zvýšené transpiraci zvyšují spotřebu hořčíku, proto je pro nejúplnější realizaci hořčíku důležitý dostatečný přísun hořčíku rostlinám v období největší spotřeby prvků

zajišťujících tvorbu úrody, jako je dusík, draslík, síra. Potřeba hořčnatých hnojiv je dána obsahem hořčíku dostupného rostlinám (Richter 2004).

Hořčík je vyžadován pro správné fungování glykolytických enzymů a Krebsův cyklus, pro RNA polymerázy a následně pro tvorbu RNA v jádře. Jak uvádí Akanova et al. (2021), při nedostatku hořčíku se v listech rostlin opožďuje tvorba chlorofylu, zvyšují se oxidační procesy, zpomaluje se fotosyntéza, ribozomy se rozpadají na podjednotky neschopné přeměňovat aminokyseliny na bílkoviny a v důsledku toho dochází k narušení růstu a vývoje rostlin. Protože se hořčík podílí nejen na syntéze sacharidů, ale zajišťuje také jejich transport do podzemní části rostliny, vede nedostatek hořčíku také k poruchám růstu kořenového systému (Šetlík et al. 2004).

### **3.5.4. Projevy nedostatku nebo nadbytku hořčíku u plodové zeleniny**

#### **a) Nedostatek Mg**

Vnější pozdním příznakem akutního nedostatku hořčíku je chloróza listů, která se projevuje především na starých listech. U obilovin způsobuje nedostatek hořčíku mramorování a pruhování listů, u dvouděložných rostlin žloutnou plochy mezi žilkami, poté žloutnoucí část listů hnědne a odumírá. Latentní nedostatek Mg je obtížně diagnostikovatelný, projevuje se hromaděním sacharidů ve spodních listech, jejich ztíženým odtokem do kořenového systému a již v této fázi může vést k omezení výnosu a zhoršení kvalitativních vlastností pěstovaných plodin (Akanova et al. 2021).

Nedostatečné množství hořčíku se většinou projevuje v latentní formě. Rostlina při omezeném příjmu Mg nejprve mobilizuje rezervy, především z organických látek, a teprve při výraznějším a dlouhodobějším deficitu Mg se objeví jeho zjevné příznaky. Dochází ke snížení tvorby chlorofylu a karotenoidů, které se při déle trvajícím nedostatku projeví vizuálními symptomy - chlorózami (Vaněk et al. 2012).

Nedostatek hořčíku se často vyskytuje v lehkých půdách s vysokou úrovní kyselosti. Čím nižší je pH půdy, tím akutnější je nedostatek hořčíku (Vaněk et al. 2012). Ze zeleninových plodin reagují na nedostatek hořčíku nesilněji rajčata a okurky, stejně jako brambory. Akutní nedostatek hořčíku způsobuje mramorování listů, pletiva mezi žilkami mohou získat různé barvy – žlutou, oranžovou, červenou, fialovou. Nakonec dojde k odumírání celých rostlinných orgánů. Nedostatek hořčíku u lilku se projevuje žloutnutím a opadáním spodních listů. Objevují se skvrny nebo až i nekrotické otvory na listech a stoncích (Kamalov 2023).

Při nedostatku hořčíku v půdě jsou listy okurek křehké a vypadají spáleně. Na spodních listech se objevují světle zelené nebo nažloutlé skvrny. Postupně se žluté skvrny začnou spojovat a list zcela zežloutne, listové lamely zaschnou a odumřou. Při vážném nedostatku hořčíku mohou špičky listů získat červenofialovou barvu a samotné listy se ohýbají nahoru nebo naopak dolů a připomínají kalich. Stonky jsou krátké, tenké a tuhé. Výhonky jsou bledé a špatně se vyvíjejí - vypadají spáleně. Po nějaké době se zpomalí proces fotosyntézy, takže rostliny přestanou hromadit nejen hořčík, ale i další užitečné prvky. Nedostatkem Mg trpí také květy. Nové květy se prakticky neobjevují, poupata opadávají spolu s listy. Plodnost se snižuje, okurky jsou malé, ztrácejí chuť a je jich velmi málo. Pokud je v okurkách nedostatek hořčíku, vitamíny a užitečné látky se přestanou hromadit, takže je důležité

včas přijmout všechna potřebná opatření, jinak bude sklizeň malá se sníženou nutriční hodnotou (Maria 2022).

### **Odstranění nedostatku hořčíku**

Důležitým předpokladem omezení výskytu poruch z nedostatku Mg je úprava půdních podmínek. Jedná se především o vápnění kyselých půd. K vápnění je třeba upřednostňovat vápenatá hnojiva s obsahem Mg, jako jsou dolomity, dolomitické vápence případně strusky (Vaněk et al. 2012).

Další variantou je přidání horečnatých hnojiv. Podle Vaněk et al. (2012) rozlišujeme tyto typy horečnatých hnojiv:

- síran hořečnatý ( $MgSO_4$ ) je dodáván v hnojivech Kieserit a hořká sůl, jedná se o hnojiva obsahující hořčík dobře rozpustný ve vodě, lepší rozpustnost vykazuje hořká sůl,
- uhličitan hořečnatý ( $MgCO_3$ ) - je součástí dolomitů, dolomitických vápenců a magnezitu, tedy hnojiv s pozvolným uvolňováním Mg a Ca, sloužících hlavně k úpravě pH půd, která jsou též významným zdrojem Mg.
- ostatní sloučeniny jsou již méně významnými zdroji Mg:
  - dusičnan hořečnatý ( $Mg(NO_3)_2$ ) je součástí některých speciálních hnojiv, např. Mg-Nsol, Magnitra apod.
  - oxid hořečnatý ( $MgO$ ) je součástí některých odpadních látek (magnezitové závody),
  - chlorid hořečnatý ( $MgCl_2$ ), většinou jako příměs hnojiv, hlavně draselných.

Hořká sůl je nejvhodnější rychle působící a bezzbytku rozpustné hnojivo, které odstraňuje nedostatek hořčíku - důležitá zejména u všech zahradních plodin, tj. zeleniny, ovoce i okrasných rostlin.

### **b) Nadbytek hořčíku**

Nadbytek hořčíku v ČR v přirozených podmínkách v podstatě nevyskytuje. Používá se velmi omezené množství horečnatých hnojiv, přísun Mg organickými hnojivy taky není vysoký (Vaněk et al. 2012).

## **3.6. Síra**

### **3.6.1. Význam síry ve výživě plodové zeleniny**

Vysoce kvalitní rostlinné produkty je možné získat pouze tehdy, pokud jsou splněny potřeby rostlin pro všechny živiny. Síra se v posledních letech stala jedním z limitujících prvků. Její nedostatek

je spojen s přechodem na bezbalastní minerální hnojiva s omezením používání organických hnojiv. Nedostatek síry je způsoben i poklesem jejího přísunu z atmosféry. Odběr síry zemědělskými plodinami je 10-30 kg/ha. Jeho ztráty jsou značné v důsledku vymývání atmosférickými srážkami (Elkina 2010).

Síra je pro rostliny jedním z nejdůležitějších prvků minerální výživy, bez které je jejich život nemožný (Kulhánek et al. 2001). Stejně jako dusík je součástí všech rostlinných bílkovin, je nezbytnou součástí řady aminokyselin – cysteinu, cystinu, methioninu, dále prostřednictvím různých silic přispívá k lepší chuti, vůni a textuře plodů. Síra je jednou ze složek vitamínů, enzymů atd. Kromě toho hraje důležitou roli v životních procesech, aktivaci enzymů, syntéze proteinů a syntéze chlorofylu. Podílí se také na asimilaci dusičnanů rostlinami a zpomaluje jejich hromadění v hlízách brambor a dalších plodinách. Síra je důležitou živinou pro všechny aspekty tvorby výnosu rajčat. Síra by se měla aplikovat po celou sezónu (Express Agro Journal 2020).

Zemědělské plodiny obsahují různé množství síry v sušině a podle toho i různé potřeby tohoto prvku. To je způsobeno jak biologickými vlastnostmi různých druhů rostlin, tak fázemi jejich vývoje, obsahem síry v půdě a v atmosférickém vzduchu. Odběr síry mnoha kulturními rostlinami je jen o něco menší než u fosforu a u brukvovitých ho dokonce převyšuje. Nejvíce síry absorbují rostliny z čeledi brukvovitých (zelí), zejména různé druhy zelí, řepka, dále z čeledi liliovitých (cibule, česnek), laskavcovitých (různé druhy řepy), hvězdlicovitých (slunečnice), luštěnin (vojtěška, jetel, hrách, sója), lilkovitých (brambory, rajče) a miříkovitých (kopr) (Express Agro Journal 2020).

### 3.6.2. Síra v půdě

Množství síry v půdách zemědělských oblastí se velmi liší. Podle Morche (2008) se pohybuje od 0,1 do 0,01 %. Zelený a Zelena (1996) zaznamenali, že celkové množství síry se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,05 %. Průměrné množství síry v půdě podle Havlin et al. (2016) je přibližně 0,05 %. Matula (2007) zjistil, že obsah síry v půdě se často pohyboval od 85 do 250 mg S/kg. Vaněk et al. (2012) uvádí, že tato hodnota se typicky pohybuje mezi 50 a 500 mg S/kg půdy. Jak uvádí Schoenau a Germida (1992), oxidaci elementární síry na síran provádějí především mikroorganismy. Mikrobiální aktivita a rychlost oxidace elementární síry jsou ovlivněny prostředím, charakteristikami půdy a používáním hnojiv, která pomáhají rozptylovat částice elementární síry z granulovaných sírných hnojiv (Khan et al. 2008). Síranové ionty se každoročně ukládají v půdách prostřednictvím srážek. Množství atmosférické depozice se však v poslední době snížilo (Franzen a Grant 2008). V sušších oblastech obsahují některé půdy významné síranové soli, zejména sádrovec, síran hořečnatý a síran sodný. Ve vlhčích oblastech pochází významný sulfát z mineralizace organické hmoty a zbytků v kombinaci s mikrobiální oxidací sulfidových vazeb na síranové ionty (Franzen 2018).

Hlavním zdrojem organické síry v půdě jsou převážně kořeny rostlin, zbytky po sklizni a organická hnojiva, avšak i minerální hnojiva mohou dodávat do půdy významné množství síry (Vaněk et al. 2012). Důležité jsou i sírové sloučeniny ve formě oxidů síry, které se do půdy dostávají z atmosféry díky vlhké nebo suché depozici, zejména v oblastech s intenzivní průmyslovou činností. Tato síra je následně absorbována kořeny rostlin nebo listy. Mezi abiotické zdroje oxidů síry patří například elektrárny, teplárny a další průmyslová zařízení, které při spalování paliv, zejména hnědého uhlí, oxidují síru vázanou v pyritu ( $\text{FeS}_2$ ) na oxid siřičitý  $\text{SO}_2$  (Eriksen et al. 1998).

## a) Anorganická S

Anorganická S je obecně mnohem méně hojná ve většině zemědělských půd než organicky vázaná S (Bohn et al. 1986; Edwards 1998). Síran je nejběžnější formou anorganické síry a lze jej rozdělit na  $\text{SO}_4^{2-}$  v půdním roztoku, adsorbovaný  $\text{SO}_4^{2-}$  a okludovanou síru (Barber 1995). Síra se může vysrážet ve formě  $\text{SO}_4^{2-}$  jako síran vápenatý, hořečnatý nebo sodný.  $\text{SO}_4^{2-}$  se také vyskytuje jako kokrytalizovaná nebo koprecipitovaná nečistota s  $\text{CaCO}_3$  a je důležitou složkou celkového obsahu S ve vápenatých půdách.

Anorganické sloučeniny síry představují 10-60 % celkového obsahu síry v půdě (Bohn et al. 2002; Scheffer, Schachtschabel 2010; Zelený, Zelená 1996; Eriksen et al. 1998).

V aerobních půdách jsou převažující formou stabilní sírany, zatímco nižší oxidační stavy tvoří jen malou část (Bohn et al. 1986). V suchých oblastech se mohou v půdě hromadit soli jako  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Mengel et al. 2001). Koncentrace síranů v půdě se mění během roku v závislosti na atmosférických srážkách, mineralizaci organických zbytků, dodávkách hnojiv, vyplavení, příjmu rostlinami a mikrobiální aktivitě (Edwards 1998).

Retence síranů v půdě závisí na koloidním systému, pH, koncentraci sulfátů a ostatních iontech v půdním roztoku (Eriksen et al. 1998). Adsorpce síranů probíhá na hydratovaných oxidech železa a hliníku a na povrchu jílových částic (Chao et al. 1962; Parfitt 1978). Elektrostatické mechanismy hrají hlavní roli v adsorpci síranů (Marsch et al. cit. Eriksen et al. 1998), ale podílí se i chemická sorpce substitucí  $\text{OH}^-$  a  $\text{H}_2\text{O}$  (Rajan cit. Bohn et al. 1986). Množství adsorbovaných síranů závisí na povrchové ploše jílových minerálů a náboji povrchu, kde vyšší obsah hliníku zvyšuje adsorpci aniontů (Bohn et al. 1986).

Adsorbované sírany jsou důležité zejména v kyselých půdách (Nodvin et al. 1988), kde jejich podíl roste s klesajícím pH a dosahuje vrcholu při  $\text{pH} = 4$ . Při nižších hodnotách pH je síran vázán s hydratovanými oxidy hliníku (např. jurbanit:  $\text{AlOHSO}_4$ ) a při  $\text{pH} < 4$  je adsorbován hlavně do hydratovaných oxidů železa (např. jarosit:  $[\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2]$ ). Tyto sloučeniny mají význam zejména v extrémně kyselých půdách pod lesní vegetací nebo v rašelinných půdách (Scheffer a Schachtschabel 1992) a v hlubších horizontech půdního profilu (Matula 2007). Většina zemědělských půd má obvykle vyšší hodnoty pH, což zvyšuje dostupnost síranů. Toto potvrzují i studie Curtin a Syers (1990), které ukazují, že v půdách s  $\text{pH} > 6$  se všechny sírany nacházejí v půdním roztoku. Vápnění půdy zvyšuje vyplavení síry (Bolan et al. 2003) a zvyšuje mineralizaci. Adsorpce síranů je také ovlivněna přítomností ostatních aniontů, přičemž jejich síla adsorpce v půdě je řazena následovně:  $\text{OH}^- > (\text{PO}_4)_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- = \text{Cl}^-$  (Tisdale et al. 1993). Jak uvádí Eriksen (1998) adsorbované sírany mají malý přímý význam pro výživu rostlin, ale mohou hrát klíčovou roli v celkové bilanci S v agroekosystému. V anaerobních podmínkách se síra v půdě nachází převážně ve formě sulfidů, při přechodu k aerobním podmínkám dochází k oxidaci, což může vést k tvorbě elementární síry a kyseliny sírové, snižující pH půdy až na extrémní hodnoty (Scheffer, Schachtschabel 1992).

## b) Organická síra

Podle McCarthy et al. (1998) může být až 98 % celkové půdní síry přítomno jako organické sloučeniny S a dle Freney (1986) je spojeno s heterogenní směsí rostlinných zbytků, živočichů a půdních mikroorganismů. Obvykle je organická síra spojena s obsahem organické hmoty v půdě, ale

výjimkou mohou být půdy s vysokou salinitou, vápencovým podkladem nebo nadměrnou vlhkostí, kde se může zvýšit podíl anorganických forem síry (Schoenau, Germida 1992). Celkový podíl organické síry se obvykle udává v rozmezí 40-90 % (Fecenko, Ložek 2000).

Stevenson a Cole (1986) zkoumali vztah mezi uhlíkem, dusíkem a sírou v organické hmotě půdy a pro zemědělské půdy uvádí průměrný poměr C:N:S kolem 107:7,7:1, podobně jako Freney (1986) s poměrem 100:7,7:1. Studie také ukazují těsnější vztah mezi dusíkem a sírou než mezi uhlíkem a sírou (Tabatabai, Bremner 1972), avšak odchylky mezi různými typy půd jsou značné, a tyto vztahy se liší mezi různými organickými frakcemi v půdě (Bettany et al. 1979). Organická síra v půdě se nachází v různých sloučeninách jako jsou sírny aminokyseliny, methionin, cystein, cholinsulfát, sulfolipidy, sulfonové kyseliny a sulfátované polysacharidy (Freney 1986). Pro analýzu organické síry v půdě se tradičně využívá reakce s redukčními činidly (Tabatabai 1982).

Podle Stevenson a Cole (1986) se 30-60 % organické síry v půdě skládá ze sírnych sloučenin redukovatelných kyselinou jodovodíkovou, a jejich dominantní podíl, sulfátové estery, jsou popsány například ve studii Fitzgerald a Strickland (1982). Síra v mikrobiální biomase hraje také důležitou roli v přeměnách půdní organické hmoty (Edwards 1998). Její podíl na celkové organické síře v zemědělských půdách se pohybuje v rozmezí 0,9-2,6 %, což odpovídá údajům ostatních autorů uvádějících 1-4 % (Saggar et al. 1981; Freney 1986). Výzkumy Wu et al. (1995) naznačují, že při imobilizaci mikrobiální biomasy je síra přeměňována přímo na půdní organickou hmotu a je tak pro rostliny nedostupná, dokud není remineralizována. Část půdní organické síry (0,5-1,5 %) může také přecházet do půdního roztoku, kde tvoří 15-40 % celkové síry (Nguyen, Goh 1992).

## Transformace síry

Veškerá síra v půdě prochází různými transformacemi, které jsou hlavně dílem mikrobiálních procesů. Tyto procesy, jako je rozklad organické síry na jednodušší formy, oxidace a redukce, jsou ovlivněny faktory jako teplota, vlhkost, pH půdy a dostupnost organických látek. Fotosyntetizující a chemolitotrofní bakterie jsou zodpovědné za oxidaci  $H_2S$  a elementární síry v půdě, což je známé jako sulfurikace. Existují různé druhy těchto bakterií, které provádějí tyto procesy, jako *Thiobacillus* v běžných půdách a *Beggiatoa*, *Thiotrix*, *Thiospirillum* a *Thiophysa* v zamokřených půdách. Dalšími bakteriemi jsou *Desulfovibrio*, které se podílejí na procesech produkujících  $H_2S$  (Narayan et al. 2023).

V zemědělských půdách je důležité uvolňování anorganických síranů z organické hmoty, které jsou potřebné pro rostliny. Konceptní model koloběhu organického uhlíku, dusíku, síry a fosforu přes půdní organickou hmotu, navržený dle McGill a Cole (1981), zahrnuje dva typy mineralizace síry: biologickou a biochemickou. Biologická mineralizace je řízena mikrobiální potřebou organického uhlíku pro získání energie, kde síra uvolněná jako síran je vedlejším produktem oxidace uhlíku na  $CO_2$ . Na druhou stranu, biochemická mineralizace zahrnuje uvolňování síry ze sulfátových esterů katalyzovaných extracelulárními enzymy. Mineralizace síry vázané na uhlík je přímo závislá na mikrobiální aktivitě, zatímco sulfátové estery mohou být rychle hydrolyzovány enzymy v půdě.

To znamená, že biochemická mineralizace je spíše regulována dostupností síry než potřebou energie. Minerální síra, která se uvolňuje z organických forem v půdě, činí podle výzkumů Eriksen et al. (1994) ročně zhruba 1,7-3,1 % organické síry. Toto rozmezí se shoduje s jinými studiemi, které uvádějí rozmezí 0,5-3,0 % (Freney 1986; Kerr et al. 2003). Eriksen et al. (1995) zjistil, že čistá mineralizace je hlavně ovlivněna mikrobiální aktivitou, systémem obhospodařování půdy a typem půdy. Důležitým je i proces imobilizace, při němž může být síra rychle opětovně vstřebána do

organických forem. Tyto procesy jsou znovu závislé na mikrobiální aktivitě a druhu dostupného substrátu. Imobilizace síry je pozitivně spojena s poměrem C:S v substrátu. Přidání organických uhlíkatých látek s obsahem síry nižším než 0,13 % výrazně zvyšuje přeměnu síranů na organické sloučeniny. Zaorávání slámy z obilovin, která má široký poměr C:S, může tedy během krátké doby zvýšit imobilizaci síry a omezit její dostupnost pro rostliny (Wu et al. 1995; Eriksen 1997; Tlustoš et al. 2002).

### **Příjem síry**

Rostliny přijímají síru z půdy pouze jako síranový aniont ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), který je v rostlině redukován a primárním produktem asimilace je cystein. Rostlina nemůže přijímat S přímo z kořenů. Pouze s pomocí hub a bakterií, které se jí živí (Tyshkevich 2020). Aminokyselina cystein je zdrojem síry pro tvorbu druhé sirné aminokyseliny methioninu, dále bílkovin a většiny dalších sirných sloučenin v rostlinách. Síru obsahuje např. thiamin (vitamin B1), který je syntetizován pouze v rostlinách, nikoli v živočišném či lidském organismu. Rostliny produkují také vitamín biotin a celou řadu sirných metabolitů. Důležitou látkou je např. glutathion, který je významným antioxidantem u rostlin, zvířat, hub a některých bakterií a zabraňuje poškození buněk volnými radikály. Mezi další sekundární metabolity patří glukosinoláty u brukvovitých plodin (řepka, hořčice, zelí, brokolice, křen a další) a alliiny u cibulové zeleniny (česnek, cibule, pór). Tyto sekundární metabolity jsou součástí mechanismu ochrany rostlin proti chorobám a škůdcům a mohou působit i na zmírnění některých onemocnění u lidí (Tyshkevich 2020).

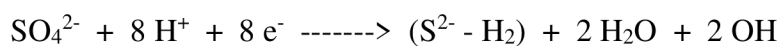
Příjem sulfátů není výrazně citlivý na pH prostředí; hrách přijímá nejvíce síry při pH 6,5, u jiných rostlin (ječmen) při pH 4. Příjem sulfátů je výrazně ovlivněn přítomností aniontů v půdním roztoku. Zatímco nitráty působí stimulačně na její příjem, anionty chloridové, fosfátové a selenátové působí inhibičně.

Příjem sulfátu závisí na iontové síle půdního roztoku. Při různých koncentracích sulfátu má příjem síry vícefázový charakter. Přenos sulfátu přes membránu z kořenevé buňky do protoplastu provádí specifická permeáza lokalizovaná v cytoplazmatické membráně nebo na jejím povrchu. Transportem na místa intenzivního metabolismu a utilizací se sulfátové ionty odčerpávají z vazebných míst do buňky, a tím je indukován příjem dalších sulfátů. Příjem síry kořeny rostlin je pod kontrolou endogenní hladiny síry včetně meziprojektu jejího využití.

### **3.6.3. Síra v rostlině**

Elementární složení zemědělských plodin kolísá v dosti širokých rozmezích v závislosti na plodině, zásobě půdních živin, úrovni aplikace hnojiv, povětrnostních podmínkách, agrotechnice atd. V řadě biofility, určené podílem chemických prvků ve stavbě živých látek je síra běžněna sedmém místě (Lukin, Zhuikov 2019). Síra je složkou několika sloučenin, jako jsou aminokyseliny (cystein a methionin), vitamíny (thiamin a biotin), koenzymy, thioredoxinový systém, glutathion, kyseliny lipové a glukosinoláty, které se přímo nebo nepřímo podílejí na zmírňování nežádoucích účinků různých typů biotických a abiotických stresů (Narayan et al. 2023).

Přijaté sírany musí být před utilizací redukovány a teprve potom mohou být zabudovány do organických látek. U vyšších rostlin je prvním stupněm při inkorporaci síry reakce  $\text{H}_2\text{SO}_4$  s ATP (Schoenau, Germida 1992). Sulfurylová skupina  $\text{H}_2\text{SO}_4$  nahrazuje pyrofosforylovou skupinu, takže vznikne adenosinfosulfát a pyrofosfát. Reakce je katalyzována enzymem ATP-sulfuryláza. Reakce síranu tedy vyžaduje energii ve formě ATP. Redukční proces závisí opět na fotosyntéze a energetickém metabolismu rostliny. Místem redukce jsou pravděpodobně mitochondrie. Redukce síranu vyvolává alkalický efekt, který lze vysvětlit rovnicí:



Redukce síranu probíhá u celé řady organismů včetně vyšších rostlin, řas, hub, sinic, bakterií. Metabolismus živočichů je závislý na příjmu redukované síry od rostlin. 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. Další významná funkce skupin SH je jejich účast v enzymatických reakcích (Richter 2007).

Nedostatek síry zůstává často nepovšimnut, protože má podobné příznaky jako nedostatek dusíku. Při nedostatku síry dochází ke zhoršení využití dusíku rostlinou. Obvykle každý kilogram síry umožňuje rostlinám plně asimilovat 10 kilogramů dusíku pro růst a tvorbu výnosu. Síra také přímo reguluje tvorbu chlorofylu a syntézu tuků. Síra vlastně spouští většinu biochemických procesů v rostlině. Posiluje imunitu rostliny - to je důležité zejména ve stresových podmínkách pěstování. V půdě síra usnadňuje převod fosforu, draslíku, vápníku, hořčíku a železa do forem dostupných pro rostliny, čímž zvyšuje účinnost hnojiv obsahujících tyto prvky (Tyshkevich 2020).

### 3.6.4 Projevy nedostatku nebo nadbytku síry u plodové zeleniny

#### a) Nedostatek síry

Elementární síra, i když je ve složení s bentonitem, nezmírňuje nedostatek síry tak dobře jako přísady obsahující sírany (Franzen 2008). Nedostatek síry vede k tomu, že rostlina špatně asimiluje dusík. A dokonce i na polích hnojených dusíkatými hnojivy se při nedostatku síry jednoduše vyplavuje do půdy a zasoluje ji. Tím trpí i životní prostředí (Tyshkevich 2020).

Síra je nezbytná pro mnoho růstových funkcí v rostlinách včetně metabolismu dusíku, aktivity enzymů a syntézy proteinů a olejů (Castellano, Dick 1990). Nedostatek síry se projevuje žloutnutím od nejmladších listů.

Podle Ryant (2020) je nedostatek síry limitující také pro kvalitu produkce. Kromě rapidního snížení množství síry z atmosférických depozic ovlivňuje negativně dostupnost síry pro pěstované plodiny také nižší používání hnojiv, v nichž byla síra doprovodnou živinou (např. jednoduchý superfosfát, síran draselný, hnojiva s mikroelementy v síranové podobě).

Jedním z důsledků nedostatku síry je horší chuť a vůně plodů zeleniny. Síra je zásadní pro tvorbu aromatických látek a dalších chemických sloučenin, které přispívají k chuti a vůni plodů. Nedostatek síry může vést k tomu, že zelenina nebude mít tak standartní chuť a aroma.



Nedostatek síry také může zvýšit náchylnost rostlin k chorobám a škůdcům. Síra má přirozené fungicidní vlastnosti a pomáhá rostlinám bojovat proti chorobám. Nedostatek síry má za následek špatnou kvalitu a výnos plodin. Mírný nedostatek síry může mít zanedbatelný vliv na výnos, ale má významný dopad na kvalitu. V půdě s nízkým obsahem síry se tak syntetizují zásobní bílkoviny chudé nebo s nízkým obsahem síry, jako je omega-gliadin a vysokomolekulární podjednotky gluteninu na úkor bílkovin bohatých na síru například u pšenice (Narayan et al. 2023).

Pokud jsou horní listy rajčat malé a stonky a řapíky listů fialové, zatímco nejspodnější listy žloutnou, znamená to, že rajčatům chybí síra. Příznaky nedostatku síry se projevují fialovým zbarvením stonků a listových řapíků a to je hlavní rozdíl od příznaků nedostatku fosforu, kdy se do fialova zbarvují samotné listy (Tyshkevich 2020).

Nedostatek síry u okurek vede ke zhoršenému kvetení - květy se tvoří v malém množství a často opadávají. Také plody rostou špatně, nevyvíjejí se, žloutnou a hnijí. Plody jsou malé, ztrácejí chuť a jejich trvanlivost se výrazně snižuje. Rostliny s nedostatkem síry se špatně vyvíjejí a prakticky přestávají růst. Stonky jsou nápadně tužší, špatně rostou a řídnou. Nedostatek prvku ovlivňuje stav všech částí rostliny, včetně kořenového systému. A v důsledku nedostatečně vyvinutých kořenů rostlina nedostatečně přijímá další živiny z půdy (Maria 2022).

### **Odstranění nedostatku síry**

Při projevech nedostatku síry je možné přidat síru v anorganické formě pomocí hnojiv obsahujících hořčík jako síran hořečnatý (při hydroponickém pěstování). Jako organická hnojiva lze použít komposty nebo hnojiva živočišného původu (Lukin, Zhuikov 2019).

### **b) Nadbytek síry**

Poškození rostlin vlivem přebytku  $\text{SO}_4^{2-}$  v podmínkách ČR nebylo pozorováno. Časté však bylo poškození rostlin vlivem zvýšené koncentrace atmosférického  $\text{SO}_2$ , které se projevuje od lehkých skvrn na špičkách listů až po úplné vyblednutí listů; celý list postupně odumírá.

Toxické působení vysokého obsahu  $\text{SO}_2$  v ovzduší je tak třeba rovněž brát v úvahu při pěstování plodin.

## 4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo formou literární rešerše shrnout dostupné aktuální poznatky o výživě plodové zeleniny makroprvky. Práce je zaměřena na zhodnocení vlivu každého prvku na rostliny, analýzu odpovědi konkrétních druhů plodové zeleniny na nadbytek nebo nedostatek makroprvků. Nejpodstatnější zjištěné informace jsou ve stručnosti následující:

- Dusík lze považovat za nejvýznamnější prvek z výnosotvorného hlediska. Plodová zelenina je na dusík velmi citlivá ze dvou úhlů pohledu, a to jak z hlediska nedostatečného hnojení, tak i přehnojení.
- Fosfor se jako prvek zodpovědný především za energetické reakce podílí na řízení veškerých procesů v rostlině. Posupně se stává strategickým prvkem ve výživě všech rostlin z důvodu omezených zdrojů minerálních hnojiv. K jeho mobilizaci z hůře přístupných forem lze využít biostimulanty, např. *Bacillus Megaterium*
- Draslík se podílí na stabilitě pletiv plodů a na vodním režimu. Nedostatek draslíku zásadně zhoršuje skladovatelnost plodové zeleniny a vede k vyššímu riziku vstupu chorob. Výsledky některých studií ukazují, že je k plodové zelenině možno použít i granulovanou formu chloridu draselného
- Nedostatek vápníku je u plodové zeleniny obzvláště problematický, neboť způsobuje porušení pletiv na špičkách plodů, kam se sekundárně dostávají choroby. Příčinou nedostatku Ca jsou nejčastěji nevyrovnané poměry živin v půdě. Proto je efektivním řešením mimokořenová výživa.
- Hořčík je u plodové zeleniny možno chápat i jako prvek podílející se na kvalitě z nutričního hlediska. Při současném nedostatku Mg v potravním řetězci je možné prostřednictvím hnojení zvýšit obsah Mg v plodech.
- Síra je důležitým prvkem s ohledem nejen na výživu rostlin, ale působí příznivě rovněž proti chorobám a některým škůdcům. Z kvalitativního hlediska se podílí také na tvorbě různých silic působících pozitivně na chuť plodové zeleniny i na zdraví člověka

Předložená práce přehledně shrnuje a ukazuje význam makroprvků ve výživě nejen plodové zeleniny. Potvrzuje se mnohokrát ověřený fakt, že pouze dostatečná a vyrovnaná výživa může vést k dostatečné produkci kvalitní plodové zeleniny.

## 5 Literatura

AgroBio Opava (2022). Nedostatek vápníku a železa. Available from: <https://agrobio.cz/poradna/clanek/251> (accessed 01.03.2023)

Akanova N.I., Kozlova A.V., Mukhina M.T. (2021). Magnesium role in plant nutrition system. D.N. Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Moscow, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-magniia-v-sisteme-pitaniya-rastenyi/viewer> (accessed 20.04.2024)

Akimova A.S. (2023). Circularization of phosphorus compounds in soil / A.S. Akimova // International Research Journal, №8 (134). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.38> (accessed 25.04.2024).

Amirov B.M., Kulymbet K.K., Seitmenbetova A.T., Kurmanakyn O.S. (2023). The use of nitrogen, phosphorus and potassium by melon plants when fertilizing on irrigated saline gray soil in southern Kazakhstan. Soil science and agrochemistry. (3):36-53. DOI: [https://doi.org/10.51886/1999-740X\\_2023\\_3\\_36](https://doi.org/10.51886/1999-740X_2023_3_36) (accessed 25.04.2024).

Ashley M. K., Grant M, Grabov A. (2006). Journal of Experimental Botany 57(2):425–436. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erj034> (accessed 25.04.2024).

Atkinson D., Jackson J. E., Sharples R. O. (1980). Mineral nutrition of fruit trees: Studies in the agricultural and food sciences. Elsevier Butterworth Heinemann, London.

Baier J., Baierová V. (1985). Abeceda výživy rostlin a hnojení. Státní zemědělské nakladatelství.

Bajerová E. (2020). Fosfor v půdě. Agrostis s.r.o., Horní Moštěnice, Česká republika. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/fosfor-v-pude> (accessed 22.11.2023)

Bajerová J. (2020). Výživa a hnojení zeleniny. Pěstík.cz., Luhačovice, Česká republika. Available from: <https://www.pestik.cz/module/csblog/post/516-9-vyziva-a-hnojeni-zeleniny.html#gref> (accessed 08.04.2024)

Balík, J. (1993). Základy výživy rostlin. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství České republiky, Praha.

Balík J., Černý J., Kulháněk M. (2012). Bilance dusíku v zemědělství: certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Barber S. A. (1995). Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2nd Ed. John Wiley, New York. Available from: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1603609> (accessed 08.04.2024)

Bassi D., Menossi M., Mattiello L. (2018). Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Sci.Rep.*, 8(1), 2327. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1> (accessed 01.04.2024)

Bettany J.R., Maynard D.G., Stewart J.W.B. (1985). The effects of plants on soil sulfur transformations, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 17, Issue 2, Pages 127-134, DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90103-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90103-8). (accessed 26.04.2024).

Bohn H.L., Barrow N.J., Rajan S.S.S. and Parfitt R.L. (1986). Reactions of inorganic sulfur in soils. *Sulfur in Agriculture*, M.A. Tabatabai (Ed.).

Bohn H. L., McNeal B. L., O'Connor G. A. (2002). *Soil chemistry* (3rd edition). John Wiley, New York.

Bolan N., Adriano D., Curtin D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*. 78. 215-272. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)78006-1. (accessed 25.04.2024).

Campbell B., Douglas, Bennett E., Hall-Spencer J., Ingram J. J., Fernando, Ortiz, Rodomiro, Ramankutty N., Sayer, Jeffrey, Shindell D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and society*. 22. 8. DOI: 10.5751/ES-09595-220408. (accessed 03.04.2024)

Casanova E. (2000). Phosphorus and potassium fertilization and mineral nutrition of soybean. *Interciencia*, vol. 25, núm. 2, marzo-abril. pp. 92-95 Asociación Interciencia Caracas, Venezuela. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/339/33904407.pdf> (accessed 03.04.2024)

Castellano S.D., Dick R.P. (1990). Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil. *Soil Science Society American Journal*, 55: 114–121

Curtin D. Beare M., McCallum F.M. (2007). Sulphur in soil and light fraction organic matter as influenced by long-term application of superphosphate. *Soil Biology and Biochemistry*. 39. 2547-2554. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.04.025. (accessed 24.04.2024)

Curtin D., Syers J.K. (1990). Mechanism of sulphate adsorption by two tropical Soils. *Journal of Soil Science*, 41: 295-304. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00064.x> (accessed 25.04.2024).

Černý J., Balík, J., Kulhánek M., Sedlář, O. (2021). Proč je vápník pro rostliny důležitý? Agromanual.cz. Available from: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/proc-je-vapnik-pro-rostliny-dulezity> (accessed 20.04.2024)

Černý J., Balík J., Kulhánek M., Sedlář O., Procházková S. (2023). Využití dusíku rostlinami ozimé řepky. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Chao T. T., Harward M. E., Fang S. C. (1962). Soil constituents and properties in the adsorption of sulfate ions. *Soil Science* 94(5): p 276-283,

Chen Z., Tao X., Khan A., Tan D.K.Y., Luo H. (2018). Biomass accumulation, photosynthetic traits and root development of cotton as affected by irrigation and nitrogen-fertilization. *front. Plant. Sci.* 9, 173. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00173> (accessed 23.05.2023)

Cherlinka V. (2022). Nitrogen deficiency in plants: diagnosis and management. EOS Data Analytics, Inc. Available from: <https://eos.com/ru/blog/defitsit-azota-u-rasteniy/> (accessed 25.04.2024)

Danica B. (2018). The role of calcium in plants. *Fitofert journal*. Moscow, Russia. Available from: [https://fitofert.ru/kalcij\\_v\\_shizni\\_rasteniy/](https://fitofert.ru/kalcij_v_shizni_rasteniy/) (accessed 23.05.2023)

Danica B. (2019). The role of phosphorus in plants. *Fitofert journal*. Moscow, Russia. Available from: [https://fitofert.ru/fosfor\\_v\\_gizni\\_rasteniy/](https://fitofert.ru/fosfor_v_gizni_rasteniy/) (accessed 23.05.2023)

Edwards P.J. (1998). Sulfur cycling, retention, and mobility in soils: A Review. Gen. Tech. Rep. NE-250. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 18 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/NE-GTR-250> (accessed 21.04.2024).

Elkina G. J. (2010). Sulfur in plant nutrition on podzolic soils. The University of Biology, Komi, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sera-v-pitanii-rasteniy-na-podzolistyh-pochvah> (accessed 20.10.2023)

Eriksen J., Bang E., Mønsted L., Mønsted O., Schroth W., Kondow A., Bisht K., Parmar V., Francis G. (1994). Mechanism of lactic acid formation catalyzed by a macrocyclic chromium(III) complex. A Comparison with the Glyoxalase I Enzyme. *Acta Chemica Scandinavica - ACTA CHEM SCAND.* 48. 12-19. 10.3891/acta.chem.scand.48-0012. Available from: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/J-Eriksen-2079089306> (accessed 25.04.2024).

Eriksen J., Lefroy R.D.B., Blair G.J. (1995). Physical protection of soil organic S studied by extraction and fractionation of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 27: 1011–1016.

Eriksen J. (1997). Sulphur cycling in Danish agricultural soils: Inorganic sulphate dynamics and plant uptake, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 29, Issues 9–10. Pages 1379-1385, ISSN 0038-0717. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00055-2). (accessed 21.04.2024).

Eriksen J., Murphy M. D., Schnug E. (1998). The soil sulfur cycle. In: Schnug, E. (ed.): Sulfur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Express Agro Journal (2020). A lot or a little? The peculiarities of fertilizing tomatoes. Moscow, Russia.

Fageria N.K. (2002). Soil quality vs. environmentally-based agricultural management practices. *Communications in SoilScience and Plant Analysis*, 33(13-14), 2301–2329. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005764> (accessed 25.04.2024)

Fageria N.K., dos Santos A.B., de Oliveira J.P. (2013). Nitrogen-use efficiency in lowland rice genotypes under field conditions. *Commun Soil Sci. Plant Anal*, 44(17), 2497–2506 <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.812732> (accessed 25.04.2024)

Fathi A. (2020). Tillage systems and use of chemical fertilizers (N:P:K). Interaction on soil properties and maize quantitative and qualitative traits. Faculty of Agriculture. Islamic AzadUniversity, Ayatollah Amoli Branch.

Fathi A., Farnia A., Maleki A. (2013). Effects of nitrogen and phosphorous biofertilizers on yield and yield components of corn. AS71 inDareh-shahr, Iran. *J. Crop Ecophysiol.*, 7,1(25),105–114. Available from: <https://www.sid.ir/paper/182741/en> (accessed 21.04.2024). (accessed 25.04.2024).

Fathi A., Farnia A., Maleki A. (2016). Effects of biological nitrogen and phosphorus fertilizers on vegetative characteristics, dry matter and yield of corn. *Appl. F. Crop. Res.*, 29, 1–7. <https://doi.org/10.22092/aj.2016.109214> (accessed 25.04.2024).

Fathi A., Zeidali E. (2021). Conservation tillage and nitrogen fertilizer: a review of corn growth, yield and weed management. *Cent Asian JPlant Sci. Innov.*, 1(3), 121–142. [https://www.cajpsi.com/article\\_137559\\_7f17409644996104fe39b1b433015cfb.pdf](https://www.cajpsi.com/article_137559_7f17409644996104fe39b1b433015cfb.pdf) (accessed 25.04.2024).

Fecenko J., Ložek O. (2000). Výživa a hnojenie pol'ných plodín. Nitra, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre.

Fertislav.cz (2022). Vápník, vápnění půdy. Available from: <https://www.fertislav-eshop.cz/vapnik--vapneni-pudy/> (accessed 22.01.2024)

Fitzgerald J. W., Strickland T. C., Swank W. T. (1982). *Soil Biol. Biochem.* 14:529-536.

Franzen D.W., Grant C.A. (2008). Sulfur response based on crop, source, and landscape position. p. 105-116. In *Sulfur: A Missing Link Between Soils, Crops and Nutrition*. J. Jez, ed. Agronomy Monograph No. 50. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wis. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronmonogr50.c7> (accessed 15.09.2023)

Franzen D.W. (2018). Limitations of the sulfate-sulfur soil test as a predictor of sulfur response. North Dakota State University. Available from: <https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/publications/limitations-sulfate-sulfur-soil-test-predictor-sulfur-response> (accessed 09.09.2023)

Freney J.R. (1986). Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. Sulfur in Agriculture, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, 207-232. Available from: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2485844> (accessed 25.04.2024).

Hallama M., Pekrun C., Lambers H., Kandeler E. (2019). Hiddenminers – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* 434:7-45.

Harward M.E., H.M Reisenauer. (1966). Reactions and movement of inorganic soil sulfur. *Soil Sci.* 101:326-335.

Havlin J. L., Beaton J. D., Tisdale S. L., Nelson W. R. (2016). Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management (eighth edition). Pearson India Education Services Pvt. Ltd, India.

Hepler P. K. (1994). The role of calcium in cell division. *Cell Calcium*. 16, 322–330.

Hlušek J., Richter R., Ryant P. (2002). Výživa a hnojení zahradních plodin. *Zemědělec – Farmář*, Praha, 81 s.

Hlušek J. (2004). Základy výživy a hnojení zeleniny a ovocných kultur. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací. 56 s., ISBN: 80-7271-147-4.

Hochmal A. K., Schulze S., Trompelt K., Hippler M. (2015). Calcium-dependent regulation of photosynthesis. *Biochim. Biophys. Acta (BBA) - Bioenerg.* 1847, 993–1003.

Hocking B., Tyerman S. D., Burton R. A., Gilliam M. (2016). Fruit calcium: transport and physiology. *Front. Plant Sci.* 7, 569. DOI: 10.3389/fpls.2016.00569 (accessed 25.04.2024).

Ivanič J., Havelka B., Knop K. (1984). Výživa a hnojenie rastlín. *Príroda*, Bratislava, 486 s.

Jasinovskaya I. (2022). Fertilizing zucchini: 11 necessary fertilizers and optimal timing. *Dacha I Sad Journal*. Available from: <https://www.ivd.ru/dacha-i-sad/dacnyj-ucastok/podkormka-kabachkov-11-nuzhnyh-udobrenij-i-optimalnye-sroki-104062> (accessed 25.04.2024)

Kamalov T.G. (2023). Fertilizing zucchini + highfakes to increase yields. *Organic Mix*. Uljanovsk, Rusko. Available from: <https://organic-mix.ru/articles/podkormka-kabachkov/> (accessed 25.04.2024)

Kamalov T.G. (2023). How to feed eggplants at all stages of cultivation. Available from: <https://organic-mix.ru/articles/chem-podkarmivat-baklazhany/> (accessed 25.04.2024)

Kerr A. (2003). Guidelines for the calculation and use of sulphide metal contents in research and mineral exploration. Newfoundland Department of Mines and Energy. Geological survey, Report 0,3-1, Pages 223-229. Available from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.nl.ca/iet/files/mines-geoscience-publications-currentresearch-2003-kerr-sulphide.pdf (accessed 25.04.2024).

Khan N. A., Singh S., Umar S. (2008). Sulfur assimilation and abiotic stress in plants. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.

Koleboshina T.G., Egorova G.S., Galichkina E.A. (2016). Potassium chloride granulate products value in melons gourds cultivation. Bykovskiy melon and gourds breeding experimental station of All-Russian scientific-research institute of horticulture. Volgograd state agrarian university Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/znachenie-kaliya-hloristogo-granulirovannogo-pri-vozdelyvanii-bahchevyh-kultur> (accessed 20.04.2024)

Kolesnichenko L. S. (2004). Biological role of makroelements (Lecture 1). Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/biologicheskaya-rol-elementov-lektsiya-1> (accessed 20.04.2024)

Kolesnichenko L. S., Kulinsky V. I. (2004). Biological role of macroelements – Na, Cl, K (Lecture 2). Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/biologicheskaya-rol-makroelementov-na-s1-k-lektsiya-2/viewer> (accessed 20.04.2024)

Kudla J., Becker D., Grill E., Hedrich R., Hippler M., Kummer U., Parniske M., Romeis T., Schumacher K. (2018). Advances and current challenges in calcium signaling. *New Phytol*, 218: 414-431. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14966> (accessed 25.04.2024).

Kulhánek M., Černý J., Balík J., Vaněk V., Sedlář O. (2001). Influence of the nitrogensulfur fertilizing on the content of different sulfur fractions in soil. *Česká zemědělská univerzita v Praze*.

Lambers H. Plaxton W.C. (2015). Phosphorus: back to the roots. *Annual Plant Reviews Volume 48* (eds W.C. Plaxton and H. Lambers). DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118958841.ch1> (accessed 23.04.2024).

Lambers H. (2022). Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*. 73. DOI: 10.1146/annurev-arplant-102720-125738 (accessed 23.04.2024).

Lu C., Zhang J., Cao P., Hatfield J. L. (2019). Are we getting better in using nitrogen?: Variations in nitrogen use efficiency of two cereal crops across the United States. *Earth's Future*, 7, 939–952. <https://doi.org/10.1029/2019EF001155> (accessed 23.04.2024).



- Lukin S.V., Zhuikov D.V. (2019). Monitoring sulfur content in soils, plants and organic fertilizers. *Agriculture*, 2019. Issue 2. Pages 10-12.
- McDonald A., Prado P., Heck K., Fourqurean J., Frankovich T., Dunton K., Cebrian J. (2016). Seagrass growth, reproductive, and morphological plasticity across environmental gradients over a large spatial scale. *Aquatic Botany*. 134. 87-96.
- Maria B. (2022). Signs of nutrient element deficiencies in cucumber seedlings. *Fertika Journal*. Moscow, Russia.
- Matula, J. (2007). *Výživa a hnojení sírou*. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha.
- McCarthy T. S., Bloem A., Larkin P. A. (1998). Observations on the hydrology and geohydrology of the Okavango Delta. *Botswana Journal of Geology*, 101, 101-117.
- McGill W.B., Cole C.V. (1981). Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. Department of soil science. University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Mihalache G., Peres C., Bodale I., Achiței V., Gheorghitoaie M. V., Teliban G., Cojocaru A., Butnariu M., Muraru V., Stoleru V. (2020). Tomato crop performances under chemical nutrients monitored by electric signal. *Agronomy*. 10. 1915. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10121915> (accessed 04.02.2024)
- Mengel K., Kirkby E. A. (1987). *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute, Worblaufen-Bern, Switzerland.
- Mengel K., Kirkby E. A., Kosegarten H., Appel T. (2001). *Principles of plant nutrition*. 5th edn. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 pp.
- Mezhak S. (2019). Why you need phosphorus-potassium fertilizer to grow tomatoes. *FertilizerDaily Journal*. Available from: <https://www.fertilizerdaily.ru/20191202-zachem-nuzhny-fosforno-kalijnye-udobreniya-dlya-vyrashhivaniya-tomatov/> (accessed 25.04.2024)
- Morche L. (2008). S-fluxes and spatial alterations of inorganic and organic sulphur fractions in soil as well as their accumulation and depletion in the rhizosphere of agricultural crops by partial use of the radioisotope <sup>35</sup>S. [PhD Thesis.] University of Bonn, Bonn. (In German)
- Narayan O. P., Kumar P., Yadav B., Dua M., Johri A. K. (2021). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India*. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15592324.2022.2030082> (accessed 07.02.2024)

Nguyen M.L., Goh K.M. (1992). Nutrient cycling and losses based on a mass-balance model in grazed pastures receiving long-term superphosphate applications in New Zealand: 1. Phosphorus. *The Journal of Agricultural Science*. 119(1):89-109.

Nodvin S. C., Driscoll C. T., Likens G. E. (1988). Soil processes and sulfate loss at the Hubbard Brook Experimental Forest. *Biogeochemistry*, 5(2), 185–199.

Ozanne P. G. (1980). Phosphate nutrition of plants - A General Treatise. CSIRO, Wembley, Western Australia. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/1980.roleofphosphorus.c21> (accessed 01.03.2024)

Pan F., Pan S., Tang J., Yuan J., Zhang H., Chen B. (2022). Fertilization practices: Optimization in greenhouse vegetable cultivation with different planting years. *Sustainability*, 14:7543. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137543>

Parfitt R.L., Smart R. St.C. (1978). The mechanism of sulphate adsorption on Iron oxides. *Soil Science Society of America Journal*. 42:48-50.

Polyakova M. (2022). Phosphor in soils and plants. *Journal "Potato System"*. Interregional information and analytical magazine for agribusiness professionals. Moscow, Russia.

Profi Press. (2008). Poruchy zeleniny zapříčiněné nedostatkem vápníku. Časopis „Zahradnictví“. Available from: <https://zahradaweb.cz/poruchy-zeleniny-zapricinene-nedostatkem-vapniku/> (accessed 19.11.2023)

Prokoshev V. V. (2005). The place and importance of potassium in the agroecosystem. The laboratory of Lyubertsy Experimental Field, Moscow, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-i-znachenie-kaliya-v-agroekosisteme/viewer> (accessed 29.03.2024)

Richter R., Hlušek J., Hřivna L. (1999). Výživa a hnojení rostlin: Praktická cvičení. MZLU Brno, 188 s.

Richter R. (2004). Draslík – význam draslíku. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/biogenni\\_prvky/k.htm](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/k.htm) (accessed 2.04.2024)

Richter R. (2004). Síra – význam síry. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/biogenni\\_prvky/s.htm](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/s.htm) (accessed 25.04.2024)

Richter R. (2004). Užitečné prvky. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/biogenni\\_prvky/uzitecne\\_prvky.htm#:~:text=Sod%C3%ADk%20je%20rostlinami%20p%C5%99ij%C3%ADm%C3%A1n%20velmi,se%20t%C3%ADm%20v%20rostlin%C3%A1ch%20sni%C5%BEuje.](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/biogenni_prvky/uzitecne_prvky.htm#:~:text=Sod%C3%ADk%20je%20rostlinami%20p%C5%99ij%C3%ADm%C3%A1n%20velmi,se%20t%C3%ADm%20v%20rostlin%C3%A1ch%20sni%C5%BEuje.) (accessed 23.04.2024)

Richter R. (2007). Živinný režim půd – draslík v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/agrochemie\\_pudy/puda\\_k.htm](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_k.htm) (accessed 16.03.2024)

Richter R. (2007). Živinný režim půd – hořčík v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/agrochemie\\_pudy/puda\\_mg.htm](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_mg.htm) (accessed 16.03.2024).

Richter R. (2007). Živinný režim půd – vápník v půdě. Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU v Brně, Zemědělská 1, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/agrochemie\\_pudy/puda\\_ca.htm](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_ca.htm) (accessed 18.04.2024)

Ryant P. (2020). Síra v půdě a její význam ve výživě rostlin a lidí. ČTPZ, Brno.

Saggar S., Bettany J.R., Stewart J.W.B. (1981). Sulfur transformations in relation to carbon and nitrogen in incubated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 13, Issue 6, Pages 499-511, DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(81\)90041-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(81)90041-9).

Scheffer/Schachtschabel (1992). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Neubearb. u. erw. v. Hans-Peter Blume u. a. Spektrum Akademischer Verlag, Springer, Berlin, Germany.

Scheffer/Schachtschabel (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Springer, Berlin, Germany.

Schoenau J. J., Germida J. J. (1992). Sulphur cycling in upland agricultural systems. Pages 261–277 in *Sulphur cycling on the continents*. R. W. Howarth, J. W. B. Stewart, and M. V. Ivanov, eds. John Wiley and Sons Ltd., New York, NY.

Shin R. (2014). Strategies for improving potassium use efficiency in plants. *Molecules and Cells*, 37(8): 575-584.

Spohn M., Schleuss P. (2019). Addition of inorganic phosphorus to soil leads to desorption of organic compounds and thus to increased soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*. 130. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.12.018 (accessed 28.04.2024)

Stevenson F. J., Cole M. A. (1986). Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients, 2nd Edition. ISBN: 978-0-471-32071-5

Šetlík I., Seidlová F., Šantrůček J. (2004). Fyziologie rostlin. Kapitola 10, Minerální a organická výživa rostlin. Stránky 1-32. Jihočeská univerzita. České Budějovice.

Škarpa P. (2010). Stanovení dusíku v půdě. Laboratorní výuka z výživy rostlin. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/laborator/index.php?N=1&I=3&J=11&K=0#:~:text=Dus%C3%ADk%20se%20nach%C3%A1z%C3%AD%20v%20p%C5%AFd%C4%9B,mohou%20vyu%C5%BE%C3%ADvat%20a%C5%BE%20po%20mineralizaci](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/laborator/index.php?N=1&I=3&J=11&K=0#:~:text=Dus%C3%ADk%20se%20nach%C3%A1z%C3%AD%20v%20p%C5%AFd%C4%9B,mohou%20vyu%C5%BE%C3%ADvat%20a%C5%BE%20po%20mineralizaci). (accessed 24.04.2024)

Tabatabai M.A. Bremner J.M. (1972). Assay of Urease Activity in Soils. American Journal of Soil Science Society, 41, 350-352. Available from: <https://scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1705512> (accessed 28.04.2024)

Tabatabai M.A. (1982). Soil enzymes. In: Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., Eds., Methods of Soil Analysis, ASA, SSSA, Publisher, Madison, WI, 903-947. Available from: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1664741> (accessed 28.04.2024)

Tei F., Nicola S., Benincasa P. [eds.] (2017). Advances in research on fertilization management of vegetable crops. Springer, 302 p.

Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D., Havlin U. (1993). Soil fertility and fertilizers. Prentice Hall, New Jersey.

Tlustoš P., Pavlíková D., Balík J. (2002). Úloha fosforu v rostlinách, jeho příjem a potřeba rostlinami. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 38-45.

Tyshkevich N. (2020). Without sulphur, the application of other elements is useless. Everything starts with sulphur. Publishing House 'Belarus Today'. Available from: <https://www.sb.by/articles/vse-nachinaetsya-s-sery.html> (accessed 23.03.2024)

Vaněk V., Pavlíková D., Balík J., Tlustoš P. (1997). Dusík v půdě a jeho přeměny. Odborná konference. Available from: <http://www.agris.cz/clanek/118806#:~:text=V%20na%C5%A1ich%20klimatick%C3%BDch%20podm%C3%ADnk%C3%A1ch%20v,a%20zabudov%C3%A1ny%20do%20organick%C3%BDch%20slou%C4%8Denin>. (accessed 19.04.2024)

Vaněk V., Balík J., Černý J., Pavlík M., Pavlíková D., Tlustoš P., Valtera J. (2012). Výživa Zahradních rostlin. Academia. Praha. 570 s.

Voyevodina L. A., Voyevodin O. V. (2015). Magnesium for soil and plants. Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/magniy-dlya-pochvy-i-rastenyi/viewer> (accessed 19.04.2024)

Wang X, Hao L, Zhu B, Jiang Z. (2018). Plant calcium signaling in response to potassium deficiency. *International Journal of Molecular Sciences* 19(11):3456.

Wang M, Ye Youliang, Chu X, Zhao Y, Zhang S a kol. (2022). Responses of garlic quality and yields to various types and rates of potassium fertilize applications. *HortScience* 57(1):72-80.

Wu Y. V., Rosati R. R., Sessa D. J., Brown P. B. (1995). Evaluation of corn gluten meal as a protein source in tilapia diets. *J. Agric. Food Chem.*, 43 (6): 1585-1588. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf00054a032> (accessed 28.04.2024)

Xiaohang W., Wenxu Z., Hui L., Chengshuai R., Yongbin Z., Songzhu Z., Liying L. (2022). Calcium regulation of growth and nutrient absorption in poplar seedlings. Shenyang Agricultural University, Shenyang, China. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.887098/full> (accessed 28.04.2024)

Yadav M.R., Kumar R., Parihar C.M., Yadav R.K., Jat S.L., Ram H., Meena R.K., Singh M., Birbal Verma A. P., Kumar U., Ghosh A., Jat M.L. (2017). Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. *Agric. Rev.*,38(1), 29–40. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7306> (accessed 28.04.2024)

Zavalin A., Sokolov O. (2019). Nitrogen fertilizers use rate by plants and its regulation. D.N. Pryanishnikov Research Institute of Agrochemistry, Moscow, Russia. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-ispolzovaniya-rastenyami-azota-udobreniy-i-ego-regulirovanie/viewer> (accessed 19.04.2024)

Zelený F., Zelená E. (1996). Síra a její potřeba pro výživu rostlin. 5. Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha.

Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T. D., Dumas P. Shen Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51–59. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature15743> (accessed 21.04.2024)

Zhang Y., Wang J., Gong S., Xu D., Sui J. (2017). Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat. *Agric. WaterManag.*, 179, 277–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.007> (accessed 22.04.2024)