

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Bilance síry při různých systémech hnojení v  
dlouhodobých pokusech s monokulturou kukuřice**

**Bakalářská práce**

**Autor práce: Stanislav Brunclík**

**Studijní obor: Rostlinná produkce**

**Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr. h. c.**

**Konzultant: Ing. Pavel Suran**

© 2023 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Bilance síry při různých systémech hnojení v dlouhodobých pokusech s monokulturou kukuřice" jsem vypracoval 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 autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.4.2023

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Jiřímu Balíkovi, CSc., dr. h. c. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a vstřícnost v průběhu vedení bakalářské práce. Děkuji také Ing. Pavlu Suranovi za ochotu a pomoc při zpracování výsledků pokusu.

# Bilance síry při různých systémech hnojení v dlouhodobých pokusech s monokulturou kukuřice

## Souhrn

Vlivem zvýšeného množství  $SO_2$  v ovzduší ve 20. století se do půdy formou atmosférických depozic dostávalo množství síry, které bylo pro výživu rostlin dostatečné a hnojení sírou nebylo nutné. Zdrojem emisí síry byla především průmyslová činnost a výroba energie. Vlivem snahy o zlepšení životního prostředí byly emise síry snižovány a s tím výrazně poklesly i atmosférické depozice.

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit bilanci síry v dlouhodobých pokusech s monokulturou kukuřice. Dále byly porovnávány různé varianty hnojení a jejich vliv na množství vodorozpustné síry v půdě, odběr síry rostlinami, obsah síry v sušině biomasy a vliv na výnos.

Bakalářská práce vychází z výsledků dlouhodobých pokusů s hnojením monokultury kukuřice vedené katedrou agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze. Pokus probíhá na stanici v Červeném Újezdě a založen byl v roce 1993. Celkem je pět variant, jedna kontrolní, dále čtyři hnojené varianty. Všechna hnojiva byla v minerální formě. Varianty jsou následující: 1) Kontrolní varianta, 2) Síran amonný, 3) DAM, 4) DAM + PK, 5) DAM + PMgS. Na variantu hnojenou síranem amonným bylo aplikováno 142 kg S/ha/rok, na variantu DAM + PMgS 84 kg S/ha/rok a ostatní varianty sírou hnojeny nebyly. Byly vyhodnoceny výsledky rozborů vodorozpustné síry z roku 1997 a 2019 a vzorky rostlin z roku 2018 a 2019.

Na všech variantách, s výjimkou varianty hnojené síranem amonným, pokleslo množství vodorozpustné síry na hodnoty pod 15 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Pokles se odvíjel od snižujících se dávek síry z atmosférických depozic. Vyšší hodnoty byly naměřeny pouze na variantě hnojené síranem amonným, kam bylo dodáváno vysoké množství síry (142 kg S/ha/rok). Jsou zřejmé i ztráty síry vyplavením, neboť množství vodorozpustné síry bylo nízké i při aplikaci 84 kg S/ha/rok. Z toho vyplývá, že při nadprůměrných (>40 kg S/ha/rok) dávkách síry v minerálních hnojivech nedochází k nárůstu obsahu vodorozpustné síry v půdě a zvyšuje se riziko ztráty vyplavením. Hnojení sírou se neprojevovalo na zvýšeném výnosu biomasy kukuřice. U variant hnojených sírou se zvýšil obsah síry v rostlinách a v důsledku toho byl i vysoký celkový odběr síry nadzemní biomasou silážní kukuřice. Pokles atmosférických depozic je nutné řešit pravidelným hnojením sírou.

**Klíčová slova:** síra, silážní kukuřice, monokultura, bilance S, atmosférické depozice

# **Sulfur balance in different fertilization systems in long – term experiments with maize monoculture**

## **Summary**

Due to the increased amount of  $SO_2$  in the atmosphere in the 20th century, the amount of sulphur entering the soil through atmospheric deposition was sufficient for plant nutrition and sulphur fertilization was not necessary. The sources of sulphur emissions were mainly industrial activities and energy production. As a result of efforts to improve the environment, sulphur emissions have been reduced and atmospheric deposition has fallen significantly.

The aim of the bachelor thesis was to evaluate the sulphur balance in long-term experiments with maize monoculture. Furthermore, different fertilization options were compared and their effect on the amount of water-soluble sulphur in the soil, sulphur uptake by plants, sulphur content in dry biomass and effect on yield.

The bachelor thesis is based on the results of long-term experiments with fertilization of maize monoculture conducted by the Department of agroenvironmental chemistry and plant nutrition of the Czech University of Life Sciences in Prague. The experiment takes place at the station in Červený Újezd and was established in 1993. There are five variants in total, one control, and four fertilized variants. All fertilizers were in mineral form. The variants are as follows: 1) Control variant, 2) Ammonium sulphate, 3) DAM, 4) DAM + PK, 5) DAM + PMgS. 142 kg S/ha/year was applied to the variant fertilized with ammonium sulphate, 84 kg S/ha/year was applied to the variant DAM + PMgS and the other variants were not fertilized with sulphur. The results of water-soluble sulfur analyses from 1997 and 2019 and plant samples from 2018 and 2019 were evaluated.

On all variants, except the variant fertilized with ammonium sulfate, the amount of water-soluble sulfur decreased to values below 15 mg  $S_{H_2O}$ /kg soil. The decrease was attributed to decreasing sulfur inputs from atmospheric deposition. Higher values were measured only on the variant fertilised with ammonium sulphate, where a high amount of sulphur was supplied (142 kg S/ha/year). Losses of sulphur by leaching are also evident, as the amount of water-soluble sulphur was low even when 84 kg S/ha/year was applied. This shows that at above average (>40 kg S/ha/year) rates of sulphur in mineral fertilisers there is no increase in the water-soluble sulphur content of the soil and the risk of loss through leaching increases. Sulphur fertilisation did not result in increased maize biomass yield. In the sulphur fertilised variants, the sulphur content of the plants increased and as a consequence the total sulphur uptake by aboveground silage maize biomass was high. The decrease in atmospheric deposition needs to be addressed by regular sulphur fertilization.

**Keywords:** sulphur, silage maize, monoculture, S balance, atmospheric deposition

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Hypotéza .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Literární rešerše .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Síra .....</b>	<b>10</b>
3.1.1	Vlastnosti a použití .....	10
3.1.2	Výskyt síry .....	10
<b>3.2</b>	<b>Síra v ovzduší .....</b>	<b>11</b>
3.2.1	Uvolňování síry do ovzduší .....	11
3.2.2	Síra v atmosféře .....	12
3.2.3	Bilance emisí síry v ovzduší .....	12
<b>3.3</b>	<b>Síra v půdě .....</b>	<b>14</b>
3.3.1	Formy síry v půdě .....	14
3.3.2	Mineralizace a imobilizace síry v půdě .....	16
3.3.3	Stanovení přístupné síry .....	16
3.3.4	Změny obsahu síry v půdě .....	16
<b>3.4</b>	<b>Síra v rostlinách .....</b>	<b>17</b>
3.4.1	Příjem síry rostlinami .....	17
3.4.2	Transformace síry v rostlině .....	18
3.4.3	Nároky zemědělských plodin na výživu sírou .....	20
3.4.4	Charakteristika výživného stavu .....	20
3.4.5	Projevy nedostatku síry .....	20
<b>3.5</b>	<b>Kukuřice .....</b>	<b>22</b>
3.5.1	Vývojové fáze u kukuřice .....	22
3.5.2	Výživa a hnojení .....	22
<b>3.6</b>	<b>Hnojení sírou .....</b>	<b>25</b>
3.6.1	Síra v minerálních hnojivech .....	26
3.6.2	Síra v organických hnojivech .....	26
<b>4</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Charakteristika dlouhodobých pokusů .....</b>	<b>28</b>
4.1.1	Charakteristika stanoviště .....	28
4.1.2	Aplikace hnojiv .....	29
4.1.3	Odběr a zpracování vzorků rostlin .....	29
4.1.4	Odběr a zpracování půdních vzorků .....	30

<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Výsledky rozborů rostlin .....</b>	<b>31</b>
5.1.1	Výnosy biomasy kukuřice .....	31
5.1.2	Obsahy S v biomase rostlin.....	33
5.1.3	Odběr S rostlinami kukuřice .....	35
<b>5.2</b>	<b>Výsledky rozborů půdy .....</b>	<b>37</b>
5.2.1	Obsah vodorozpustné S v půdě.....	37
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Výnos biomasy kukuřice .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Obsah vodorozpustné síry v půdě .....</b>	<b>40</b>
<b>6.3</b>	<b>Odběr S rostlinami kukuřice a obsah S v sušině biomasy .....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Seznam tabulek a grafů .....</b>	<b>49</b>
<b>9.1</b>	<b>Tabulky .....</b>	<b>49</b>
<b>9.2</b>	<b>Grafy.....</b>	<b>49</b>

# 1 Úvod

Síra je důležitý makroprvek ve výživě rostlin, její množství v sušině by se mělo pohybovat mezi 0,1 a 1 %. Její role v rostlině je významná, protože je nenahraditelnou součástí řady sloučenin. Vznikají z ní esenciální aminokyseliny methionin a cystein. Cystein a methionin jsou důležitou součástí enzymů a koenzymů, jež mají význam v rostlinných pletivech, z důvodu tvorby disulfidových můstků. Z cysteinu se také tvoří vitamíny B1 a H, acetylkoenzym A a řada produktů sekundárního metabolismu. Síra je součástí glutathionu, jenž je prekurzor pro tvorbu fytochelatinů a hraje roli v askorbát-glutathionovém cyklu. Důležitou roli má i v transportních procesech. Syntézou sirných esterů se tvoří glukosinoláty, které se nachází ve větší míře především u brukvovitých. Glukosinoláty mají obranou a zásobní funkci pro rostliny. Dále je síra důležitá pro tvorbu řady látek, které mají vliv na vonné a chuťové vlastnosti (Pavlíková et al. 2011).

Nároky na síru jsou rozdílné u rostlinných druhů. Vysoký obsah síry, především glukosinolátů je u rostlin z čeledi brukvovitých. Ve srovnání významných čeledí je můžeme dle obsahu seřadit takto Brassicaceae > Fabaceae > Poaceae. Právě u náročných rostlin na síru, především u řepky ozimé jsou dlouhodobě a čím dál častěji pozorovány projevy deficitu (Marschner 2011, Kulhánek et al. 2013).

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) je řazena do čeledi lipnicovitých (Poaceae). Jedná se o rostlinu jednodomou a jednoletou. Rostlina má terminální latu samčích květů a úžlabní palici samičích květů. Kukuřice se pěstuje v řadě variet po celém světě, obilky mohou mít žlutou, bělavou nebo červenou barvu. Je významnou obilninou ve výživě lidí, ale také důležitou krmnou a energetickou plodinou. Kukuřice má mohutný kořen, díky němuž dobře přijímá živiny z půdy. Je tolerantní k monokulturnímu pěstování (Zimolka et al. 2008).



## **2 Cíl práce**

Cílem práce je stanovení bilance síry v dlouhodobých pokusech s monokulturou kukuřice při různých systémech hnojení a dále množství vodorozpustné síry v ornici.

### **2.1 Hypotéza**

V důsledku snížení depozice síry v ČR se výrazně zvyšuje úloha hnojení minerálními a organickými hnojivy při výživě rostlin sírou. Použitá hnojiva se významně liší v efektivnosti využití S rostlinami a v sorpci S v půdě.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Síra

Síru můžeme v přírodě nalézt ve velkém množství a v mnoha rozmanitých formách. Nachází se v ovzduší, v půdě, je součástí hornin a minerálů a je nezastupitelnou složkou mnoha rostlinných i živočišných bílkovin (Smith 2020).

#### 3.1.1 Vlastnosti a použití

Dle Pfennig (2015) ji řadíme k prvkům VI.A skupiny, mezi chalkogeny. Je pevná, krystalická látka patřící mezi nekovy. V elementární formě má žluté zbarvení a podle vnějších podmínek se může vyskytovat v několika alotropických modifikacích. Nejčastější kosočtverečná, která při 95 °C obvykle přechází na jednoklonnou. Krystalická struktura se skládá za běžných podmínek z osmi atomových molekul  $S_8$ . Při teplotě vyšší než 160 °C v roztavené síře molekuly  $S_8$  štěpí a vznikají dlouhé řetězce  $S_n$  (síra má tmavší zbarvení a vyšší viskozitu), dalším zahříváním vzniká hnědá pára. Pokud tuto síru následně ochladíme vzniká tzv. plastická síra. V případě ochlazení par vzniká sirný květ.

Síra se ve vodě nerozpouští, vhodné je rozpustit ji v nepolárních rozpouštědlech (obvykle např. sirovodík ( $H_2S$ )). Špatně vede teplo a elektřinu. Za běžných teplot je poměrně stálá, při vyšších teplotách reaguje s mnoha kovy a nekovy. Při zapálení hoří a vzniká oxid siřičitý ( $SO_2$ ). Často reaguje s prvky o stejné nebo nižší elektronegativitě a má oxidační čísla od  $-II$  do  $+VI$ , nejčastěji  $II$ ,  $IV$  a  $VI$  (Smith 2020).

Jak uvádějí Tlustoš et al. (2007) síra má také důležité průmyslové využití, používá se k výrobě zápalek, střelného prachu, jako prostředek proti rostlinným škůdcům, herbicidů a pro výrobu pryže z kaučuku. V poslední době stoupá význam síry při výrobě hnojiv. Je surovinou pro výrobu kyseliny sírové, siřičitanů, sulfidů a sirouhlíku. Můžeme ji získávat také z ropy, uhelných dehtů a technický plynů.

#### 3.1.2 Výskyt síry

Vyskytuje se v přírodě volná nebo vázaná ve sloučeninách. Volnou (čistou) můžeme najít v oblastech s vulkanickou činností, ve formě usazenin a sopečných par. Může se vyskytovat i v okolí horkých minerálních pramenů (Pfennig 2015).

Vázaná ve sloučeninách bývá častější. Tvoří velké množství organických i anorganických sloučenin. Síra patří mezi důležité biogenní prvky, v organických sloučeninách tvoří důležitou složku cysteinu (a cystinu) a methioninu (Smith 2020). Je součástí mnoha minerálů. Se sulfidy reaguje za vzniku mnoha sloučenin, nejdůležitější jsou pyrit ( $FeS_2$ ), rumělka ( $HgS$ ), galenit ( $PbS$ ), sfalerit ( $ZnS$ ) a chalkopyrit ( $CuFeS_2$ ). Známé sloučeniny se sírany jsou Glaubertova sůl ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) a sádrovec ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Mnoho se jich využívá jako rudy. S kyslíkem tvoří oxid siřičitý ( $SO_2$ ) a sírový ( $SO_4$ ), které jsou zastoupeny v ovzduší. Z kyselin můžeme uvést

kyselinu sírovou ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a siřičitou ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Ropa, uhlí a zemní plyn také obsahují síru (Pfennig 2015).

Podle Apodaca (2019) je na celé zemi uloženo okolo 5 miliard tun síry v rámci kovů, minerálů, uhelných dehtů, ropy, zemního plynu a vulkanických ložisek a par. A asi 600 miliard tun se nachází ve formě uhlí a ropných břidlic.

Co do rozdělení v rámci sfér země, tak nejvíce síry je uloženo v litosféře ( $24,3 \cdot 10^{18}$  kg) a hydrosféře ( $1,3 \cdot 10^{18}$  kg). Mnohem méně je vázáno v půdě ( $2,6 \cdot 10^{14}$  kg) a asi 5% síry v půdě je součástí půdní organické hmoty. V rostlinách se síra nachází také, a to v množství asi  $7,6 \cdot 10^{11}$  kg. Nejméně ze všech složek země se vyskytuje v atmosféře, okolo  $4,8 \cdot 10^9$  kg (Stevenson & Cole in Tlustoš et al. 2011).

## 3.2 Síra v ovzduší

### 3.2.1 Uvolňování síry do ovzduší

Vzhledem k tomu, že se síra vyskytuje v mnoha formách, tak její uvolňování do atmosféry může nastávat mnoha způsoby. Různými interakcemi se postupem času se vytvořil cyklus, kdy se síra uvolňovala do ovzduší přirozeným způsobem. Tedy při vulkanické činnosti, rozkladem hornin a těl živých organismů, živočichů i rostlin (Berglen et al. 2004, Wenche et al. 2019). V 19. století začalo docházet vlivem průmyslového pokroku k nárůstu průmyslové činnosti a s tím souvisejícím intenzivnějším využíváním přírodních zdrojů. V sulfidech vázaná síra se tak začala dostávat do prostředí ve formě reaktivních sloučenin, nejčastěji při spalování fosilních paliv a zpracování železných a neželezných rud. Právě spalování fosilních paliv se podílí na uvolňování síry ze 75 až 85 %, zpracování železných a neželezných rud tvoří menší část. Síra se uvolňuje také při v rafinériích ropy a dalších chemických provozech. Nezanedbatelným zdrojem síry je doprava a vytápění domácností (Smith et al. 2011).

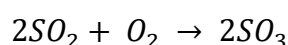
Síra se v ovzduší vyskytuje v několika sloučeninách, hlavními složkami jsou oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ) a sírový ( $\text{SO}_3$ ), sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ) a thioly. Další látky se nachází v atmosféře v zanedbatelném množství. V oblasti moří se dostává do ovzduší dimetylsulfid ( $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ ), který vzniká rozkladem dimethylsulfoniopropionátu při odumírání buněk fytoplanktonu a jako produkt metabolismu u řas. Při sopečné činnosti se uvolňuje oxid uhličitý a sulfan. V největší míře vzniká při sirných emisích oxid siřičitý, tvořící dominantní sirnou složku uvolňovanou při hoření, často jsou sloučeniny do této formy oxidovány. Oxid siřičitý je považován za prvek znečišťující životní prostředí (Berglen et al. 2004).

Antropogenní emise síry se v průběhu času zvyšovaly a dosáhly maxima okolo roku 1970. Negativní vliv oxidu siřičitého způsobil, že řada zemí světa se snažila emise snížit. To se projevilo spolu s dalšími vlivy na klesajících emisích  $\text{SO}_2$  ve velkém počtu zemí světa. Snížení nastalo hlavně v Evropě a Severní Americe. A nenastalo ve většině Asijských zemí, v některých se emise  $\text{SO}_2$  i zvýšily. Nejvíce emisí dnes produkuje Čína a Indie. Velký podíl globálních emisí zauímají rozvíjející se země a mezinárodní lodní doprava (Smith et al. 2011).

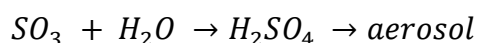
Ve vnitrozemských státech, a tedy i u nás jsou zdrojem emisí síry především intenzivní průmyslová činnost a spalování hnědého uhlí za účelem vytápění domácností a produkce energie (Tlustoš et al. 2001).

### 3.2.2 Síra v atmosféře

Oxid siřičitý je hlavní sloučenina síry uvolňována do atmosféry u nás, rozkladem organických látek v půdě se může do vzduchu také v menším množství dostávat sulfan. Sulfan obvykle podléhá oxidaci na oxid siřičitý a zbylý sulfan se nachází v malém množství v atmosféře v porovnání s oxidem siřičitým. Oxid siřičitý bývá často oxidován za vzniku oxidu sírového. K této reakci dochází především v mracích a znečištěném vzduchu, ve kterém je nadbytek ozonu a amoniaku (Singh & Agrawal 2008, Berglen et al. 2004).



Oxid sírový může dále reagovat s částicemi vody v ovzduší za vzniku kyseliny sírové, ve formě aerosolu. K této reakci také dochází především v mracích a znečištěném vzduchu (Mudd & Kozlowski 1975).



Vztah přeměny oxidu siřičitého na kyselinu sírovou není konstantní při jeho koncentraci v prostředí. Bylo zjištěno, že při nižší koncentraci oxidu siřičitého v ovzduší je nárůst kyseliny sírové úměrný. Ale při vyšší koncentraci oxidu siřičitého se rychlost přeměny na kyselinu sírovou zvyšuje (Mudd & Kozlowski 1975).

Síra se k zemskému povrchu dostává mokrou a suchou depozicí. Mokrou formou se kyselina sírová dostává k zemskému povrchu ve formě deště, sněhu, popřípadě mlhy. Při vyšší koncentraci aerosolu kyseliny sírové mohou vznikat kyselé deště. Suchá depozice přináší na zemský povrch oxid siřičitý (Berglen et al. 2004, ČHMÚ 2021). Typy depozice se liší také ve vzdálenosti unášení látek unikajících do ovzduší, suchá depozice převládá v blízkosti zdroje znečištění a několikanásobně převyšuje na tomto místě mokrou depozici. Jedná se především o města a místa v blízkosti průmyslových objektů. Oproti tomu mokrá depozice unáší emisní látky na větší vzdálenost a má význam v místech s méně emisními zdroji. Atmosférická depozice přispívá k samočištění ovzduší a obohacuje zemský povrch o tyto látky, v našem případě o síru (ČHMÚ 2016).

### 3.2.3 Bilance emisí síry v ovzduší

V 90. letech prudce klesaly emise oxidu siřičitého a pokles se pomalu zastavoval po roce 2000. V této době jsou již platné emisní limity a aplikovány ochranné opatření pro snížení emisí většiny znečišťujících látek. V roce 2000 nastává nárůst emisí u velkých zdrojů znečištění (REZZO 1), který způsobila větší výroba elektrické energie a narůstající spotřeba paliv. Emise oxidu siřičitého jsou v převážné míře tvořeny velkými zdroji znečištění (REZZO 1).

Pokračují také snahy o snížení emisí u středních a malých zdrojů znečištění (REZZO 2 a 3), které po roce 2000 klesají a tento pokles do značné míry kompenzuje nárůst emisí u velkých zdrojů. Na poklesu se podepsalo hlavně postupné přecházení na plyn a v menší míře vhodné klimatické podmínky. Mobilní zdroje znečišťování (REZZO 4) se na celkových emisích SO<sub>2</sub> podílí jen v malé míře (ČHMÚ 2005). Celkové emise tedy neklesaly, ale po roce 2000 mírně rostly až do roku 2003, kdy začaly klesat a v roce 2005 se vrátily na úroveň roku 2000.

Nejvyšších hodnot dosahují emise v oblastech s rozvinutým průmyslem a intenzivní dopravou. Jedná se o oblasti severních Čech, Moravskoslezského kraje a hlavní město Prahu (ČHMÚ 2005).

Po vstupu České republiky do Evropské unie v roce 2004 je vytvořen Národní program snižování emisí ČR. Program se zabývá přidělováním finančních prostředků za účelem snižování emisí v rámci stanovených emisních stropů. Emisní stropy se každoročně snižují (ČHMÚ 2011).

V roce 2006 emise oxidu siřičitého oproti předchozímu roku poklesly převážně kvůli výraznému snížení emisí v kategorii REZZO 3. Mírný pokles nastává i u velkých zdrojů znečištění. Roku 2007 emise výrazně narostly v souvislosti se zvýšením intenzity výroby elektrické energie. Celkem jedná o nárůst asi o 6 kt/rok na 216,4 kt/rok. Vzrostly pouze emise z kategorie REZZO 1, ostatní klesaly. Další rok výroba elektrické energie nerostla, dokonce se výrazně snížila, a to hlavně vlivem ekonomické krize v roce 2008, která způsobila pokles ekonomiky a snížení průmyslové výroby. Klesající trend pokračuje i v dalších letech vlivem utlumeného průmyslu a v roce 2010 dosahuje 169,5 kt/rok emisí oxidu siřičitého (ČHMÚ 2011).

Emise se dále výrazně nesnižují a dosahují v roce 2011 meziročně stejné úrovně. Pokračující ekonomická krize způsobuje nižší potřebu elektrické energie. Snižují se i emise z automobilové dopravy způsobené používáním paliv se sníženým obsahem síry a používáním modernějších vozidel. Rok 2012 přinesl snížení emisí oxidu siřičitého o 3,7 % oproti předchozímu roku. V roce 2013 se dále emise snižují zejména díky dlouhodobé snaze odsířování veřejné energetiky a změnám v odvětvích národního hospodářství (ČHMÚ 2016).

V následujících dvou letech emise meziročně prudce klesají v roce 2014 o 9 % a v roce 2015 o 3,5 %. Klesají dále emise ve veřejné energetice a výrobě tepla, tento sektor se v roce 2015 podílel na celkových emisích oxidu siřičitého ze 61,2 %. Hlavním důvodem poklesu je zavádění nových technologií a metod výroby, převážně u uhelných elektráren. Vzrůstá také podíl výroby elektřiny v jaderných elektrárnách, přičemž uhelné elektrárny výrobu mírně snižují. Vytápění domácností se podílelo v roce 2015 na celkových emisích z 13,7 % (ČHMÚ 2016).

Emise oxidu siřičitého klesají i v roce 2016, a to o 12,6 % oproti předchozímu roku. Klesající tendenci můžeme sledovat i v dalších letech, v roce 2019 meziročně poklesly dokonce o 17,2 %. Pokles způsobuje pokračující modernizace průmyslu a energetiky s důrazem na plnění emisních stropů, dále potlačení výroby elektřiny v uhelných elektrárnách ve prospěch

jaderných elektráren a obnovitelných zdrojů energie. Roste význam používání paliv se sníženým obsahem síry. Oproti roku 2015 poklesl výrazně podíl emisí oxidu siřičitého ze sektoru veřejné energetiky a výroby tepla. Roku 2020 tvořila tato složka pouze 47,2 % ročních emisí oxidu siřičitého. Oblasti s největšími emisemi jsou i nadále střední Čechy, severní Čechy a Moravskoslezský kraj. Roku 2020 byly emise na historickém minimu a dosahovaly pouze 66,4 kt/rok, což je snížení o 96,2 % oproti hodnotě roku 1990 (ČHMÚ 2021).

### 3.3 Síra v půdě

#### 3.3.1 Formy síry v půdě

Obsah síry v půdě je značně proměnlivý a jeho množství v půdě se pohybuje v širokém rozmezí. Na většině zemědělských půd v České republice se pohybuje od 50 do 500 mg S/kg. Síra se v půdě nachází v organické i anorganické formě, přičemž může podléhat mineralizaci, mobilizaci, imobilizaci, oxidačním a redukčním procesům. Organické sloučeniny síry jsou obvykle málo mobilní, nejvíce mobilní je síranový aniont ( $SO_4^{2-}$ ). Anorganické sloučeniny síry jsou, co se týče mobility, někde uprostřed (Scherer 2001). Transport síranů je ve velké míře závislý na své koncentraci v půdním roztoku, pH půdy, povaze koloidních částic a na koncentraci ostatních aniontů v půdním roztoku. Síra se v půdě častěji vyskytuje v rámci organických sloučenin, přesný poměr nelze jednoznačně určit, neboť značně kolísá a přechází mezi těmito formami neustále (Kirby & Mengel 2001).

Z hlediska výživy rostlin je nejdůležitější anorganický síran. Rostliny jsou schopny v této formě svými kořeny síru přijímat nejsnáze (Freney 1986). Nicméně se síranový aniont vyskytuje v půdě jen ve velmi malém množství. Organicky vázaná síra je pro rostliny nepřijatelná, ale může být potenciálně důležitým zdrojem síry v době jeho nedostatku v síranovém aniontu (Eriksen 2009).

##### 3.3.1.1 Organické formy síry

Organická síra v půdě je různorodá směs organického materiálu, nejčastější součástí jsou půdní organismy a částečně rozložené rostliny, popřípadě zvířata a mikroorganismy (Eriksen 2009). V půdě byly nalezeny organické látky sulfolipidy, kyselina sulfonová, aminokyseliny cistein a methionin a polysacharidy se sírou (Freney 1986).

Obvykle se člení organicky vázaná síra do dvou skupin. O rozdělení rozhoduje jejich reakce s redukčními činidly. První skupinu tvoří organická síra, která není vázaná přímo na uhlík (C) a redukcí pomocí kyseliny jodovodíkové (HCl) vzniká sulfan. Tuto skupinu tvoří převážně síranové estery (C–O–S), ale třeba také sulfonáty (Eriksen 2009). Do druhé skupiny můžeme zahrnout ostatní organicky vázanou síru, u těchto sloučenin kyselina jodovodíková neredukuje organickou síru na sulfan. Druhá skupina obsahuje látky jako aminové kyseliny, merkaptany, disulfidy, sulfony a sulfonové kyseliny (Freney 1986, Kirby & Mengel 2001)). Jejich množství obvykle nekoreluje s množstvím síranového aniontu v půdním roztoku, ale vykazují určitou závislost na půdní mikrobiální biomase. Estery síry v organických sloučeninách

obvykle převažují a mají charakter snadno přístupné síry. Zvyšují své množství v případě zvýšení koncentrace síranového aniontu v půdním roztoku. Asi 1-3 % síry vázané v organické hmotě je součástí mikrobiální biomasy (Tlustoš et al. 2011).

Wang et al. (2006) uvádějí, že při poklesu organické hmoty vlivem rozorání travní plochy a následného dlouhodobého intenzivního pěstování plodin, klesá výrazněji síra ve formě síranových esterů oproti síře vázané na uhlík. Zdůvodňují to tím, že síranové estery tvoří labilnější složku organické hmoty, která může být v případě potřeby snadněji mineralizovaná. Uvádějí také, že tento úbytek byl větší na půdách s vyššími srážkami. A v porovnání půd, více organické hmoty obsahovaly půdy s větším zastoupením jílu, které mají schopnost lépe akumulovat organické zásoby S.

### 3.3.1.2 Anorganické formy síry

Obvykle v zemědělských půdách nebývá v takovém množství jako organická síra, ale oproti organické síře je vysoce dynamickou složkou. Tvoří často 10-20% celkové síry a je pro rostliny velice snadno přístupná. V anorganické formě je síra v půdě zastoupena především sírany, ty se nachází buď v půdním roztoku nebo v pevné fázi půdy, přičemž v půdním roztoku se vyskytují ve větším množství (Balík et al. 2009, Vaněk et al. 2016). Síranový aniont se vyskytuje hojněji ve vzdušných a nezamokřených půdách. Dále se v půdě síra nachází jako součást sulfidů, polysulfidů, siřičitanů, thiosíranů a elementární síry. Síranový aniont je běžný v provzdušněných půdách a v případě nedostatku kyslíku se redukuje na sulfid (Kulhánek et al. 2013).

#### 3.3.1.2.1 Sorpce síranového aniontu

Sorpcí rozumíme schopnost půdy zadržet látku rozpuštěné, popřípadě dispergované ve vodě. Tyto látky se mohou do půdy dostávat jako produkty mineralizace, atmosférickým spádem a hnojivy. Sorpce pomáhá zadržovat živiny v půdě pro jejich možné využití rostlinami. Chrání živiny před vyplavením. Sorpcí je několik typů, nejčastěji jsou živiny poutány biologickou, chemickou a výměnnou sorpcí (Vaněk et al. 2016).

Zdali jsou sírany zadržovány závisí především na pH půdy, povaze koloidních částic, koncentraci síranu a koncentraci ostatních iontů (Eriksen 2009, Balík et al. 2009). Sírany se v půdě kromě půdního roztoku nachází sorbovány jako vápenaté a hořečnaté (okludované) nebo sodné sírany v pevné fázi půdy. Bývají sorbovány na oxidy železa a hliníku, buď dochází k výměně síranových aniontů na povrchu minerálu za hydroxylové nebo se tvoří na oxidech hliníku hydroxo-síranový komplex. K reakcím dochází především na povrchu jílových minerálů a kladně nabitých organických radikálů (Tlustoš et al. 2001, Kulhánek et al. 2011).

Výměnná sorpce aniontů má význam především v kyselých půdách, kde vznikají koloidní micely s kladným nábojem, schopné sorpce aniontů. Vápnění těchto půd způsobuje vytěsňování síranového aniontu a jeho návrat do půdního roztoku, k tomu může docházet také, pokud jsou v půdě přítomny fosforečnany, mající větší sorpční schopnost. Síra v rámci chemické sorpce netvoří ve větším množství s kationty sloučeniny, které by zůstávaly v půdě

a byly nerozpustné pro vodu. Tento fakt dokládá vysoký příjem síry z atmosférických depozic v minulém století, při kterém nedošlo k výraznějšímu navýšení obsahu síry v půdě (Balík et al. 2009, Vaněk et al. 2016).

### 3.3.2 Mineralizace a imobilizace síry v půdě

Síra se může měnit z anorganické na organickou a opačně. Proces přeměny organické síry na síranový aniont nazýváme mineralizace a přechod anorganické formy zpět na organickou imobilizace (Kertesz & Mirleau 2004).

Mineralizace síry může probíhat dvěma různými procesy. Biologickou a biochemickou mineralizací. Biologická mineralizace potřebuje mikroorganismy, které spotřebovávají uhlík a získávají z něho energii, následně oxidují uhlík na oxid uhličitý a jako vedlejší produkt vzniká síra. Biochemická mineralizace spočívá ve vzniku síranů ze síranového esteru za pomoci hydrolytických enzymů (Kirby & Mengel 2001). Organická síra vázaná přímo na uhlík je obvykle mineralizovaná pomocí mikroorganismů, kdežto biochemickou mineralizací se častěji rozkládají estery síry (Eriksen 2009).

Mikrobiální mineralizace závisí na podmínkách půdy, hlavně na teplotě a vlhkosti, ale i na oxidačně-redukčních podmínkách. Vhodná je teplota 25-35 °C. Mineralizací se může uvolňovat z organicky vázané síry do prostředí 5 až 49 kg S/ha každý rok. Zda je síra rostlinám přístupná závisí převážně na obsahu organické hmoty a poměru C:S. Pokud je poměr C:S nižší než 200:1, tak se do vnějšího prostředí uvolňují sírany. Zvýší-li se poměr C:S nad 400:1 dochází k imobilizaci přístupné síry, imobilizace probíhá i pokud se zapraví do půdy rostlinné zbytky s obsahem síry nižším než 0,13 % (Tlustoš et al. 2001).

### 3.3.3 Stanovení přístupné síry

Činidlo Mehlich 3 je v České republice běžně používáno ke stanovení přístupného P, K, Ca a Mg. Jedná se o jednoduchou a univerzální metodu, kterou je možné stanovit i obsah přístupné S. Složky extrakčního činidla Mehlich 3 jsou 0,2 mol/l CH<sub>3</sub>COOH, 0,015 mol/l NH<sub>4</sub>F, 0,013 mol/l HNO<sub>3</sub>, 0,25 mol/l NH<sub>4</sub>NO a 0,001 mol/l EDTA (Mehlich 1984). Vysušená jemnozeme (< 2 mm) se promísí s extrakčním činidlem 1:10. Vzorek se následně ponechá na třepačce 10 minut a následně se suspenze zfiltruje. Množství je stanovováno optickou emisní spektrometrií. Byly zjištěny korelace mezi metodou Mehlich 3 a různými frakcemi minerální síry v půdě. Také byla stanovena silná závislost mezi Mehlich 3 a celkovým množstvím přístupné síry (Kulhánek et al. 2018).

### 3.3.4 Změny obsahu síry v půdě

Snaha o zlepšení ovzduší vedla k poklesu atmosférických depozic, což způsobilo snížení příjmu síry do půdy. V roce 2000 dosahovala celková atmosférická depozice 70 400 t S/rok na plochu České republiky a průměrná hodnota dosahovala necelých 9 kg S/ha/rok (ČHMÚ 2001). Do roku 2010 celková depozice síry poklesla na 52 568 t S/rok. A průměrný depoziční tok byl



6,7 kg S/ha/rok (ČHMÚ 2011). V roce 2020 průměrná atmosférická depozice v ČR činí pouze 3,88 kg S/ha/rok. Celková depozice na plochu ČR byla 30 577 t S/rok. Z této hodnoty připadá 13 793 t na mokrou depozici, zbytek, tedy 16 784 t zaujímá depozice suchá. Hodnota 3,88 kg S/ha/rok je průměrná, přičemž můžeme pozorovat výkyvy převážně díky mokré depozici v oblasti hor a v jejich blízkosti. Jedná se o Moravskoslezské Beskydy, Jeseníky, Krkonoše, Českomoravskou vrchovinu a Šumavu, v těchto oblastech byla naměřena největší mokrá depozice v ČR. Suchá depozice dosahovala největší hodnoty v Krušných horách a Moravskoslezských Beskydech, tedy v blízkosti velkých průmyslových oblastí (ČHMÚ 2021).

Kulhánek et al. (2013) zjistili výrazný pokles minerální síry v půdě mezi lety 1981 a 2007. Stanovována byla minerální síra v půdním roztoku, síra okludovaná a síra adsorbovaná na povrchu půdních částic. Nejvýrazněji poklesla síra v půdním roztoku, jež je hlavním zdrojem síry pro rostliny. Hodnoty stanoveny vodným výluhem v roce 2007 dosahovaly běžně pod 10 mg S/kg. V porovnání s hodnotami okolo 20 mg S/kg půdy z roku 1981 se jedná o výrazný pokles. Kulhánek et al. (2013) dále uvádějí, že hodnoty stanovené vodným výluhem nižší než 8 mg S/kg jsou hodnoceny jako nízké. Okludovaná a adsorbovaná síra poklesla také, ale ne tak výrazně.

### 3.4 Síra v rostlinách

#### 3.4.1 Příjem síry rostlinami

Rostliny mohou přijímat síru z půdy nebo z ovzduší. V převážné míře je síra přijímána kořeny. Při vhodném pH v půdě přijímají buňky kořenů síranový aniont z půdního roztoku a transportují ho do xylému a floému (Marschner 2011). O příjmu rozhoduje kromě pH půdy také koncentrace síranového aniontu v půdě (Vaněk et al. 2016). Dříve byl v poměrně velké míře přijímán oxid siřičitý z ovzduší nadzemními částmi rostlin, především listy, vlivem poklesu atmosférických depozic se příjem snížil (Kirby & Mengel 2001). Při malé koncentraci  $\text{SO}_4^{2-}$  v půdním roztoku je příjem z ovzduší vyšší. Takto může být síra přijímána asi do 30 % celkové potřeby. Pokud dojde k překročení koncentrace oxidu siřičitého v ovzduší nad hodnotu 1-1,5 mg  $\text{SO}_2$  v 1 m<sup>3</sup> můžeme pozorovat poškození nadzemních částí rostlin, v přítomnosti dalších složek emisí může být hodnota pro poškození rostlin nižší (Vaněk et al. 2016).

Vhodným nahrazením příjmu síry z atmosférických depozic může být mimokořenová výživa. Mimokořenová aplikace síry může na povrchu rostlin, především listů, na kterých ulpívá v největší míře, působit fyto-sanitárně a mít pozitivní efekt na potlačování houbových chorob (*Helminthosporium* spp., *Peronospora arborescens* aj.) (Škarpa et al. 2020).

Podle potřeb rostliny je určité množství síranového aniontu po příjmu rostlinou zabudováno do organických látek. Přebytek rostlina ukládá do vakuol, obvykle starších listů. V případě nadbytku síry v půdě, převážně po hnojení sírou jsou rostliny schopny přijmout větší množství síry a předzásobovat se. Později mohou zásoby podle potřeby přemístit, jedná se o proces zvaný remobilizace (Černý et al. 2020).

### 3.4.2 Transformace síry v rostlině

Přijatá síra je transportována apoplastem a symplastem v kořenech, následně prochází xylémem a je zabudovaná do buněk. Transport síranů do buněk je důležitý z důvodu jeho redukce v plastidech nebo zabudování do vakuol. K tomuto obvykle dochází v nadzemních částech rostlin, ale síra může zůstat i v kořenech (Kirby & Mengel 2001). Z většiny síranového aniontu vzniká cystein, aminokyselina důležitá jako meziprodukt primárního metabolismu, pro syntézu proteinů a je také součástí sloučenin majících důležitý význam v obranné funkci rostlin. Přebytná síra je transportovaná a zabudovaná do vakuol, kde vytváří zásobu pro potřebu metabolismu v případě nedostatku (Capaldi et al. 2015).

#### 3.4.2.1 Aktivace síranu

Síranový aniont v anorganické formě je relativně stabilní a aby se mohl účastnit dalších reakcí je nutné jeho zabudování do organických sloučenin. Reakce mohou probíhat v cytosolu, mitochondriích a plastidech. Enzym ATP-sulfuryláza (ATPS) katalyzuje přemístění dvou fosfátových skupin z ATP a jejich nahrazení síranovými skupinami. Reakcí vzniká adenosinfosulfát (APS) a jako vedlejší produkt pyrofosfát (PPi). Aktivita enzymu je redukována vnějšími a vnitřními faktory. APS může sloužit jako substrát při syntéze sirných esterů nebo redukci síranů (Marschner 2011).

##### 3.4.2.1.1 Redukce síranu

K redukci  $\text{SO}_4^{2-}$  je zapotřebí 8 elektronů, což je asi dvakrát více než k redukci nitrátu. Účelem je získat  $\text{S}^{2-}$ , potřebné k syntéze cysteinu, což je první stabilní sloučenina vznikající ze síry. K reakci dochází v zelených nebo nezelených plastidech (Hell 1997).

Prvním krokem je redukce APS za účasti enzymu APS reduktázy za vzniku siřičitanu ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), k čemuž jsou potřeba dva elektrony z glutathionu. Další reakcí je vznik sulfidu ( $\text{S}^{2-}$ ) katalyzovaný enzymem sulfid reduktázou. K uskutečnění reakce je potřeba šest elektronů z ferredoxinu (Kirby & Mengel 2001). Druhá reakce probíhá pouze v plastidech. Sulfid je následně přemístěn do O-acetylserinu (OAS), za účasti enzymu O-acetylserinlyazy (OASTL). Substrát O-acetylserin se skládá ze serinu a acetyl CoA a vzniká za účasti enzymu acetyl transferázy (SAT). V případě nadbytku O-acetylserinu se zastaví činnost SAT a syntéza O-acetylserinu. Po přemístění sulfidu do O-acetylserinu vzniká cystein (Cys). Cystein je složkou pro syntézu dalších látek jako cystinu, glutathionu (GSH) a methioninu (Met) (Marschner 2011, Droux 2003).

Cystein spolu s methioninem je součástí enzymů a koenzymů, jenž jsou důležitou složkou v rostlinných pletivech. Jejich vazby jsou důležité pro strukturu bílkovin. Vytvářejí vnitro- nebo mezibuněčné disulfidové můstky. Jejich množství v bílkovinách nekolísá, ale odvíjí se od množství dusíku. Poměr N/S je typický vždy pro určitý typ bílkovin. Bílkoviny chloroplastů mají poměr N/S 15, albumin 28 a globulin 67 (Vaněk et al. 2016).

Redukce síranů probíhá v závislosti na světle. Proto je vysoká aktivita redukce pozorovaná v mladých listech, ve starších je nižší. V kořenech je aktivita redukce nízká. Po redukcí síranů dochází obvykle k tvorbě glutathionu, hlavně v nadzemních částech rostlin. Glutathion je zásobní látkou, přičemž k jeho tvorbě dochází hlavně v listech a v největších koncentracích se nachází v plastidech, často až 50 %. Skládá se z cysteinu, glycinu a kyseliny glutamové (Vaněk et al. 2001).

Významem glutathionu v metabolismu rostliny je převážně transport látek. Může být i pohotovou zásobní látkou vhodnou pro řadu syntéz. Má i oxidační a antioxidační funkci (Marschner 2011). Je prekurzorem pro syntézu fytochelatinů, které plní významnou roli v detoxikaci organismu rostlin, působí především na rizikové prvky (Cd, Zn a Cu). Redukovaná síra (-SH) je součástí řady sloučenin účastnících se oxidačně-redukčních procesů. Za oxidačních podmínek se mohou tvořit disulfidové vazby, v redukčních podmínkách dochází k opačné reakci. Má pozitivní vliv na vznik redox systémů, obvykle v těchto systémech plní funkci akceptorů vodíku. Známým příkladem jsou nízkomolekulární ferredoxiny (Vaněk et al. 2016).

#### 3.4.2.1.2 Syntéza sirných esterů

APS může být použit jako substrát pro tvorbu síranových esterů. Nejprve dochází k tvorbě kyseliny trihydrogenfosforečné ( $H_3PO_4$ ), která se odštěpuje z ATP za vzniku adenosindifosfátu (ADP). Další reakce je katalyzovaná enzymem APS kinásou a dochází při ní ke vzniku fosfoadenosinfosulfátu (PAPS) z APS a kyseliny trihydrogenfosforečné. PAPS může následně tvořit složitější látky s organickými sloučeninami. Převážně s lipidy a polysacharidy nebo se podílí na tvorbě glukosinolátů. Sloučenina PAPS je považovaná také jako zásobárna APS a tedy v případě nedostatku může být snadno rozložen zpět na APS pro potřeby metabolismu (Vaněk et al 2016, Hell 1997).

Síra je v rostlině součástí velkého množství látek majících vliv jako prekurzory vonných a chuťových látek. Můžeme uvést trioly, sulfidy, isothiokyanáty a sirné heterocyklické sloučeniny. Z konkrétních sloučenin jsou důležité dimethylsulfid a dimethyltrisulfid podílející se na aroma mnoha rostlin. Isothiokyanáty mají vysokou senzoryckou aktivitu. Uvádí se, že mají toxické a farmakologické účinky, například strumigenní, antibakteriální a antifungicidní. Mohou mít efekt na potlačování nádorového bujení. Významný je ještě sulfurafan, který můžeme ve formě prekurzoru najít v brokolici (Pavlíková et al. 2011).

Významnou a rozsáhlou skupinou jsou glukosinoláty. Ve větší míře se nachází především u rostlin z čeledi brukvovitých. Po štěpení mají obrannou funkci a také tvoří zásobárnu síry a dusíku pro rostlinu. V rostlině mohou být hydrolyzovány nebo štěpeny. Právě po štěpení vzniká mnoho látek mající rozmanité účinky, můžeme uvést účinky strumigenní, hepatotoxické, neurotoxické, antimikrobiální a insekticidní, mohou mít také negativní účinek na chuť krmiva a růst. Jsou vyšlechtěny odrůdy mající snížený obsah kyseliny erukové a glukosinolátů, označované jako 00 (tzv. dvounulové) řepky. Z pozitiv můžeme uvést u glukosinolátů jejich antikarcinogenní funkci (Vaněk et al. 2016).

### 3.4.3 Nároky zemědělských plodin na výživu sírou

V sušině rostlin by se obsah síry měl pohybovat mezi 0,1 a 1 % hmotnosti. Přičemž můžeme pozorovat odlišný obsah v závislosti na rostlinných čeledí. Vysoký obsah síry, především glukosinolátů je u rostlin z čeledi brukvovitých. Ve srovnání významných čeledí je můžeme dle obsahu seřadit takto Brassicaceae > Fabaceae > Poaceae. Rovněž kolísá obsah proteinů se sírou v závislosti na typu buněk a rostlinném druhu (rozdíly i v rámci čeledí) (Marschner 2011, Kulhánek et al. 2013).

Při průměrných výnosech biomasy odebírají obilniny 18 až 25 kg S/ha, ozimá řepka 45 až 70 kg S/ha, brambory 17 až 23 kg S/ha, cukrová řepa 20 až 60 kg S/ha a bílé zelí 40 až 70 kg S/ha (Sturm et al. in Balík et al. 2001).

Pšenice v případě dostatečné zásoby síry v půdě může celkově odebírat 15 až 25 kg síry na hektar. I v případě nižšího příjmu, pod 15 kg/ha může být dosažen dobrý výnos 8 t/ha. Odběrové normativy tedy mohou kolísat mezi 2 až 6 kg S/t a fyziologická potřeba se pohybuje mezi 2 až 3 kg S/t. V případě potravinářské pšenice může být obsah síry v rostlině nepatrně vyšší (Černý et al. 2020).

### 3.4.4 Charakteristika výživného stavu

Výživný stav rostlin lze charakterizovat více metodami. Obvykle metodou celkového obsahu síry v rostlině, ale může být použit i poměr N/S. Metoda je založena na faktu, že síra se nachází v řadě bílkovin spolu s dusíkem a tento poměr je geneticky determinovaný, a tedy charakteristický pro rostlinný druh. Výhodou je malá proměnlivost v průběhu ontogeneze. Obecně bývá na 1 atom síry 34 až 36 atomů N, převedeno na hmotnostní poměr N/S je to 14,87 až 15,77:1. U pšenice je odvozený poměr 14,1, pro cukrovku 16,6, jícelek 16,2 a pro vojtěšku 16 až 17 (Matula 2011).

Sedlář et al. (2019) zjistili, že u ozimé pšenice a řepky silně koreluje hmotnostní poměr N/S v nadzemní biomase s obsahem přijatelné síry v půdě (stanovené Mehlich 3) a výnosem hlavního produktu. Optimálního růstu dosahovala ozimá pšenice při poměru N/S v nadzemní biomase okolo 12 v období mezi začátkem sloupkování a začátkem metání. Ozimá řepka dosahovala optimálního růstu při N/S 9 v nadzemní biomase v období kvetení. Dále zjistili, že ozimá pšenice měla vhodný poměr N/S při obsahu vodorozpustné síry v půdě 13 mg/kg a ozimá řepka při hodnotě alespoň 23 mg/kg.

### 3.4.5 Projevy nedostatku síry

Při poklesu síry se nejdříve projeví nedostatek cysteinu a glutathionu, tedy primárních produktů asimilace síry. Tím, že se netvoří cystein má za následek hromadění O-acetylserinu a serinu. Rozkládají se glukosinoláty a hromadí se tryptofan, glycin a nakonec auxiny. Nadbytek auxinů podpoří růst kořenů. To vše vede ke snížení hladiny lipidů a S-adenosylmethioninu (SAM), což má za cíl pokles metabolismu, nárůst fotorespirace a výraznou změnu poměru C/N (Hoefgen & Nikifora 2008).

Rostlina má nízký obsah energetických složek, sacharózy a škrobu. Kvalita produkce klesá spolu s nutriční hodnotou a výnosem (Vaněk et al. 2016). Vizuálně se deficit síry podobá nedostatku dusíku, jedná se o chlorózy především na mladších listech. Vzhledem k nárokům se deficit u zemědělských plodin projevuje nejprve u řepky olejky (Matula 2011).

Dle Bečka et al. (2022) se deficit S u řepky projevuje dlouhodobě a čím dál častěji. Rostliny méně kvetou, mají světlé korunní plátky a snižují se u nich výnosy, mají také světle zbarvené mladé listy. Deficit síry se často projevuje na polích se splavenou orníci. Hnojením dusíkatým hnojivem s obsahem síry můžeme deficitu předcházet.

### 3.5 Kukuřice

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) je řazena do čeledi lipnicovitých (Poaceae). Jedná se o rostlinu jednodomou a jednoletou. Rostlina má terminální latu samčích květů a úžlabní palici samičích květů. Kukuřice se pěstuje v řadě variet po celém světě, obilky mohou mít žlutou, bělavou nebo červenou barvu. Je významnou obilninou ve výživě lidí, ale také důležitou krmnou a energetickou plodinou (Zimolka et al. 2008).

#### 3.5.1 Vývojové fáze u kukuřice

Tabulka 1 Růstové fáze kukuřice (Zimolka et al. 2008)

BBCH	Popis
03	Klíčení
09	Vcházení
11	Růst listů
31	Sloupkování
51	Metání lat
61	Kvetení
71	Tvorba obilky
83	Zrání
97	Stáří

#### 3.5.2 Výživa a hnojení

Kukuřice má mohutný kořenový systém, který jí umožňuje velmi dobře přijímat živiny z půdy. Spadá do skupiny rostlin s C4 typem fotosyntézy. To jí pomáhá efektivněji využívat sluneční energii a živiny k tvorbě výnosu. Živiny přijímá v závislosti na pěstovaném hybridu, půdně-klimatických podmínkách a intenzitě hnojení. Intenzivně začíná přijímat živiny asi měsíc po vzejití a tento příjem pokračuje asi 6 až 7 týdnů, poté může příjem některých prvků stagnovat, jiné přijímá ve stejné míře (Vaněk et al. 2016).

Na půdní podmínky není kukuřice náročná, lepší výnosy poskytuje na středně těžkých až těžkých půdách s pH mezi 5,6 až 7,0. Je nutné dát si při pěstování pozor na půdy s vyšším množstvím štěrku a vysokou hladinou podzemní vody. Dobré výnosy poskytuje na

černozemích, hnědozemích a rendzinách, přičemž by tyto půdy měly být hlinité nebo písčitohlinité. Vhodné jsou středně hluboké až hluboké půdy s dostatkem humusu. Nejvíce náročná je kukuřice na teplotu a délku vegetační doby (Zimolka et al. 2008).

### 3.5.2.1 Nároky na výživu

#### 3.5.2.1.1 Silážní kukuřice

Kukuřice vyžaduje vysoké dávky dusíku a draslíku, střední dávky fosforu a dobrého výnosu dosahuje na půdách s dostatkem vápníku. Síry odebírá kukuřice 0,4-0,5 kg/t hmoty silážní kukuřice (Zimolka et al. 2008). Vaněk et al. (2016) uvádějí odběr síry u obilnin 12-15 kg S/ha. Společnost KWS (2023) doporučuje hnojit většinu dnešních hybridů dávkou 30-40 kg S/ha.

Silážní kukuřice dle autorů Vaněk et al. (2016) odebírá na 1 t produktu 3,5-4 kg N, 0,7-0,9 kg P, 2,9-3,7 kg K, 0,9-1,3 kg Ca a 0,3-0,6 kg Mg. Autoři Velthof et al. (2020) uvádějí doporučenou dávku 112-140 kg N/ha a 40-80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha u silážní kukuřice.

Dle Richter (2005) bývá potřeba živin na 10 t hmoty silážní kukuřice v průměru 30 až 40 kg N, 15 až 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 35 až 50 kg K<sub>2</sub>O, 7 až 13 kg MgO a 12 až 18 kg CaO.

#### 3.5.2.1.2 Kukuřice na zrno

Odběr živin kukuřice při pěstování na zrno a výnosu 9,5 t může dosahovat hodnot: N 191 kg/ha, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 89 kg/ha, K<sub>2</sub>O 235 kg/ha, MgO 73 kg/ha, CaO 57 kg/ha, S 21 kg/ha, Fe 2 130 g/ha, Zn 380 g/ha, Mn 340 g/ha, B 240 g/ha, Cu 110 g/ha, Mo 9 g/ha a Cl 81 g/ha. (Solaimalai et al. 2020).

Nagy (2006) uvádí odběr na 1 t zrna 25 kg N, 13 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a 22 kg K<sub>2</sub>O. Kukuřice vyžaduje asi 3,1 až 3,5 kg síry na 1 t zrna dle autorů Zimolka et al. (2008).

### 3.5.2.2 Organická (statková) hnojiva

Jak uvádí Richter (2005) kukuřice z hlediska hnojení a agrotechniky disponuje vlastnostmi typickými pro okopaniny.

#### 3.5.2.2.1 Sláma a posklizňové zbytky

Kukuřice se zařazuje do osevního postupu obvykle po obilninách. Často se sláma a posklizňové zbytky zanechávají na poli, rozkládají se a jsou zdrojem živin v budoucnu. Obvykle se zaorávají, ale mohou se ponechat na povrchu půdy. Podniky s živočišnou výrobou mohou slámu využívat jako podestýlku. Pro dobrý rozklad slámy je vhodné aplikovat 4-6 kg N na tunu slámy (poměr C:N). Vhodné je doplnit dusík močovinou, síranem amonným nebo DAM 390. Ke kompenzaci dusíku lze využít i vhodná organická hnojiva (Vaněk et al. 2016).

#### 3.5.2.2.2 Hnůj

Chlévský hnůj je nejčastější organické hnojivo, a to i přes úbytek chovu hospodářských zvířat. Dávka u kukuřice se pohybuje často mezi 30 a 40 t/ha. Obzvláště účinný je tento způsob hnojení na půdách méně úrodných s nižším množstvím humusu (Zimolka 2008). Tyto závěry potvrzuje i Nagy (2006), jež uvádí vhodnou dávku hnoje okolo 35 t/ha. Hnůj může být hovězí, koňský a ovčí. V největší míře je produkován hnůj hovězí. Hnůj se rozkládá v průběhu 2 až 4 let, déle na těžších půdách. Nejvíce živin se uvolňuje první rok, poté následuje pokles. Při aplikaci 40 t/ha hovězího hnoje se uvolní pro plodiny v prvním roce asi 48 kg N; 6,6 kg P a 83 kg K (Vaněk et al. 2016).

#### 3.5.2.2.3 Kejda

Kejda skotu a prasat je pro kukuřici velice dobré hnojivo. Má úzký poměru C:N, jenž nabývá hodnot 4-8:1. Proto je vhodné aplikovat ji spolu se slámou nebo zeleným hnojením. Složení kejdy nemusí být homogenní, ale může se značně lišit hlavně vlivem kolísání množství sušiny (Richter 2005). Kejda prasat má 7,2 % sušiny a kejda skotu 7,5 %. U kejdy prasat je dusík z 50 až 60 % obsažen ve formě amonné, a proto by měla být kejda zapravena do půdy pro omezení ztrát. Může být zapravena po hnojení nebo být aplikována přímo do půdy, lze použít i podlistovou aplikaci (Zimolka 2008).

Velikost dávky se určuje podle kvality kejdy a u kukuřice se aplikuje takové množství, aby pokrylo celkové potřeby dusíku. Rostlina nevyužije všechnen dusík, takže se bere v úvahu množství, které je schopna přijmout, to bývá 60 a 90 % obsahu N v kejdě. Kejda skotu obsahuje asi 0,32 % N v čerstvém stavu a kejda prasat 0,5 % N. Dále kejda dodává do půdy snadno dostupné P, K a Ca. Může být použita i kejda drůbeže, ta obsahuje více dusíku než ostatní druhy (Vaněk et al. 2016).

#### 3.5.2.2.4 Močůvka

Močůvkou může být hnojeno ke kukuřici také, má charakter dusíkato-draselného hnojiva. Nevýhodou je nízký obsah organických látek a P. Doporučuje se hnojení močůvkou kombinovat se zaorávkou slámy nebo zeleným hnojením (Vaněk et al. 2016). Po aplikaci většího množství by se mělo doplnit množství P a vápnit. Množství močůvky se volí stejně jako v případě kejdy, v závislosti na potřebě N, bývá bráno v úvahu i množství K v hnojivu. Vhodné je rychlé zapravení do půdy, případně aplikace rovnou do půdy (Richter 2005).

#### 3.5.2.2.5 Digestát

Digestát vzniká anaerobní fermentací v bioplynových stanicích. Vyrábí se z rostlinných zbytků a biomasy. Při fermentaci dochází ke zúžení poměru C: N. Poměr C: N je menší než 10:1, často ale dosahuje hodnot 4-6:1. V konečném důsledku C:N závisí na charakteru fermentované organické hmoty. Po aplikaci na pole se jedná o hnojivo s dobře přístupnými živinami, rychle se uvolňuje dusík a draslík. Může obsahovat menší množství některých makroprvků oproti ostatním organickým hnojivům. Digestát kupříkladu kukuřičné siláže obsahuje velice dobře přístupný fosfor a železo (Kusá et al. 2019).



#### 3.5.2.2.6 Zelené hnojení

Spočívá nejčastěji v zaorání meziplodiny. Zaorání zeleného hnojení může být spojeno s aplikací jiného organického hnojiva. Účelem je zanechat v půdě dostatek organických látek. Zaoraná organická hmota je zdrojem živin pro půdní mikroorganismy, substrátem pro tvorbu humusových látek a část podléhá mineralizaci. Často se pěstuje hořčice, svazanka nebo řepka. Zaorávají se na podzim nebo se nechávají vymrzat přes zimu. Může sloužit jako protierozní opatření a brání vymývání živin z půdy. Na stanovišti by měl být zabezpečen vláhový režim. Výhodou je, že vnáší do půdy dobře rozložitelnou organickou hmotu, což je důležité obzvláště pro podniky s nízkou produkcí statkových hnojiv nebo bez živočišné produkce. Příznivě ovlivňuje činnost půdní mikroflóry, ale nezvyšuje obsah C v půdě (Zimolka 2008, Vaněk et al. 2016).

#### 3.5.2.3 Minerální hnojiva

Na fosfor je kukuřice náročná po celou dobu růstu, obzvláště v počátečních fázích. Nejlépe je výživa fosforem zabezpečena na slabě kyselých až neutrálních půdách. Pro doplnění P může být využit Amofos, Superfosfát (trojitý nebo granulovaný), Hyperkorn a DAP. Draslík v minerální formě můžeme dodat v tuhém minerálním hnojivu, a to v draselné soli, síranu draselném nebo Patenkali. Kapalná draselná hnojiva jsou CK sol a SK sol. Z hořečnatých hnojiv můžeme ke kukuřici aplikovat kieserit ESTA a hořkou sůl. Síru můžeme dodat v síranu draselném, síranu hořečnatém (hořká sůl), superfosfátu a dalších (kapitola 3.6.1.). Dusík můžeme dodávat v ledkové formě, a to v rámci LAV (ledek amonný s vápencem), LAD (ledek amonný s dolomitem), LAS (ledek amonný se síranem vápenatým), LV (ledek vápenatý) a DASA (ledek amonný se síranem amonným). Dále můžeme aplikovat síran amonný (SA), močovinu, sulfan a dusičnan amonný (LA). Minerálním dusíkem můžeme hnojit i v kapalně podobě například DAM 390, SAM a dumag (Zimolka 2008).

### 3.6 Hnojení sírou

V posledních letech se začal projevovat deficit síry ve výživě rostlin. Hlavním důvodem je snížení atmosférických depozic. Používala se hnojiva s nízkým obsahem síry a používané pesticidy obsahovaly jen nízký obsah síry. A nakonec se pěstují a pěstovaly vysoce výkonné odrůdy, které odčerpávají vysoké množství živin. To vše vede k tomu, že každý rok je z půdy odčerpáváno více síry, než půda přijímá (Matula 2011, Černý et al. 2011).

Kulhánek et al. (2011) uvádějí, že došlo k výraznému poklesu především minerálních forem síry, bez ohledu na způsob výživy na pozemku. I přes tento úbytek zůstává obsah organické síry a poměr C:S přibližně na stejné úrovni.

### 3.6.1 Síra v minerálních hnojivech

#### 3.6.1.1 Na bázi elementární síry

Ve vodě nerozpustná elementární síra musí být oxidována, aby mohla být rostlinou přijata jako síranový aniont. Granulované hnojivo je v půdě biologicky oxidováno sirnými bakteriemi (*Thiobacillus*). Oxidace závisí na fyzikálním stavu půdy a klimatických podmínkách. Důležitá je teplota, obsah vody a vzduchu v půdě, pH a množství organické hmoty. Hnojivo obsahuje vysoké množství síry, často až 90 %. Důležitá je také velikost částic síry. V kapalné formě je elementární síra ve vodném roztoku, aplikuje se jako suspenze (Valenta 2011).

#### 3.6.1.2 Na bázi síranů

Známa hnojiva jsou síran draselný (42 % K, asi 17 % S), jednoduchý superfosfát (8 % P, 8-12 % S), síran vápenatý (17 % síry) neboli sádra, magnesia-kainit (8-10 % S), patenkali-kalimagnesia (18 % S), LAS (ledek amonný se síranem vápenatým, 24 % N a 6 % S), síran hořečnatý (hořká sůl, obsahuje 10 % Mg a asi 12 % S) a kieserit (14-15 % Mg, 18 % S) (Kulhánek et al. 2013, Vaněk et al. 2016).

##### 3.6.1.2.1 Na bázi síranu amonného

V dnešní době nejčastější způsob aplikace síry. Používán z důvodu dobrého kompromisu ceny a kvality (Valenta 2011). Používají se hnojiva: síran amonný (SA, 21 % N, 24 % S, v granulované formě 1,4 % nitrátového N a 2,5 % Ca) a DASA (26 % N, 13 % S, dusičnan amonný + síran amonný) (Kulhánek et al. 2013).

V kapalné formě vodný roztok síranů se často kombinuje se čpavkovým dusíkem. Pro listy i kořeny je hnojivo dobře přijatelné. Někdy se aplikuje i s močovinou. Častý je SAM (síran amonný s močovinou, 24 % N a 6-8 % S) (Valenta 2011).

##### 3.6.1.3 Ostatní

V kapalném stavu se občas aplikují hnojiva na bázi thiosíranů. Mají vysoký obsah síry a jsou dobře vstřebatelná. Někdy ve formě pevného hnojiva je používán síran hlinitoamonný nebo sloučeniny na bázi síranů hořečnato-vápenatých (Valenta 2011).

### 3.6.2 Síra v organických hnojivech

U každého organického hnojiva může být obsah síry jiný, pohybuje se mezi 0,015 a 0,07 % S. V chlévském hnoji je 40 % síry v organických vazbách s C, 20 % se váže v sulfidech a zbytek v organických a anorganických síranech (Tlustoš et al. 2001).

Množství síry ve statkových hnojivech je odlišné v závislosti na druhu hnojiva, tekutá hnojiva obsahují zpravidla méně živin, ale v lépe přístupné formě. Kejda, která bývá častým hnojivem pro porosty kukuřice obsahuje síru ve formě  $\text{SO}_4^{2-}$ , obsah kolísá mezi 0,3 a 0,5 kg S/m<sup>3</sup>, při obsahu sušiny 7,5 až 10 % (Richter 2005).

Černý et al. (2011) uvádějí množství síry ve statkových hnojivech u kejdy 0,15-0,7 kg S/m<sup>3</sup> a hnoje 0,7-1,4 kg S/m<sup>3</sup>. Dále uvádějí, že množství je odvislé od krmiva zvířat a mění se v porovnání druhů hospodářských zvířat.

S ohledem na množství v sušině uvádějí Černý et al. (2011) u stájových hnojiv v průměru 0,6 až 0,7 % S a dle Font-Palma (2019) je průměrný obsah síry v sušině hnoje u skotu 0,58 %.

## 4 Metodika

Ke zpracování praktické části bakalářské práce byly použity výsledky dlouhodobých pokusů s hnojením monokultury kukuřice, vedené katedrou agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze.

### 4.1 Charakteristika dlouhodobých pokusů

Dlouhodobý experimentální pokus s monokulturou kukuřice trvá od roku 1993 a byl založen na pokusných pozemcích ČZU v Červeném Újezdu. Pozemek je rozdělen na parcely o velikosti 170 m<sup>2</sup>, přičemž každá varianta je 4x opakována. Vysévá se 80 000 rostlin na hektar a během let byly použity následující hybridy rostlin: DK 205 (1993-1996), Torena (1997, 1998), DK 254 (1999), Compact (2000), Etendard (2001-2003), Rivaldo (2004-2011), RGT Indexx (2012-2014) a RGT Sixxtus (2015-2019).

#### 4.1.1 Charakteristika stanoviště

*Tabulka 2 Charakteristika experimentálního stanoviště v Červeném Újezdu (Suran et al. 2021)*

Nadmořská výška (m.n.m.)	410
Průměrné roční srážky (mm)	493
Průměrná roční teplota (C°)	7,7
Půdní typ	luvizem
Půdní druh	hlinitá
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6,5
Jíl (%)	5,4
Prach (%)	68,1
Písek (%)	26,5
Objemová hmotnost ornice (g/cm <sup>3</sup> )	1,47
Objemová hmotnost podorničí (g/cm <sup>3</sup> )	1,5
Půdní organická hmota (%)	1,26
Kationtová výměnná kapacita (mmol <sub>(+)</sub> /kg)	118

#### 4.1.2 Aplikace hnojiv

V pokusu jsou zastoupeny následující varianty:

- Nehnojená (kontrolní) varianta s produkcí rostlin (Kontrola)
- Síran amonný (SA) - 21 % N a 24 % S
- Močovina a dusičnan amonný (DAM) – 30 % N
- DAM + fosfor a draslík (DAM + PK) – P ve formě trojitého superfosfátu (21 % P) a K v podobě draselné soli neboli chloridu draselného (50 % K)
- DAM + fosfor, hořčík a síra (DAM + PMgS) – P ve formě trojitého superfosfátu (21 % P), Mg a S v hnojivu kieserit (15 % Mg a 21 % S)

Dusík je aplikován na jaře před setím. Ostatními živinami, tedy fosforem (P), draslíkem (K), hořčíkem (Mg) a sírou (S) je hnojeno na podzim. Nadzemní biomasa rostlin je odvážena z pole a strniště zaoráváno do půdy.

Tabulka 3 Množství živin aplikovaných na jednotlivé varianty pokusu (Suran et al. 2021)

Varianta	kg ha <sup>-1</sup> rok <sup>-1</sup>				
	N	P	K	Mg	S
Kontrola	0	0	0	0	0
SA	120	0	0	0	142
DAM	120	0	0	0	0
DAM + PK	120	30	150	0	0
DAM + PMgS	120	30	0	60	84

#### 4.1.3 Odběr a zpracování vzorků rostlin

Na parcelách se odebírá celá nadzemní biomasa ze dvou celých řádků (20 m<sup>2</sup>). Kukuřice se sklízí při dozrání do silážní zralosti. Na poli se sklizená hmota váží a určuje se výnos. Rostlinná hmota se následně rozdrtí a reprezentativní vzorky z každé parcely jsou sušeny v sušičce na konstantní hmotnost. Vysušené vzorky se následně namelou a jsou mineralizovány (kyselinou dusičnou (HNO<sub>3</sub>) a peroxidem vodíku (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)) v prostředí o vysokém tlaku. Nakonec jsou vzorky podrobeny analýze.

#### 4.1.4 Odběr a zpracování půdních vzorků

Vzorky půdy jsou odebírány z ornice, z hloubky 0 až 30 cm. K odběru dochází následně po sklizni pokusu. Následuje vysušení a prosetí na síť (< 2mm).

Stanovení přístupné síry vodným výluhem je metoda ke stanovení velmi mobilní síry. Metodou se stanovuje pouze síra v půdním roztoku. Postupuje se následovně: do 50 ml centrifugační kyvety se naváží 1 g vzorku vysušené jemnozeme (< 2 mm), přidá se 10 ml demineralizované vody, vzorek se silně protřepe a následně se umístí na protřepání na třepačce po dobu 30 minut, dále se provádí odstředění při 10000 U.min<sup>-1</sup> po dobu 10 minut a odlití do kyvety, kde se síra měří na přístroji ICP-OES (Kulhánek et al. 2013).

## 5 Výsledky

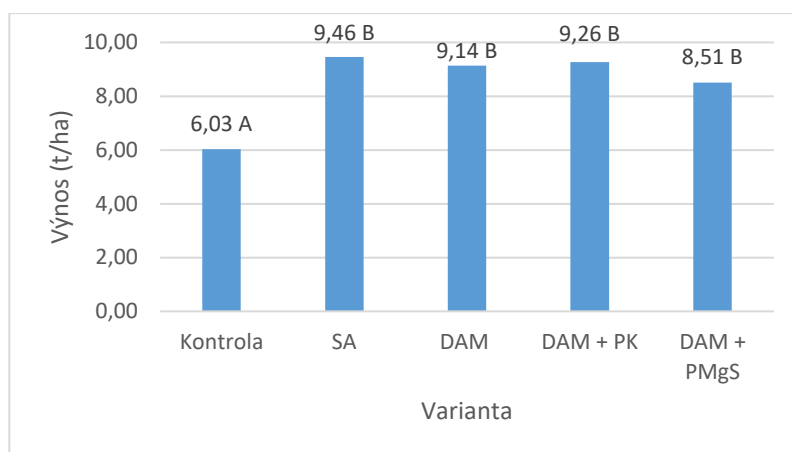
Ke zpracování praktické části bakalářské práce byly použity výsledky dlouhodobých pokusů s hnojením monokultury kukuřice, vedené katedrou agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU v Praze.

### 5.1 Výsledky rozborů rostlin

V bakalářské práci byly zpracovány výsledky rozborů rostlin z roku 2018 a 2019. Analyzovány byly výnosy biomasy kukuřice, obsah síry v sušině rostlin a dopočítaný odběr síry z půdy.

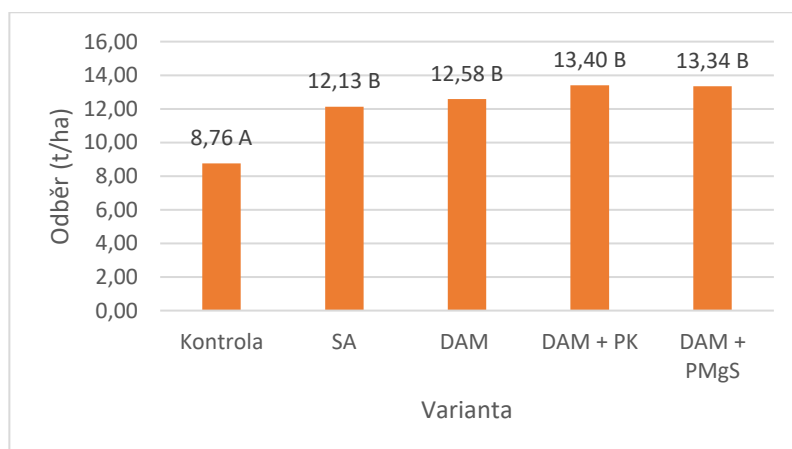
#### 5.1.1 Výnosy biomasy kukuřice

Graf 1 Výnos biomasy kukuřice v roce 2018 (t sušiny/ha)



Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 2 Výnos biomasy kukuřice v roce 2019 (t sušiny/ha)



Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Na grafu 1 je vidět výnos biomasy kukuřice v roce 2018. Statistická analýza prokázala podobnost mezi hnojenými variantami. Zde výnos kolísal okolo hodnoty 9 t sušiny/ha. Rozdílná byla kontrolní, tedy nehnojená varianta, kde byl pozorován výrazně nižší výnos, a to hodnota 6,03 t sušiny/ha, což je rozdíl asi o třetinu. Žádná varianta nedosahovala výnosu nad 10 t sušiny/ha a žádné konkrétní hnojivo výrazně výnos nenavýšilo ani nesnížilo.

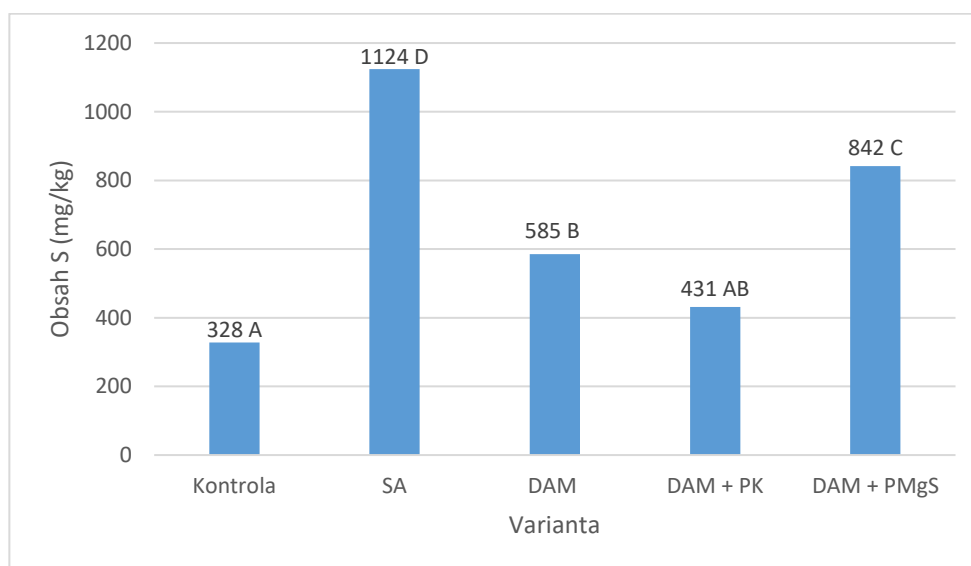
Graf 2 zobrazuje výnosy v roce 2019, kde opět statistická analýza prokázala rozdílnost hnojených a nehnojené varianty. Hnojené varianty dosahovaly výnos mezi 12 a 13,5 t sušiny/ha a kontrolní 8,76 t sušiny/ha.

V obou letech byl výrazně nižší výnos u kontrolní varianty oproti variantám hnojeným. Hnojené varianty byly v obou letech statisticky podobné. U výnosů je zřejmá rozdílnost, zatímco v roce 2018 výnosy hnojených variant nepřesáhly hranici 10 t sušiny/ha, tak v roce 2019 neklesly hnojené varianty pod 12 t sušiny/ha. Hodnota výnosu kontrolní varianty v roce 2019 byla také výrazně vyšší oproti předchozímu roku a dosahovala v roce 2019 srovnatelných hodnot jako hnojené varianty v roce 2018. Zajímavý je rozdíl nárůstů výnosu mezi lety 2018 a 2019, nejvyšší nárůst byl pozorován u varianty DAM + PMgS, a to asi o 5 t sušiny/ha a nejnižší u varianty hnojené síranem amonným, kde výnos stoupl pouze o 2,67 t sušiny/ha.



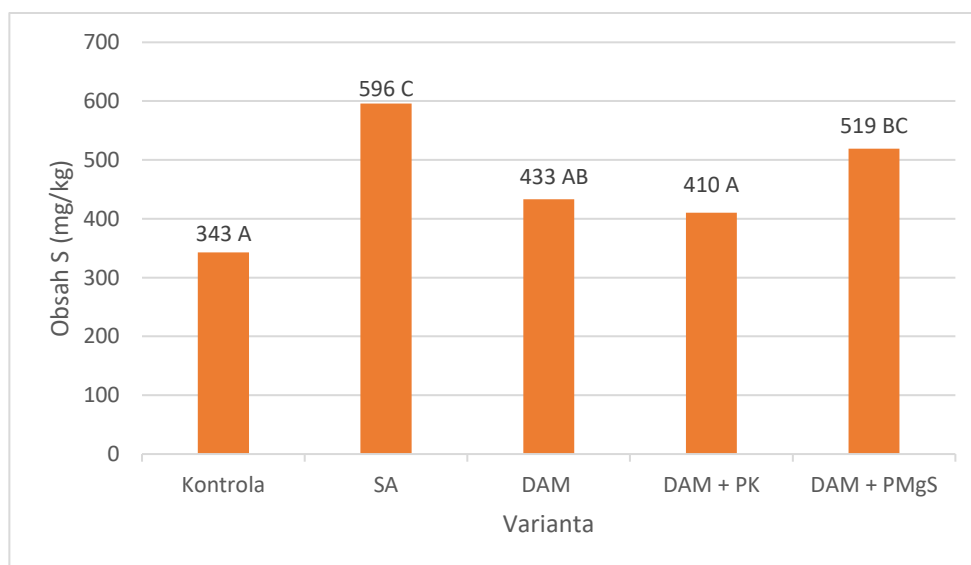
### 5.1.2 Obsahy S v biomase rostlin

Graf 3 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2018 (mg S/kg)



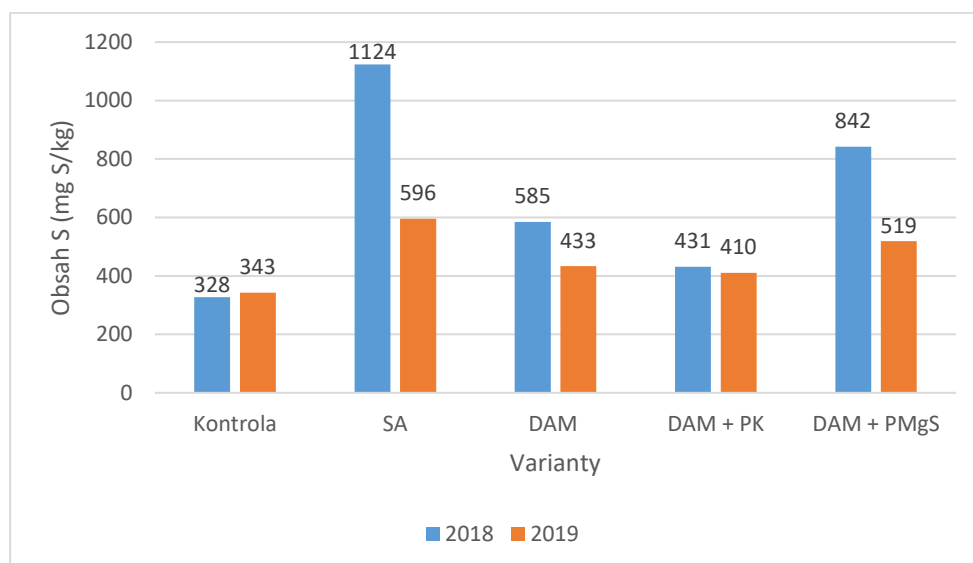
Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 4 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2019 (mg S/kg)



Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 5 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2018 a 2019 (mg S/kg)



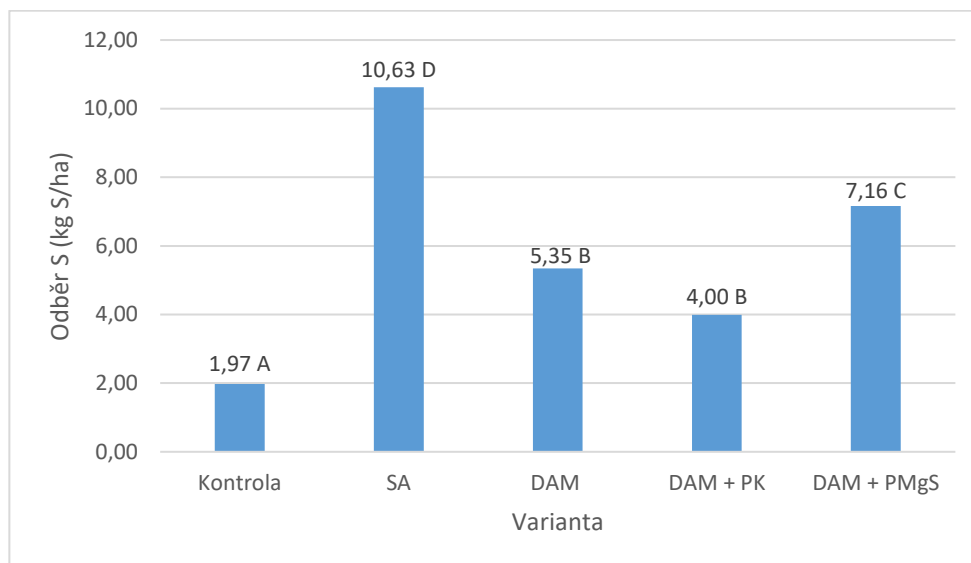
Na grafu 3 je vidět obsah síry v biomase v roce 2018. Statisticky podobné byly varianty DAM + PK a kontrolní varianta, a také DAM a DAM + PK. I přesto že v obou případech se vyskytuje varianta DAM + PK, tak varianty kontrolní a DAM vykazují statistickou odlišnost. Vysokých hodnot obsahu S dosahují varianty hnojené sírou, přičemž nejvyšší obsah byl u varianty hnojené síranem amonným, dále u varianty DAM byl naměřen vyšší obsah S než u kontrolní varianty.

Graf 4 zobrazuje obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2019. Statistickou podobnost jevíly obě varianty hnojené sírou, tedy varianta DAM + PMgS a variant hnojená síranem amonným, zde byly nejvyšší hodnoty měření. Nejnižší hodnota byla naměřena na kontrolní variantě, a to v průměru 343 mg S/kg. Tato varianta vykazuje statisticky významnou podobnost s variantami DAM a DAM + PMgS.

V grafu 5 jsou obsahy S v biomase kukuřice z obou let. V roce 2019 byl nižší obsah biomasy na všech variantách, s výjimkou kontrolní, kde lze zaznamenat meziročně mírný nárůst. Prudký pokles je na variantách hnojených hnojivem se sírou, kdežto ostatní hnojené varianty poklesly mírněji. U varianty DAM + PK byl obsah síry v obou letech podobný, byl zde zaznamenán pokles průměrné hodnoty pouze o 21 mg S/kg.

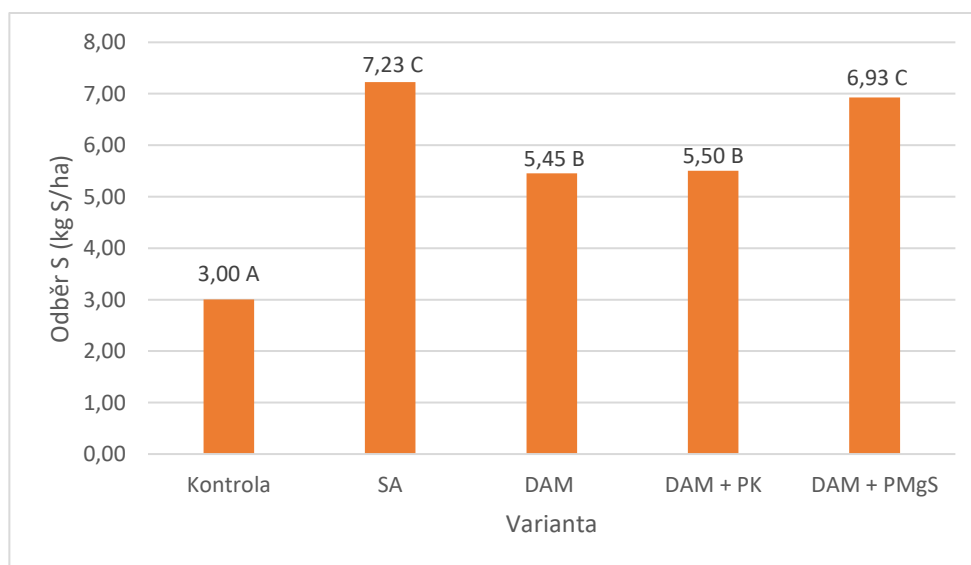
### 5.1.3 Odběr S rostlinami kukuřice

Graf 6 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2018 (kg S/ha)



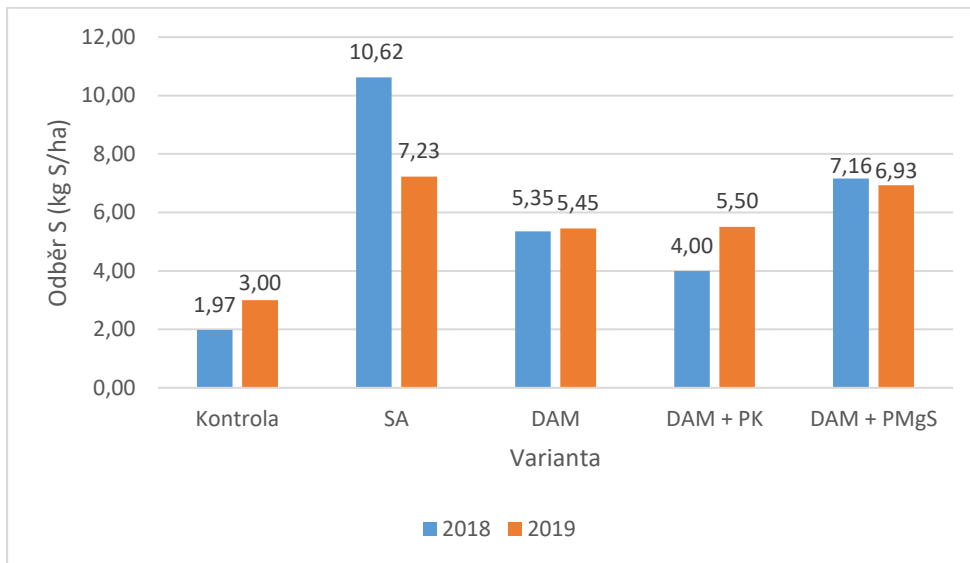
Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 7 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2019 (kg S/ha)



Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 8 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2018 a 2019 (kg S/ha)



Z grafu 6 je zřejmá odlišnost naměřených hodnot, statistická podobnost byla pouze u variant DAM a DAM + PK, zde se hodnoty pohybovaly lehce pod středem spektra. Nejvyšší odběr síry byl na variantách hnojených sírou a nejnižší u kontrolní varianty, pouze 1,97 kg S/ha. Pro porovnání u varianty hnojené síranem amonným dosahoval odběr 10,63 kg S/ha.

Graf 7 zobrazuje hodnoty odběru v roce 2019. Nejvyšší hodnoty odběrů jsou opět u variant hnojených sírou, ale tentokrát je mezi těmito variantami statisticky významná podobnost a hodnoty odběru se pohybují okolo 7 kg S/ha. Statisticky významná podobnost je také u variant DAM a DAM + PK, zde se hodnoty odběru pohybují nad hodnotou 5 kg S/ha. Nejnižší hodnota odběru je u kontrolní varianty.

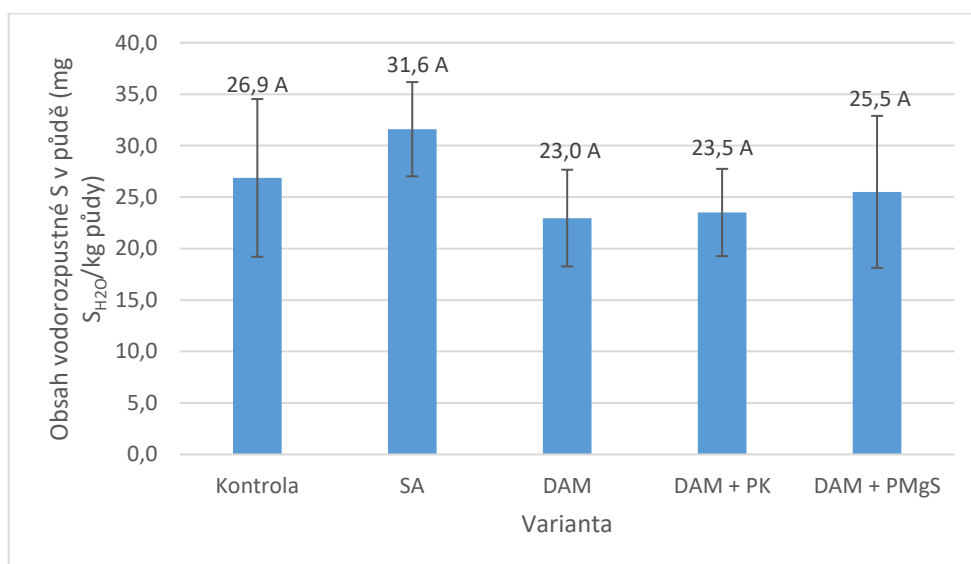
V roce 2019 byly nižší odběry síry u variant hnojené síranem amonným (graf 8), přičemž průměr odběru této varianty poklesl o více než 3 kg/ha. Odběr vzrostl u varianty hnojené DAM + PK a také u kontrolní varianty. Varianty DAM a DAM + PMgS měly v obou letech přibližně stejný odběr.

## 5.2 Výsledky rozborů půdy

Z rozborů půdy byly v bakalářské práci zpracovány obsahy vodorozpuštěné síry z roku 1997 a 2019.

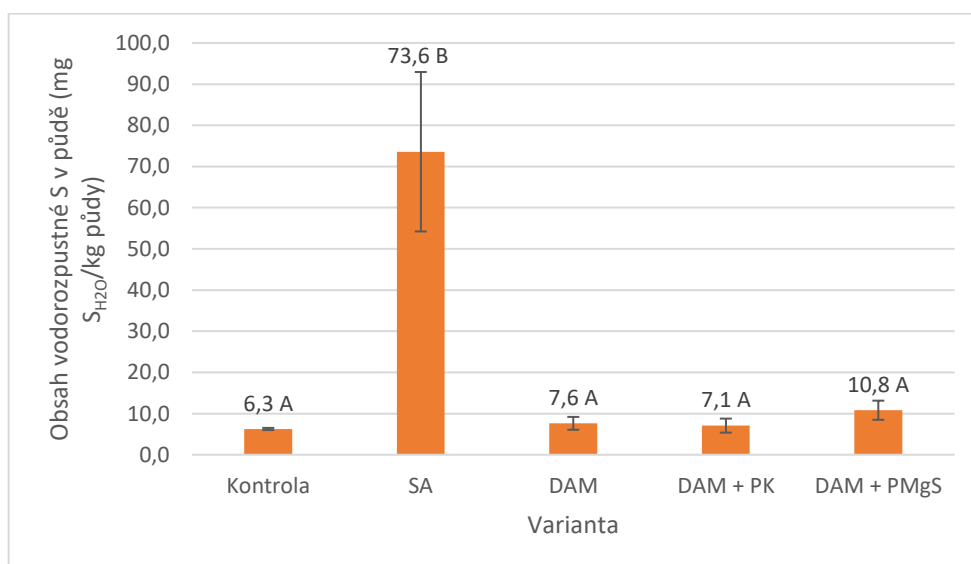
### 5.2.1 Obsah vodorozpuštěné S v půdě

Graf 9 Obsah vodorozpuštěné S v roce 1997 (mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy)



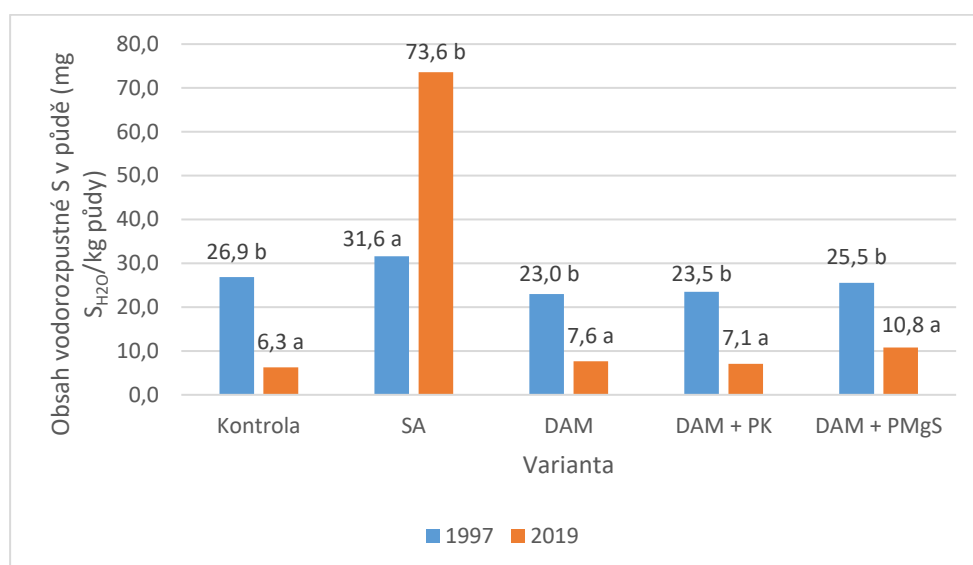
Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 10 Obsah vodorozpuštěné S v roce 2019 (mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy)



Rozdílná velká písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi variantami v jednom roce,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Graf 11 Obsahy vodorozpustné S v roce 1997 a 2019 (mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy)



Rozdílná malá písmena popisují statisticky významné rozdíly mezi lety na jedné variantě,  $p < 0,05$ . Tukey HSD test.

Obsah vodorozpustné síry v roce 1997 (graf 9) je statisticky podobný u všech variant, malé rozdíly mezi jednotlivými variantami jsou způsobeny zřejmě poměrně krátkou dobou pokusu (5 let). Obsah u žádné varianty nepřekročil 40 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy.

V roce 2019 (graf 10) již pokus trval poměrně dlouhou dobu a lze zde pozorovat vysokou hodnotu obsahu vodorozpustné síry u varianty hnojené síranem amonným. Všechny varianty, kromě varianty hnojené síranem amonným, vykazují statisticky významnou podobnost a hodnoty odběru se zde pohybují v pod 11 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy.

V roce 2019 (graf 11) je na všech variantách statisticky významný rozdíl mezi lety, u varianty hnojené síranem amonným došlo k výraznému nárůstu průměrných hodnot z 31,6 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy v roce 1997 na hodnotu 73,6 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy v roce 2019, u ostatních variant je zřejmý výrazný pokles, a to u všech na méně než polovinu hodnoty z roku 1997, u kontrolní varianty došlo k poklesu až na 6,3 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy, což je pouze 23,42 % hodnoty z roku 1997.

## 6 Diskuze

V pokusu je hodnoceno, jak se pokles atmosférických depozic síry z ovzduší projevuje na zásobenosti síry v půdě a s tím souvisejícím nižším příjmem síry rostlinou a jejím obsahem v sušině. Dále je posuzováno, jaký vliv na tyto parametry mají různé varianty hnojení a jaký vliv mají hnojiva se sírou a bez síry na výnos, příjem síry rostlinami a obsah síry v sušině rostliny a v půdě.

### 6.1 Výnos biomasy kukuřice

Z výsledků vyplívá, že množství biomasy sušiny u kukuřice v roce 2018 a 2019 nebylo statisticky odlišné u různých variant hnojení, lišila se varianta kontrolní v obou hodnocených letech. Vaněk et al. (2001) uvádějí, že nižší množství síry se projevuje primárně zhoršením kvalitativních parametrů produkce. Dle Richter (2005) je pro optimální a kvalitní výnos nutná vyrovnaná výživa. Zde se statistický rozdíl neprojevil. Varianta DAM, hnojená pouze hnojivem s dusíkem, měla obdobné výnosy v obou hodnocených letech jako varianty DAM + PK a DAM + PMgS. Zajímavý je rozdíl mezi variantami DAM a DAM + PK. Na variantu DAM + PK bylo hnojeno třemi hlavními živinami, konkrétně dusíkem, draslíkem a fosforem. Byla zde byla aplikována stejná dávka dusíku, tedy 120 kg/ha/rok, navíc oproti variantě DAM bylo dodáno 30 kg P/ha/rok a 150 kg K/ha/rok, a přesto mezi variantami nebyla statisticky významná rozdílnost. Na variantu DAM + PMgS bylo aplikováno 120 kg N/ha/rok, 30 kg P/ha/rok, 60 kg Mg/ha/rok a 84 kg S/ha/rok a výnosy i zde byly obdobné jako u ostatních hnojených variant. Je zřejmé, že na stanovišti byla dostatečná zásoba fosforu a draslíku v půdě a že P/K hnojení neovlivnilo výnos.

Vliv dávek síry na výnos zkoumali Khan et al. (2006), kteří pozorovali nárůst výnosu u kukuřice při rostoucích dávkách síry v hnojivech. V našich pokusech se vliv rozličných dávek síry na výnosy silážní kukuřice neprojevil. Rozdíly v dávkách síry byly výrazné. Na variantu DAM + PMgS bylo aplikováno 84 kg S/ha/rok a na variantu SA, tedy variantu hnojenou síranem amonným, bylo aplikováno o 142 kg S/ha/rok více oproti variantám, kam se sírou nehnojilo a rozdíl ve výnosu biomasy kukuřice v sušině se zde statisticky neprojevil.

Ciampitti & Vyn (2012) uvádějí, že na nárůst výnosu u kukuřice má vliv především množství dusíku v hnojivech. Zde jsou výsledky pokusu v souladu s těmito závěry, neboť byl statisticky významný rozdíl mezi kontrolní variantou a hnojenými variantami. Pro porovnání na všechny hnojené varianty byla aplikována stejná dávka dusíku, a to 120 kg/ha/rok. Na kontrolní variantu dusíky aplikován nebyl. Kontrolní varianta měla v roce 2018 výnos 6,03 t sušiny/ha a v roce 2019 8,76 t sušiny/ha. Hnojené varianty dosahovaly v roce 2018 výnosu mezi 8,5 a 9,5 t sušiny/ha. V roce 2019 byl u hnojených variant nejnižší výnos 12,13 t sušiny/ha (SA) a nejvyšší 13,40 t sušiny/ha (DAM + PK). Z toho vyplívá, že rozdíl v dávce 120 kg N/ha/rok se projevil zvýšením výnosu silážní kukuřice v obou hodnocených letech o hodnotu 2,5 až 5 t sušiny/ha.

V roce 2019 byl výrazně vyšší výnos sušiny biomasy na všech variantách hnojení. Tento vyšší výnos byl způsoben vlivem ročníku. V roce 2018 dosahoval roční úhrn srážek na Výzkumné stanici v Červeném Újezdu 334 mm a v roce 2019 479 mm (Archiv KAVR 2023). Dle závěrů Huang et al. (2015) je vliv srážek na výnos kukuřice výrazný. Jak již bylo uvedeno, tak hnojené varianty dosahovaly v roce 2018 výnosu mezi 8,5 a 9,5 t sušiny/ha a v roce 2019 byl nejnižší výnos u hnojené varianty 12,13 t sušiny/ha (SA) a nejvyšší 13,40 t sušiny/ha (DAM + PK).

## 6.2 Obsah vodorozpustné síry v půdě

Obsah vodorozpustné síry byl hodnocen v roce 1997 a 2019. Obsah vodorozpustné síry v roce 1997 vykazuje u všech variant obdobné výsledky. Vlivem inputu z atmosférických depozic. Obsahy kolísají mezi 20 a 30 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy, pouze u varianty hnojené síranem amonným překročily hodnoty 30 mg  $S_{H_2O}$ /kg. To, že se nadbytek síry z atmosférických depozic neakumuloval, vysvětlují Černý et al. (2011) ztrátami síry vyplavením z půdy, ve formě iontu  $SO_4^{2-}$ . Ke stejným závěrům došli Huang et al. (2020), jež uvádějí, že na pozemcích s vyšším množstvím srážek je méně dostupné síry. Ložek et al. (2011) uvádějí ztráty síry vyplavením okolo 30 kg S/ha/rok (Slovensko).

V roce 2019 atmosférické depozice již dosahovaly nízké úrovně a průměrná roční depozice síry na území České republiky byla 4,18 kg S/ha/rok (ČHMÚ 2021), množství síry v půdě tak bylo v převážné míře závislé na množství síry dodávané hnojivou. Oproti roku 1997 byl vyšší obsah vodorozpustné síry pouze u varianty hnojené síranem amonným, jinak všechny varianty poklesly, což je v souladu se závěry Kulhánek et al. (2011), jež uvádějí, že došlo k úbytku minerálních forem síry v půdách v ČR. Pokles množství síry v půdě vlivem snižujících se atmosférických depozic pozorovali také Feinberg et al. (2021) (Evropa).

Obsah vodorozpustné síry na variantě hnojené síranem amonným byl 73,6 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Jedná se tedy o nárůst na více než dvojnásobnou hodnotu oproti roku 1997. Důvodem byly vysoké dávky síry v minerálním hnojivu, celkem 142 kg S/ha/rok. Oproti tomu u ostatních variant se množství vodorozpustné síry v půdě snížilo. Obsahy se zde pohybovaly mezi 6 a 12 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Nejvyšší pokles byl u kontrolní varianty, kde obsah vodorozpustné síry v roce 2019 dosahoval hodnoty pouze 6,3 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Na variantě DAM + PMgS dosahoval obsah vodorozpustné síry v půdě 10,8 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Mezi touto variantou a variantami kam nebylo sírou hnojeno je statisticky významná podobnost i když se lišily v dávce 84 kg S/ha/rok. To lze vysvětlit vyplavením části vodorozpustné síry. Určité množství síry bylo také získáno mineralizací posklizňových zbytků z minulých let. Tím, že bylo odlišné množství posklizňových zbytků s různým obsahem síry, lze předpokládat, že také množství S uvolněné mineralizací bylo na jednotlivých variantách odlišné.



### 6.3 Obsah S v sušině biomasy a odběr S rostlinami kukuřice

Obsah S v sušině biomasy byl vyšší na variantách, kde bylo sírou hnojeno, což potvrzují Pavlíková et al. (2011), jež uvádějí, že příjem i asimilaci síry si rostliny efektivně řídí v závislosti na dostupnosti síry v prostředí a potřebě rostliny, stejné závěry uvádějí i Capaldi et al. (2015). Ke stejným výsledkům došli i Bharathi & Poongothai (2008), kteří uvádějí nárůst síry v biomase při zvyšujících se dávkách síry v hnojivech. Je to v souladu s výsledky, kde byl nejvyšší obsah vodorozpustné síry na variantě hnojené síranem amonným a bylo zde i nejvyšší množství síry v sušině. Varianta hnojená DAM + PMgS měla také vyšší obsah síry v sušině než ostatní varianty, v roce 2018 842 mg S/kg sušiny a v roce 2019 519 mg S/kg sušiny. Varianty DAM a DAM + PK obsahovaly v biomase sušiny v obou letech mezi 400 a 600 mg S/kg, mezi variantami je statisticky významná podobnost. Kontrolní varianta měla nejnižší obsah ze všech variant, což souvisí s nižším příjmem síry.

Jak uvádějí Vaněk et al. (2001), tak při vyšším množství dostupné síry rostliny zvyšují její příjem. Z pokusu je zřejmé, že na variantách hnojených sírou byl vyšší odběr. Nejvíce síry odebrala varianta SA, která v roce 2018 odebrala 10,63 kg S/ha a v roce 2019 7,23 kg S/ha. O něco méně odebrala varianta DAM + PMgS, kam bylo hnojeno sírou v nižší dávce. Zajímavé je, že varianty DAM a DAM + PK odebraly v obou hodnocených letech mezi 4 až 6 kg S/ha a jevíly statistickou významnou podobnost v obou hodnocených letech. Odběr síry zde byl statisticky odlišný než u kontrolní varianty i přesto, že na žádnou z uvedených variant sírou hnojeno nebylo. Nejnižší množství odebrala kontrolní varianta, kde hodnoty dosahovaly méně než poloviny oproti variantě SA, v roce 2019 zde byl odběr 3 kg S/ha. Tento rozdíl je v souladu s Kopriva & Rennenberg (2004), jež uvádějí souvislost mezi příjmem a asimilací S a N u rostlin, tedy při deficitu N se snižuje příjem S. Rostliny na všech variantách, s výjimkou varianty hnojené síranem amonným, odebíraly podobné množství síry v obou letech i když tvořily různé množství biomasy.

## 7 Závěr

Na všech variantách, s výjimkou varianty hnojené síranem amonným, pokleslo množství vodorozpustné síry na hodnoty pod 15 mg  $S_{H_2O}$ /kg půdy. Pokles se odvíjel od snižujících se dávek síry z atmosférických depozic. Vyšší hodnoty byly naměřeny pouze na variantě hnojené síranem amonným, kam bylo dodáváno velmi vysoké množství síry (142 kg S/ha). Jsou zřejmé i ztráty síry vyplavením, neboť množství vodorozpustné síry bylo nízké i při aplikaci 84 kg S/ha. Z toho vyplývá, že při nadprůměrných dávkách síry v minerálních hnojivech nedochází k nárůstu obsahu vodorozpustné síry v půdě a zvyšuje se riziko ztráty vyplavením.

Pokles atmosférických depozic tedy způsobil nutnost pravidelného hnojení sírou na pozemcích, kde jsou pěstovány rostliny náročné na síru. Zatímco v roce 1997 byla dostatečná zásoba síry v půdě pro rostliny bez ohledu na aplikovaná hnojiva, tak v roce 2019, již bylo množství dostupné síry odvislé od množství síry v aplikovaných hnojivech.

Hnojení sírou se neprojevovalo na zvýšeném výnosu biomasy kukuřice. U variant hnojených sírou se zvýšil obsah síry v rostlinách a v důsledku toho byl i vysoký celkový odběr síry nadzemní biomasou silážní kukuřice.

## 8 Literatura

Apodaca L. 2019. Mineral Commodity Summaries 2019. U.S. Geological Survey, Reston, VA. Available at <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/sulfur-statistics-and-information> (accessed February 25, 2022).

Archiv KAVR. 2023. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Balík J, Černý J, Tlustoš P, Sýkora K, Štípek K. 2001. Výživa a hnojení ozimé řepky sírou. Pages 49-55 in Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry v rostlinné výrobě. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Balík J, Kulhánek M, Černý J, Száková J, Pavlíková D, Čermák P. 2009. Differences in soil sulfur fractions due to limitation of atmospheric deposition. *Plant, Soil and Environment* **55**:344-352.

Bharathi C, Poongothai S. 2008. Direct and residual effect of sulphur on growth, nutrient uptake, yield and its use efficiency in maize and subsequent greengram. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* **4**:368-372.

Bečka D, Bokor P, Vašák J. 2022. Stav porostů řepky a první jarní práce. Agromanuál. Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/stav-porostu-repky-a-prvni-jarni-prace> (accessed March 19, 2022).

Berglen TF, Berntsen TK, Isaksen ISA, Sundet JK. 2004. A global model of the coupled sulfur/oxidant chemistry in the troposphere: The sulfur cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **109**. DOI: 10.1029/2003JD003948.

Capaldi FR, Gratao PL, Reis AR, Lima LW, Azevedo RA. 2015. Sulfur metabolism and stress defense responses in plant. *Tropical Plant Biology* **8**:60-73.

Ciampitti IA, Vyn TJ. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research* **133**:48-67.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Vašák F. 2011. Bilance S v dlouhodobých pokusech. Pages 32-39 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Černý J, Kulhánek M, Sedlář O, Balík J, Javor T, Suran P. 2020. Vhodná dávka síry a termín aplikace při jarním hnojení ozimé pšenice. Agromanuál. Available at

<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vhodna-davka-siry-a-termin-aplikace-pri-jarnim-hnojeni-ozime-psenice> (accessed March 16, 2022).

ČHMÚ. 2001. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2000. Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Available at <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr00cz/obsah.html> (accessed March 11, 2022).

ČHMÚ. 2005. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2004. Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Available at <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr04cz/obsah.html> (accessed March 11, 2022).

ČHMÚ. 2011. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2010. Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Available at <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr10cz/obsah.html> (accessed March 11, 2022).

ČHMÚ. 2016. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2015. Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Available at [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/Obsah\\_CZ.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/Obsah_CZ.html) (accessed March 12, 2022).

ČHMÚ. 2021. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020. Český hydrometeorologický ústav - Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha. Available at [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/Obsah\\_CZ.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/Obsah_CZ.html) (accessed March 12, 2022).

Droux M. 2004. Sulfur Assimilation and the Role of Sulfur in Plant Metabolism: A Survey. *Photosynthesis Research* **79**:331-348.

Eriksen J. 2009. Soil Sulfur Cycling in Temperate Agricultural Systems. *Advances in Agronomy* **102**:55-89.

Feinberg A, Stenke A, Peter T, Hinckley E-LS, Driscoll CT, Winkel LHE. 2021. Reductions in the deposition of sulfur and selenium to agricultural soils pose risk of future nutrient deficiencies. **2**. DOI: [10.1038/s43247-021-00172-0](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00172-0).

Font-Palma C. 2019. Methods for the treatment of cattle manure—a review. *C* **5**:27.

Freney JR. 1986. Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. *Sulfur in agriculture* **27**:207-232.

Hell R. 1997. Molecular physiology of plant sulfur metabolism. *Planta* **202**:138-148.

- Hoefgen R, Nikifora VJ. 2007. Metabolomics integrated with transcriptomics: assessing systems response to sulfur-deficiency stress. *Physiologia Plantarum* **132**:190-198.
- Huang C, Duiker S, Deng L, Fang C, Zeng W. 2015. Influence of Precipitation on Maize Yield in the Eastern United States. *Sustainability* **7**:5996-6010.
- Huang C, Yermiyahu U, Shenker M, Ben-Gal A. 2020. Effect of leaching events on the fate of polyhalite nutrient minerals used for crop fertilization. *Journal of Plant Nutrition* **43**:2518-2532
- Khan MJ, Khan MH, Khattak RA, Jan MT. 2006. Response of Maize to Different Levels of Sulfur. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **37**:41-51.
- Kirby EA, Mengel K. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Kertesz MA, Mirleau P. 2004. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. *Journal of Experimental Botany* **55**:1939-1945.
- Kopriva S, Rennenberg H. 2004. Control of sulphate assimilation and glutathione synthesis: interaction with N and C metabolism. *Journal of Experimental Botany* **55**:1831-1842.
- Kulhánek M, Balík J, Černý J. 2011. Změny obsahu a forem síry v půdách. Pages 27-31 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.
- Kulhánek M, Balík J, Vaněk V, Pavlíková D, Černý J. 2013. Využití analýz frakcí minerální síry v půdě k optimalizaci hnojení. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Kulhánek M, Balík J, Sedlář O, Zbírál J, Smatanová M, Suran P. 2018. Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Kusá H, Růžek P, Vavera R. 2019. Využití digestátu při hnojení kukuřice. Agromanuál. Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vyuziti-digestatu-pri-hnojeni-kukurice> (accessed March 19, 2022).
- KWS. 2023. Agricultural fertilisation in maize – optimal support for an ideal development. Available at <https://www.kws.com/gb/en/consulting/plant-growth-management/fertilisation/fertilisation-of-maize/> (accessed April 1, 2023).
- Ložek O, Slamka P, Kajanovičová I, Hanková H. 2011. Bilancia S a použitie hnojív so S na Slovensku. Pages 61-66 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití

hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Marschner P. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Academic press, London.

Matula J. 2011. Diagnostika výživného stavu rostlin sírou. Pages 48-57 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Communications in Soil Science and Plant Analysis **15**:1409-1416.

Mudd JB, Kozlowski TT. 1975. Responses of plants to air pollution. Academic Press, New York.

Nagy J. 2006. Maize production. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Pavlíková D, Vaněk V, Pavlík M, Kolář L. 2011. Úloha síry v rostlinách a její potřeba pro rostliny. Pages 21-26 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Pfennig WB. 2015. Principles of Inorganic Chemistry. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

Richter R. 2005. Multimediální učební texty z výživy rostlin: Kukuřice. Available at [https://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/hnojeni\\_plodin/html/obilniny/kukurice.htm#n%C3%A1roky%20na%20p%C5%AFdu%20a%20organick%C3%A9%20hnojen%C3%AD](https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/html/obilniny/kukurice.htm#n%C3%A1roky%20na%20p%C5%AFdu%20a%20organick%C3%A9%20hnojen%C3%AD) (accessed March 16, 2022).

Sedlář O, Balík J, Kulhánek M, Suran P, Matěchová M. 2020. Inovace diagnostiky výživného stavu plodin fosforem a sírou. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Scherer HW. 2001. Sulphur in crop production — invited paper. European Journal of Agronomy **14**:81-111.

Scherer HW. 2009. Sulfur in soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science **172**:326-335.

Singh A, Agrawal M. 2008. Acid rain and its ecological consequences. Journal of Environmental Biology **29**:15-24.

Smith MB. 2020. Biochemistry : An Organic Chemistry Approach. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.

Smith SJ, Aardenne J, Klimont Z, Andres RJ, Volke A, Delgado AS. 2011. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics* **11**:1101-1116.

Solaimalai A, Anantharaju P, Irulandi S, Theradimani M. 2020. *Maize Crop: Improvement, Production, Protection and Post Harvest Technology*. Taylor & Francis Group, London.

Škarpa P, Školníková M, Antošovský J, Richter R. 2020. Síra na list - vhodný doplněk výživy máku. *Agromanuál*. Available at <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/sira-na-list-vhodny-doplnek-vyzivy-maku> (accessed March 19, 2022).

Suran P, Kulhánek M, Balík J, Černý J, Sedlář O. 2021. Evaluation of Soil S Pools under 23 Years of Maize Monoculture. *Agronomy* **11**:2376. DOI: 10.3390/agronomy11122376.

Tlustoš P, Pavlíková D, Balík J, Száková J. 2001. Koloběh síry v půdě a v prostředí. Pages 20-26 in Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry v rostlinné výrobě*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Tlustoš P, Švehla P, Pavlík M, Hanč A. 2007. *Agrochemie*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Tlustoš P, Pavlíková D, Vaněk V, Habart J. 2011. Síra v životním prostředí. Pages 15-20 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Valenta J. 2011. Sortiment hnojiv se sírou a její zdroje. Pages 58-60 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Vaněk V, Kolář L, Štípek K, Jakl M. 2001. Úloha síry v rostlinách a její potřeba. Pages 27-34 in Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry v rostlinné výrobě*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, Praha.

Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press, Praha.

Velthof G, Schooten H, Dijk W. 2020. Optimization of the Nutrient Management of Silage Maize Cropping Systems in The Netherlands: A Review. *Agronomy* **10**. DOI: 10.3390/agronomy10121861.

Wang J, Solomon D, Lehmann J, Zhang X, Amelung W. 2006. Soil organic sulfur forms and dynamics in the Great Plains of North America as influenced by long-term cultivation and climate. *Geoderma* **133**:160-172.

Wenche A, et al. 2019. Global and regional trends of atmospheric sulfur. *Scientific reports* **9**:1-11.

Zimolka J, et al. 2008. *Kukuřice: hlavní a alternativní užitkové směry*. Profi press, Praha.



## 9 Seznam tabulek a grafů

### 9.1 Tabulky

Tabulka 1 Růstové fáze kukuřice (Zimolka et al. 2008) .....	22
Tabulka 2 Charakteristika experimentálního stanoviště v Červeném Újezdu (Suran et al. 2021) .....	28
Tabulka 3 Množství živin aplikovaných na jednotlivé varianty pokusu (Suran et al. 2021) .....	29

### 9.2 Grafy

Graf 1 Výnos biomasy kukuřice v roce 2018 (t sušiny/ha) .....	31
Graf 2 Výnos biomasy kukuřice v roce 2019 (t sušiny/ha) .....	31
Graf 3 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2018 (mg S/kg) .....	33
Graf 4 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2019 (mg S/kg) .....	33
Graf 5 Obsah S v biomase rostlin kukuřice v roce 2018 a 2019 (mg S/kg) .....	34
Graf 6 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2018 (kg S/ha) .....	35
Graf 7 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2019 (kg S/ha) .....	35
Graf 8 Odběr S rostlinami kukuřice v roce 2018 a 2019 (kg S/ha) .....	36
Graf 9 Obsah vodorozpustné S v roce 1997 (mg S <sub>H2O</sub> /kg půdy) .....	37
Graf 10 Obsah vodorozpustné S v roce 2019 (mg S <sub>H2O</sub> /kg půdy) .....	37
Graf 11 Obsahy vodorozpustné S v roce 1997 a 2019 (mg S <sub>H2O</sub> /kg půdy) .....	38