Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin

Příjem mikroprvků ozimou pšenicí ve vztahu k příjmu síry

Bakalářská práce

Michaela Zmeškalová

Rostlinná produkce

Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Příjem mikroprvků ozimou pšenicí ve vztahu k příjmu síry" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. dubna 2021 _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Ondřeji Sedlářovi, Ph.D. za ochotu, pomoc a cenné rady při psaní mé bakalářské práce. Dále bych také chtěla poděkovat svým spolužákům, kteří mi zpříjemňovali celé studium. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodičům za podporu během mého studia.

Příjem mikroprvků ozimou pšenicí ve vztahu k příjmu síry

Souhrn

Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) je z mnoha důvodů nejvýznamnější obilninou nejenom pro Českou republiku, ale i celosvětově. Kromě přizpůsobivosti a vysokých výnosů je pšenice významným zdrojem železa a zinku. U velké části lidské populace je příjem těchto mikroprvků nedostatečný, proto je důležitý jejich obsah v obilninách. Mikroprvky jsou důležité nejen pro lidský organismus, ale také pro zvířata a rostliny.

Síra patří mezi nejdůležitější makroprvky ve výživě rostlin, jelikož je stavebním prvkem esenciálních aminokyselin, konkrétně cysteinu a methioninu. Pro optimální růst a vývoj rostlin je síra nezbytnou živinou, která se podílí na kvalitě rostlinných produktů, které poté získáváme. A právě síra může být dobrým prostředkem agronomického biologického obohacení pšenice, za účelem zvýšení obsahu a absorpce mikroživin, jako jsou Fe, Mn, Zn a Cu.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jestli přijatelná síra v půdě ovlivňuje příjem sledovaných mirkoprvků, a pokud ano, tak do jaké míry. Dalším cílem této práce bylo posoudit, jakým extrakčním činidlem je vhodnější stanovit přijatelný obsah síry v půdě z hlediska vztahu s obsahem sledovaných mikroprvků v rostlinách, v tomto případě v ozimé pšenici. Porovnávali jsme extrakční činidla Mehlich 3 a vodný výluh. V experimentální části této práce jsme se zaměřili pouze na alkalické půdy.

Vzorky půdy a nadzemní biomasy ozimé pšenice byly odebrány z polních provozů v deseti okresech v České republice v letech 2015 – 2020. Pro vyhodnocení byly odebrány vzorky nadzemní biomasy ve fázi konce kvetení (BBCH 65 – 69). Půdní vzorek byl odebrán během jarní regenerace v hloubce orničního profilu (0 – 30 cm).

Z výsledků bylo zjištěno, že vztah mezi obsahem přijatelné síry a obsahem sledovaných mikroprvků v nadzemní biomase ozimé pšenice nebyl žádný. U analyzovaných výsledků pro železo, byl viditelný určitý trend mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem železa v nadzemní biomase ozimé pšenice. Nicméně ani tyto výsledky nebyly jasně průkazné.

Stanovené množství přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3 vyšlo rovnocenně s výsledky již ověřené extrakční metody, tj. vodným výluhem. Byla potvrzena hypotéza o tom, že extrakční činidlo Mehlich 3 je spolehlivou a rovnocennou alternativou pro stanovení přijatelné síry na alkalických půdách, stejně jako je vodný výluh. V tomto pokusu nebyla extrakční účinnost metody Mehlich 3 výrazně ovlivněna alkalickým pH analyzovaných půd.

Metodu Mehlich 3 je možné doporučit jako metodu vhodnou pro stanovení dostupné síry v půdě, a to i v případě alkalických půd.

Klíčová slova: antagonismus, mikroprvky, příjem živin, síra, synergismus

Microelements Uptake by Winter Wheat in Relation to Sulphur Uptake

Summary

Winter wheat (*Triticum aestivum*) is for many reasons the most important cereal not only for the Czech Republic but also worldwide. In addition to adaptability and high yields, wheat is an important source of iron and zinc. In a large part of the human population, the intake of these microelements is insufficient, so their content in cereals is important. Microelements are important not only for the human body but also for animals and plants.

Sulphur is one of the most important macroelements in plant nutrition, as it is a building block of essential amino acids, namely cysteine and methionine. For optimal plant growth and development, sulphur is an essential nutrient, which contributes to the quality of plant products, which we then obtain. And sulphur can be a good means of agronomic biological enrichment of wheat, to increase the content and absorption of micro-nutrients such as Fe, Mn, Zn, and Cu.

This bachelor thesis aimed to determine whether acceptable sulphur in the soil affects the intake of monitored microelements, and if so, to what extent. Another aim of this work was to assess which extraction agent is more appropriate to determine the acceptable sulphur content in the soil in terms of the relationship with the content of the monitored microelements in plants, in this case in winter wheat. We compared Mehlich 3 extraction reagents and aqueous extract. In the experimental part of this work, we focused only on alkaline soils.

Samples of soil and aboveground biomass of winter wheat were taken from field operations in ten districts in the Czech Republic in the years 2015 – 2020. Samples of aboveground biomass at the end of the flowering phase (BBCH 65 - 69) were taken for evaluation. The soil sample was taken during the spring regeneration at the depth of the topsoil profile (0 - 30 cm).

From the results, there was found no relationship between the content of bioavailable sulphur and the content of the monitored microelements in the above-ground biomass of winter wheat. In the analyzed results for iron, a certain trend was visible between the content of acceptable sulphur in the soil and the content of iron in the above-ground biomass of winter wheat. However, even these results were not clearly conclusive.

The determined amount of bioavailable sulphur in soil by the Melich 3 were equal to the amount determined by the already verified extraction method, i.e. aqueous extract. The hypothesis that the Mehlich 3 extractant is a reliable and equivalent alternative for the determination of acceptable sulphur on alkaline soils, as is aqueous leaching, has been confirmed. In this experiment, the extraction efficiency of the Mehlich 3 method was not significantly affected by the pH of the analyzed soils.

The Mehlich 3 method can be recommended as a suitable method for determining the available sulphur in the soil, even in the case of alkaline soils.

Keywords: antagonism, microelements, nutrient uptake, sulphur, synergism

Obsah

1 Úvod 8

2 Cíle práce 9

3 Hypotézy 9

4 Literární rešerše 10

4.1 Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) 10

4.1.1 Význam a využití pšenice 10

4.1.2 Požadavky na pěstování pšenice 10

4.1.2.1 Výběr stanoviště 10

4.1.2.2 Osevní postup 11

4.1.2.3 Zpracování půdy pro pšenici ozimou 11

4.1.2.4 Setí 12

4.1.2.5 Výživa a hnojení pšenice 12

4.1.2.6 Ochrana a ošetření porostu pšenice ozimé 13

4.1.3 Sklizeň pšenice ozimé 13

4.1.4 Plochy osevů pšenice ozimé 14

4.2 Síra v rostlině 14

4.2.1 Funkce síry v rostlině 14

4.2.2 Projevy nedostatku síry v rostlině 15

4.3 Síra v půdě 15

4.3.1 Formy síry v půdě 15

4.3.2 Stanovení přijatelné síry v půdě 16

4.4 Hnojení sírou 17

4.4.1 Nároky plodin na síru 18

4.4.2 Aplikace hnojiv se sírou 18

4.4.3 Vstupy síry do půdy v ČR 18

4.4.4 Souvislost síry s výnosem a kvalitou produkce 19

4.4.5 Hnojiva obsahující síru 20

4.4.6 Určování dávky hnojiv 21

4.5 Mikroprvky 22

4.5.1 Význam mikroprvků pro rostlinu 22

4.5.2 Vztahy mikroprvků se sírou – antagonismus / synergismus 22

4.5.3 Význam vybraných mikroprvků pro rostlinu 23

4.5.4 Význam mikroprvků pro člověka 25

5 Metodika 26

5.1 Odběr vzorků z polních provozů 26
5.2 Chemické analýzy 26

6 Výsledky 27
6.1 Výsledky pro vybrané mikroprvky 27
6.1.1 Mangan 27
6.1.2 Zinek 28
6.1.3 Železo 29

7 Diskuze 31
7.1 Vliv přijatelné síry na příjem mikroprvků ozimou pšenicí 31
7.2 Srovnání vodného výluhu a metody Mehlich 3 při stanovení přijatelné síry v alkalických půdách 32

8 Závěr 33

9 Literatura 34

1 Úvod

Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) je z mnoha důvodů nejvýznamnější obilninou nejenom pro Českou republiku, ale i celosvětově. Pšenice je prakticky univerzální a pro mnoho potravinářských výrobků je nejvhodnější obilninou. Dalšími kladnými vlastnostmi pšenice jsou její výnosové schopnosti, variabilita odrůd a další (Diviš et al. 2010). Kromě přizpůsobivosti a vysokých výnosů je pšenice významným zdrojem železa a zinku (Henderson et al. 2007). U velké části lidské populace je příjem těchto mikroprvků nedostatečný, proto je důležitý jejich obsah v obilninách. Mikroprvky jsou důležité nejen pro lidský organismus, ale také pro zvířata a rostliny.

Síra patří mezi nejdůležitější makroprvky ve výživě rostlin, jelikož je stavebním prvkem esenciálních aminokyselin, konkrétně cysteinu a methioninu. Tyto dvě aminokyseliny jsou nedílnou součástí bílkovin v rostlině. Pro optimální růst a vývoj rostlin je síra nezbytnou živinou, která se podílí na kvalitě rostlinných produktů, které poté získáváme.

Před počátkem 21. století nebyla přikládána důležitost hnojení plodin sírou, a to díky spadům síry na zemědělskou půdu z průmyslového znečištění. Z pochopitelného důvodu došlo ke zlepšení životního prostředí, a to následným odsířením úhelných elektráren. To také ale významně přispělo k poklesu obsahu síry v půdě a v rostlinách. Z tohoto důvodu se v evropských zemích stalo zohlednění nároků rostlin na tuto živinu velmi důležité.

A právě síra může být dobrým prostředkem agronomického biologického obohacení pšenice, za účelem zvýšení obsahu a absorpce mikroživin, jako jsou Fe, Mn, Zn a Cu (Klikocka & Marks 2018).

V této bakalářské práci hodnotíme vliv přijatelné síry v půdě na příjem mikroprvků (železo, zinek, mangan) ozimou pšenicí. Také bylo zjišťováno, jakým extrakčním činidlem je vhodnější stanovit přijatelnou síru v půdě, konkrétně na alkalických půdách. Porovnávali jsme metodu Mehlich 3 a vodný výluh.

2 Cíle práce

Prvním cílem bylo zjistit, jestli přijatelná síra v půdě ovlivňuje příjem sledovaných mikroprvků, a pokud ano, tak do jaké míry. Dalším cílem této práce bylo posoudit, jakým extrakčním činidlem je vhodnější stanovit přijatelný obsah síry v půdě z hlediska vztahu s obsahem sledovaných mikroprvků v rostlinách, v tomto případě v ozimé pšenici. Porovnávali jsme extrakční činidla Mehlich 3 a vodný výluh. V experimentální části této práce jsme se zaměřili pouze na alkalické půdy.

3 Hypotézy

- Obsah přijatelné síry v půdě zlepšuje příjem Fe, Mn a Zn u ozimé pšenice.
- Mehlich 3 je rovnocennou alternativou pro stanovení přijatelné síry v půdě stejně jako je vodný výluh.

4 Literární rešerše

4.1 Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*)

4.1.1 Význam a využití pšenice

Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) je z mnoha důvodů nejvýznamnější obilninou nejenom pro Českou republiku, ale i celosvětově. Pšenice je prakticky univerzální a pro mnoho potravinářských výrobků je nejvhodnější obilninou. Z důvodu obsahu lepku a také kvality lepku se výborně hodí pro pekařské účely. Dále je také velmi rozšířena jako krmná obilnina a využívána pro průmyslové zpracování (např. líh nebo škrob). Dalšími kladnými faktory pšenice jsou její výnosové schopnosti, variabilita odrůd a další (Diviš et al. 2010).

Pšenice neposkytuje na zpracování pouze zrno, ale také stéblo (slámu) a otruby (semenné slupky). Pšeničnou slámu zle použít na podestýlku, ke krmení nebo ji lze zaorat (Pulkrábek et al. 2003).

Není pochyb o tom, že nejenom přizpůsobivost pšenice, ale také její vysoké výnosy přispěly k jejímu úspěchu (Shewry 2009). Kromě přizpůsobivosti a vysokých výnosů je pšenice významným zdrojem železa a zinku (Henderson et al. 2007). Ačkoli v dnešní době došlo u moderní pšenice k poklesu obsahu těchto minerálů, které bylo částečně způsobeno ředěním, které je výsledkem zvýšeného výnosu (zvýšený výnos negativně koreloval s obsahem minerálů) (Shewry 2009).

V České republice je pro mlýnsko-pekárenské zpracování potřebný objem pšenice přibližně 1,2 milionu tun v potravinářské kvalitě, to je kolem 35 % z celkové produkce. Pro přebytečné objemy pšenice v této kvalitě se následně hledá jiné (nepotravinářské) využití, například na výrobu biolihu (Prugar et al. 2008).

4.1.2 Požadavky na pěstování pšenice

Pšenici ozimou pěstujeme v České republice ve všech výrobních oblastech. Dle použité agrotechniky a podmínek stanoviště dosahuje pšenice rozdílných výnosů zrna v rozdílné kvalitě. Záleží na výběru stanoviště, osevním postupu, předseťové přípravě půdy – zpracování půdy, setí, výživě a hnojení pšenice, ochraně proti škodlivým činitelům a také na sklizni (Prugar & Hraška 1986).

4.1.2.1 Výběr stanoviště

Pšenice je oproti jiným obilninám (např. žitu) náročnější na půdu a podnebí. Pěstuje se převážně v mírném a teplejším podnebí nížinných a podhorských oblastí. Co se týká nároků na teplo, patří pšenice mezi náročné plodiny. Nejnižší teplota, která je potřebná ke klíčení semen je 3 – 4° C. Nárok na vodu u pšenice činí asi 600 mm za rok a její transpirační koeficient bývá 400 až 500. Optimální pH půdy se pohybuje mezi 6,0 až 7,5 a nejvhodnějšími půdami jsou pro pšenici černozemě, jílovité, jílovitohlinité a hlinité půdy, které mají dostatek živin. Naopak mokré, kyselé a lehké půdy jsou nevhodné (Kuchtík et al. 2005).

Kováč a Kubinec (1998) uvádějí, že při pěstování pšenice by neměla pórovitost půd klesnout pod 50 % a vzdušná kapacita pod 11 % obj.

Z tohoto hlediska jsou pro pšenici vhodné lepší řepařské oblasti. Z hlediska srážek poskytnou pšenici velice dobré podmínky kukuřičné oblasti, které netrpí přílišným suchem v době, kdy má pšenice největší nároky na vodu (Diviš et al. 2010).

4.1.2.2 Osevní postup

Předplodiny ovlivňují nejenom půdní vlastnosti, které jsou důležité pro růst rostlin, ale také pro tvorbu a kvalitu zrna. Ozimá pšenice dokáže dobře výnosově zúročit vliv předplodiny (Hůla & Procházková 2008).

Pšenice ozimá je ze všech obilnin nejnáročnější na předplodinu. Při výběru předplodiny musíme zohlednit nejenom požadavky odrůd a konečné použití produkce, ale také podmínky pro výrobní oblast. Jako předplodiny pro ozimou pšenici nejsou vhodné obilniny (Zimolka et al. 2005). Obilniny pěstované opakovaně za sebou, mohou trpět různými chorobami přenášenými půdou a strništěmi, i když rozsah a závažnost konkrétních patogenů se regionálně i sezónně značně liší (Kirkegaard et al. 2008). Naopak nejlepšími předplodinami jsou luskoviny, olejniny – řepka ozimá, jeteloviny a včas sklizené brambory. Díky množství a kvalitě posklizňových zbytků (které zanechává v půdě) je v našich podmínkách nejvhodnější předplodinou vojtěška (Zimolka et al. 2005).

4.1.2.3 Zpracování půdy pro pšenici ozimou

Při volbě technologie zpracování půdy musíme brát v úvahu konkrétní podmínky pro pěstování, jako je zařazení pšenice do osevního postupu, stanovištní podmínky a stav půdy po sklizni předplodiny (stupeň utužení, výskyt plevelů) (Javůrek & Vach 2006).

Způsob a kvalita zpracování půdy může mít rozhodující vliv na založení porostu a ovlivňuje významně i rentabilitu pěstování pšenice ozimé. Pokud vhodně a včasně zvolíme zpracování půdy, ovlivníme tak počet rostlin po vzejití a také zaplevelení a výskyt chorob (Zimolka et al. 2005).

Faměra (1993) uvádí, že při základním způsobu zpracování půdy zahrnujeme podmítku, orbu a jejich ošetření, kultivační operace nebo hloubkové kypření. Zpracováním dochází k regulaci poměru vody a vzduchu v půdě a také dochází k urychlení mineralizace organických látek. Podmítka se provádí podmítači (diskovými, radličkovými) co nejdříve po sklizni, a to do hloubky 8 – 15 cm. Radličnými nebo talířovými pluhy se provádí orba do hloubky 18 – 22 cm. Orba spadá do tradičního zpracování půdy. Další pracovní operace, které provádíme, mají za úkol urovnat pole, vytvořit hrudkovitou půdní strukturu a kvalitní seťové lůžko (smykování, vláčení, kypření). Kromě tradičního způsobu zpracování půdy se také využívají minimalizační technologie, které slučují hned několik pracovních operací dohromady (např. podmítka se seťovou orbou).

Při setí do nezpracované půdy (přímé setí) sejeme speciálními secími kombinacemi na zpodmítaný pozemek. Při tzv. setí do hrubé brázdy, se nejdříve provádí orba a následně sejeme speciálními kombinacemi do hrubé brázdy (Kuchtík et al. 2005).

4.1.2.4 Setí

K setí ozimé pšenice se používá uznané, zdravé a kvalitní osivo, které by mělo být namořeno. Dle kvality dělíme odrůdy pšenice na: potravinářské odrůdy (E – elitní, A – kvalitní, B – chlebové), odrůdy pro speciální použití (výroba škrobu, lihu a K – keksů) a na odrůdy krmné (C). Dále můžeme odrůdy dělit podle ranosti nebo podle vzrůstu a náročnosti na pěstování – intenzivní a extenzivní. Agrotechnický termín setí je závislý na výrobních oblastech a na odrůdě. V závislosti na odrůdě provádíme časné setí (od 10. do 20.9.) a pozdní setí (po 5.10.) Semena se sejí do hloubky 2 – 3 cm a šířka řádků činí 7,5 – 12,5 cm. Výše výsevku je závislá na termínu setí, na odrůdě a na výrobní oblasti. Vyséváme 3,0 až 5,0 MKS/ha, což je asi 130 až 240 kg/ha. U hybridních odrůd pšenice vyséváme pouze 0,9 až 1,5 MKS/ha, což je přibližně 50 až 70 kg/ha, podle HTS (Kuchtík et al. 2005).

4.1.2.5 Výživa a hnojení pšenice

Jedním z rozhodujících faktorů pro dostatečný výnos zrna v požadované kvalitě je adekvátní výživa porostu pšenice. Hlavně na jaře v době intenzivního růstu pšenice, je nutné věnovat hnojení zvýšenou pozornost. V tomto období se vytváří jednotlivé výnosotvorné prvky. Jedná se o počet produktivních odnoží (počet klasů na jednotku plochy), délku klasu (počet zrn v klase) a o velikost zrn (hmotnost tisíce zrn). Každý z těchto parametrů můžeme hnojením významně podpořit. Počet odnoží můžeme zvýšit regeneračním hnojením po zimě, počet zrn v klase produkčním hnojením na počátku sloupkování a hmotnost zrn můžeme ovlivnit pozdním přihnojením (Ryant et al. 2017).

Na kvalitě a výnosu zrna se nejefektivněji projevuje dusíkatá výživa. Avšak přehnojení dusíkatými hnojivy způsobuje nebezpečí polehání, nadměrného zahuštění porostu aj. (Špaldon et al. 1982).

Hnojení dusíkem (N) se pohybuje v dávce na 1 ha v rozmezí od 40 do 120 kg. Soustava hnojení dusíkem je založená na dělené aplikaci:

1. základní hnojení N (předseťové, na podzim) v dávce 0 – 40 kg N/ha
2. regenerační hnojení N (na jaře, leden až březen) v dávce 30 – 40 kg N/ha
3. produkční přihnojení N (3 týdny po regeneračním hnojení) v dávce 20 – 45 kg N/ha
4. pozdní přihnojení N v dávce 30 – 45 kg N/ha

Pozdní přihnojení lze rozdělit na tři termíny (v období sloupkování, před nebo v době metání, v době květu) (Kuchtík et al. 2005).

Dávka fosforu (P) u pšenice ozimé je 20 – 30 kg P/ha (podle zásoby fosforu v půdě). Oproti fosforu je výrazně vyšší celkový odběr draslíku (K), který představuje více než 100 kg K/ha, u dobře zapojených porostů to může být až 150 kg K/ha. Celkový odběr hořčíku (Mg) činí u pšenice 10 – 15 kg/ha, což je desetkrát méně, než činí odběr dusíku nebo draslíku. Hořčík je důležitý během celého období růstu rostlin, proto nelze vynechat. Také síra (S) je důležitá již od počátku růstu ozimé pšenice. Celková potřeba síry je od 15 až do 30 kg S/ha (Černý et al. 2014).

Vápněním se dosahuje a udržuje optimální půdní reakce (pH). Pšenice nevyžaduje přímé vápnění, vzhledem k tomu že většinou následuje po plodinách, ke kterým se vápní (Faměra 1993).

4.1.2.6 Ochrana a ošetření porostu pšenice ozimé

Cílem ochrany plodin je vyhnout se nebo zabránit ztrátám na plodinách, případně je ekonomicky snížit na přijatelnou úroveň (Smith et al. 1984).

Ztráty na plodinách mohou být způsobeny abiotickými a biotickými faktory prostředí, které vedou ke snížení produkce plodiny a výsledkem je nižší skutečný výnos. Tyto škodlivé činitele, lze ovlivnit použitím fyzikálních opatření (např. kultivace, mechanické odplevelení), biologické opatření (výběr odrůdy, střídání plodin, přirození predátoři atd.) a chemickým opatřením (pesticidy) (Oerke 2006).

Intenzita výskytu plevelů značně ovlivňuje zásobování pšenice vodou a živinami a má vliv na využití slunečního záření (Šroller et al. 1997).

Mezi nejrozšířenější a nejvýznamnější jednoděložné plevele v ozimé pšenici patří především chundelka metlice, psárka polní, lipnice roční a sveřep. Z dvouděložných plevelů patří mezi nejrozšířenější svízel přítula, úhorník mnohodílný, hluchavky, heřmánkovité plevele, rozrazily a v posledních letech také violka rolní a zemědým lékařský. Jako ochranu proti plevelům lze využít preemergentní aplikaci (po zasetí, před vzejitím plevelů) nebo postemergentní aplikaci, kdy máme možnost ošetřit porost až podle skutečného výskytu plevelů (Hezký 2012).

V ochraně proti chorobám, ať už listovým nebo klasovým, je velmi důležitá správná a hlavně včasná identifikace choroby a odhadnutí dalšího vývoje infekčního tlaku. Častou nezbytností je opakování ochrany. Obdobné zásady platí i pro hlavní škůdce pšenice (Diviš et al. 2010).

Napadení pšenice škůdci hrozí po celou dobu její vegetace. Nejvýznamnější škody vznikají při sání mšic a křísků na podzim. Tito škůdci ovlivňují přezimování rostlin a omezují počet odnoží. Dále také přenášejí virus zakrslosti pšenice a mnohé jiné (Zimolka 2005).

Podstatný vliv na pěstování pšenice mají látky označované jako regulátory růstu. Tyto látky (tzv. morforegulátory) zvyšují adaptabilitu rostlin proti nepříznivým podmínkám jako jsou horko, sucho, chlad a mráz. Dále můžou ovlivnit odnožování, zpomalit diferenciaci vzrostného vrcholu a prodloužit jednotlivé etapy organogeneze, čímž významně ovlivňují výnosové prvky (Petr et al. 1987).

4.1.3 Sklizeň pšenice ozimé

Doba sklizně ozimé pšenice je určena především průběhem počasí. Zrání neprobíhá zcela rovnoměrně. Jako první dozrávají klasy hlavního stébla a nejranějších odnoží prvního řádu. Potom teprve dozrávají další odnože (Diviš et al. 2010). Při pěstování ozimé pšenice je velmi důležitý termín sklizně, protože má do určité míry zabezpečit požadovanou kvalitu (Špaldon et al. 1982). Jakékoliv otálení ve sklizni může značně znehodnotit naše předchozí úsilí vysokými ztrátami zrna a značným zhoršením kvality (Diviš et al. 2010). Porosty pšenice dozrávají v červenci až v srpnu. Sklizeň by měla proběhnout na začátku plné zralosti. Sklízíme (žacími) sklízecími mlátičkami. Zrno se po sklizni čistí a při případné vyšší vlhkosti, než je 15 % se zrno musí dosoušet (Kuchtík et al. 2005).

4.1.4 Plochy osevů pšenice ozimé

V České republice plochy osevů pšenice ozimé pro sklizeň v roce 2020 dle stavu k 30. listopadu 2019 činily 758 699 tisíc hektarů. Oproti předchozímu roku došlo k zásadnímu poklesu a to o 56 tisíc hektarů (Český statistický úřad 2020).

4.2 Síra v rostlině

Síra (S) je rostlinami přijímána z půdy převážně jako síranový anion (SO_4^{2-}). Vlastní příjem je poměrně málo ovlivňován ostatními ionty v půdním roztoku i půdními vlastnostmi (Balík & Tlustoš 2000). Koncentrace síry v rostlinných pletivech se pohybuje mezi 0,1 – 0,5 % v sušině (Havlin et al. 2005).

Rozhodující je obsah síranového anionu v půdě, kam se dostává jednak hnojivy, spadem z ovzduší (po oxidaci SO_3^{2-}) a z půdních zásob. Síra se v půdě postupně uvolňuje z méně rozpustných sloučenin, včetně organických a je oxidována až na sírany, které jsou hlavním zdrojem síry pro rostliny (Vaněk et al. 2007).

Rostliny jsou schopné využívat i SO_2 z ovzduší. Tímto způsobem jsou schopny saturovat jen část své potřeby (asi do 30 % celkové potřeby) (Balík & Tlustoš 2000).

4.2.1 Funkce síry v rostlině

Síra je stavebním prvkem esenciálních aminokyselin, cysteinu a methioninu, které jsou nezbytnou součástí plnohodnotných bílkovin. Síra je složkou vitamínů (thiaminu, biotinu), koenzymu A a ferredoxinu. Dále se síra vyskytuje v sulfoxidech, těkavých látkách, např. u cibule a brukvovitých rostlin (Matula 2007).

Je známo, že síra hraje důležitou roli při tvorbě bílkovin v obilninách a asimilaci dusíku u ozimé pšenice (Sun et al. 2016). Síra je základní minerální živina pro růst rostlin. Je to čtvrtá hlavní živina po dusíku, fosforu a draslíku. Devadesát procent síry v těle rostliny se používá k syntéze aminokyselin obsahujících síru (Yang GM et al. 2007).

Síra je v rostlinách poměrně dobře pohyblivá, je transportována hlavně do mladých listů a meristémů. V rostlinách se hromadí ve formě síranu, který slouží jako zásobní látka. Podle potřeby rostliny síran redukují (na H_2S) a zabudovávají do organických sloučenin (Vaněk 2012). Redukce síranu: z adenosinfosfosulfátu se sulfátová skupina přenese na nosič a váže se na SH-skupinu nosiče tak, že je vodík nahrazen sulfurylovou skupinou SO_3H. Za účasti feredoxinu je tato skupina dále redukována na SH-skupinu, která reaguje s acetylserinem za vzniku **cysteinu**. Vznikající cystein je v rostlinných pletivech první organickou stabilní sloučeninou se sírou. Z cysteinu jsou syntetizovány další organické sloučeniny, především aminokyselina **metionin**, která s cysteinem slouží k tvorbě peptidů, včetně enzymů a koenzymů, tedy velmi aktivních složek v rostlinných pletivech. Jsou tedy nezastupitelnou součástí bílkovin – jejich vazby mají významnou úlohu ve struktuře bílkovin (Vaněk et al. 2016).

Síra v neredukované formě, ve formě esterů (především v sulfo-lipidech) je součástí všech biologických membrán. Většinou je vázaná na lipid přes sacharidovou složku. Sulfolipidy působí na strukturální uspořádání membrán a také ovlivňují transport iontů membránami (Vaněk et al. 2016).

4.2.2 Projevy nedostatku síry v rostlině

Nedostatek síry v rostlině se zprvu projevuje omezením syntézy bílkovin, včetně enzymů, a tím i snížením aktivity významných enzymových dějů, jako je např. redukce nitrátů. Tím, že je snížena syntéza bílkovin, se hromadí v rostlinách nízkomolekulární organické sloučeniny dusíku a nitráty. Značně je omezena tvorba chlorofylu, a tím metabolitů (sacharózy, škrobu, bílkovin a oleje), zvláště u náročných rostlin na síru, takže se výrazně snižuje kvalita produkce. Známé je omezení fixace vzdušného dusíku při nedostatku síry (Vaněk et al. 2001).

Typickým vizuálním příznakem nedostatku síry na rostlinách je žloutnutí listů. Žloutnutí listů začíná u nejmladších listů a při trvalejším nedostatku síry přechází i na spodní listy. Projev nedostatku síry je podobný jako při nedostatku dusíku, ovšem počáteční příznaky jsou vždy soustředěny na vrcholové části. Zvláště listy jsou nejprve světle zelené, později žloutnou a mnohdy mají růžový nádech. Mají omezený růst do šířky, a jeví se tak jako úzké a dlouhé. Celkově špatně rostou, jsou slabé, nízké a svým habitem připomínají strádající rostlinu (Vaněk et al. 2007).

Vaněk (2012) uvádí, že nedostatek síry se většinou projeví, když obsah síranu klesne pod 100 mg/kg v sušině (0,01 %). Celkový obsah síry v pletivech rostlin se pohybuje kolem hodnot 0,2 – 0,5 % v sušině. U řepky však již obsah v sušině pod 0,4 % (u ostatních plodin pod 0,2 %) signalizuje počínající nedostatek síry.

Požadavek pšenice na síru je asi 15 – 20 kg/ha pro optimální růst (Zhao et al. 1999a).

4.3 Síra v půdě

4.3.1 Formy síry v půdě

Celkový obsah síry v půdě se obvykle pohybuje mezi 0,01 a 0,1 % (Balík et al. 2009). Převážná část celkové síry v půdě je však součástí organické půdní hmoty, tedy v podobě nedostupné pro rostliny. Tímto se síra v půdě v mnoha rysech podobá dusíku (Matula 2007).

Půdní síra kontinuálně přechází mezi anorganickými a organickými formami síry. Organické sloučeniny síry nejsou rostlinám k dispozici a musí být před absorpcí rostlin převedeny biochemickou nebo mikrobiologickou mineralizací na anorganickou SO_4^{2-} (Castellano & Dick 1991).

Podle Vaňka et al. (2016) můžeme **organické sloučeniny síry** rozdělit do dvou skupin. První skupinou je síra vázaná na organické sloučeniny v oxidované formě – jako estery s lipidy, polysacharidy i glukosinoláty. Taro forma tvoří větší část organicky vázané síry v půdě. Z těchto sloučenin je síra poměrně snadno uvolňována při jejich mineralizaci, a proto je také považována za hlavní potencionální zdroj síry pro rostliny. Druhou skupinou je síra vázaná na organické sloučeniny v redukované formě. Hlavními představiteli těchto sloučenin jsou aminokyseliny, jako je metionin a cystein, které jsou součástí bílkovin, ale i dalších sloučenin. Síra je v těchto sloučeninách vázaná přes uhlík a jejich mineralizace je již složitější. Jejich mineralizace probíhá v několika krocích. První je rozložení složitých látek na jednodušší – až na aminokyseliny, následné odštěpení sulfanu a jeho postupná oxidace na síran. Tato část mineralizace je obdobná jako u dusíku – uvolňování NH_3 při rozkladu bílkovin a dále jeho oxidace na nitráty.

Malý podíl síry je vázán v biomase mikrobů (1 – 3 %). Tato část organických sloučenin v půdě se může významně podílet na výživě rostlin sírou (po mineralizaci). Síra v **anorganických sloučeninách** je představována sírany, které jsou přítomny v půdním roztoku, ale část se jich nachází v pevné fázi půdy. Je to hlavně nerozpustná část síranů, ale také sorbovaná na koloidy s kladným nábojem, která je významnější v kyselých půdách. Hlavním zdrojem organické síry jsou v podstatě kořeny rostlin a posklizňové zbytky a také statková hnojiva. Významné množství síry můžou do půdy dodávat také minerální hnojiva. V koloběhu síry hrají také významnou roli sloučeniny, která se dostávají do půdy z ovzduší ve formě oxidu siřičitého (Vaněk et al. 2016).

U našich půd je významná biologická sorpce síranů, jejich zapojování mikrobiální činností do organických sloučenin v procesu přeměn organické půdní hmoty (Matula 2007). Mikrobiologická mineralizace organických sloučenin síry je zjevně ovlivněna teplotou půdy (Swift 1985). Jaggi et al. (1999), kteří studovali dopad tří teplotních režimů na mineralizaci půdních organických sloučenin síry, zjistili velký teplotní účinek, přičemž rychlost mineralizace byla nejvyšší při 36 ° C. Nejdůležitější skupinou S-oxidujících organismů jsou autotrofní bakterie rodu *Thiobacillus*. Thiobacily jsou typické chemolithotrofní bakterie (Scherer 2001).

Při oxidaci síry hrají důležitou roli další fyzikální faktory, jako je vlhkost a teplota půdy (Janzen & Bettany 1987). Lawrence a Germida (1988) prokázali důležitou roli velikosti a aktivity heterotopické biomasy pro oxidaci síry v zemědělských půdách. Síra bude oxidovat rychleji v půdách s velkou populací aktivní biomasy. Půdy s nedostatkem síry v oblastech se středně silnými a silnými srážkami mohou mít prospěch z aplikace elementární síry, aby se zabránilo ztrátám vyplavováním (Donald & Chapman 1998).

Vyplavování síry je potenciálně jedním z nejdůležitějších činitelů vyčerpávající síru z půdy. Dochází k němu, když množství vody pohybující se vertikálně dolů v půdním profilu převyšuje příjem vody rostlinami, odpařování a množství vody nezbytné pro nasycení půdního profilu (Scherer 2001). Adsorpce SO_4^{2-} je reverzibilní proces v závislosti na adsorpční kapacitě. Proto je odolnost proti vyplavování síry primárně ovlivněna různými půdními faktory, jako je obsah jílu, obsah oxidů železa (Fe) a hliníku (Al) a pH půdy. Obsah ve vodě rozpustného SO_4^{2-} závisí na typu půdy a liší se mezi horizonty, od sezóny k sezóně a po celou sezónu a je ovlivněn aplikačním množstvím a rozpustností hnojiv ve vodě. Ve vápenatých půdách, kde téměř nerozpustný $CaSO_4$ může představovat velké procento celkového SO_4^{2-}, může být vyplavování síry zanedbatelné (Tisdale et al. 1986). Ve srovnání s těžkými půdami je vyplavování síry vyšší v písčitých půdách, což je způsobeno nižší sorpční schopností SO_4^{2-} a vyšším pohybem vody směrem dolů (Scherer 2001).

Další vyplavování síry z půdy je obvykle vyšší po aplikaci hnojiv obsahujících SO_4^{2-} ve srovnání s hnojivy vytvářejícími SO_4^{2-} (Nesheim et al. 1997).

4.3.2 Stanovení přijatelné síry v půdě

Za přístupnou síru v půdě je považována především síra v půdním roztoku, vyskytující se v síranové formě (SO_4^{2-}). Dalším snadno dostupným zdrojem je však zpravidla i síra adsorbovaná na povrchu půdních částic. Mezi touto frakcí síry a půdním roztokem se udržuje rovnováha. Adsorbovaná síra tak snadno přechází do půdního roztoku, ale i naopak. Tyto dvě

nejdostupnější formy síry představují jen velmi malý podíl z celkové síry, nepřesahující zpravidla 2 %. Větší část síry v půdě (organická a okludovaná) je rostlinám dostupná jen obtížně. Přesto je nutné s ní počítat z dlouhodobého hlediska (Kulhánek et al. 2018).

Hlavní předností půdních testů je, že mohou poskytnout informace pro preventivní korekci výživného stavu půdy před vegetací plodiny na pozemku. Avšak, právě zde v možnostech využití půdních testů k diagnostice síry panuje největší skepse. Podstata skepse spočívá v tom, že hlavní podíl síry v půdě je součástí organické půdní hmoty a tedy její přeměny by mohly významně a v krátké době měnit stav zásoby dostupné síry v půdě pro rostliny, obdobně jako v případě dusíku (Matula 2007).

Existuje řada extrakčních postupů, které jsou uváděny jako vhodné pro stanovení přístupné síry (Kulhánek et al. 2018). Půdní test na síru by měl podchycovat pouze tu frakci organické síry, která může být snadno převedena na sírany. Analytická koncovka stanovení síry spektrometricky ICP (s indukčně vázaným plazmatem), stanovuje celkový obsah síry (anorganické i organické) ve výluhu. Jde potom jen o to, aby extrakčním činidlem půdního testu byla z půdy uvolněna pouze ta část organické síry, která se může podílet na výživě rostlin. Z tohoto pohledu byla ověřována možnost doplnění síry k současným a perspektivním víceúčelovým půdním testům (Mehlich 2 a 3, KVK-UF, extrakce $CaCl_2$, extrakce vodou, simulovaný půdní roztok, sinkový postup sorpce na ionexové kapsle PST-1) ve srovnání s klasickou extrakcí Ca $(H_2PO_4)_2$, která je obecně deklarována za nejvhodnější jednoúčelový test dostupné síry v půdě (Matula 2007). Další velmi využívanou analýzou je frakcionace minerální síry. Tou je možné stanovit zvlášť podíl síry v půdním roztoku a podíl adsorbované síry. Jejich součtem je pak možné získat informaci o podílu přístupné síry v půdě (Shan et al. 1997; Förster et al. 2012).

Jako jedna z možných metod pro stanovení obsahu síry v půdě je uváděna metoda Mehlich 3. Metoda Mehlich 3 je v ČR již od roku 1999 využívána pro stanovení přístupného P, K, Ca a Mg. Většina modernějších laboratoří již v současnosti disponuje optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem, která za srovnatelných nákladů umožňuje i paralelní stanovení síry a mikroprvků. Nesporné výhody tohoto postupu spočívají v univerzálnosti (možnosti stanovení makro- i mikroprvků), relativní jednoduchosti provedení a běžném použití v ČR (ÚKZÚZ) i v zahraničí. Naproti tomu je Mehlich 3 považován za jedno z nejsilnějších extrakčních činidel pro stanovení přístupných živin. Proto je zde riziko, že bude stanoven i určitý podíl nepřístupné síry (Kulhánek et al. 2018).

4.4 Hnojení sírou

Ačkoli je síra jednou z hlavních živin pro růst rostlin s požadavkem na plodiny podobným fosforu, tomuto prvku se po mnoho let věnovala malá pozornost, protože hnojiva a atmosférické vstupy dodávaly půdě odpovídající množství. Nyní se oblasti s nedostatkem síry stávají rozšířenými po celém světě (Scherer 2001).

Obsah síranu v půdním roztoku byl dříve hlavním zdrojem síry pro rostliny a většinou stačil pokrýt i požadavky náročných plodin na síru. V současné době se však množství SO_4^{2-} v půdním roztoku značně snížilo a jeho doplňování mineralizací organických sloučenin je většinou nedostatečné, proto je nutný přísun síry v hnojivech a to zvláště pro rostliny, které jsou náročné na tuto živinu (Vaněk et al. 2016).

4.4.1 Nároky plodin na síru

Výskyt deficitu síry byl v posledním desetiletí stále častěji hlášen u rostlin rodu *Brassica* a obilovin, zejména díky zmiňovanému masivnímu poklesu vstupů síry z atmosféry (Zhao et al. 1999a).

Odběr síry plodinami závisí na jejich schopnosti přijímat tuto živinu a na celkové produkci biomasy. Údaje o odběru síry zemědělskými plodinami se proto značně liší (Zelený & Zelená 1999).

Nároky plodin na síru se zvyšují v následujícím pořadí: *Poaceae* <*Fabaceae* <*Brassicaceae* (Deloach 1960). Nejnáročnější polní plodinou na síru je ozimá řepka. Uvádí se, že k zajištění dobrého výnosu semene řepky potřebuje porost řepky během vegetace odebrat 70 – 90 kg S/ha (Matula 2007). Pšenice ozimá se obecně řadí mezi plodiny s relativně nízkými nároky na síru. Při diskuzích o potřebě hnojení pšenice ozimé sírou se můžeme setkat se třemi názory. První názor je založen na předpokladech, že pšenice ozimá nevyžaduje mnoho síry, a proto si potřebné množství zajistí z půdních zásob, případně organických hnojiv nebo zbytků předplodiny, a tudíž není nutné přímo k pšenici sírou hnojit. Druhý názor též předpokládá s nízkou potřebou síry u pšenice, ale doporučuje aplikovat alespoň malou dávku síry přímo k pšenici. Třetí názor nezpochybňuje nízkou potřebu síry pšenice, ale s ohledem na fyziologii příjmu a jejího využití rostlinami doporučuje dávky síry k ozimé pšenici zvýšit nad úroveň jejího odběru. Dle posledních výsledků polních pokusů, vědeckých poznatků a rozborů půd se stále častěji potvrzuje třetí názor na hnojení. S tím se také mění poznatky pro doporučení termínu pro aplikaci síry (Černý et al. 2020).

Požadavek ozimé pšenice (pro optimální růst) na síru je asi 15 – 20 kg/ha (Zhao et al. 1999a).

4.4.2 Aplikace hnojiv se sírou

Síru aplikujeme zpravidla do půdy, můžeme jí však aplikovat i foliárně. Pokud je síranová forma síry aplikována foliárně dostává se do listů velmi rychle. Sírany jsou však následné z velké části zachycovány ve vakuolách a jsou z menší části využívány na tvorbu výnosu. K aplikaci na list můžeme využít například hořkou sůl, avšak lepších výsledků je dosaženo listově aplikovanou elementární sírou. To lze nejpravděpodobněji vysvětlit tím, že před samotnou adsorpcí listy musí být tato forma nejdříve oxidována na sírany. Postupná přeměna elementární síry na sírany je pozvolný proces, a proto tak dochází k plynulejšímu zásobení listů sírany. Nedochází tedy k přílišné kumulaci síranů v cytosolu a jejich následné kumulaci ve vakuolách (Kulhánek et al. 2013).

4.4.3 Vstupy síry do půdy v ČR

Dříve podstatným množstvím do půdy přispívaly spady síry z průmyslového znečištění, zejména v důsledku spalování uhlí. Odsíření uhelných elektráren a dalších emisních zdrojů na přelomu 20. a 21. století a další opatření, která snižují znečištění životního prostředí, přispěly nejvýznamněji k poklesu spadů síry na zemědělskou půdu. Přestože v minulosti nebyly výjimkou spady síry v množství přes 100 kg/ha, od roku 2007 již nepřesahují 10 kg síry, a v posledních letech jsou na většině území ČR do 5 kg S/ha (70 %). Zbylých 30 % území

má spady 5 – 10 kg S/ha, ale to jsou především horské oblasti s vyšším „zadržováním“ síry z tzv. podkorunové depozice (Černý et al. 2020).

Z důvodu snižování atmosférických emisí síry se v evropských zemích stává předpovídání požadavků rostlin na síru stále důležitějšími (Eriksen 1997). Užitečnými nástroji pro diagnostiku deficitu síry jsou půdní i rostlinné analýzy (Ensminger & Freney 1966).

4.4.4 Souvislost síry s výnosem a kvalitou produkce

Výživa rostlin sírou se významně podílí na kvalitě rostlinných produktů (Vaněk et al. 2016). Podílí se nejenom na kvalitě zrna, ale také ovlivňuje řadu technologických parametrů zrna a dusíkatý metabolismus rostliny (Hřivna et al. 2004). Bylo prokázáno, že nedostatek síry způsobuje nízký výnos a špatné technologické vlastnosti zrna pšenice, což má následky při dalším zpracování pšenice např. v pekařském průmyslu můžou mít bochníky chleba horší sktrukturu a menší objem (MacRitchie & Gupta 1993). Na druhou stranu podle Vaňka et al. (2016) výrazná vlastnost organických sirných sloučenin v rostlinách může být příčinou různých nežádoucích pachů a příchutě.

Metabolické cesty síry a dusíku v rostlině spolu těsně souvisí. Efektivní využití dávek dusíku, a tím i dosažení odpovídajícího výnosu, je přímo závislé na dostatečném přísunu síry (Schnug & Haneklaus 1994). Vliv síranové formy zvyšuje využití dusíku u ozimé pšenice z 59 % na 75 %, což má příznivý vliv na obsah bílkovin v zrnu (Schnug et al. 1993).

Hlavní biochemickou úlohou síry v bílkovinách je tvorba disulfidických vazeb (-S-S-) mezi peptidickými řetězci ze sulfhydrylových (-SH) skupin cysteinu a stabilizace bílkovinných struktur, což je velmi důležité při technologickém zpracování zrna, promítá se do jeho kvality a významně ovlivňuje jakost produktů ze zrna vyráběných, tj. mouky a chleba (Mengel 1991).

Vzhledem k silné vzájemné závislosti metabolismu dusíku a síry není překvapivé, že rostliny mají tendenci udržovat relativně konstantní poměr organicky vázaného dusíku k organicky vázané síře (N_{org}:S_{org}), zejména ve svých vegetativních částech. Například v bílkovinách chloroplastů pšenice jsou dusík a síra v hmotnostním poměru 15:1. Bílkoviny a aminokyseliny tvoří více než 80 % organických forem síry a dusíku vegetativních částí rostlin (Černý et al. 2020).

Podle výsledků studie Tao et al. (2018) se zdá, že hnojení sírou zmírňuje negativní účinky vysokoteplotního stresu na výnos pšenice a kvalitu zrna. Výsledky této studie mohou být užitečné pro zemědělce, kteří hledají způsoby, jak zvýšit výnos zrna při zachování jeho kvality, s ohledem na potencionální hrozby pro růst rostlin v důsledku změny klimatu.

Udržování vysoké koncentrace síry v zrnu není u krmné pšenice tak důležité jako u pšenice, která je určená pro pekařské účely, nicméně některé důkazy naznačují, že závažný nedostatek síry má za následek snížené koncentrace esenciálních aminokyselin v zrnu, a tedy i sníženou nutriční hodnotu pro zvířata (Randall & Wrigley 1986).

Síra je základním prvkem nejenom pro rostliny, ale i zvířata a lidi, kde je většina přítomna ve formě aminokyselin obsahující síru, cysteinu a methioninu. I když člověk může syntetizovat určitý cystein (tedy částečně esenciální), většina z něj a veškerý methionin (esenciální, protože jej lidé nemohou syntetizovat) musí být získán z rostlinné nebo živočišné potravy. Nedostatek síry vede k řadě onemocnění, včetně ztuhlosti kloubů a artritidy (Prasad & Shivay 2018). Síra se též podílí na tvorbě kolagenu a keratinu, nedostatek síry může vést k problémům s vlasy,

pokožkou a nehty (Wood et al. 2009). Adekvátní hnojení sírou je klíčem k adekvátní výživě rostlin, zvířat a lidí (Prasad & Shivay 2018).

4.4.5 Hnojiva obsahující síru

V současné době najdeme na trhu velké množství hnojiv obsahujících síru. Síra se v těchto hnojivech obvykle vyskytuje jako síran, elementární síra nebo sulfid. Mezi celosvětově nejčastěji používaná hnojiva patří síran amonný, síran draselný, síran hořečnatý, sádrovec, elementární síra. Efektivita využití síry ze síranových hnojiv je zhruba na stejné úrovni bez ohledu na rozpustnost daného hnojiva ve vodě (Kulhánek et al. 2013).

Elementární síra je vysoce koncentrované minerální hnojivo, které se doporučuje především pro hnojení sírou na alkalických půdách. Při aplikaci elementární síry dochází ke snížení pH půdy, a tím se uvolní vápník (Ca) vázaný ve fosforečnanech. Tím se tedy zpřístupní fosfor (P) pro rostliny. Při aplikaci elementární síry dochází k minimalizaci rizik, které jsou spojené s vyplavováním SO_4^{2-}iontů do spodních vrstev půdy, a to díky pozvolné oxidaci. Čím je částice elementární síry v půdě menší, tím rychleji dochází k její oxidaci. Rychlost oxidace však záleží i na dalších faktorech, jako je např. mikrobiální aktivita sirných bakterií, úroveň kontaktu hnojiva s půdou, pH a stupeň aerace půdy. Nezanedbatelnou výhodou elementární síry jsou menší náklady na manipulaci a transport vycházející z vysoké koncentrace síry v tomto hnojivu (Kulhánek et al. 2013).

Síran amonný (SA) – $(NH_4)_2SO_4$ je důležité dusíkaté hnojivo používané po celém světě, obsahuje kromě cca. 20,5 % dusíku také 24 % síry (Scherer 2001). Při aplikaci 100 kg síranu amonného se rovněž dodá 22 – 23 kg síry v mobilní formě síranu (SO_4^{2-}). Předností hnojiva je, že současně s hnojením dusíkem se hnojí sírou – živinou, která je nezbytná k efektivnímu využívání dusíku v metabolismu plodin (Matula 2007). Toto hnojivo obsahuje dusík ve čpavkové formě. V půdě podléhá amonný dusík nitrifikaci, avšak oproti ostatním hnojivům je nitrifikace dusíku síranu amonného mnohem pomalejší. Síran amonný je velmi vhodný k základnímu hnojení. Má však výrazně okyselující charakter, a proto je vhodným hnojivem do půd alkalických, neutrálních nebo slabě kyselých a pro plodiny, které vyžadují nebo snášejí kyselejší podmínky. Je tedy nutné při soustavném používání síranu amonného neutralizovat okyselující účinek vápněním (Vaněk et al. 2016). Více než 50 % vyrobeného síranu amonného je vedlejším produktem při výrobě plastů nebo syntetických vláken a malé množství se získává z koksárenského plynu (Ceccotti 1994). V dnešní době je síran amonný k dispozici jako granulovaný materiál, se kterým se snadno manipuluje a který lze použít pro hromadné míchání. Dále může být formulován do čirých kapalných a suspenzních produktů (Hagstrom 1986).

Ostatní dusíkatá hnojiva se sírou – jejich základ zpravidla tvoří dusičnan amonný, obsahují přídavek síranu amonného nebo vápenatého, např. DASA obsahující 13 % síry v síranu amonném, nebo LAS se 6 % síry v síranu vápenatém (Matula 2007). V praxi hojně používaným hnojivem je roztok síranu amonného s močovinou (SAM), který obsahuje 24 % dusíku a 6 – 8 % síry (Kulhánek et al. 2013).

Jednoduchý superfosfát (JSP) – obsahuje 8 % fosforu a 12 – 14 % síry. Superfosfát se vyrábí reakcí fosfátové horniny s H_2SO_4 a obsahuje přibližně 1:1 směs fosforečnanu vápenatého a sádry. H_2SO_4 rozkládá chemickou a fyzickou strukturu fosfátové horniny. Po mnoho let byl jednoduchý superfosfát široce distribuovaným a běžně používaným fosforečným hnojivem, ale

za posledních 40 let význam tohoto fosforečného hnojiva neustále klesal a průmysl hnojiv se přesunul k více amoniakovaným fosfátům a složeným hnojivům (Hagstrom 1986).

Síran vápenatý (sádra) - podle původu a stupně hydratace obsahuje 14 až 18 % síry. Vyznačuje se nízkou rozpustností ve vodě (Matula 2007). Sádra je vhodné sirné hnojivo, které zásobuje půdu také vápníkem (Yan & Mengel 1992).

Síran draselný (SD) – K_2SO_4 je velmi kvalitní draselné hnojivo v krystalické nebo granulované formě. Obsahuje přibližně 42 % draslíku a 17 – 18 % síry. Vzhledem k jeho vysoké ceně je výhodné jeho použití pouze k plodinám citlivým na chlór, např. chmel, hrách, keříčkové fazole aj. Lze jej aplikovat na všech půdách (Vaněk et al. 2016). Dostupný je běžně v práškové, nebo i granulované formě (Kulhánek et al. 2013).

Kieserit (síran hořečnatý) - obsahuje 14 – 15 % hořčíku a 18 % síry. Kieserit je velice dobrý zdroj síry a hořčíku. Obsahuje síru ve formě síranu hořečnatého, a proto je vhodný pro většinu půd České republiky, kde je běžný i nedostatek hořčíku (Kulhánek et al. 2013).

Hořká sůl - ($MgSO_4.7\ H_2O$), obsahuje 11 – 12,5 % síry. Hnojivo je snadno rozpustné ve vodě a často používané k listové aplikaci (Matula 2007).

Protože na velkou část zemědělské půdy se aplikuje kejda prasat a krav, Eriksen et al. (1995) zkoumali formy a dostupnost rostlin síry v kejdě. Obsah síry v kejdě se může značně lišit v závislosti na typu zvířete a formě a množství potravy (Bird & Hume 1971). Koncentrace celkové síry v kejdě se pohybuje mezi 0,15 – 0,7 kg S/m^3 (Eriksen et al. 1995) Celkový obsah síry v tomto organickém hnojivu je obsažen jako 40 % uhlíku vázaného sírou, 20 % sulfidu a přibližně 40 % organického a anorganického síranu (Pederson et al. 1998).

Poměr N:S kejdy prasat se pohybuje mezi 13:1 a 25:1 a v kejdě skotu mezi 7:1 a 17:1. Vzhledem k tomu, že kejda již před aplikací na půdu prochází značným rozkladem, předpokládá se, že dostupnost síry z kejdy skotu a prasat je v polních podmínkách nižší než 5 % (Eriksen et al. 1995). Eriksen et al. (1998) uvádí, že je velmi obtížné posoudit agronomický význam síry aplikované kejdou, protože labilní síra moči může být snadno vyplavována, zatímco stabilnější formy síry stolice musí být nejprve mineralizovány. Proto se toto živočišné hnojivo v praxi nepovažuje za zdroj síry pro rostliny, i když může obsahovat značné množství síry. Dokonce ani zbytkový účinek dlouhodobých aplikací živočišného hnoje neměl významný dopad na úroveň dostupné síry v půdě pro plodiny s krátkou vegetační dobou (Eriksen & Mortensen 1999).

4.4.6 Určování dávky hnojiv

Před aplikací sirných hnojiv je nutné definovat množství síry potřebné pro správný růst a vývoj rostlin (Dämmgen et al. 1998; Zhao et al. 1999b; Mathot et al. 2008; Zörb et al. 2010). Potřeba síry u ozimé pšenice je, obdobně jako u potřeby dusíku, významně spojena s tvorbou biomasy a výnosem. Neplatí zde však zcela přímo-úměrný vztah, neboť v zrnu je akumulován menší podíl celkově přijaté síry (Černý et al. 2020).

Při výpočtu potřeby hnojení sírou vycházíme z předpokládaného výnosu stejně jako u ostatních živin. Na 1 tunu zrna pšenice ozimé počítáme, že rostlina odebere 4,3 kg síry. S obsahem síry v posklizňových zbytcích se nepočítá (Zimolka et al. 2005).

4.5 Mikroprvky

4.5.1 Význam mikroprvků pro rostlinu

Makroprvky jsou strukturálními prvky rostliny, zatímco role mikroprvků je podílet se na regulaci probíhajících biochemických procesů v rostlinách během vegetačního období (Soetan et al. 2010). Mikroprvky: železo (Fe), bór (B), zinek (Zn), mangan (Mn), molybden (Mo), měď (Cu), chlór (Cl) a nikl (Ni) (Baier & Baierová 1985). Jejich specifické i nespecifické biofunkce se pozitivně či negativně odrážejí na vnějších změnách fyziologického stavu rostliny (Dobrovolskij 1983).

Koncentrace mikroelementů v rostlinách a následně v potravinách závisí na vlastnostech půdy, jako je obsah organických látek, pH a mineralogie jílu, které mohou ovlivnit biologickou dostupnost prvků (Škrbić & Onjia 2007). Wang et al. (2008) naznačují, že obsah těchto prvků v plodinách lze regulovat hnojením nejen mikroživinami, ale také makroživinami, jako jsou dusík, fosfor, draslík, hořčík a síra.

Četné studie prokázaly, že aplikace dusíkatých hnojiv může podporovat akumulaci určitých mikroelementů v pšeničném zrnu, jako jsou například Fe a Zn (Kutman et al. 2011; Singh et al. 2018). Tento účinek je vysvětlen skutečností, že dostatečný přísun dusíku zvyšuje obsah bílkovin v zrnu a proteiny jsou tam, kde se hromadí Fe a Zn (Barunawati et al. 2013).

4.5.2 Vztahy mikroprvků se sírou – antagonismus / synergismus

Interakce mezi živinami nastávají, když přísun jedné živiny ovlivňuje příjem, distribuci nebo funkci jiné živiny. V závislosti na přísunu živin může interakce upravit růst a výnos rostlin. Interakce lze hodnotit zkoumáním vztahu mezi přísunem živin a koncentracemi živin v rostlinách a zkoumáním vztahu mezi přísunem živin a růstem rostlin (Robson & Pitman 1983). Interakce živin v plodinách je pravděpodobně jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících výnosy ročních plodin (Fageria 2014).

Interakce živin ovlivňují růst a vývoj rostlin pouze tehdy, když je přísun stanovené živiny ve srovnání s aplikovanými příliš nízký. Jinými slovy, ke snížení výnosu dochází pouze tehdy, když přísun některých živin klesne pod kritickou úroveň. Proto je růst nebo výnos rostlin považován za lepší kritérium pro hodnocení interakcí živin v rostlinách (Fageria 2014).

Biofortifikace lze definovat jako zvýšení obsahu dieteticky významných prvků ve sklizených produktech plodin aplikací půdního hnojení nebo listového hnojení rostlin a v důsledku toho zlepšením jejich kvality (Yang E et al. 2007).

Protože síra snižuje pH alkalické půdy, nepřímo ovlivňuje dostupnost fosforu a mnoha mikroelementů, včetně Zn, Fe, Mn a Cu. Dále také může snížit výskyt chlorózy způsobené nedostatkem železa (Soliman et al. 1992; Shuman 1998; Aulakh 2003; Jaggi et al. 2005). Dle Astolfi et al. (2018) získané výsledky studie ukázaly, jak se rostliny zotavily ze stresu z nedostatku Fe pomocí vyladěného síranové hnojení, bez dalšího vstupu Fe hnojiv. Doplnění síry hnojením NPK může být dobrým prostředkem agronomického biologického obohacení pšenice za účelem zvýšení obsahu a absorpce mikroživin, jako jsou právě Fe, Mn, Zn a Cu (Klikocka & Marks 2018). Velmi populární formou síry při hnojení zemědělských plodin je elementární síra. Její přidání do půdy snižuje ztrátu síranové síry a její dlouhá doba rozkladu

příznivě ovlivňuje celý osevní sled (Jagii et al. 2005; Klikocka 2010; Klikocka 2011; Klikocka & Głowacka 2013).

Dusíkaté a síranové hnojení může katalyzovat vyšší produkci fytosideroforů (rostlinné nosiče železa), kdy bylo zaznamenáno, že v půdních a polních experimentech podporují a zvyšují obsah Zn a Fe v pšenici (Shi et al. 2010; Kutman et al. 2011). Klikocka a Marks (2018) uvádí, že přidání síry do každé dávky dusíku zvyšuje výnos pšeničného zrna a obsah a absorpci analyzovaných mikroživin, tj. železa, manganu, zinku a mědi.

4.5.3 Význam vybraných mikroprvků pro rostlinu

Železo (Fe) - většina půd má poměrně vysoký obsah Fe (okolo 2 %). Pouze v půdách organogenního původu je obsah železa nižší. Jedná se převážně o železo obsažené v krystalické mřížce primárních i sekundárních minerálů. Převážná část Fe je v půdě v anorganické formě. Malé množství se vyskytuje v komplexech s humusovými látkami a zřejmě tvoří větší část rozpustného Fe v půdě. Pro anorganické sloučeniny železa v půdě je charakteristická velmi malá rozpustnost, která je závislá na pH prostředí. Teprve v kyselejší oblasti jsou ionty Fe přítomné v půdním roztoku ve významnějším množství. Zde může být buď jako Fe^{3+} nebo Fe^{2+}, které se podílejí na výživě rostlin. V podmínkách značně omezujících rozpustnost Fe sloučenin v půdách (půdy s vysokou biologickou činností, dobře provzdušněné a vysokou hodnotou pH) je v půdním roztoku málo železa a může se objevit jeho nedostatek u rostlin. Ve většině půd je v půdním roztoku rozhodující přítomnost železa vázaného v chelátových sloučeninách, které vykazují stabilitu i při vyšších hodnotách pH (Vaněk et al. 2016).

Železo rostliny přijímají téměř výhradně jen kořenovými špičkami (mladými částmi kořenového systému). Ve výživě se uplatňuje jak kationt Fe^{2+}, tak Fe^{3+}. Příjem železa rostlinami je značně ovlivňován hodnotou pH. Významné jsou také konkurenční vztahy mezi ionty, nejvýraznějším konkurentem je měď. V rostlině přechází velká část Fe do organických vazeb (80 – 90 %). Většina Fe je soustředěna v chloroplastech a mitochondriích, tedy buněčných částicích, kde se uskutečňují nejvýznamnější procesy tvorby i odbourávání glycidů. Ve feroxidu je železo vázáno na protein sírou cysteinových molekul a vytváří tak vysoce účinný redoxní systém. Obsah železa v sušině rostlin se pohybuje okolo 100 mg/kg, je soustředěný hlavně v listech, málo Fe najdeme v kořenech, hlízách a semenech. Železo má významné postavení v tvorbě chlorofylu, proto se poruchy příjmu Fe promítají do syntézy chlorofylu, projevují se typickou chlorózou. Dále se také Fe v rostlině účastní tvorby bílkovin a nukleových kyselin (Vaněk et al. 2016).

Nedostatek železa je nejčastěji způsoben omezením jeho příjmu z prostředí. Ve většině půd v ČR je dostatečné množství Fe pro zajištění potřeb rostlin. Nedostatek se vyskytuje na stanovištích s alkalickými půdami a vysokým obsahem $CaCO_3$, případně při nerozumném vápnění půd. Typickým příznakem nedostatku Fe je omezená tvorba chlorofylu ve vrcholových částech rostliny, takže nejmladší listy jsou světle zelené a později žloutnou (Vaněk el al. 2016). Během nedostatku železa lze u rostlin pozorovat příznaky toxicity manganu, zatímco nedostatek manganu může být důsledkem přebytku železa v půdě (Błaziak 2007). Proto je důležitá správná rovnováha mezi těmito prvky. Správný poměr Fe:Mn v obilném zrnu je v rozmezí od 1,5:1 do 2,5:1 (Kabata-Pendias 2011).

Zinek (Zn) – obsah zinku v půdě je v rozmezí několik desítek mg/kg a vyskytuje se hlavně v minerální formě jako součást mřížky minerálů. Část zinku je vázána jako kationt Zn^{2+}, případně ZnOH v sorpčním komplexu. Menší podíl zinku je v půdě vázán v organických sloučeninách. Pohyblivost zinku v půdě je poměrně malá, zvláště při vyšších hodnotách pH a větším obsahu fosforu (Vaněk et al. 2016).

Zinek je pro rostlinu nezbytnou mikroživinou, která se účastní nejrůznějších fyziologických a biochemických procesů (Sommer & Lipman 1926; Marschner 2012). Pšeničné kořeny přijímají Zn převážně jako Zn^{2+} (Sinclair & Krämer 2012). Obsah zinku v pletivech rostlin se pohybuje v rozmezí 20 – 100 mg/kg v sušině. Kritickou hladinou je u většiny rostlin 20 mg/kg Zn. Nižší příjem zinku signalizuje deficit této mikroživiny a pod 10 mg/kg je provázen zjevnými příznaky nedostatku zinku v rostlině. Je známé že na příjem zinku negativně působí vyšší hodnoty pH a podobně také působí fosfor. Pohyblivost Zn v rostlině je nízká, zvláště v mladých pletivech. Nedostatek zinku vyvolává poruchy dělení buněk na špičkách kořenů, vegetačních vrcholech a kambálních pletivech. Je narušen normální růst rostlin a je také snížen počet chloroplastů, čímž je snížen i obsah chlorofylu a na rostlinách se objevují chlorotické skvrny. Pšenice ozimá a celkově obilniny patří do skupiny rostlin, které trpí nejméně na nedostatek zinku (Vaněk et al. 2016).

Hnojení zinkem zvyšuje obsah bílkovin a kvalitu pšeničných zrn zvýšením koncentrací albuminu, gluteninu, gliadinů a globulinu (Liu et al. 2015). Koncentrace Zn je navíc spojena s akumulačním proteinem v pšeničném zrnu a je úzce spojena s obsahem lepku v zrně (Peck et al. 2008).

Mangan (Mn) – v půdách se celkový obsah manganu pohybuje okolo 20 – 50 mg/kg. V půdě se může mangan vyskytovat v různých oxidačních stupních – Mn^{2+}, Mn^{3+}, Mn^{4+}. Hlavní část manganu přijatelného pro rostliny jsou ionty Mn^{2+}, které se nacházejí v půdním roztoku a sorbované a sorpční komplex. Vícemocné sloučeniny manganu jsou málo rozpustné, takže nejsou přítomny v půdním roztoku a rostliny je mohou využívat až po redukci na sloučeniny manganaté. V půdě probíhají změny manganu podle oxidačně-redukčních podmínek. Všechny vlivy, které podporují oxidační procesy (dobrá aerace, mikroorganismy, přísun organických látek i snížená vlhkost), vedou k tvorbě vícemocných sloučenin Mn a snižují jeho přijatelnost, podobně jako zvýšení hodnoty pH (Vaněk et al. 2016). Poměr mezi Mn-oxidujícími a Mn-redukujícími mikroorganismy může určovat dostupnost půdního manganu pro rostliny (Marschner et al. 1991).

Mangan je rostlinami přijímán jako kation Mn^{2+}. Jeho příjem je výrazně ovlivněn acidními podmínkami půdy. V kyselejší oblasti pH a při redukčních podmínkách je přijatelnost Mn vyšší a může vést na zamokřených pozemcích až k jeho toxicitě (Vaněk et al. 2016). Přebytek manganu způsobující toxicitu pro rostliny je velmi rozšířený jev, hned po hliníku (Al) je přebytek Mn celosvětově nejvíce omezujícím faktorem v kyselých půdách (Rengel 2000). Kromě toho se vysoké koncentrace Mn v půdním roztoku vyskytují také ve špatně odvodněných a redukovaných prostředích souvisejících s podmáčenými půdami (Sparrow & Uren 1987). V pletivech pšenice po zamokření na kyselé půdě, byly pozorovány vysoké až toxické koncentrace manganu (Khabaz-Saberi et al. 2006). Naopak zvýšená oxidace na půdách neutrálních a alkalických, provzdušněných a silně biologicky činných půdách vede k omezení příjmu Mn až k jeho nedostatku. Obsah manganu v rostlinách je obecně dán jednak stanovištěm, kde je rozhodující pH a jednak také rostlinným druhem. Mangan se v rostlině

účastní řízení oxidačních, redukčních a karboxylačních procesů, také při tvorbě glycidů a bílkovin. Mnoho enzymů je aktivováno právě díky manganu. Mangan je dále velmi důležitým prvkem při fotosyntetických pochodech (nepřímo se podílí na syntéze chlorofylu). Mírný nedostatek manganu se promítne do omezené syntézy bílkovin, vitamínu C a chlorofylu (snížení kvality produktů). U obilnin se objevují po odnožování na středních listech šedavé, později hnědnoucí protáhlé skvrny. Při silném nedostatku manganu dochází k nekrozám pletiv a odumírání rostlin. Porost je značně nevyrovnaný. Reakce rostlin na nadbytek manganu bývá dosti podobná jako při jeho nedostatku (Vaněk et al. 2016).

4.5.4 Význam mikroprvků pro člověka

V zájmu zachování lidského zdraví a pohody musí být do stravy zahrnuto nejméně 22 biogenních prvků (Welch & Graham 2005), včetně zinku, manganu, mědi a železa (Graham et al. 2007; Wang et al. 2008). Biologická dostupnost mikroelementů v obilovinách je obecně nízká (Kan 2015; Dapkekar et al. 2018). Odhaduje se, že více než dvě miliardy lidí na celém světě trpí „skrytým hladem“ kvůli nedostatku mikroživin (White & Broadley 2009). Přibližně polovina světové populace má nedostatek zinku a anémie vyvolaná nedostatkem železa je nejběžnějším onemocněním v Evropě (Kan 2015; Winiarska-Mieczan et al. 2019). Vzhledem k závažnosti minerální podvýživy u lidí na celém světě je třeba podporovat biofortifikaci mikroživin, zejména Fe a Zn, v obilovinách (Xu et al. 2011). Koncentrace Zn a Fe v komerčních kultivarech pšenice jsou obvykle 20 – 35 mg/kg (Rengel et al. 1999; Cakmak et al. 2004).

Pozitivní účinek síry na obsah zinku a železa, který je nedostatečný ve stravě velké části lidské populace, je obzvláště důležitý (White & Broadley 2009).

5 Metodika

5.1 Odběr vzorků z polních provozů

Vzorky půdy a nadzemní biomasy ozimé pšenice byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015 – 2020. Tyto provozy se nacházely v okresech Hradec Králové, Kutná Hora, Chomutov, Litoměřice, Louny, Mělník, Mladá Boleslav, Nymburk, Přerov a Znojmo.

Vzorky nadzemní biomasy ozimé pšenice byly odebrány na výšku strniště cca 3 cm. Dále byly rostlinné vzorky vysušeny při teplotě 45 °C. Odběr rostlinných vzorků ozimé pšenice probíhal ke konci kvetení (BBCH 65 – 69).

Půdní vzorky byly odebírány v hloubce orničního profilu během jarní regenerace ozimé pšenice. Odebírán byl půdní profil 0–30 cm.

Půdní reakce byla stanovena jako výměnné pH v 0,01 mol/l roztoku $CaCl_2$ (1:2,5 w/v), doba třepání 60 minut (Zbíral et al. 2016).

5.2 Chemické analýzy

Rostlinný materiál byl mineralizován rozkladem na suché cestě (Mader & Čurdová 1997). Obsah živin v půdě a v nadzemní biomase pšenice byl stanoven optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

Pro stanovení celkového obsahu dusíku v rostlinné biomase byl použit rozklad na mokré cestě v prostředí kyseliny sírové (1:20 w/v) katalyzovaným práškovým selenem. Obsah celkového dusíku v nadzemní biomase byl stanoven metodou podle Kjeldahla na přístroji Vapodest 50S (Gerhardt, Spolková republika Německo). Rostlinný materiál určený k analýzám byl homogenizován laboratorním střižným mlýnem SM100 (Retsch, Spolková republika Německo).

Půda byla po vysušení při laboratorní teplotě zhomogenizována a přeseta na sítu s velikostí ok 2 mm. Přístupný obsah živin v půdě byl stanoven metodami uvedenými v tabulce 1.

Tabulka 1. Sledované způsoby stanovení obsahů přijatelných živin v půdě

Vyluhovadlo	Vyluhovací poměr w/v	Doba třepání	Zdroj
voda	1:10	60 min	Kowalenko 2008
Mehlich 3	1:10	10 min	Mehlich 1984

6 Výsledky

Z výsledků grafů, kterými jsme zjišťovali korelační vztahy mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem vybraných mikroprvků v nadzemní biomase ozimé pšenice, jsme zjistili, že u všech sledovaných mikroprvků byla tato korelace velmi slabá až slabá. Všechny výsledky byly zjišťovány na alkalických půdách (pH ≥ 7). Tabulka 2 zobrazuje souhrn všech výsledků pro dané mikroprvky. Všechny sledované vztahy byly vyjádřeny lineární funkcí.

Tabulka 2. Výsledky závislosti obsahu přijatelné síry v půdě na obsah mikroprvků v nadzemní biomase ozimé pšenice

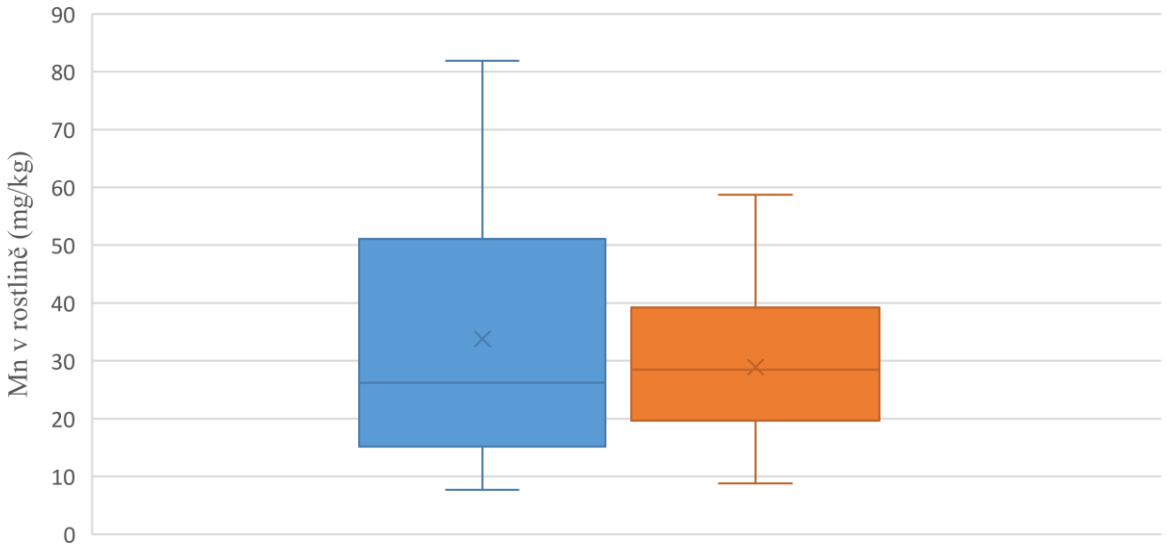
	r	síla korelace
S-Mehlich 3 x Mn	0,199	velmi slabá
S-vodný výluh x Mn	0,249	slabá
S-Mehlich 3 x Zn	0,045	velmi slabá
S-vodný výluh x Zn	0,069	velmi slabá
S-Mehlich 3 x Fe	0,101	velmi slabá
S-vodný výluh x Fe	0,172	velmi slabá

6.1 Výsledky pro vybrané mikroprvky

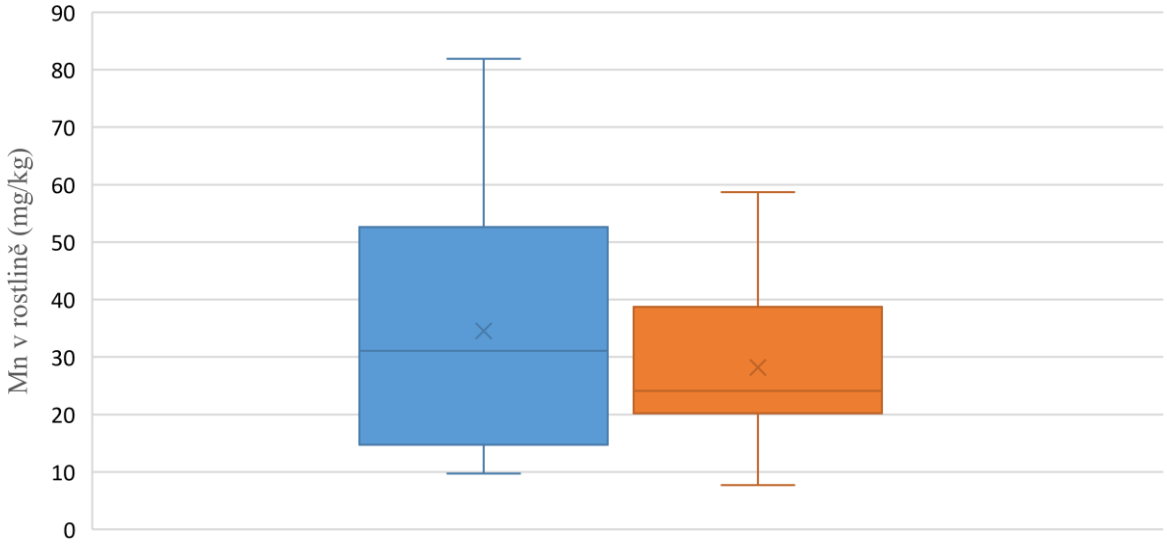
Jelikož jsme nenalezli průkaznou závislost mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem mikroprvků v nadzemní hmotě ozimé pšenice, přiklonili jsme se dále k porovnání obsahu daných mikroprvků na půdách s nižším obsahem přijatelné síry a vyšším obsahem přijatelné síry. Do půd s nižším obsahem přijatelné síry stanovené metodou Mehlich 3 jsme zahrnovali půdy do 20 mg/kg, nad 20 mg/kg půdy spadaly do kategorie s vyšším obsahem přijatelné síry. Dle stanovení přijatelné síry pomocí vodného výluhu, obsahovaly půdy s nižším obsahem přijatelné síry do 11 mg/kg, nad 11 mg/kg spadaly půdy do kategorie půd s vyšším obsahem přijatelné síry. Ve všech kategoriích bylo dosaženo a použito přibližně stejně velkých souborů dat.

6.1.1 Mangan

V případě manganu jsme zjistili, že vliv přístupné síry v půdě na jeho obsah v nadzemní biomase ozimé pšenice, nebyl žádný (viz. Graf 1 a Graf 2). Tento výsledek byl zjištěn u obou metod stanovení přijatelné síry v půdě, tj. Mehlich 3 a vodný výluh.



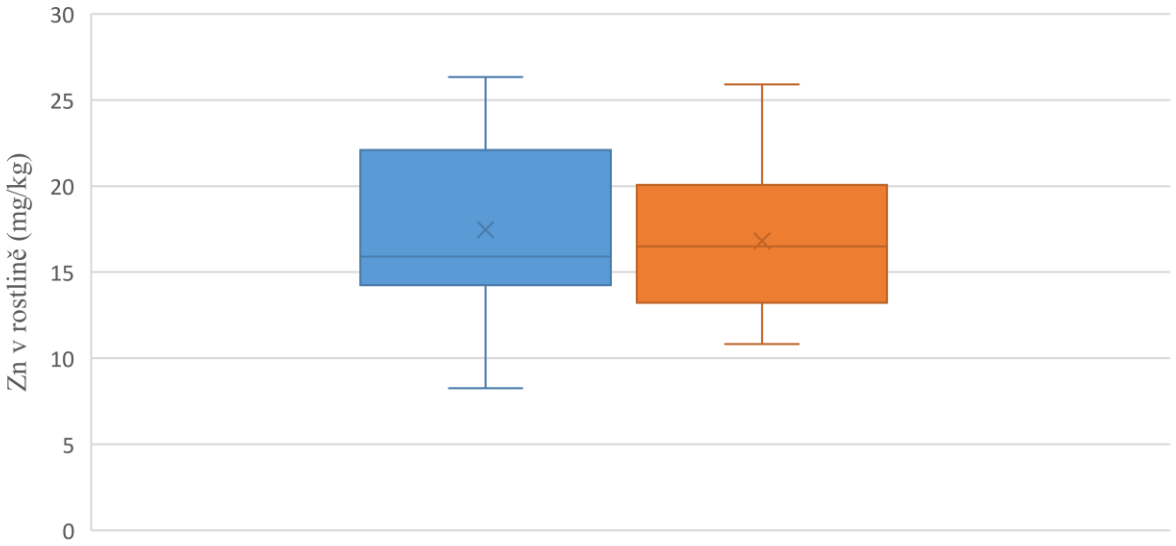
Graf 1. Obsah manganu v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené metodou Mehlich 3



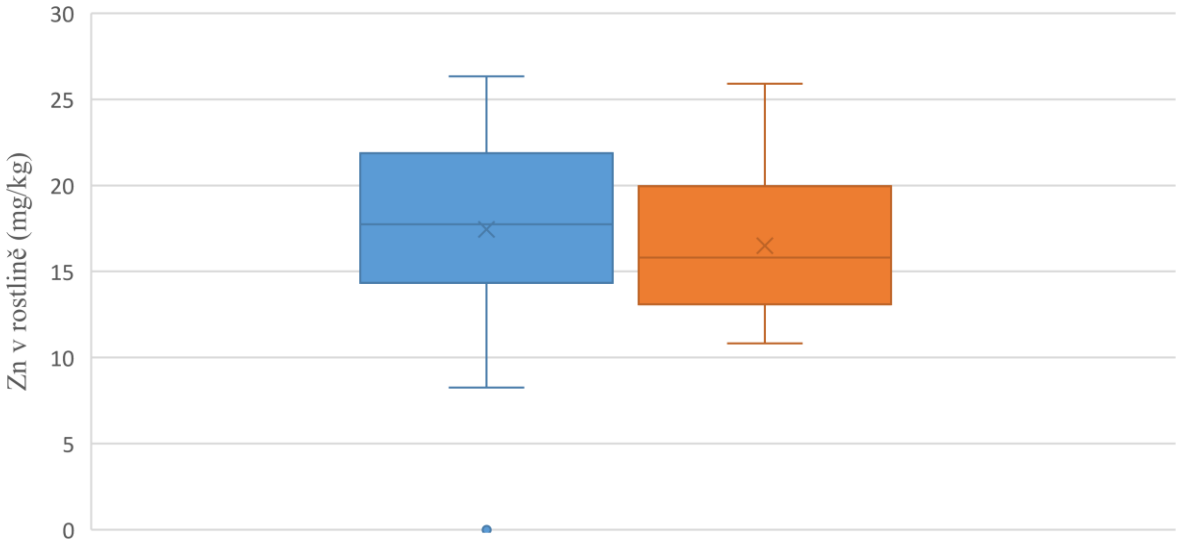
Graf 2. Obsah manganu v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené vodným výluhem

6.1.2 Zinek

Na výsledný obsah zinku v nadzemní biomase ozimé pšenice, stejně jako u manganu, neměla přijatelná síra v půdě žádný vliv, ani při porovnávání odlišných koncentracích přijatelné síry v půdě (viz. Graf 3 a Graf 4).



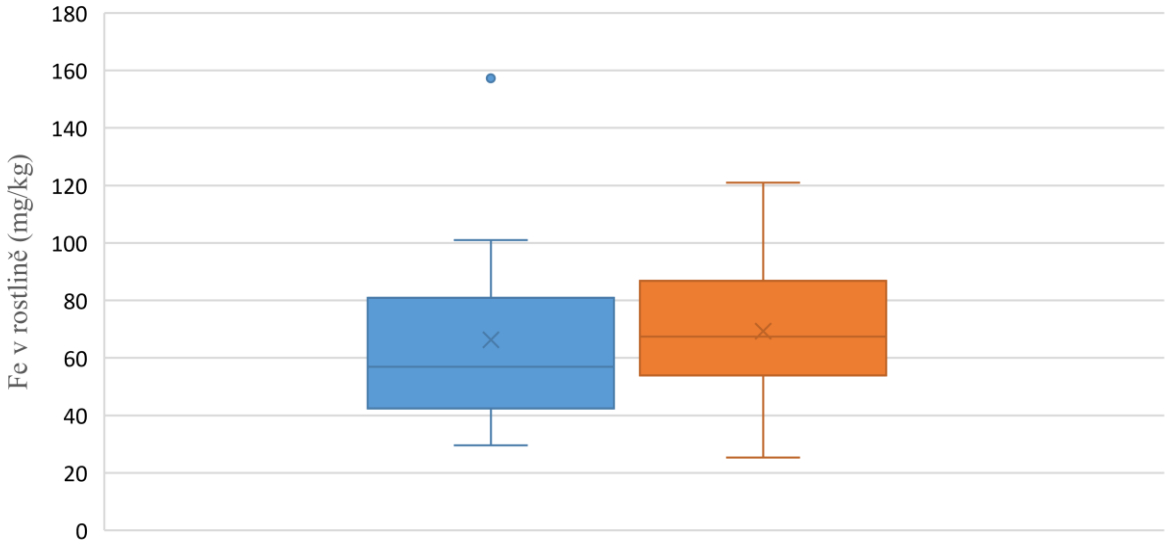
Graf 3. Obsah zinku v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené metodou Mehlich 3



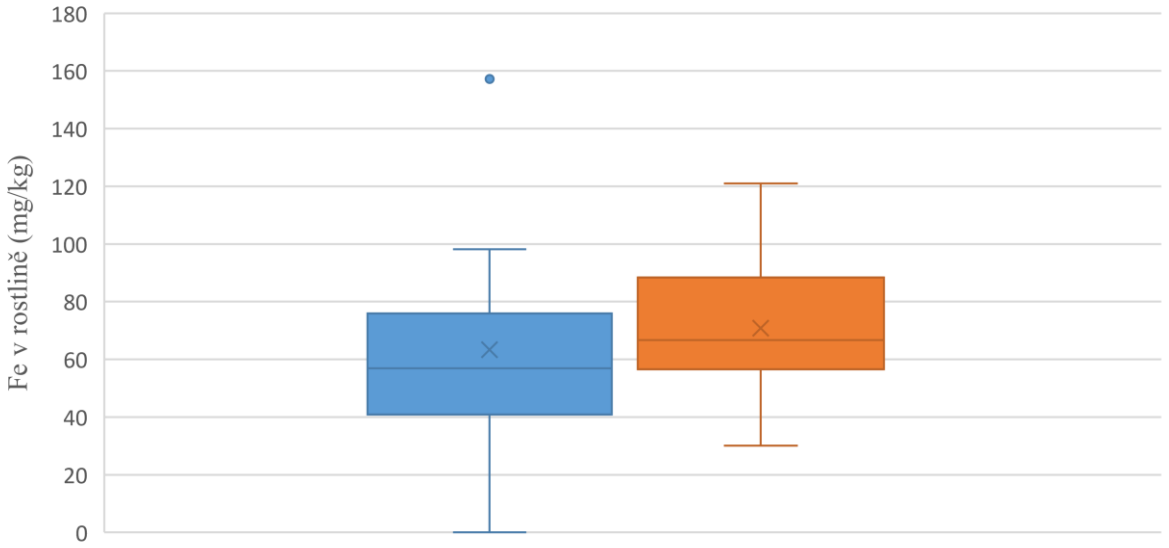
Graf 4. Obsah zinku v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené vodným výluhem

6.1.3 Železo

U tohoto sledovaného mikroprvku byly mírně rozdílné výsledky stanovené metodou Mehlich 3 a metodou stanovení přijatelné síry v půdě pomocí vodného výluhu. Metoda Mehlich 3 byla v tomto případě ve slabším vztahu s přijatelnou sírou v půdě (viz. Graf 5). Určitý viditelný trend mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem železa v nadzemní biomase ozimé pšenice, byl zejména v případě vodorozpustné síry (viz. Graf 6). Nicméně ani u železa nebyly výsledky závislosti mezi obsahem přístupné síry a obsahem mikroprvku v rostlině průkazné.



Graf 5. Obsah železa v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené metodou Mehlich 3



Graf 6. Obsah železa v nadzemní biomase ozimé pšenice na půdách s nižším (modrý sloupec) /vyšším (oranžový sloupec) obsahem přijatelné síry stanovené vodným výluhem

7 Diskuze

Cílem této práce je zjistit, jestli přijatelná síra v půdě ovlivňuje příjem sledovaných mikroprvků v nadzemní biomase ozimé pšenice. Dalším cílem je posoudit, jakým extrakčním činidlem je vhodnější stanovit přijatelný obsah síry v alkalických půdách z hlediska vztahu s obsahem sledovaných mikroprvků v rostlinách, v tomto případě v ozimé pšenici. Porovnávaná extrakční činidla jsou Mehlich 3 a vodný výluh.

7.1 Vliv přijatelné síry na příjem mikroprvků ozimou pšenicí

Dle výše uvedených výsledků naší práce v Tabulce 2, je síla korelačních vztahů mezi sledovanými mikroprvky (Mn, Zn, Fe) a obsahem přijatelné síry v půdě, velmi slabá až slabá. Protože nejsme schopni vidět závislost mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem mikroprvků v nadzemní biomase pšenice ozimé, přiklonili jsme se dále v této práci k porovnání obsahu mikroprvků na půdách s vyšším obsahem přístupné síry a na půdách s nižším obsahem přístupné síry. Jak je výše v práci uvedeno, u extrakčního činidla Mehlich 3 jsou půdy pod 20 mg/kg zařazené do půd s nižším obsahem přijatelné síry, nad 20 mg/kg spadají mezi půdy s vyšším obsahem přijatelné síry. Dle metodiky Kulhánka et al. (2018) zásobenost půd přijatelnou sírou extrahovanou metodou Mehlich 3, označuje půdy s obsahem pod 20 mg/kg jako půdy s nízkým až velmi nízkým obsahem přijatelné síry. Půdy s obsahem 20 mg/kg a výše jsou hodnocené jako vyhovující, dobré a s vysokým obsahem přijatelné síry. U metody vodného výluhu spadají půdy pod 11 mg/kg do kategorie půd s nižším obsahem přístupné síry, nad 11 mg/kg jsou zařazené do půd s vyšším obsahem přístupné síry. Ve všech kategoriích jsou použité přibližně stejně velké soubory dat. Matula (2007) ve své metodice kategorizuje zásobenost půd přístupnou sírou extrahovanou vodným výluhem tak, že půdy pod 11 mg/kg mají hluboký nedostatek přijatelné síry, 11 – 19 mg/kg jsou půdy se středním nedostatkem přístupné síry a výraznou potřebu hnojení, malý nedostatek mají půdy s obsahem 20 – 23 mg/kg, nad 23 mg/kg mají půdy dostatečný obsah přístupné síry a není nutné S hnojení.

Z našich výsledků krabicových grafů vytvořených pro toto porovnání je zřejmé, že vliv přijatelné síry na obsah manganu a zinku v rostlině, nebyl žádný. Z analyzovaných výsledků pro železo, je viditelný určitý trend mezi obsahem přijatelné síry v půdě a obsahem železa v nadzemní biomase ozimé pšenice. Nicméně ani tyto výsledky nebyly jasně průkazné. Jelikož jsme výsledky zaměřili na alkalické půdy s pH ≥ 7, jsou možným vysvětlením našich výsledků poznatky ze studie, kterou vypracovali White a Broadley (2009) a Frossard et al. (2000), kteří uvádějí, že obsah manganu a zinku v rostlině klesá se zvyšujícím se pH. Klikocka et al. (2017) prokázali ve své studii podobné výsledky, kde uvádí, že síra významně neovlivnila obsah a příjem zkoumaných živin, jako je železo, mangan, zinek a měď. Dále ale také zmiňuje, že trend obsahu a příjem mikroprvků byl zaznamenán při kombinaci hnojení, kde bylo aplikováno 80 – 120 kg/ha dusíku spolu s 50 kg/ha síry. Naproti tomu, Klikocka a Marks (2018) ve své práci potvrzují tvrzení, že přidání síry do každé dávky dusíku zvyšuje obsah a absorpci analyzovaných mikroživin, tj. železa, manganu, zinku a mědi. Odlišitelnost našich výsledků od jejich studie může být dána rozdílným pH půdy, kdy reakce půdy při jejich studii byla slabě kyselá (pH 5,6 – 5,8).

7.2 Srovnání vodného výluhu a metody Mehlich 3 při stanovení přijatelné síry v alkalických půdách

Obsah přijatelné síry v půdě je stanoven zmiňovanými metodami Mehlich 3 a vodný výluh. Stanoven je na 64 odebraných půdních vzorkách, celkově z deseti okresů v České republice. Analyzované výsledky u obou extrakčních činidel jsou zaměřené na alkalické půdy s pH ≥ 7. Průměrné pH na sledovaných alkalických půdách je 7,49 pH. U metody Mehlich 3 je stanovená průměrná hodnota ze všech odebraných vzorků 24,36 mg/kg přijatelné síry v půdě a průměrná hodnota ve vodném výluhu je 15,17 mg/kg.

Wendt (1995) a Jones (1990) uvádí, že Mehlich 3 nabízí rovnocenné předpovědi úrodnosti půd, stejně jako jiné ověřené extrakční metody. Dále zmiňují, že tuto metodu lze také účinně využít k analyzování potencionálně deficitních půd, a to pro jednu nebo více makro- i mikroživin. Kulhánek et al. (2018) zmiňuje nesporné výhody této metody, které spočívají v univerzálnosti, relativní jednoduchosti provedení a dále také v běžném použití v ČR i v zahraničí.

Ačkoli je Mehlich 3 zaveden původně pro kyselé půdy, jeho použití je rozšířeno i na alkalické půdy (Tran et al. 1990; Alva 1993; Mamo et al. 1996; Schmisek et al. 1998). Toto tvrzení potvrzují také Hanlon a Johnson (1984) a Wendt (1995), kteří zmiňují, že díky své zvýšené pufrovací kapacitě je Mehlich 3 účinný na alkalických půdách. Naproti tomu, Kowalenko et al. (2014) uvádějí, že na obsahy přijatelné síry v půdě, stanovené pomocí metody Mehlich 3, má významný vliv pH půdy. Dále upřesňují, že Mehlich 3 je schopný extrahovat více přijatelné síry při pH < 6,0.

Pouze obsah železa v nadzemní biomase ozimé pšenice byl ve slabším vztahu s přístupnou sírou stanovenou metodou Mehlich 3 než se sírou stanovenou vodným výluhem. Nicméně stanovené výsledky přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3 pro ostatní sledované mikroprvky, zinek a mangan, vychází rovnocenně s výsledky již ověřené extrakční metody vodného výluhu. Díky výsledkům v naší práci, můžeme souhlasit s tvrzením, že Mehlich 3 lze účinně použít ke stanovení přijatelné síry na alkalických půdách.

8 Závěr

- Hypotéza, že obsah přijatelné síry v půdě zlepšuje příjem železa, manganu a zinku v nadzemní biomase ozimé pšenice, nebyla v naší práci potvrzena. I když u analyzovaného výsledku pro obsah železa v nadzemní biomase ozimé pšenice byl viditelný trend závislosti mezi přijatelnou sírou v půdě a obsahem železa v nadzemní biomase ozimé pšenice, tento výsledek nebyl jasně průkazný.

- V této práci byla potvrzena hypotéza o tom, že extrakční činidlo Mehlich 3 je spolehlivou a rovnocennou alternativou pro stanovení přijatelné síry na alkalických půdách, stejně jako je vodný výluh. V tomto pokusu nebyla extrakční účinnost metody Mehlich 3 výrazně ovlivněna alkalickým pH analyzovaných půd.

9 Literatura

Alva AK. 1993. Comparison of Mehlich 3, Mehlich 1, ammonium bicarbonate-DTPA, 1.0M ammonium acetate, and 0.2M ammonium chloride for the extraction of calcium, magnesium, phosphorus, and potassium for a wide range of soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis **24**:603-612.

Astolfi S, Pii Y, Terzano R, Mimmo T, Celletti S, Allegretta I, Lafiandra D, Cesco S. 2018. Does Fe accumulation in durum wheat seeds benefit from improved wholeplant sulfur nutrition? Journal of Cereal Science **83**:74-82.

Aulakh MS. 2003. Crop responses to sulphur nutrition. Pages 341-358 in Abrol YP, Ahmed A, editors. Sulphur in Plants. Kluwer, Boston USA.

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

Balík J, Tlustoš P. 2000. Hnojení ozimé řepky sírou. Květy olejnin **4**:2-3.

Barunawati N, Hettwer Giehl RF, Bauer B, Von Wirén N. 2013. The influence of inorganic nitrogen fertilizer forms on micronutrient retranslocation and accumulation in grains of winter wheat. Plant Science **4**:320.

Bird PR, Hume ID. 1971. Sulphur metabolism and excretion studies in ruminants: IV: cystine and sulphate effects upon flow of sulphur from the rumen and upon sulphur excretion by sheep. Australian Journal of Agricultural Research **22**:443-452.

Błaziak J. 2007. Estimation of changeset microelement contents in cereals as influence of calcium and magnesium soil application. Annales UMCS **62**:77–84.

Cakmak I, Torun A, Millet E, Feldman M, Fahima T, Korol A, Nevo E, Braun HJ, Ozkan H. 2004. Triticum dicoccoides: An important genetic resourcefor increasing zinc and iron concentration inmodern cultivated wheat. Soil Science and Plant Nutrition **50**:1047-1054.

Castellano SD, Dick RP. 1991. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil. Soil Science Society of America Journal **55**:114-121.

Ceccotti SP. 1994. Sulphur fertilizers: an overview of commercial developments and technological advances. Sulphur in Agriculture **18**:58-64.

Černý J, et al. 2020. Vhodná dávka síry a termín aplikace při jarním hnojení ozimé pšenice. Kurent, České Budějovice. Dostupné z https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vhodna-davka-siry-a-termin-aplikace-pri-jarnim-hnojeni-ozime-psenice (přístupné leden 2020).

Černý J, Shejbalová Š, Kovářík J, Kulhánek M. 2014. Předseťové a podzimní hnojení pšenice ozimé. Kurent, České Budějovice. Dostupné z https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/predsetove-a-podzimni-hnojeni-psenice-ozime (přístupné prosinec 2020).

Český statistický úřad. 2020. Osevní plochy ozimých plodin pro sklizeň v roce 2020. Český statistický úřad, Praha. Dostupné z https://www.czso.cz/csu/czso/osevni-plochy-ozimych plodin-pro-sklizen-v-roce-2020 (přístupné prosinec 2020).

Dämmgen U, Walker P, Grünhale L, Jäger HJ. 1998. The Atmospheric Sulphur Cycle. Pages 75-114 in Schung E, editors. Sulphur in Agroecosystems, Nutrients in Ecosystems volume 2. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Dapkekar A, Deshpande P, Oak MD, Paknikar KM, Rajwade JM. 2018. Zinc use efficiency is enhanced in wheat through nanofertilization. Scientific Reports **8**:6832.

Deloach HW. 1960. Analytical sulphur estimating in biochemical substances and the sulphur uptake with agriculture plants depending on the fertilizing [dissertation]. Universität Giessen, Germany.

Diviš J. 2010. Pěstování rostlin. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice.

Dobrovolskij V. 1983. Geografija mikroelementov: Globaľnoje rassejanije. Mysl, Moskva.

Donald D, Chapman SJ. 1998. Use of powdered elemental sulphur as a sulphur source for grass and clover. Communications in Soil Science and Plant Analysis **29**:1315-1328.

Ensminger LE, Freney JR. 1966. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. Soil Science **101**:283.

Eriksen J, Mortensen JV, Kjellerup VK, Kristjanson O. 1995. Forms and plant availability of sulfur in cattle and pig slurry. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **158**:113-116.

Eriksen J, Mortensen JV. 1999. Soil sulphur status following long-term annual application of animal manure and mineral fertilizers. Biology and Fertility of Soils **28**:412-416.

Eriksen J, Murphy MD, Schnug E. 1998. The soil sulphur cycle. Pages 39-73 in Schnug E, editors. Sulphur in Agroecosystems, Nutrients in Ecosystems volume 2. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Eriksen J. 1997. Sulpur cycling in Danish agricurtural soil: Inorganic suplhate dynamics and plant uptake. Soil Biology & Biochemistry **29**:1379-1385

Fageria NK. 2014. Nitrogen management in crop production. CRC Press, Boca Raton USA.

Faměra O. 1993. Základy pěstování ozimé pšenice. Institut výchovy a vzdělávání Mze ČR, Praha.

Förster S, Welp G, Scherer HW. 2012. Sulfur specification in bulk soil as influenced by long-term application of mineral and organic fertilizers. Plant Soil and Environment **58**:316-321.

Frossard E, Bucher M, Mächler, Mozafar FA, Hurrell R. 2000. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. Journal of the Science of Food and Agriculture **80**:861–879.

Graham RD, et al. 2007. Nutritious subsistence food systems. Pages 1-74 in Sparks DL, editors. Advances in Agronomy vol. 92. Elsevier, Amsterdam.

Hagstrom GR. 1986. Fertilizer sources of sulfur and their use. Pages 567–581 in Tabatabai MA, editors. Sulfur in Agriculture, Agronomy Monographs volume 27. ASA, CSSA, and SSSA, Madison.

Hanlon EA, Johnson GV. 1984. Bray/Kurtz, Mehlich 3, ammonium bicarbonate/DTPA and ammonium acetate extractions of P, K, and Mg in four Oklahoma soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis **15**:277–294.

Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL. 2005. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. Pearson Prentice Hall, New Jersey.

Henderson KN, et al. 2007. A structural and immunological basis for the role of human leukocyte antigen DQ8 in celiac disease. Immunity **27**:1–12.

Hezký P. 2012. Uskladnění produkce – Jak dlouho a za jakých podmínek je možné obilí skladovat? Farmář **11**:21-22.

Hřivna L, Hurtová L, Gálová J. 2004. Vliv hnojení dusíkem a sírou na podíl bílkovinných frakcí pšenice ozimé. Pages 7-16. Sborník číslo 4. Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity. Mendelova univerzita, Brno.

Hůla J, Procházková B. 2008. Minimalizace zpracování půdy. Profi Press, Praha.

Jaggi AC, Aulakh MS, Sharma R. 1999. Temperature effects on soil organic sulphur mineralization in subtropical soils of varying pH. Nutrient Cycling in Agroecosystems **54**:175-182.

Jaggi RC, Aulakh MS, Sharma R. 2005. Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and available P in acid, neutral alkaline soils. Biology and Fertility of Soils **41**:52–58.

Janzen HH, Bettany JR. 1987. Oxidation od elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science **67**:609-618.

Javůrek M, Vach M. 2006. Zjednodušené zakládání porostů při hospodaření bez živočišné výroby. Úroda **6**:34-37.

Jones JB. 1990. Universal soil extractants: Their composition and use. Communications in Soil Science and Plant Analysis **21**:1091–1101.

Kabata-Pendias A. 2011. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton USA.

Kan A. 2015. Characterization of the fatty acid and mineral compositions of selected cereal cultivars from Turkey. Records of Natural Products **9**:124.

Khabaz-Saberi H, Setter TL, Waters I. 2006. Waterlogging induces high to toxic concentrations of iron, aluminum and manganese in wheat varieties on acidic soil. Journal of Plant Nutrition **29**:899-911.

Kirkegaard J, Christen O, Krupinsky J, Layzell D. 2008. Break crop benefits in temperature wheat production. Field Crops Research **107**:185-195.

Klikocka H, Głowacka A. 2013. Does the sulphur fertilization modify magnesium and calcium content in potato tubers (*Solanum tuberosum L.*)? Acta Scientarum Polonorum **12**:41–53.

Klikocka H, Marks M. 2018. Sulphur and nitrogen fertilization as a potential means of agronomic biofortification to improve the content and uptake of microelements in spring wheat grain DM. Journal of Chemistry **2018**:9326820.

Klikocka H. 2010. The importance of sulphur in the biosphere and fertilization of plants. Przemysł Chemiczny **90**:903–908.

Klikocka H, Cybulska M, Nowak A. 2017. Efficiency of fertilization and utilization of nitrogen and sulphur by the spring wheat. Polish Journal of Environmental Studies **26**:2029–2036.

Klikocka H. 2011. The effect of sulphur kind and dose on content and uptake micro-nutrients by potato tubers (*Solanum tuberosum L.*). Acta Scientarum Polonarum **10**:137–151.

Kováč K, Kubinec S. 1998. Pestovanie ozimnej pšenice a pôdoochranárské technologie pestovania obilnín. VÚRV, Piešťany.

Kowalenko CG. 2008. Extraction times and analysis methods influence soil test measurements of phosphorus and sulphur. Canadian Journal of Soil Science **88**:733-747.

Kowalenko GG, Bittman S, Neilsen GH, Kennyes E, Hunt DE, Neilsen D. 2014. Potential for improving sulfur tests on agricultural soils in contrasting ecoregions of British Columbia, Canada. Geoderma Regional **1**:10–20.

Kuchtík F, Procházka I, Teksl M, Valeš J. 2005. Pěstování rostlin: speciální část. Vydavatelství Petr Večeřa, Třebíč.

Kulhánek M, Balík J, Sedlář O, Zbíral J, Smatanová M, Suran P. 2018. Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3 (certifikovaná metodika). Česká zemědělská univerzita, 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, Praha.

Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. 2011. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil **342**:149-164.

Lawrence JR, Germida JJ. 1988. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. Soils Science Society of America Journal **52**:672-677.

Liu HE, Wang QY, Rengel Z, Zhao P. 2015. Zinc fertilization alters flour protein composition of winter wheat genotypes varying in gluten content. Plant Soil and Environment **61**:195-200.

MacRitchie F, Gupta RB. 1993. Functionality-composition relationships of wheat flour as a result of variation in sulfur availability. Australian Journal of Agricultural Research **44**:1767-1774.

Mader P, Čurdová E. 1997. Metody rozkladu biologických materiálů pro stanovení stopových prvků. Chemické Listy **91**:227-236.

Mamo T, Richter C, Heiligtag B. 1996. Comparison of extractants for the determination of available phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sodium in some Ethiopian and German soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis **27**:2197-2212.

Marschner P, Ascher JS, Graham RD. 1991. Effect of manganese-reducing rhizosphere bacteria on the growth of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* and on manganese uptake by wheat (*Triticum aestivum L.*). Biology and Fertility of Soils **12**:33-38.

Marschner P. 2012. Marschner's mineral nutrition on higher plants. Academic Press, London.

Mathot M, Mertens J, Verlinden G, Lambert R. 2008. Positive effect of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium. European Journal of Agronomy **28**:655–658.

Matula J. 2007. Výživa a hnojení sírou: metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Ústav zemědělských a potravinářských informací, 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.

Mengel K. 1991. Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena.

Nesheim L, Gautneb H, Myhr K. 1997. Plant uptake of sulphur and trace elements from pyrite applied on grassland. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science **47**:135-141.

Oerke EC. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science **144**:31-43.

Peck AW, McDonald GK, Graham RD. 2008. Zinc nutrition influences the protein composition of flour in bread wheat (*Triticum aestivum L.*). Journal of Cereal Science **47**:266-274.

Pedersen CA, Knudsen L, Schnug E. 1998. Sulphur fertilization. Pages 115-134 in Schnug E, editors. Sulphur in Agroecosystems, Nutrients in Ecosystems volume 2. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Petr J, et al. 1987. Počasí a výnosy. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Prasad R, Shivay YS. 2018. Sulphur in soil, plant and human nutrition. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences **88**:429–434.

Prugar J, Hraška Š. 1986. Kvalita pšenice. Príroda, Bratislava.

Prugar J. 2008. Kvalita rostlinných produktů na prahu 3. tisíciletí. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský ve spolupráci s komisí jakosti rostlinných produktů ČAZV, Praha.

Pulkrábek J, Capouchová I, Hamouz K. 2003. Speciální fytotechnika. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Randall PJ, Wrigley CW. 1986. Effects of sulphur supply on the yield, composition, and quality of grain from cereals, oilseeds, and legumes. Advences in Cereal Science and Technology **8**:171-206.

Rengel Z, Batten GD, Crowley DE. 1999. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. Field Crops Research **60**:27-40.

Rengel Z. 2000. Uptake and transport of manganese in plants. Pages 57-87 in Sigel A, Sigel H, editors. Metal Ions in Biological Systems. Marcel Dekker, New York.

Robson AD, Pitman MG. 1983. Interactions between nutrients in higher plants. Pages 147-180 in Laeuchli A, Bieleski RL, editors. Inorganic plant nutrition, Encyclopedia of Plant Physiology volume 15. Springer, Berlin.

Ryant P, Antošovský J, Škarpa P. 2017. Hnojení ozimé pšenice na jaře. Kurent, České Budějovice. Dostupné z https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/hnojeni-psenice-ozime-na-jare (přístupné prosinec 2020).

Shan X, Chen B, Zhang TH, Li FL, Wen B, Qian J. 1997. Relationship between sulfur specification in soils and plant availability. Science of Total Environment **199**:237–246.

Shewry PR, 2009. Wheat. Journal of Experimental Botany **60**:1537-1553.

Shi R, Zhang Y, Chen X, Sun Q, Zhang F, Römheld V, Zou C. 2010. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum L.*). Journal of Cereal Science **51**:165–70.

Shuman LM. 1998. Micronutrient fertilizers. Journal of Crop Production **1**:165–195.

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

Schmisek ME, Cihacek LJ, Swenson LJ. 1998. Relationship between the Mehlich 3 soil test extraction procedure and standard soil test methods in North Dakota. Communications in Soil Science and Plant Analysis **29**:1719–1729.

Schnug E, Haneklaus S, Murphy D. 1993. Impact of sulphur fertilisation on fertiliser nitrogen efficiency. Sulphur in Agriculture **17**:8-12.

Schnug E, Haneklaus S. 1994. The ecological importance of sulphur. Norwegian Journal of Agricultural Sciences **15**:149-156.

Sinclair SA, Krämer U. 2012. The zinc homeostasis network of land plants. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) **1823**:1553-1567.

Singh BR, Timsina YN, Lind OC, Cagno S, Janssens K. 2018. Zinc and iron concentration as affected by nitrogen fertilization and their localization in wheat grain. Plant Science **9**:307.

Smith IM, Chiarappa L, Van der Graff NA. 1984. World crop losses: An overview. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Soetan KO, Olaiya CO, Oyewole OE. 2010. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants. African Journal of Food Science **4**:200-222.

Soliman MF, Kostandii SF, Van Beusichem ML. 1992. Influence of sulphur and nitrogen fertilizer on the uptake of iron, manganese, and zinc by corn plants grown in calcareous soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis **23**:1289–1300.

Sommer AL, Lipman CB. 1926. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants. Plant Physiology **1**:231-249.

Sparrow LA, Uren NC. 1987. The role of manganese toxicity in crop yellowing on seasonally waterlogged and strongly acidic soils in north-eastern Victoria. Australian Journal of Experimental Agriculture **27**:303-308.

Sun QS, Huang J, Wu XJ, Jiang HD, Zhou Q. 2016. Effect of different acidities of acid rain on nitrogen and sulfur metabolism and grain protein levels in wheat after anthesis. Acta Ecologica Sinica **36**:190-199.

Swift RS. 1985. Mineralization and immobilization of sulphur in soils. Sulphur in Agriculture **9**:20-24.

Škrbić B, Onjia A. 2007. Multivariate analyses of microelement contents in wheat cultivated in Serbia. Food Control **18**:338-345.

Špaldon E, et al. 1982. Rastlinná výroba. Príroda, Bratislava.

Šroller J, et al. 1997. Speciální fytotechnika, rostlinná výroba. Ekopress, Praha.

Tao ZQ, Chang XH, Wang DM, Wang YJ, Ma SK, Yang YS, Zhao GC. 2018. Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins. The Crop Journal **6**:413-425.

Tisdale SL, Reneau RB Jr, Platou JS. 1986. Atlas of sulfur deficiency. Pages 295–322 in Tabatabai MA, editors. Sulfur in Agriculture, Agronomy Monographs volume 27. ASA, CSSA, and SSSA, Madison.

Tran TS, Giroux M, Guilbeault J, Audesse P. 1990. Evaluation of Mehlich 3 extractant to estimate the available P in Quebec soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis **21**:1-28.

Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, Praha.

Vaněk V, et al. 2012. Výživa zahradních rostlin. Academia, Praha.

Vaněk V, et al. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press, Praha.

Vaněk V, Kolář L, Štípek K, Jakl M. 2001. Úloha síry v rostlinách a její potřeba. Pages 27-34. Sborník ze 7. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv. AF ČZU, Praha.

Wang ZH, Li SX, Malhi S. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. Journal of the Science of Food and Agriculture **88**:7–23.

Welch RM, Graham RD. 2005. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology **18**:299–307.

Wendt JW. 1995. Evaluation of the Mehlich 3 soil extractant for upland Malawi soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis **26**:687-702.

White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. New Phytologist **182**:49–84.

Winiarska-Mieczan A, Kowalczuk-Vasilev E, Kwiatkowska K, Kwiecień M, Baranowska-Wójcik E, Kiczorowska B, Samolińska W. 2019. Dietary intake and content of Cu, Mn, Fe, and Zn in selected cereal products marketedin Poland. Biological Trace Element Research **187**:568-578.

Wood JM, Decker H, Chavan B, Rokos H, Spencer JD, Hess S, Thornton MJ, Paus R, Schallreuter KU. 2009. Senile hair graying: H_2O_2-mediated oxidative stressaffects human hair color by blunting methioninesulfoxide repair. The FASEB Journal **23**:2065–2070.

Xu YF, An DG, Li HJ, Xu HX. 2011. Breeding wheat for enhanced micronutrients. Canadian Journal of Plant Science **91**:231-237.

Yan F, Mengel K. 1992. Determination of lime requirement by electro-ultrafiltration (EUF). European Journal of Agronomy **1**:71-77.

Yang E, Chen WR, Feng Y. 2007. Improving human micronutrient through biofortifiction in the soil-plant system: China as a case study. Environmental Geochemistry and Health **29**:413–428.

Yang GM, Zhao GC, Liu LH, Yang YS. 2007. Sulphur effect on protein components and grain yield of wheat. Journal of Soil Science **38**:89-92.

Zbíral J, Čižmárová E, Obdržálková E, Rychlý M, Vilamová V, Srnková J, Žalmanová A. 2016. Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Národní referenční laboratoř, Brno.

Zelený F, Zelená E. 1999. Změna v bilanci síry v rostlinné výrobě České republiky. Úroda **3**: 23-25.

Zhao FJ, Hawkesford MJ, McGrath SP. 1999a. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. Journal of Cereal Science **30**:1-17.

Zhao FJ, Salmon SE, Withers PJ, Monaghan JM, Evans EJ, Shewry PR, McGrath SP. 1999b. Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions. Journal of Cereal Science **30**:19–31.

Zimolka J, et al. 2005. Pšenice-pěstování, hodnocení a užití zrna. Profi Press, Praha.

Zörb C, Grover C, Steinfurth D, Mühling KH. 2010. Quantitative proteome analysis of wheat gluten as influenced by N and S nutrition. Plant and Soil **327**:225–23.