

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Využití aniontovýměnných membrán ke stanovení
přijatelného obsahu síry pro pšenici pěstovanou v
nealkalických půdách**

Bakalářská práce

Autor práce: Josef Král

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sedlář, Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití aniontovýměnných membrán ke stanovení přijatelného obsahu síry pro pšenici pěstovanou v nealkalických půdách" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17.7.2020

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Ondřejovi Sedlářovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a za cenné rady, které mi v průběhu vypracovávání poskytl.

Využití aniontovýměnných membrán ke stanovení přijatelného obsahu síry pro pšenici pěstovanou v nealkalických půdách

Souhrn

Ozimá pšenice (*Triticum aestivum*) je nejpěstovanější plodinou v České republice s výměrou okolo 758 tis. ha. Pšenici se nejlépe daří pěstovat tam, kde jsou úrodné půdy, převážně černozemě, ale i lužní typy v kukuřičné oblasti a černozemní či hnědozemní půdy na spraších v řepařské oblasti.

Síra je poslední dobou často deficitním prvkem nejen v půdách v České republice. V minulém století byl síry v půdách dostatek, a to především díky množství elektráren spalujících uhlí. V posledních letech ale ubylo tepelných elektráren a ty, které zbyly, začaly používat odsiřovací zařízení. U pšenice se deficit síry projevuje zejména ve zhoršení pekařské kvality zrna.

Cílem této bakalářské práce bylo ověřit možnost uplatnění aniontovýměnných membrán pro hodnocení obsahu síry přístupné pšenici v nealkalických půdách a definovat optimální obsah takto stanovené síry v půdě. Vzorokly půdy a nadzemní biomasy byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015–2019 ze 17 okresů v České republice. Odběr rostlinných vzorků probíhal u ozimé pšenice na počátku sloupkování (BBCH 30–31) a ke konci kvetení (BBCH 65–69).

Nejvhodnějším vyluhovadlem pro stanovení obsahu přijatelné síry v půdě byl Mehlich 3, který vysoce a stabilně koreloval jak s poměrem N:S, tak i s obsahem síry v nadzemní biomase. Metoda použití vodného výluhu vykazovala stabilní a průměrně silné korelace v průběhu vegetace mezi sírou v půdě a sírou v rostlině. Při stanovení obsahu přijatelné síry v půdě pomocí AEM membrán na základě vztahu mezi obsahem síry v půdě a obsahem síry v rostlinách byla zjištěna optimální hodnota přijatelné síry v půdě ve fázi sloupkování 0,47 ppm a ve fázi kvetení 8,14 ppm. Vyšší spolehlivost poměru N:S než celkového obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice nebyla potvrzena, neboť silnější korelace s obsahem přijatelné síry v půdě byly zaznamenány s obsahy síry v nadzemní biomase.

Klíčová slova: AEM, poměr N:S, pšenice, síra, vodný výluh

Use of Anion Exchange Membranes for Determination of Sulphur Content Available for Wheat Grown on Noncalcareous Soils

Summary

Winter wheat (*Triticum aestivum*) is the most cultivated crop in the Czech Republic with an area of about 758 thousand ha. Wheat is best grown where there are fertile soils, mostly black soils, but also floodplain types in the corn area and black or brown soils on loess in the beet area.

Recently, sulfur has often been a deficit element not only in soils in the Czech Republic. In the last century, there was high sulfur input into soil from atmospheric deposition, mainly due to the number of coal-fired power plants. In recent years, some of coal-fired power plants have been removed and the remaining ones have begun to use wet desulphurization. In the case of wheat, the deficit is reflected mainly in the quality of bread-making wheat.

The aim of this bachelor's thesis was to verify the possibility of using anion exchange membranes to evaluate the sulfur content available for wheat in non-alkaline soils and to define the optimal content of sulfur in the soil. Soil and aboveground biomass samples were taken from field operating areas in the years 2015–2019 from 17 districts in the Czech Republic. Soil and aboveground biomass samples were taken at the beginning of the jointing (BBCH 30-31) and the end of flowering (BBCH 65-69).

The most suitable leachate for the determination of the acceptable sulfur content in the soil was Mehlich 3, which correlated highly and stably with both the N:S ratio and the sulfur content in the aboveground biomass. The method of using aqueous leaching showed stable and moderately strong correlations during vegetation between sulfur in the soil and sulfur in the plant. When determining the available sulfur content in the soil using AEM membranes based on the relationship between the sulfur content in the soil and the sulfur content in plants, the optimal value of acceptable sulfur in the soil was found in the jointing phase 0,47 ppm and in the flowering phase 8,14 ppm. The higher reliability of the N:S ratio than the total sulfur content in the aboveground biomass of winter wheat was not confirmed, as stronger correlations with the acceptable sulfur content in the soil were recorded with the sulfur contents in the aboveground biomass.

Keywords: AEM, N:S ratio, wheat, sulphur, water extract

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Cíl práce	8
3	Literární rešerše	9
3.1	Pšenice setá	9
3.1.1	Význam pšenice seté	9
3.1.2	Produkce pšenice seté.....	9
3.1.3	Agrotechnika	10
3.1.4	Charakteristika druhu	12
3.1.5	Výživa a hnojení pšenice.....	12
3.2	Síra	15
3.2.1	Formy síry	15
3.2.2	Síra v životním prostředí	16
3.2.3	Síra v půdě.....	18
3.2.4	Síra v rostlině.....	20
3.2.5	Hnojiva obsahující síru.....	24
3.2.6	Metody stanovení přístupné síry v půdě.....	26
4	Metodika.....	29
5	Výsledky	30
6	Diskuse.....	37
7	Závěr.....	40
8	Literatura	41

1 Úvod

Pšenice je jednou z nejpěstovanějších obilnin na celém světě. Má tedy patřičný ekonomický dopad na celý svět, zejména na Evropu. Pšenice je středně náročnou plodinou, co se odčerpávání živin týče. Konkrétně síry je odčerpáváno průměrně 4,3 kg na 1 tunu zrna pšenice.

Síra je zejména v poslední době často limitujícím makroprvkem ve výživě rostlin. V minulém století s deficitem síry žádný problém nebyl, a to z důvodu emisí oxidu siřičitého z tepelných elektráren spalujících zejména hnědé uhlí. V současnosti však za prvé těchto elektráren ubylo a za druhé elektrárny začaly odsiřovat. Tím se značně snížily emise a tím se snížilo množství síry uměle uvolněné do prostředí. Z těchto důvodů dnes musíme dbát na dostatečné hnojení.

Síra má v rostlině mnoho funkcí. V rostlinách se nejčastěji vyskytuje ve formě aminokyselin methioninu a cysteinu, které jsou nedílnou součástí bílkovin. Nachází se také v řadách sloučenin, jako je acetylkoenzym A, který se podílí na syntéze lipofilních sloučenin, jako jsou mastné kyseliny, a má stěžejní roli při tvorbě terpenů (například fytosteroly, karotenoidy a růstové hormony). Rostlina síru přijímá aktivně přes kořeny nebo průduchy na listech převážně ve formě síranového aniontu.

V současné době jsou používány k extrakci síry z půdy zejména vyluhovací voda a v poslední době také Mehlich 3. Mé téma bakalářské práce přidává k těmto dvěma způsobům i relativně nový. Tím způsobem mám na mysli použití aniontovýměnných membrán. Tímto způsobem je popsána extrakce síranu z půdy pomocí proužků fosfátované aniontovýměnné membrány. Principem funkce AEM membrán je výměna iontů HCO_3^- nasorbovaných z NaHCO_3 za síranové anionty v roztoku, jež jsou poté zpětně desorbovány pomocí HCl .

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je ověřit možnost uplatnění aniontovýměnných membrán pro hodnocení obsahu síry přístupné pšenici v nealkalických půdách a definovat optimální obsah takto stanovené síry v půdě.

2.1 Hypotézy

- Metoda s využitím aniontovýměnných membrán je spolehlivá pro stanovení přijatelného obsahu síry v nealkalických půdách při pěstování pšenice ozimé.
- Poměr N:S v nadzemní biomase je spolehlivější parametr hodnocení výživného stavu ozimé pšenice sírou než obsah síry v nadzemní biomase.

3 Literární rešerše

3.1 Pšenice setá

3.1.1 Význam pšenice seté

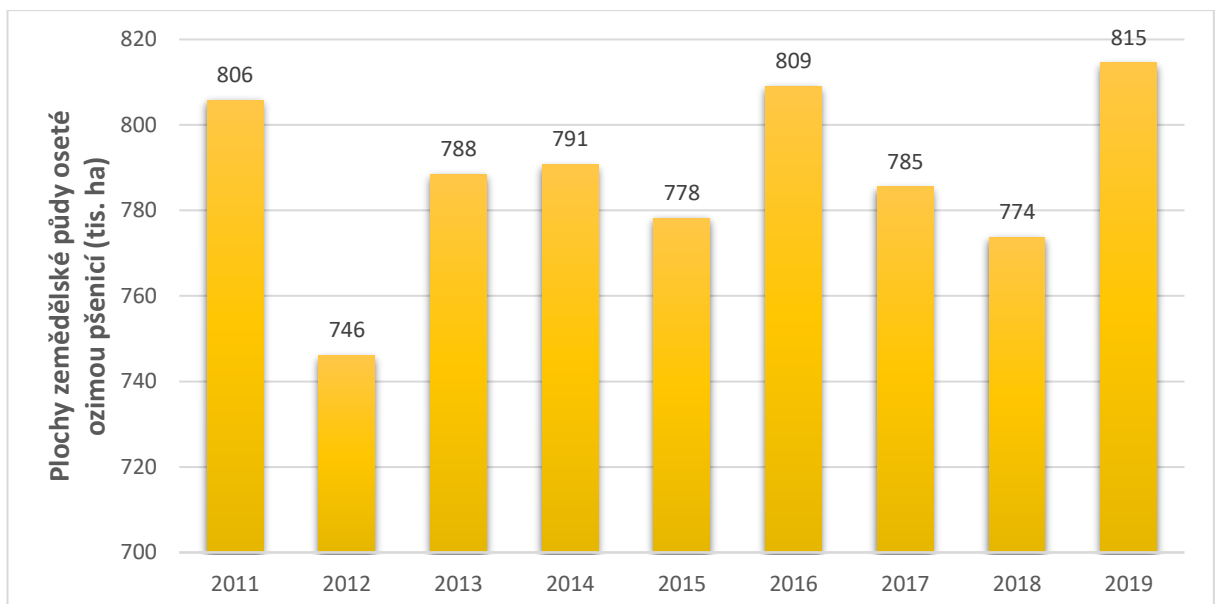
Archeologické nálezy dokládají pěstování pšenice na území Íránu již 6000 let př. n. l. Na území České republiky se objevila pšenice setá v neolitu – 5000 let př. n. l. Poskytuje zrno, které se používá jako potravinu, krmivo a jako surovina. Zpracovávají se také stébla (sláma) a otruby (semenné slupky). Její výhodou, tak jako u jiných obilovin, je jednoduchá skladovatelnost a poměrně dlouhá trvanlivost. Pšenice má vysokou výživnou hodnotu, v Evropě je základní potravinářskou surovinou pro výrobu pečiva, těstovin a rozmanitých pokrmů. Průmyslově se využívá jako surovina k výrobě škrobu, lihu nebo piva. Pšenice je komoditní surovinou stejně jako například kukuřice, měď nebo ropa, se kterou se obchoduje na komoditních burzách (Kůst 2019).

3.1.2 Produkce pšenice seté

3.1.2.1 Česká republika

Na základě definitivní sklizně obilovin podle ČSÚ je stanovena produkce pšenice v roce 2019 ve výši 4812,2 tis. tun. Z tohoto množství je 4716,5 tis. tun ozimé pšenice a 95,7 tis. tun jarní pšenice. Celková výroba pšenice vzrostla proti skutečnosti předchozího roku o 395 tis. tun. Co se týče průměrného výnosu, v České republice byl v roce 2019 5,79 t/ha (ČSÚ 2019). Vývoj osevních ploch ozimé pšenice uvádí graf 1.

Graf 1: Plochy zemědělské půdy oseté ozimou pšenicí setou (ha) v letech 2011–2019 v České republice (ČSÚ 2019)



3.1.2.2 Evropská unie

Plocha osetá pšenici se v jednotlivých státech EU výrazně liší. V Portugalsku tvoří 17,3 % z celkové plochy, zatímco v Bulharsku činí plocha osetá pšenici 61,8 % (Bozek et al. 2016). Na základě údajů Evropské komise (DG AGRI) z října 2018 bylo v marketingovém roce 2017/2018 z celkové plochy 55,2 mil. ha sklizeno 305,6 mil. tun obilovin. Z toho zaujímá pšenice 142,1 mil. tun a pšenice tvrdá 8,8 mil. tun. Ve srovnání s předchozím rokem jde o nárůst celkové využitelné produkce obilovin v EU o 3,9 %. Meziročně se snížila produkce žita a ječmene, ke zvýšení produkce došlo u pšenice seté i tvrdé a kukuřice.

Z hlavních producentů států produkce obilovin poklesla v Itálii, Španělsku a Maďarsku, vzrostla naopak v Německu, Francii, Rumunsku, Polsku a ve Velké Británii. Průměrný výnos sklizně byl 5,5 t/ha. Výnosy oproti předchozímu roku vzrostly u pšenice seté i tvrdé, klesly u ječmene, kukuřice a žita (Kůst 2019).

3.1.2.3 Svět

V marketingovém roce 2017/2018 by mělo být podle odhadu IGC z května 2019 ze sklizňové plochy 220,4 mil. ha sklizeno 763,4 mil. tun pšenice při průměrném výnosu 3,5 t/ha. Nejvíce pšenice na základě uvedených odhadů v marketingovém roce 2017/2018 měla vyprodukovat EU (151,4 mil. tun), Čína (138,2 mil. tun), Indie (98,5 mil. tun), Rusko (85,1 mil. tun), USA (47,3 mil. tun), Austrálie (35,1 mil. tun), Kanada (30 mil. tun), Ukrajina (27 mil. tun), Turecko (21,5 mil. tun), Argentina (18,5 mil. tun) a Kazachstán (14,8 mil. tun). Celosvětová sklizeň pšenice tak meziročně vzrostla o 0,86 % na rekordní úroveň. Z hlavních světových producentů by sklizeň pšenice měla být oproti předchozímu roku vyšší především v EU, Indii, Číně, Rusku, na Ukrajině, v Turecku a v Argentině, pokles produkce je naopak v USA, Kanadě, Austrálii a v Kazachstánu (Kůst 2019).

3.1.3 Agrotechnika

Vedle klimatických podmínek a průběhu počasí mají na kvalitu pšenice vliv i podmínky půdní. Ve většině oblastí, kde se daří pěstovat kvalitní potravinářskou pšenici, jsou úrodné půdy, převážně černozemě i lužní typy v kukuřičné oblasti a černozemní či hnědozemní půdy na spraších v řepařské oblasti. Osev pšenice v těchto oblastech může dosahovat až 30 % z orné půdy, ale při celkovém zastoupení obilnin do 55 %. Vysoké zastoupení obilnin, včetně kukuřice na zrno, nedává takovou jistotu dosažení dobré jakosti (Petr 2001).

Pšenici vyhovují hlubší, hlinité a jílovitohlinité půdy s neutrální až slabě kyselou půdní reakcí a s dostatečnou zásobou živin. Velmi dobré podmínky pro pěstování pšenice jsou zejména v oblastech s průměrnou teplotou v jarním a letním období 14–17 °C a s nízkými

srážkami 250–350 mm (Zimolka 2005). V České republice převažuje pěstování ozimé pšenice, která poskytuje stabilní a vysoké výnosy kvalitního zrna. Nejvyšší kvalita potravinářské pšenice je docilována v teplejších oblastech (Vaněk et al. 2007).

3.1.3.1 Vliv předplodiny

Předplodina je významným agrotechnickým faktorem. Volba vhodné předplodiny patří na přední místo mezi faktory vytvářející jistotu dosažení dobré jakosti pšenice. Má, jak známo, mnohostranný vliv na půdu, na její strukturu, biologickou aktivitu, fyzikální poměry, může mít i fyto-sanitární vliv, ale zejména ovlivňuje zásobu živin v půdě a dynamiku jejich uvolňování pro ozimou pšenici. Hlavně jde v tomto směru o dusík. V řadě pokusů se dokonce ukázalo, že vliv předplodiny na kvalitu, tj. na obsah lepku a bílkovin, byl vyšší než vlastní hnojení průmyslovými hnojivy.

Nejvhodnější jsou předplodiny s obecně uznávanou vysokou předplodinovou hodnotou, jako jsou jeteloviny (vojtěška, jetel). V suchých oblastech však nebývá vojtěška dobrou předplodinou, protože příliš vysušuje půdu, zvláště po víceletém pěstování, a následná pšenice strádá nedostatkem vláhy. Po jetelovinách je velká zásoba dusíku a též dynamika jeho uvolňování je právě pro potravinářskou pšenici velmi příznivá, protože se dusík uvolňuje i v druhé polovině vegetace.

Další skupinou dobrých předplodin jsou luskoviny hrách a bob. Zde je též vysoká zásoba dusíku a příznivá struktura půdy, která podmiňuje dobré základní předseťové zpracování půdy a příznivý vodní režim.

Klasickou dobrou předplodinou je i ozimá řepka, která jediná z dobrých předplodin zvyšuje svůj podíl na orné půdě. Vhodnou předplodinou jsou i okopaniny, například brambory, které se začínají pěstovat i v oblastech vodných pro potravinářskou pšenici. U nich (jako předplodin) ceníme, že se k nim hnojí organickými hnojivy. U cukrovky jako předplodiny pro ozimou pšenici nám vadí pozdní sklizeň a tím i pozdní setí, což není pro dobrou jakost příznivé (Petr 2001).

Významné místo mezi předplodinami co do zastoupení v současné době zaujímá kukuřice, která díky možnostem využití pro technické účely zaujímá u nás relativně velkou plochu. I když je z hlediska následné plodiny značný rozdíl mezi předplodinou kukuřicí na siláž a kukuřicí na zrna, vždy je nutno počítat s tím, že se po kukuřici zhorší půdní struktura a sníží obsah pohotových živin v půdě v raných fázích růstu pro následnou ozimou pšenici. Kukuřice na siláž jako předplodina pro ozimou pšenici nemá tak velké problémy s organickou hmotou jako kukuřice sklizená na zrna. Množství organické hmoty je mnohonásobně nižší a sklizeň je časnější. Rozklad menšího množství organické hmoty při jejím správném zpracování je rychlejší. Pšenice setá po kukuřici na zrna je seta obvykle pozdě a rostliny vstupují do zimního období málo odrostlé. Velké množství rostlinných

zbytků po kukuřici na zrno vyžaduje pečlivé zpracování (rozdrcení, aplikaci N hnojiv a opakované zapravení do půdy), navíc v časově velmi omezeném období. Po kukuřici, zejména pak po kukuřici na zrno, je třeba počítat s rizikem zvýšeného výskytu fuzarióz (Polišenská et al. 2017).

3.1.3.2 Vliv přípravy půdy

Vliv přípravy půdy na jakost potravinářské pšenice se projevuje prostřednictvím úpravy vláhových a vzdušných poměrů v půdě, podmínek pro uvolňování živin a vlastní přípravu set'ového lůžka. Pro pšenici se zdá nejvhodnější klasický způsob přípravy půdy s včasným naoráním před orbou a se současnou úpravou oranice. Dosáhne se tak přirozené ulehlosti půdy a lépe se připravuje set'ové lůžko (Petr 2001).

3.1.3.3 Doba setí a výsevek

Doba setí a výsevek se na jakostních ukazatelích potravinářské pšenice mohou též projevit. Stupeň závislosti je spíše odrudovou vlastností a ta může být podle odrůd různá. U dnešních moderních odrůd, které mají delší vegetační dobu než odrůdy před 20-30 lety, se příznivě projevuje na jakosti spíše včasné setí. Tím se poněkud prodlouží období tvorby obilek, které jsou větší, s větším podílem předních zrn a vyšším obsahem lepku. Při včasném zasetí vytvoří rostliny mohutnější kořenový systém, a tak mohou lépe přijímat živiny a vodu (Petr 2001). Pšenice ozimé se vysévá 3-5 MKS (150-220 kg/ha). Hloubka setí by měla optimálně činit 4-5 cm a ideálně by se mělo zasít od 15.9. do 20.10.

3.1.4 Charakteristika druhu

Pšenice setá (*Triticum aestivum*) je ozimá nebo jarní trsnatá obilnina z čeledi *Poaceae*. Stéblo je duté, tenkostěnné, tvořené obvykle pěti články oddělenými kolénky. List je čárkovitý, plochý, bez řapíku. Na rozhraní listové pochvy a čepele se nachází krátký vroubkovaný jazýček. Ouška objímající zčásti lodyhu jsou malá, řídce obrvená nebo lysá. Květenstvím je čtyřhranný klas s vícekvěťmi klásky (většinou 2–5 květů). Vřeteno klasu je tuhé a nelámavé. Plevy a pluchy mají vejčitý nebo podlouhle vejčitý tvar a jsou zřetelně kýlnaté. Pluchy mohou být osinaté nebo bezosinné. Plodem je obilka. Obilky mají oblý tvar a z plev volně vypadávají. Rostlina kvete v červnu (Zimolka 2005).

3.1.5 Výživa a hnojení pšenice

Příjem živin i jejich konečný odběr sklizní ozimé pšenice je značně závislý na půdních a povětrnostních podmínkách, intenzitě růstu, dosaženém výnosu i pěstované odrůdě. Při výnosu kolem 6 tun zrna a přibližně stejném výnosu slámy z jednoho hektaru je odčerpáváno z půdy okolo 144 kg dusíku, 30 kg fosforu, 108 kg draslíku, 24 kg vápníku a 12 kg hořčíku.

Hlavní příjem živin je v období intenzivního růstu (fáze sloupkování) a většinou vrcholí v době květu (Vaněk et al. 2007).

Pro zajištění stabilních a vysokých výnosů zrna ozimé pšenice je nutné poskytnout pšenici dobré podmínky. Z výsledků četných pokusů vyplývá, že rozhodujícími faktory, které vytvářejí předpoklady dobrých a kvalitních sklizní, jsou:

Vysoká půdní úrodnost – je dána dobrými fyzikálními, fyzikálně-chemickými, chemickými i biologickými vlastnostmi. Patří sem i dostatečný obsah přijatelných živin (zejména fosfor, draslík a hořčík) v půdě.

Správná výživa rostlin – zajištěná živinami staré půdní síly i vlastním hnojením, zejména dusíkatými hnojivy (Vaněk et al. 2007).

3.1.5.1 Hnojení sírou

V uplynulých dvaceti letech došlo v pěstební technologii ozimé pšenice k podstatným změnám, které přispívají ke zvyšování výnosů. Se stoupajícím výnosem nových odrůd se také zvyšují nároky pšenice na výživu. Výživa dusíkem je v praxi dostatečně řešena přihnojením v jarním období. Hnojení sírou však ne vždy patří k běžným hnojařským opatřením, přestože zejména mezi roky 1990 a 1998 došlo k výraznému poklesu přívodu síry atmosférickými depozicemi (ze 100 kg/ha na 20 kg/ha za rok). V posledních deseti letech je přívod síry do půdy depozicemi již zanedbatelný (kolem 6 kg/ha). To má dopad na výrazný pokles obsahu mobilních forem síry v půdě. V roce 1981, při působení vysokých depozic, byl průměrný obsah vodorozpustné síry v půdě 22,6 mg/kg a v roce 2007, v důsledku omezení produkce emisí z průmyslu, poklesl na 7,2 mg/kg. V současnosti vykazují rozbory půd i nižší obsahy přístupné síry. Normativ odběru síry výnosem pšenice je v průměru 4,2 kg síry na 1 tunu zrna, tedy poměrně nízký ve srovnání s řepkou (16-17 kg/t). To vyvolává mylnou představu o malé potřebě hnojení sírou k ozimé pšenici (Javor et al. 2018).

Tabulka 1: Potřeba přihnojení sírou na základě obsahu S_{H_2O} v půdě a při zohlednění výnosové úrovně ozimé pšenice na stanovišti (Javor et al. 2018)

Obsah vodorozpustné síry (S_{H_2O}) (ppm)	Kategorie obsahu síry (S_{H_2O})	Potřeba přihnojení sírou (kg/ha)
0-3,5	extrémně malá	80-60
3,6-7,0	velmi malá	60-45
7,1-11,0	malá	30-15
11,1-15,5	střední	15-0
15,6-20,0	dobrá	15-0 (pouze v raném sloupkování pro plánovaný vyšší než 9,5 t/ha)
>20,0	velmi dobrá	nepřihnojovat

Javor et al. (2018) doporučují přihnojení pšeníc sírou optimalizovat podle analýz půd na obsah S_{H_2O} na základě provedeného odběru vzorků půdy v období počátku sloupkování. Výsledky analýz obsahu S_{H_2O} dodané laboratoří doporučují vyhodnotit validovaným nástrojem uvedeným v tabulce 1, stanovujícím kategorii obsahu přijatelné síry – S_{H_2O} v půdě a příslušnou korekční dávku síry pro období plného sloupkování až metání (BBCH 31-51), realizovanou hnojivou s obsahem rychle působící síranové (SO_4^{2-}) formy, tj. v podobě síranu hořečnatého (Kieserit). Obdobné působení síry lze očekávat i při aplikaci síranu amonného (SA, DASA apod.), avšak v těchto hnojivech je už jiná forma dusíku, než byla aplikována v pokusech Javora et al. (2018). Pokud lze využít laboratorních analýz, Javor et al. (2018) doporučují paušální přihnojení výnosných odrůd pšeníc realizovat nejdříve na počátku sloupkování v dávce síry alespoň 30 kg/ha.

3.1.5.2 Hnojení dusíkem

Výživa dusíkem je nejvýznamnější opatření ovlivňující utváření výnosových prvků i vlastní výnos a kvalitu zrna. Snahou musí být zajistit rostlinám dostatek dusíku v půdě v období jeho potřeby, a proto vlastní hnojení musí vycházet z biologických zvláštností odrůd, půdní úrodnosti, průběhu povětrnosti a stavu porostu. Pro zajištění dobrého a kvalitního výnosu a rentability produkce je zapotřebí, po zohlednění všech podmínek, správně stanovit celkovou dávku dusíku v minerálních hnojivech i období aplikace hnojiv. Značná pohyblivost minerálních forem dusíku v půdě a s tím související možnosti ztrát dusíku většinou v našich podmínkách neumožňují jednorázové použití dusíkatých hnojiv. S ohledem na časovou potřebu rostlin je zřejmé, že převážnou část dusíku v minerálních hnojivech je zapotřebí aplikovat na počátku jarní vegetace, aby měly rostliny dostatek dusíku v období intenzivního růstu. V minerálních hnojivech bychom měli aplikovat v časovém předstihu takové množství dusíku, aby dodaný dusík spolu s půdním minerálním dusíkem kryl potřebu rostlin (Vaněk et al. 2007).

3.1.5.3 Hnojení ostatními živinami

Hnojení P, K a Mg vychází u jejich obsahu v půdách a zásadou musí být udržení či vytvoření takového stavu, aby výnos zrna byl zajišťován především živinami půdy a hnojením byly doplňovány z půdy odebrané živiny. Vhodným obdobím ke hnojení je podzim a hnojiva by měla být aplikována nejpozději při předset'ové přípravě. Přihnojování během vegetace není účelné. Pouze při nedostatku hořčíku lze doporučit přihnojení Kieseritem, případně hořkou solí (Vaněk et al. 2007).

3.2 Síra

3.2.1 Formy síry

3.2.1.1 Přírodní

Síra je žlutá krystalická látka (obrázek 1) ve vodě nerozpustná. Rozpouští se však v polárních rozpouštědlech, například sirouhlíku. Její výskyt může být buď volný, nebo vázaný. Volná síra se nachází v oblastech s vulkanickou činností nebo v oblastech s horkými minerálními prameny. Vázanou síru nalezneme v několika formách. Anorganické sloučeniny síry se nacházejí ve formách bezkyslíkatých nebo kyslíkatých. V půdě jsou tyto sloučeniny zastoupeny asi zhruba z 10-60 %. Organicky vázaná síra v rostlinách funguje jako tzv. přenašeč vodíku (Duchoně & Hampl 1962).



Obrázek 1: Úlomky síry v kráteru Mt. Ijen na ostrově Jáva v Indonésii (Josef Král)

3.2.1.2 Jiné

Dříve k hlavním zdrojům síry vázaných na člověka patřily výfukové plyny a průmyslové exhaláty. Od 80. let došlo v Evropě k poklesu síry z atmosféry, neboť se začaly odsiřovat kouřové spaliny. Z tohoto důvodu je dnes třeba aplikace síry nejen u brukvovitých rostlin, ale i u pšenice. Nebylo to však pouze spalování fosilních paliv, ale i zpracování sulfidických rud, které vedlo k uvolňování oxidu siřičitého, který se dostává do atmosféry. V

atmosféře může podléhat dalším přeměnám a reakcím. Atmosférická síra byla zpět dodávána jako SO_2 , v tzv. suché depozici či ve formě mokré depozice SO_4^{2-} , rozpuštěné ve srážkové vodě. Tato forma ovšem měla při vysoké koncentraci oxidu siřičitého škodlivý vliv především na lesní kultury (Zelený & Zelená 1997).

Antropogenní emise síry však nejsou jediným mobilním zdrojem síry v atmosféře. Její koncentrací je ovlivňována také degradace půdní organické hmoty, těkání dimethylsulfidu z moří, oceánů a vulkanických činností. V globálním měřítku jsou antropogenní zdroje podobné zdrojům přirozeným (Tlustoš et al. 2011).

3.2.2 Síra v životním prostředí

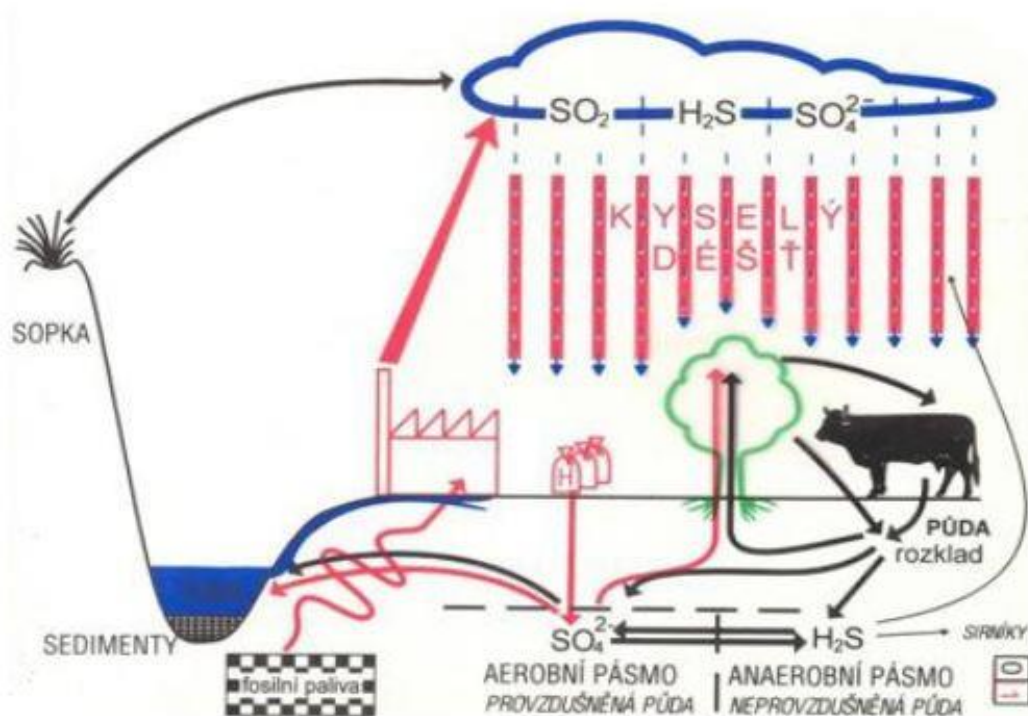
Síra patří mezi prvky s největším výskytem na Zemi. V přírodě se nejčastěji vyskytuje jak v oxidované formě jako sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tak i v redukované formě sulfidů nejčastěji jako pyrit (FeS_2), a to v břidlicích, uhlí a vápencích a jako čistý prvek (S) v sedimentech. Síra je v různých koncentracích součástí všech živých organismů, kde se vyskytuje především v bílkovinách a polysacharidech.

Největší množství síry se nachází v litosféře ($24,3 \cdot 10^{18}$ kg) a v hydrosféře ($1,3 \cdot 10^{18}$ kg). V půdě se nachází síry mnohem méně ($2,6 \cdot 10^{14}$ kg) a z toho je přibližně 5 % vázáno v půdní organické hmotě. Množství síry v rostlinách je mnohem nižší a je odhadováno na $7,6 \cdot 10^{11}$ kg. Nejméně síry se nachází v atmosféře ($4,8 \cdot 10^9$ kg) (Stevenson & Cole 1999). Široké zastoupení síry ve všech hlavních složkách a v různých formách znamenalo její neustálý pohyb, přeměny a vytvoření přirozeného cyklu. Tento cyklus byl narušen především v posledních dvou stoletích, tzn. v období maximálního využívání přírodních zdrojů. Síra stabilně vázána ve formě sulfidů, nebo nepatrně rozpustná ve formě čistého prvku a přítomná ve fosilních palivech i řadě železných a neželezných rud, se jejich využíváním zpřístupnila a začala se ve formě reaktivních sloučenin uvolňovat do prostředí nejčastěji ve formě plynů do atmosféry. Antropogenní emise síry nejsou jediným zdrojem mobilní síry v atmosféře, její koncentraci ovlivňuje vulkanická činnost, degradace půdní organické hmoty a těkání dimethylsulfidu z moří a oceánů. V globálním měřítku jsou antropogenní zdroje podobné zdrojům přirozeným. Z antropogenních je největší podíl přičítán spalování fosilních paliv, a to 75 až 85 %, zbytek pak zpracování sulfidických rud. Nezanedbatelným zdrojem oxidu siřičitého jsou rafinérie ropy, chemické provozy vyrábějící sirné sloučeniny nebo využívající sirných sloučenin k výrobním procesům. Síra se do ovzduší dostává nejen z uvedených velkých zdrojů, ale i ze zdrojů drobných, a to především z těch, které spalovacími procesy získávají energii, tzn. emisemi ze všech druhů dopravy, z lokálních zdrojů tepla a energie (Tlustoš et al. 2011).

Většina sirných sloučenin je do atmosféry uvolňována v podobě oxidu siřičitého nebo je do této formy oxidována (obrázek 2). SO_2 však podléhá v atmosféře dalším přeměnám a

reakcím především oxidaci, ale i rozpuštění ve vodě, suché a mokré depozici a sorpci na povrch rostlin i půdy. Všechny tyto procesy ve svém důsledku vedou k jeho odstraňování z atmosféry a současně znamenají nárůst množství síry v místě jejího následného působení. Oxidace oxidu siřičitého znamená v konečné fázi tvorbu velmi agresivní kyseliny sírové (H_2SO_4) a může probíhat několika způsoby, a to jak v plynné, tak i v kapalně fázi. V plynné fázi může probíhat především přímá či nepřímá fotooxidace, v kapalně pak oxidace za přítomnosti katalyticky působících sloučenin či kovů. Doba setrvání SO_2 v atmosféře je relativně krátká a podle různých autorů se pohybuje mezi 1 až 8 dny.

Zvýšení a zrychlení koloběhu síry neznamenal jen výraznou redepozici síry v průběhu relativně krátkého časového období, ale současně s ohledem na povahu jejich sloučenin i značný negativní vliv na hodnotu pH prostředí, především půdy. Tyto změny byly bohužel zachyceny, a především řešeny se zpožděním několika desítek let, proto došlo v oblastech s vysokými imisemi k závažnému poškození ekosystému a s těmito problémy se vyrovnáváme dosud (Mengel 2001).



Obrázek 2: Koloběh síry (Slavičková 2010)

Rozhodujícím zdrojem síry v ovzduší ve vnitrozemských státech je intenzivní průmyslová činnost a s ní spojená produkce energie, zejména pokud se jedná o spalování

hnědého uhlí, které je zdrojem značných emisí. Právě dřívější závislost naší republiky na produkci energie z této suroviny vedla k extrémní produkci oxidu siřičitého. V roce 1980 činily emise SO₂ více než 2,1 mil. tun, a to především v důsledku produkce tohoto plynu u velkých zdrojů. V důsledku kritické situace byl jedním z hlavních úkolů polistopadových vlád tuto situaci změnit. Vysoké investice do odsiřovacích zařízení u hlavních producentů, především tepelných elektráren, pokles produkce těžkého průmyslu a snížení energetické náročnosti dalších odvětví průmyslu vedlo ke strmému čtyřnásobnému poklesu produkce tohoto plynu zejména mezi roky 1996 až 1999, kdy se již plně projevila funkčnost odsiřovacích jednotek (Tlustoš et al. 2011).

Při podrobnějším hodnocení měrných emisí dle jednotlivých krajů můžeme konstatovat, že oblasti, ze kterých bylo nejvíce plynu emitováno v minulosti, si své postavení drží i v současnosti, ale jejich podíl se celkově snižuje. (Tlustoš et al. 2011).

3.2.3 Síra v půdě

Celkový obsah síry v ornici půd se pohybuje nejčastěji v rozmezí 85–250 mg S/kg. Poměrné zastoupení celkového obsahu síry k obsahu celkového uhlíku a dusíku vyjádřené poměrem C/N/S zjistil Matula (2007) v pokusech v následném poměrném rozpětí: 78–126/8–13/0,5–1,5. 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). Síra v půdě kontinuálně cykluje mezi anorganickými a organickými formami. Anorganická síra je imobilizována na organické formy. Různé organické formy síry jsou vzájemně převedeny a imobilizovaná síra je současně mineralizována, čímž se získá anorganická forma síry, která je rostlinám přístupná (Wilhelm Scherer 2009).

Množství SO₄²⁻ v půdě sezónně kolísá v závislosti na rovnováze mezi vstupy síry z aplikovaných hnojiv, atmosféry, zavlažovací vody, mineralizace půdní organické síry a zvířecích výkalů a výstupy síry prostřednictvím vyluhování, příjmu rostlin a půdní mikrobiální imobilizace (Nguyen & Goh 1994). Uvolňování SO₄²⁻ z organických forem síry je obzvláště důležité pro zásobování rostlin sírou v zemědělských systémech s nízkými vstupy síry z atmosférické depozice nebo hnojiv (Eriksen 1997).

V jarním období, po zimě, stanovujeme v půdách v České republice obsah aktuálně dostupné síry pro rostliny ve formě síranů nejčastěji v rozmezí hodnot 4–13 mg S/kg zeminy ornice. Pro náročné plodiny, zřejmě ne zcela dostatečný obsah. Matula (2007) si klade otázku, do jaké míry může mineralizace organické hmoty v našich půdách přispět k výživě porostů sírou, a to zvláště v období intenzivního jarního růstu řepky. Z jeho výzkumu vyplývá, že v kritickém jarním období nelze počítat s dostatečným doplňováním síranů v půdě z mineralizace organické půdní hmoty. Během šedesáti dnů na přirozeně úrodných půdách

produkce síranů nepřevyšovala hodnotu 4 kg S/ha. Naopak u ostatních půd byl spíše úbytek minerální síry. Významným poznatkem je, že hnojení dusíkem snižovalo produkci síranů z mineralizace organické složky půdy a u půd s imobilizační tendencí byla imobilizace síry ještě silnější (Matula 2007).

Organická síra půdy je členěna do dvou kategorií, a to, zdali je přímo vázána na uhlíkový skelet organických sloučenin, nebo nepřímo přes kyslík, dusík nebo síru. Nepřímo vázaná síra na uhlík (C-O-S, C-N-S, C-S-S) je snadněji zapojována do biologických transformací v půdě. Z hlediska výživy porostů na kulturních půdách mají největší význam sírany. Síranový aniont (SO_4^{2-}) je vysoce mobilní v půdní vodě, neboť je odpuzován od povrchu půdních částic se stejnojmenným (záporným) nábojem. V období promyvného režimu půd jsou sírany snadno vyplavovány tokem gravitační vody do spodních vrstev. Jsou dokumentovány ztráty síranů vyplavením z ornice v hodnotách 30 až 80 kg S/ha/rok (Matula 2007).

Dominantní formy anorganické síry ve vyprahlých, spíše kyselých travních porostech jsou rozpustné a adsorbované SO_4^{2-} , protože sulfidy a jiné redukční sloučeniny jsou snadno oxidovány na SO_4^{2-} za aerobních podmínek (Nguyen & Goh 1994). Avšak ve vyprahlých, vápenatých nebo nedávno vápněných půdách může SO_4^{2-} spoluprecipitovat nebo spolukrystalizovat s uhličitanem vápenatým za vzniku nerozpustného síranu vápenatého (Freney 1986). V kyselých půdách (pH <5,5) je také SO_4^{2-} sráženo výměnnou zeminou hliníku a železa jako Al a Fe hydroxy sloučeniny (Nguyen & Goh 1994).

Výměnná sorpce síranů připadá v úvahu pouze na půdách kyselých (<4 pH), s vysokým podílem hydroxidů železa a hliníku. Spodnější horizonty půdy vykazují větší sorpci síranů. Při tomto mechanismu výměnné sorpce dochází k poklesu půdní kyselosti, ke vzrůstu hodnoty pH. Síranový aniont může rovněž vytvářet nerozpustný komplex s aktivní formou hliníku:

$[\text{Al}(\text{OH})]^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow \text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$. Další možnost chemické vazby síranu je v půdách s vysokou koncentrací Ca^{2+} vznikem málo rozpustné soli CaSO_4 .

U půd v České republice může být významná i biologická sorpce síranů, jejich zapojování mikrobiální činností do organických sloučenin v procesu přeměn organické půdní hmoty. Po aplikaci síranu amonného do půdy byla zaznamenána významná imobilizace síranů až do výše 20 % z aplikované dávky síry. Výskyt anorganických sloučenin síry v půdě nižšího oxidačního stupně (S^{2-}) je spojen s anaerobními podmínkami. Signalizuje vysoký stupeň redukčních pochodů v půdě, kterému běžně předchází produkce toxických produktů (Mn^{2+} , Fe^{2+} a organických kyselin na alkoholy), v nadměrné koncentraci pro rostliny (Matula 2007).

3.2.4 Síra v rostlině

Obsah síry v rostlinách se pohybuje v rozmezí 0,1-0,5 % S v sušině. Nejvyšší nároky na síru mají rostliny produkující více bílkovin, silic a pryskyřic – tedy řepka a brukvovité zeleniny, dále chmel, jeteloviny, cibule a česnek. Síra je z půdního roztoku přijímána rostlinami převážně jako aniont SO_4^{2-} . Vlastní příjem je poměrně málo ovlivňován ostatními ionty v půdním roztoku i půdními vlastnostmi. Rozhodující je obsah síranového aniontu v půdě, kam se dostává jednak hnojivy, z ovzduší spadem (po oxidaci SO_3^{2-}) a z půdních zásob (Mengel 2001).

Oxid siřičitý z atmosféry vstupuje do rostlin průduchy. Rostliny jsou schopny krýt prostřednictvím SO_2 z ovzduší jen asi do 30 % celkové potřeby. Při malé koncentraci SO_2 v ovzduší a nedostatku SO_4^{2-} v půdě je využití oxidu siřičitého vyšší a působí příznivě, ale od koncentrací 1,0-1,5 mg SO_2 v 1 m³ vzduchu způsobuje již poškození rostlin. Vzhledem k tomu, že k poškození rostlin přispívají i další složky emisí, které se do ovzduší dostávají s SO_2 , může k poškození dojít i při podstatně nižší koncentraci. Rostliny příjem síranu i asimilaci síry efektivně řídí podle dostupnosti síranu z prostředí i podle potřeb rostliny. Síra je transportována hlavně do mladých listů a meristémů (Vaněk et al. 2007).

Síra může být asimilována přímým vestavěním síranu do organických sloučenin za vzniku sulfurylové skupiny. V této formě se síra nejčastěji vyskytuje v sulfolipidech v membránách thylakoidů, v sekundárních metabolitech a v některých látkách signální povahy. Významnou sloučeninou obsahující síru je acetylkoenzym A, který se podílí na syntéze lipofilních sloučenin, jako jsou mastné kyseliny, a tvorbě terpenů (například fytoosteroly, karotenoidy a růstové hormony). Naprostá většina síry se však v rostlině vyskytuje v redukované formě, především v cysteinu a metabolitech z něj odvozených (Taiz et al. 2014).

Přeměna SO_4^{2-} na -SH je proces náročný na energii. Z kořenů přijatý síran je většinou transportován xylémem v minerální formě do nadzemních orgánů. Jen velmi malý podíl SO_4^{2-} je redukován v plastidech kořenů. Redukce SO_4^{2-} a asimilace S^{2-} probíhá v nadzemní části rostliny v chloroplastech a je výrazně aktivována světlem. V plastidech se vyskytují všechny enzymy potřebné k redukci a asimilaci síry. Vysoká aktivita je v mladých listech, ve starších listech výrazně klesá. V rostlinách se síra hromadí ve formě síranů, které slouží jako zásobní látka. Síraný mohou být skladovány ve vakuolách (Buchanan et al. 2000).

Prvním krokem asimilace síry je navázání SO_4^{2-} na ATP za vzniku adenosinfosfosulfátu (APS) a odštěpení pyrofosfátu (PPi). Reakce je katalyzována enzymem ATPsulfurylázou. APS reaguje s další molekulou ATP za vzniku fosfoadenosinfosfosulfátu (PAPS). Sulfát z APS je přenesen na redukováný glutathion (tj. na thiolovou skupinu cysteinového zbytku). Za účasti ferredoxinu je sulfonová skupina SO_3H dále redukována na SH-skupinu, která reaguje s acetylserinem za vzniku cysteinu. Dalšími metabolickými přeměnami vznikají z cysteinu

metabolity, například methionin, acetylkoenzym A, vitamíny B1 a H, sekundární metabolity (například Alicin) (Marschner & Marschner 2012).

Methionin a cystein patří k esenciálním aminokyselinám. Oxidací cysteinu vzniká cystin, jehož vazba má významnou úlohu ve struktuře bílkovin, kde vytváří často vnitro nebo meziřetězcové disulfidové můstky. Disulfidové můstky mohou být redukcí zrušeny. Vznik a rušení těchto můstků mění aktivitu enzymů (například enzymů Calvinova cyklu). Thiolové skupiny cysteinových zbytků umožňují tvořit struktury Fe-S, které slouží k přenosu elektronů (například ferredoxin). Cystein spolu s kyselinou glutamovou a glycerinem tvoří tripeptid glutathion. Glutathion je prekurzorem pro tvorbu fytochelatinů, které jsou schopny působit na detoxikaci některých těžkých kovů, zvláště Cd, ale také Zn a Cu. Vyšší obsah glutathionu je v listech než v kořenech. V listech je soustředěno většinou více než 50 % glutathionu v chloroplastech. Glutathion je také součástí askorbátglutathionového cyklu, který slouží k redukcí peroxidů vznikajících během oxidačního stresu, a tím k ochraně buněčných membrán před oxidací nenasycených mastných kyselin (Buchanan et al. 2000).

Podle Vaňka et al. (2007) jsou mnohé sloučeniny obsahující síru v organické formě prekurzory vonných a chuťových látek, proto se výživa rostlin sírou významně podílí na kvalitě rostlinných produktů. Nejdůležitější těkavé sírné sloučeniny v rostlinách patří mezi thioly (například propanthiol je sloužkou aroma cibule a póru), sulfidy, isothiokyanáty a sírné heterocyklické sloučeniny. Dimethylsulfid a dimethyltrisulfid jsou součástí aroma brukvovitých zelenin, malin, černého rybízu, zelí a česneku.

Významné jsou isothiokyanáty. Kromě vysoké senzoričké aktivity mají řadu toxických i jiných farmakologických účinků (například strumigenní, antibakteriální a antifungicidní). Některé z nich inhibují chemicky indukované nádorové bujení. Významným se jeví zvláště sulforafan, který je ve formě svého prekurzoru glukorafaninu obsažen hlavně v brokolici (Vaněk et al. 2007).

3.2.4.1 Poměr N:S

Filozofie diagnostiky poměru N:S vychází z toho, že hlavní funkcí síry je účast síry v plnohodnotných bílkovinách, které jsou pod genetickou kontrolou, čímž poměr N:S by měl být stabilizován a měl by být charakteristický pro jednotlivé plodiny. Znalost poměru N:S by tedy měla být univerzálnějším kritériem diagnostiky, méně závislým na fenofázi rostliny. Uvádí se, že na 36-34 atomů dusíku připadá v bílkovinách 1 atom síry. Při převodu na hmotnostní vyjádření to představuje poměr N:S 15,77–14,87:1. Pro jednotlivé plodiny byly odvozeny následné optimální poměry: pšenice 14,1:1; cukrovka 16,6:1; jilek 16,2:1; vojtěška 16–17:1 (Matula 2007). Pilbeam & Barker (2007) udávají jako optimální poměr N:S pro ozimou řepku 5:1 až 8:1. Obecně poměr větší než 20 by měl indikovat deficitní výživu plodiny sírou.

Úskalím tohoto diagnostického přístupu je praktická stránka realizace, neboť zjišťování poměru N:S v metabolizovaných produktech by bylo velmi analyticky náročné. Použití zjednodušeného přístupu, stanovení pouze celkového obsahu síry a dusíku selhává hlavně z důvodu vysokého a proměnlivého obsahu nemetabolizované síry v rostlinách v průběhu fenofází (Matula 2007).

Kritické hodnoty koncentrací celkové síry v listech se v průběhu času mění a nejsou vhodné pro diagnostiku nedostatku síry na začátku vegetačního období. Potenciálně vhodnějším ukazatelem by tak mohl být poměr N:S v nadzemní biomase. Jedním z problémů při použití poměru N:S je však to, že přebytek jednoho z těchto prvků lze interpretovat jako nedostatek toho druhého. Kromě toho stanovení poměru N:S vyžaduje dvě přesné analýzy měření (Blake-Kalff et al. 2000).

3.2.4.2 Nadbytek síry

Nadbytek síry v našich podmínkách je třeba posuzovat ze dvou hledisek. Vysoký obsah S v půdě, který se projeví vysokou koncentrací SO_4^{2-} v půdním roztoku, většinou nepůsobí negativně na rostliny. Vyšší obsah síranů snášejí totiž rostliny poměrně dobře a mohou si nadbytečné množství síranů ukládat ve svých pletivech bez poškození. Teprve velmi vysoké koncentrace síranů (nad 4000 mg v 1 l půdního roztoku) působí na rostliny depresivně. Vyšší obsah síranů může však spolupůsobit, hlavně s Cl^- a kationty Na^+ a K^+ , na zasolení půd a zvýšení koncentrace solí v půdním roztoku v aridních oblastech a v krytých objektech (skleníky, fóliovníky), čímž může být narušena jednak vzcházejivost, ale i pozdější růst citlivějších rostlin k vyšší koncentraci solí (zejména některé květiny a okrasné rostliny, například primule, kapradiny, asparágy, orchideje a ze zelenin salát). Druhé hledisko je toxicita SO_2 v ovzduší (Vaněk et al. 2007).

Stresové podmínky, zejména látky znečišťující ovzduší, mění fyziologické vlastnosti, biochemické a morfologické procesy v rostlinách inhibicí fotosyntézy, snižují rychlosti růstu a způsobují akutní viditelné poškození. Fotosyntéza je jedním z prvních procesů, které jsou ovlivněny vysokou koncentrací SO_2 . U zasažených rostlin klesá rychlost fotosyntézy a zvyšuje se rychlost dýchání. Byly prokázány účinky SO_2 na fyziologické procesy související s činností průduchů, pravděpodobně proto, že se průduchy nemohou řádně uzavřít, když je rostlina v stresovém prostředí. Kromě toho mohou mít polutanty SO_2 vliv na alokaci uhlíku a obsah chlorofylu, které ovlivňují růst a produktivitu rostlin. Polutanty ovlivňují také strukturu buněčné membrány a mění její permeabilitu. Když je SO_2 absorbován rostlinou, míra zranění je klasifikována jako akutní nebo chronická. Akutní poškození nastává, když jsou vysoké koncentrace SO_2 absorbovány po relativně krátkou dobu, zatímco chronické poškození je způsobeno dlouhodobou absorpcí SO_2 při prahových koncentracích (Lee et al. 2017).

Mnohdy lokálně dosahované koncentrace nad 0,3 mg SO₂ v 1 m³ vzduchu působí již poškození pletiv rostlin, zvláště citlivých jehličnatých stromů. Plošné znečištění SO₂ v současné době není aktuální, protože hlavní zdroje emisí jsou zachycovány. Je možný pouze ojedinělý výskyt, především v uzavřených lokalitách s omezenou cirkulací vzduchu, hlavně v zimním období, kdy je stále v domácnostech spalováno nekvalitní hnědé uhlí s vysokým obsahem síry (Vaněk et al. 2007).

3.2.4.3 Deficit síry

Nedostatek síry se nejprve projevuje omezením syntézy bílkovin, včetně enzymů (výrazně například nitrátoreduktázy). Přijaté nitráty nejsou v dostatečné míře převáděny na amoniak, takže v rostlinách je omezena tvorba prvotních zdrojů organických látek obsahujících dusík, tedy aminokyselin a dále bílkovin, a minerální N v nitrátové formě se hromadí nevyužit v pletivech rostlin. Snížená fotosyntetická asimilace vede k nižší produkci cukrů, a tím následně ke snížení obsahu hlavních energetických složek rostlin, tedy škrobů, cukrů apod. Snížený obsah těchto látek, hlavně bílkovin, signalizuje latentní nedostatek síry především u rostlin s vysokými nároky na tuto živinu. Nižší produkce hlavních složek rostlin se projevuje kvalitou produkce a s ní spojenou nutriční hodnotou, včetně některých technologických parametrů. Podle rozsahu deficitu dochází i k poklesu výnosů (Vaněk et al. 2007).

Příznaky nedostatku síry v pšenici, stejně jako v jiných vyšších rostlinách, jsou charakterizovány chlorózou nejprve u mladých listů, zatímco starší listy mohou zůstat zelené. Nedostatek síry v rostlinách má za následek mnohem větší pokles obsahu chlorofylu a míru asimilace CO₂ u mladých, vyvíjejících se listů než u zralých listů. Objevení se symptomů nedostatku nejprve u mladých listů naznačuje, že síra je u starších listů relativně nehybná pro další distribuci. Je však nutné rozlišovat různé formy síry v různých fondech, protože vykazují velmi odlišnou mobilitu. Nerozpustná síra (např. Protein-S) je ve starších listech relativně nehybná. Její pohyblivost může být zvýšena nedostatkem dusíku (Zhao et al. 1998).

Typickým vizuálním projevem nedostatku síry na rostlinách je žloutnutí listů, které začíná od nejmladších listů a při trvalejším nedostatku S přechází i na spodní listy. Projev nedostatku síry je podobný jako u dusíku, ovšem počáteční příznaky jsou při nedostatku síry vždy lokalizovány na vrcholové části rostlin. Charakteristické také je, že rostliny špatně rostou, jsou sice vzpřímené, ale velmi slabé a nízké – svým habitem zjevně připomínají strádající rostliny. Nedostatek S je také dáván do souvislosti s vyšším výskytem některých chorob, především houbových, ale i škůdců, například mšic. Má to své opodstatnění z hlediska poněkud změněného metabolismu rostlin a omezení produkce specifických látek a obranného systému rostlin. Do jisté míry se dá také uvažovat i o zvýšeném infekčním tlaku některých chorob v důsledku snížení obsahu SO₂ v ovzduší (Vaněk et al. 2007).

Případný deficit síry u pšenice se odráží především ve zhoršení pekařské kvality zrna. Výsledky z Anglie a Německa odhalily, že pekařská kvalita zrna se zhoršuje dříve, než dojde k redukci výnosu. Již v 80. letech minulého století bylo prokázáno, že deficit síry u pšenice má hluboký dopad na složení lepkových bílkovin. Gliadiny a gluteniny ovlivňují rheologické znaky těsta, a tím objem pečiva. Gliadiny jsou spojeny s viskozitou a extenzibilitou (tažností) a gluteniny s elasticitou a pevností těsta. Při nedostatku síry narůstá syntéza bílkovin s nízkým obsahem síry (ω gliadinů a vysokomolekulárních subjednotek gluteninů) na úkor bílkovin na síru bohatých (α - a γ -gliadinů a nízkomolekulárních subjednotek gluteninů). Tyto změny ve skladbě jsou spojené s poklesem tažnosti a nárůstem elasticity těsta. Tažnost těsta je podle výsledků z Anglie přímo závislá na koncentraci síry v zrně. Naopak rezistence těsta se zvyšuje s rostoucím poměrem N:S (Ryant & Hřivna 2011). Deficit síry způsobuje zřetelně pevnější a méně tažné těsto. Síra přispívá k vyššímu obsahu N-látek v zrně a vyšší sedimentační hodnotě, která pozitivně koreluje s objemem pečiva. Vztah mezi obsahem síry v zrně a objemem pečiva je dokonce silnější než s obsahem bílkovin (Zhao et al. 1998).

Obsah síry v mouce má přímý vztah k objemu pečiva a každá 0,1 % odpovídá 40 až 50 ml jeho objemu (Haneklaus et al. 1992). Aplikace síry se odráží v zastoupení jednotlivých bílkovinných frakcí, a to se může projevit příznivě v nutriční hodnotě pšeničných bílkovin vyjádřené podílem jejich jednotlivých frakcí.

Bylo zjištěno, že nedostatek síry se projevuje ve zvýšené kumulaci asparaginu v pšeničném zrně, což může mít za následek zvýšenou tvorbu akrylamidu během pečení. Akrylamid je považován za potenciální karcinogen, který vzniká Maillardovou reakcí asparaginu a sacharidů (Ryant & Hřivna 2011).

3.2.5 Hnojiva obsahující síru

V současnosti je na trhu nabízeno 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 a 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 v současné době intenzivně testována jako perspektivní vysoce koncentrované minerální hnojivo, doporučované především pro hnojení sírou na alkalických půdách. Udává se, že při aplikaci tohoto hnojiva dochází ke snížení pH půdy, a tím uvolnění vápníku vázaného ve fosforečnanech, a tedy i zpřístupnění fosforu pro rostliny. Další výhodou používání elementární síry je její pozvolná oxidace, a tím i minimalizace rizik spojených s vyplavováním SO_4^{2-} iontů do spodních vrstev půdy. Čím je částice elementární síry v půdě menší, tím rychleji dochází k její oxidaci. Rychlost oxidace však záleží i na dalších faktorech, jako je například mikrobiální aktivita sírných 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). Elementární síra je lehce zapracovatelná do směsných hnojiv, měli bychom ale dát z bezpečnostních důvodů pozor na kombinaci s dusičnanem amonným (Messick et al. 2005).

Síran amonný (SA) je dusíkaté hnojivo (20-21 % N), které je významným zdrojem síry. Při aplikaci 100 kg síranu amonného se dodá i 22-23 kg síry ve formě síranu SO_4^{2-} . Síran amonný se nesmí používat na kyselých půdách, jelikož by kyselost půdy ještě zvyšoval a mohlo by dojít k aktivizaci toxické koncentrace hliníku a popřípadě i manganu (Matula 2007). Granulovaný síran amonný pak obsahuje 1,4 % nitrátového dusíku a kolem 2,5 % vápníku, což má příznivý vliv na počáteční růstové fáze, popř. na výměnnou půdní reakci (Kulhánek et al. 2013).

Ostatní dusíkatá hnojiva se sírou – Jejich základ zpravidla tvoří dusičnan amonný, obsahující přírůstek síranu amonného nebo vápenatého, například 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 % N a 6-8 % S.

Síran draselný – hnojivo obsahující kromě 42 % draslíku přibližně 17 % síry je rovněž hnojivo vhodné pro doplnění síry do půdy. Zároveň je možné ho využít k doplnění draslíku k plodinám nesnášejícím chlór z draselných solí, kamexu a kainitu. Dostupný je běžně v práškové nebo i granulované formě.

Kieserit obsahuje 14-15 % Mg a 18 % S. Jedná se o velmi 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. Jedná se o hnojivo velmi vhodné do půd středních až těžších s vyšším pH a s nízkou zásobou hořčíku a dobrou zásobou draslíku.

Hořká sůl ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) obsahuje 11-12,5 % síry (Matula 2007) a 10 % hořčíku. Je to hořečnaté hnojivo s podobnými vlastnostmi jako zmíněný kieserit. Jedná se o heptahydrát síranu hořečnatého a díky tomu se jedná o hnojivo velmi dobře rozpustné ve vodě. Pro svou výbornou rozpustnost se především využívá k mimokořenové výživě rostlin a používá se koncentrace maximálně 4 kg hořké soli na 100 kg vody (Kulhánek et al. 2013).

Jednoduchý superfosfát (JSP) byl dříve hojně využívaným hnojivem obsahujícím kromě přibližně 8 % fosforu i stejný podíl síry (8-12 %). Ta je zde obsažena v hůře přístupné formě síranu vápenatého.

Síran vápenatý (sádra) obsahuje kolem 17 % síry. Jedná se však o síru poměrně špatně dostupnou rostlinám. Dá se tedy z hlediska síry považovat za hnojivo spíše dlouhodobě působící (Kulhánek et al. 2013).

Snaha omezit negativní dopady klasických, zejména dusíkatých hnojiv, na životní prostředí a zároveň eliminovat ekonomické ztráty vedla k vývoji hnojiv s takzvaným dlouhodobým účinkem. První skupinu tvoří hnojiva s pomalým uvolňováním (SRF – Slow Release Fertilizers). Do této kategorie hnojiv patří i elementární síra a pomalu rozpustná granulovaná hnojiva obsahující síru jako jednu ze svých složek (například granulát směsi močoviny a síry).

Druhou skupinu hnojiv s pozvolným působením představují typická granulovaná hnojiva obalená vrstvou materiálu, která brání přístupu vody k vlastnímu hnojivu a zpomaluje tak jeho rozpouštění a transport uvolněných živin do okolního prostředí. Volbou obalovaného materiálu a jeho tloušťky lze tento proces do určité míry řídit, proto jsou tyto produkty označovány jako hnojiva s řízeným uvolňováním živin (CRF–Controlled Release Fertilizers) (Kulhánek et al. 2013). Hnojiva s pomalým uvolňováním zajišťují postupné zásobování živinami po dlouhou dobu, což zlepšuje účinnost využití hnojiv a snižuje ztráty při vyplavování (Fernández-Escobar et al. 2004). K nejstarším a doposud nejrozšířenějším průmyslově využívaným obalovým materiálům patří právě elementární síra (Kulhánek et al. 2013).

3.2.5.1 Aplikace hnojiv se sírou

Síra je aplikována zpravidla do půdy. Může však být aplikována i foliárně. Foliárně aplikovaná síranová forma síry se do listů dostává velmi rychle. Síraný jsou však následně z velké části zachycovány ve vakuolách a jsou z menší části využívány na tvorbu výnosu. K listové aplikaci je možné využít například hořkou sůl. Lepších výsledků je však dosahováno s listově aplikovanou elementární sírou. To lze nejpravděpodobněji vysvětlit tím, že před samotnou adsorpcí listy musí být tato forma nejdříve oxidována na síraný. Postupná přeměna elementární síry na síraný je pozvolný proces, a proto tak dochází k plynulejšímu zásobení listů síraný. Nedochozí tedy k přílišné kumulaci síranů v cytosolu a jejich následné kumulaci ve vakuolách (Kulhánek et al. 2013).

3.2.6 Metody stanovení přístupné 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 S a půdním roztokem se udržuje rovnováha. Absorbovaná síra tak snadno přechází do půdního roztoku, ale i naopak. Tyto dvě nejdostupnější formy síry představují jen velmi malý podíl z celkové S, nepřesahující zpravidla 2 %. Větší částí síry v půdě (organická a okludovaná) je rostlinám dostupná jen obtížně. Přesto je nutné s ní počítat z dlouhodobého hlediska.

Existuje řada extračních postupů, které jsou uváděny jako vhodné pro stanovení přístupné síry. Jedná se zpravidla o vodný výluh nebo roztoky slabých solí, jako například CaCl_2 , LiCl nebo NaCl . Významným nedostatkem 0,01 M CaCl_2 je možnost tvorby nedostupných solí v průběhu extrakce a tím také stanovení nižších hodnot. Chyba stanovení nastává zejména při nízkých obsazích síry v půdě.

Pro kombinovanou extrakci rozpustného a adsorbovaného SO_4^{2-} je doporučeno několik extraktantů: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, NaHCO_3 a octan amonný. Dále byly doporučeny roztoky obsahující fosfor ve formě KH_2PO_4 nebo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Oba roztoky obsahují dost fosfátů k výměně většiny adsorbované síry a množství adsorbovaného SO_4^{2-} extrahovaného $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ se může pohybovat od <1 až do několika tisíc mg/kg půdy.

Další hojně využívanou analýzou je frakcionace minerální síry. Tou je možné stanovit zvláště podíl síry v půdním roztoku a podíl adsorbované síry. Jejich součtem je pak možné získat informaci o podílu přístupné síry v půdě (Kulhánek et al. 2018).

3.2.6.1 Metoda Mehlich 3

Metoda Mehlich 3 je v České republice již od roku 1999 využívána pro stanovení přístupného P, K, Ca a Mg. V současnosti je otázkou možnost využití této metody pro stanovení dalších živin, popřípadě i rizikových prvků. Jednou z možností, jak zjistit potenciál metody Mehlich 3 pro stanovení přístupné síry, je porovnat získané výsledky s metodami, které byly již za tímto účelem ověřeny. Mehlich 3 je 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). Extrakční činidlo Mehlich 3 je složeno z následujících komponentů, a to 0,2N CH_3COOH -0,25N NH_4NO_3 -0,015N NH_4F -0,013N HNO_3 -0,001M (Mehlich 1984).

Zřejmě nejdůležitější je sledování odezvy samotných rostlin, to znamená porovnání výsledků půdních rozborů s rozborů rostlin, včetně zahrnutí různých indexů beroucích v potaz i další faktory ovlivňující příjem síry (Kulhánek et al. 2018).

3.2.6.2 Metoda využití aniontovýměnných membrán

Aniontovýměnné membrány, jak homogenní, tak heterogenní, jsou svou povahou jedinečné, přitom se navzájem patrně liší. Homogenní membrány mají dobré elektrochemické vlastnosti, ale postrádají svou mechanickou pevnost. Zatímco heterogenní membrány mají velmi dobrou mechanickou pevnost, ale jsou ve svých elektrochemických výkonech poměrně slabé (Vyas et al. 2001).

Tímto způsobem je popsána extrakce síranu z půdy pomocí proužků fosfátované aniontovýměnné membrány. Výsledky získané touto metodou jsou v dobré shodě s výsledky získanými extrakcí roztokem $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a způsob má řadu praktických výhod oproti použití

fosfátových roztoků. Není nutné žádné zpracování uhlí, odstředování nebo filtrování a během turbidimetrického měření extrahovaného síranu se nevyskytují žádné organické interference. Inkubace půdy ošetřené membránou a následná reextrakce a měření síranů produkovaných mineralizací poskytuje měřítko čistého potenciálu mineralizace síry v půdách, což může být užitečné při předpovídání požadavků na hnojiva v půdách (Searle 1992). Shi et al. (2016) použili ve své studii proužky AEM (6,25 cm x 2,25 cm). Jedná se o aniontově komprimované kopolymery vinylových monomerů a obsahují kvartérní amoniové aniontoměničové skupiny. Tyto membrány mají tloušťku 0,5 mm, obsah vody 46% mokré pryskyřice a minimální aniontoměničovou kapacitu 2,40 meq g⁻¹ suché pryskyřice. Tyto AEM mají silnou schopnost vylučovat kationty a vysokou odolnost proti kontaminaci organickými materiály.

4 Metodika

V bakalářské práci byly využity výsledky z polních provozů odebíraných v letech 2015–2019. Významný vliv na přijatelnost živin a funkci extrakčních činidel půdní reakce, kterou jsme stanovili ve výluhu 0,01 mol/l CaCl₂ s hodinovým třepáním dle jednotných pracovních postupů ÚKZÚZ (Zbírál et al. 2016).

4.1 Odběr vzorků z polních provozů

Vzorky půdy a nadzemní biomasy byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015–2019 v okresech Benešov, Beroun, Domažlice, Hradec Králové, Kutná Hora, Litoměřice, Louny, Mělník, Mladá Boleslav, Nymburk, Pelhřimov, Přerov, Rokycany, Rychnov nad Kněžnou, Ústí nad Orlicí, Vsetín a Znojmo. Vzorky nadzemní biomasy rostlin byly odebrány na výšce strniště cca 3 cm. Rostlinné vzorky byly vysušeny při teplotě 45 °C. Odběr rostlinných vzorků probíhal u ozimé pšenice na počátku sloupkování (BBCH 30–31) a ke konci kvetení (BBCH 65–69).

Půdní vzorky byly odebrány vždy jen jednou během vegetace s první odebíranou růstovou fází, odebírán byl půdní profil 0–30 cm.

4.2 Chemické analýzy

Rostlinný materiál byl mineralizován rozkladem na suché cestě. Obsah živin v půdě a rostlinách byl stanoven optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA). 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 střížným 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 2.

Tabulka 2: 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)
voda + AEM	1:20	16 h	upraveno dle Kuono et al. (1995) a Tiessen & Moir (1993)

5 Výsledky

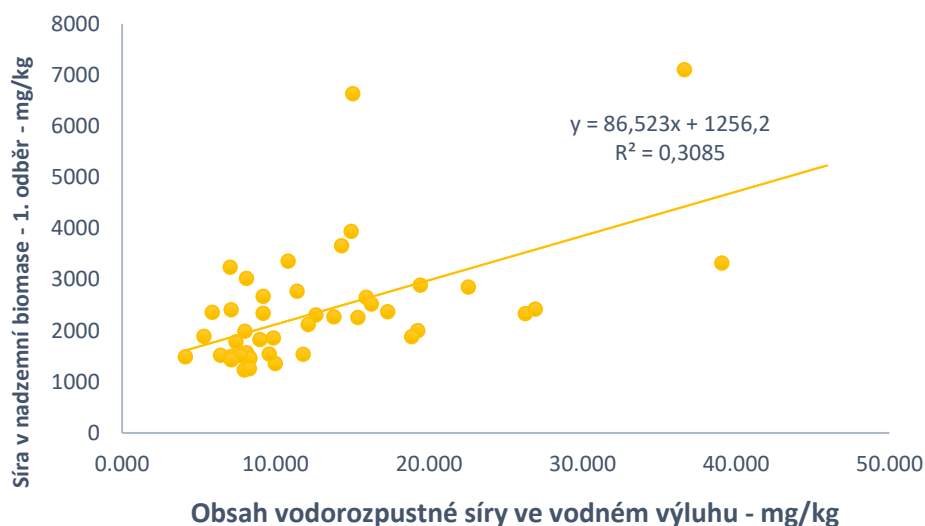
Tabulka 3: Průměrné množství síry v půdách vyluhované třemi způsoby

vodný výluh	Mehlich 3	voda + AEM
13,1 ppm	14,5 ppm	10,0 ppm

5.1 Korelace mezi obsahem síry v půdě a v rostlině na nealkalických půdách

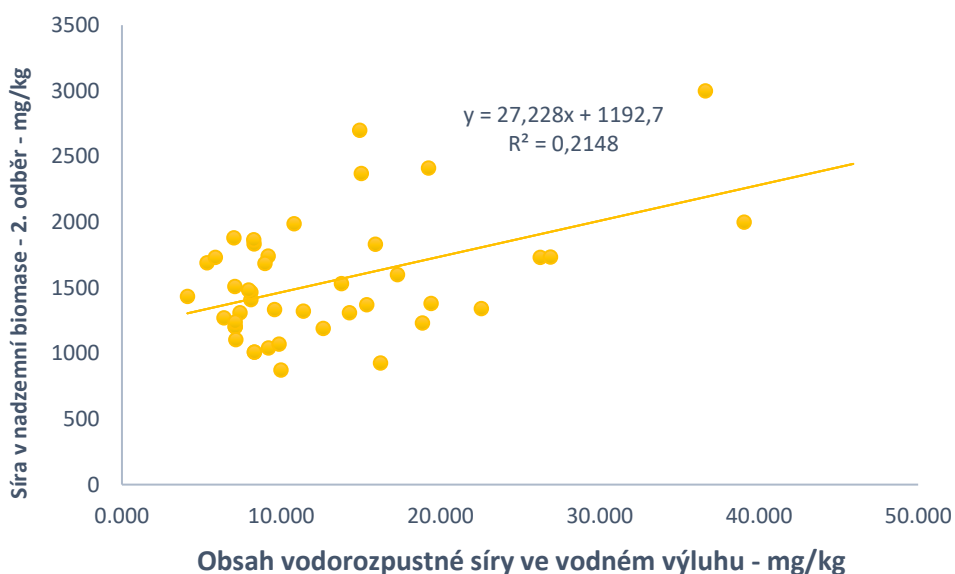
Obsah síry v rostlině při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) s půdní sírou stanovenou vodným výluhem byl zaznamenán v grafu č. 2. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,555$ způsobuje mírnou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 2. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



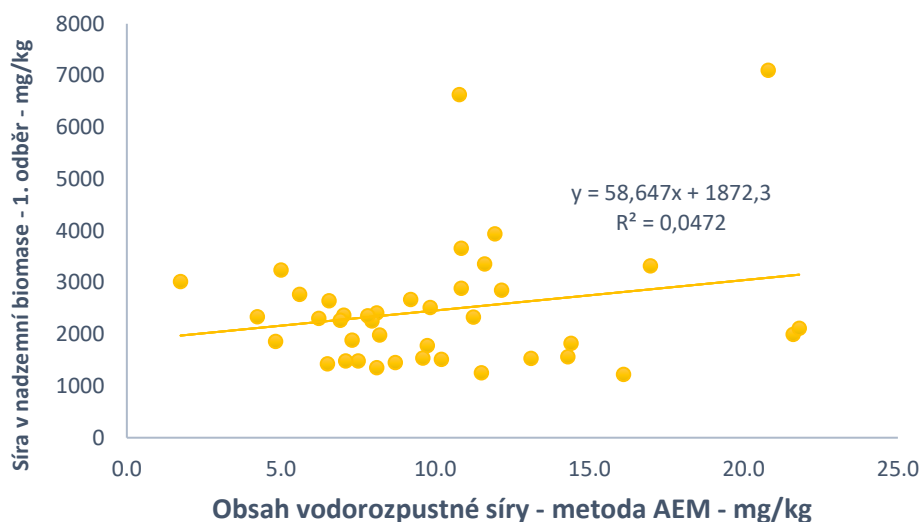
Obsah síry v rostlině při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) s půdní sírou stanovenou vodným výluhem byl pozorován v grafu č. 3. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,463$ způsobuje mírnou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 3. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



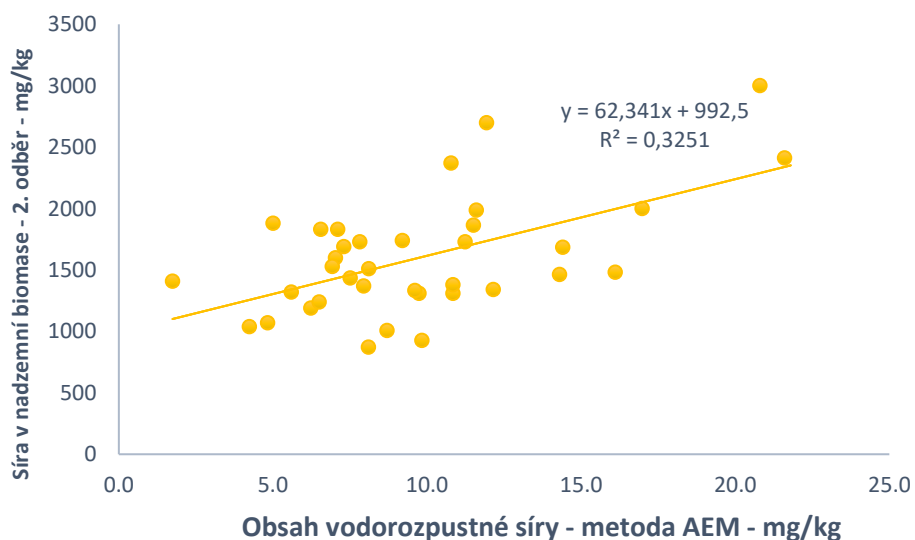
Obsah síry v rostlině na počátku sloupkování (BBCH 30–31) s půdní sírou stanovenou aniontovýměnnými membránami byl sledován v grafu č. 4. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,217$ vytváří pouze slabou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 4. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



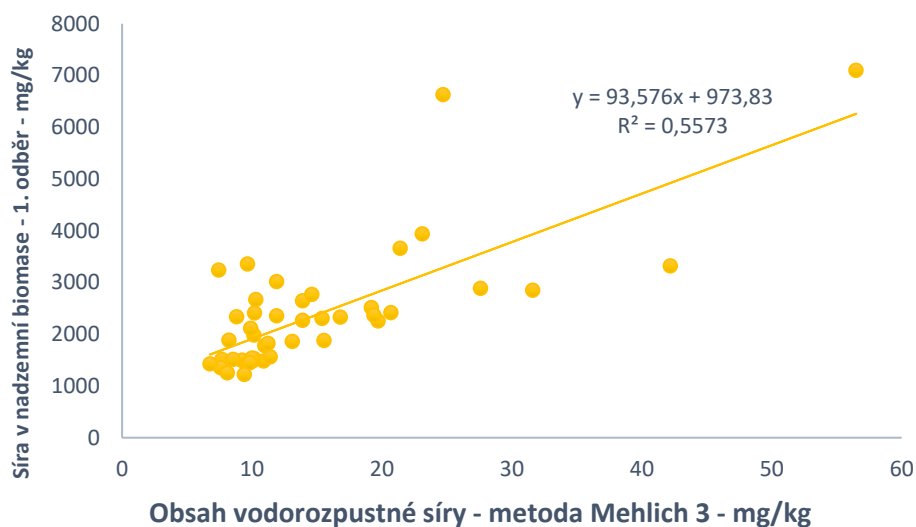
Obsah síry v rostlině ke konci kvetení (BBCH 65–69) s půdní sírou stanovenou aniontovýměnnými membránami byl zaznamenán v grafu č. 5. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,570$ vytváří mírnou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 5. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



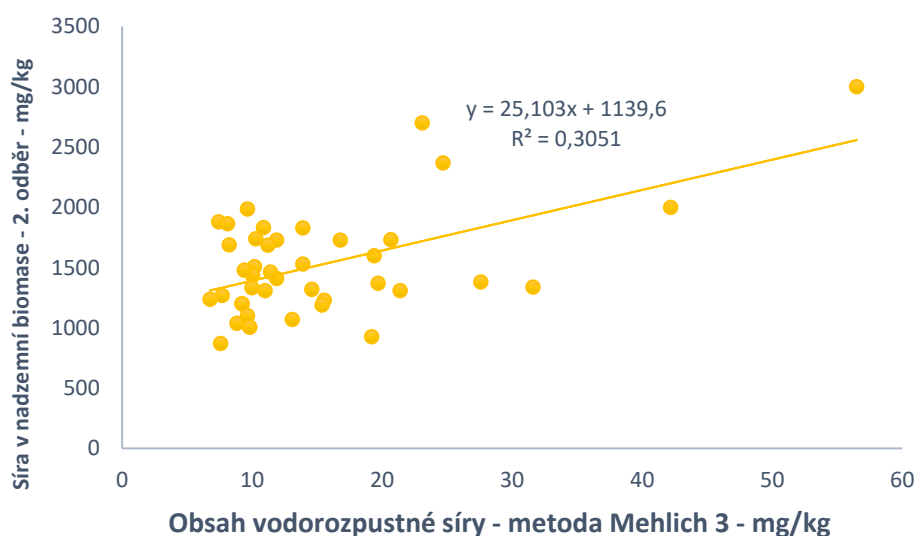
Obsah síry v rostlině na počátku sloupkování (BBCH 30–31) s půdní sírou stanovenou ve výluhu Mehlich 3 byl zaznamenán v grafu č. 6. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,747$ udává vysokou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 6. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



Obsah síry v rostlině ke konci kvetení (BBCH 65–69) s půdní sírou stanovenou Mehlicem 3 byl pozorován v grafu č. 7. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem $r = 0,552$ způsobuje mírnou sílu korelace. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

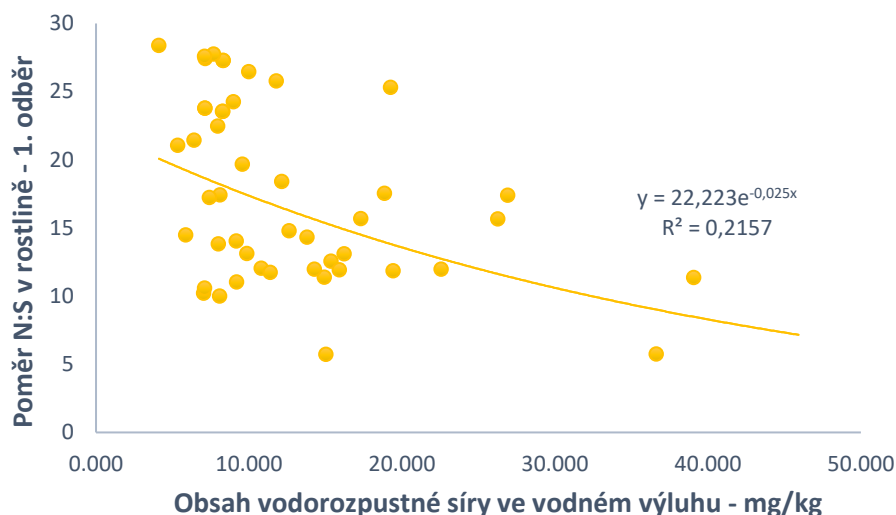
Graf 7. Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



5.2 Sledovaná korelace mezi poměrem N:S v rostlině a půdní sírou na nealkalických půdách

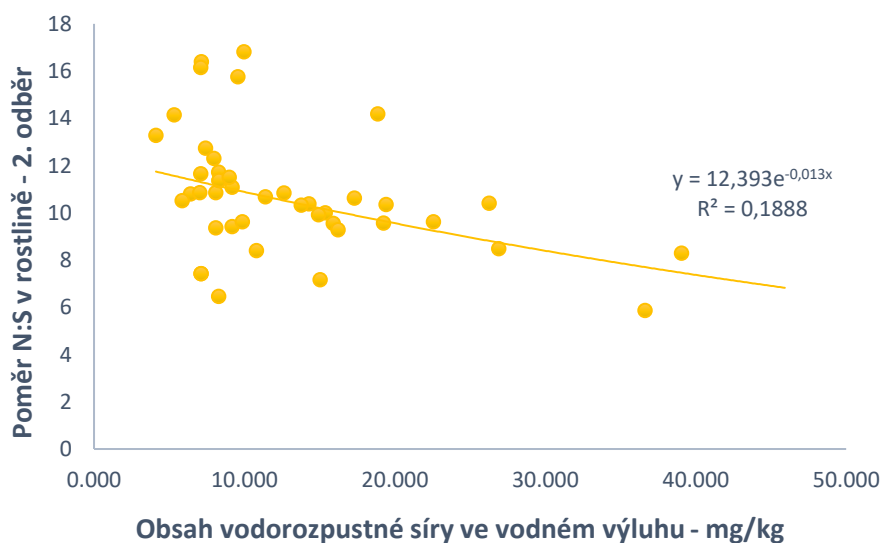
V grafu č. 8 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině na počátku sloupkování (BBCH 30–31) s půdní sírou stanovenou ve vodném výluhu. Jedná se o negativní mírnou sílu korelace s korelačním koeficientem $r = -0,464$. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 8. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



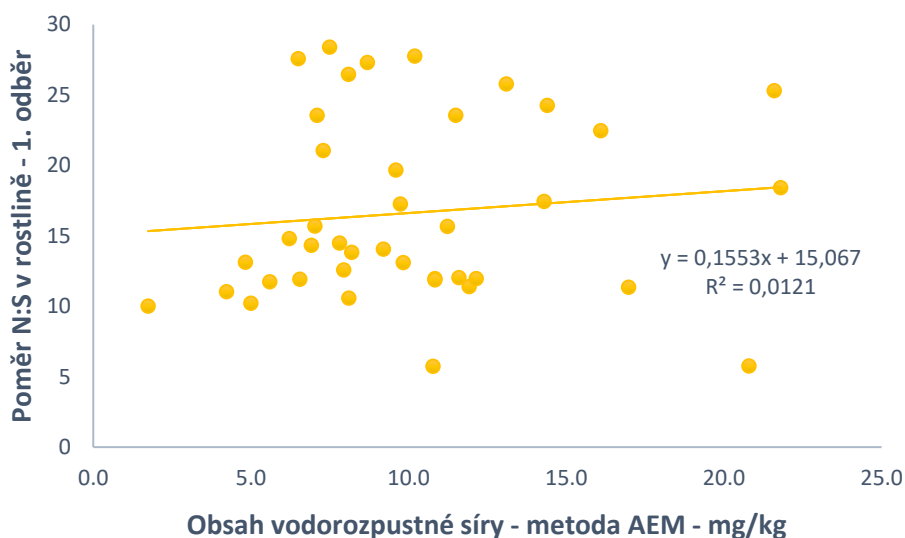
V grafu č. 9 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině ke konci kvetení (BBCH 65–69) s půdní sírou stanovenou ve vodném výluhu. Jedná se o negativní mírnou sílu korelace s korelačním koeficientem $r = -0,435$. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 9. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



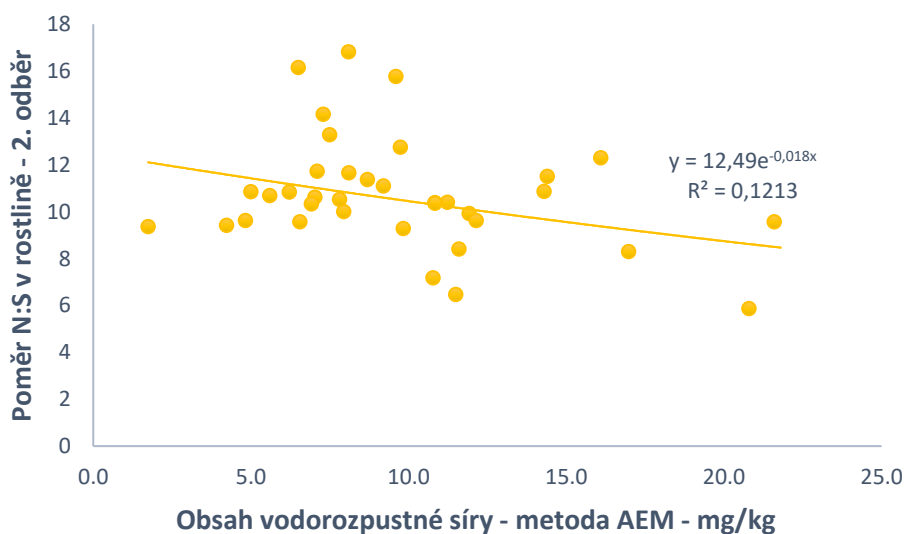
V grafu č. 10 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině na počátku sloupkování (BBCH 30–31) s půdní sírou stanovenou aniontovýměnnými membránami. Jedná se o pozitivní velmi slabou sílu korelace s korelačním koeficientem $r = 0,110$. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 10. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



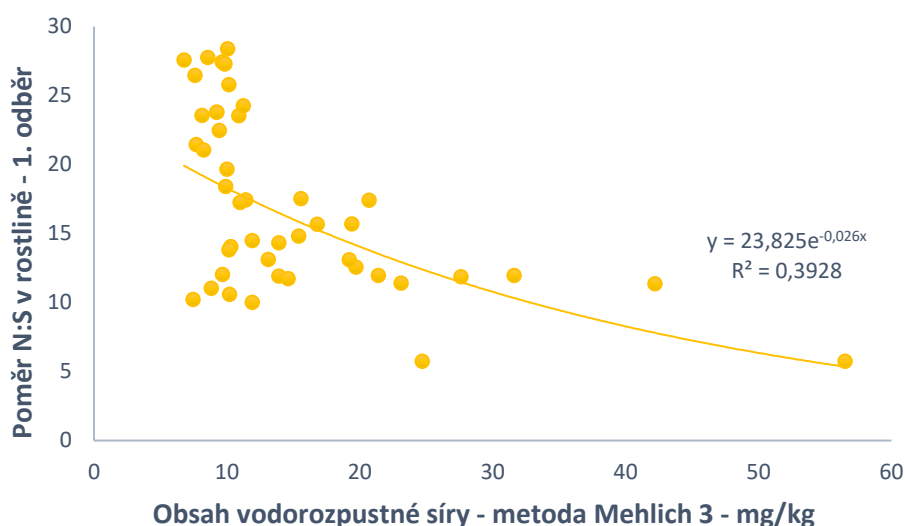
V grafu č. 11 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině ke konci kvetení (BBCH 65–69) s půdní sírou stanovenou aniontovýměnnými membránami. Jedná se o negativní slabou sílu korelace s korelačním koeficientem $r = -0,348$. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 11. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



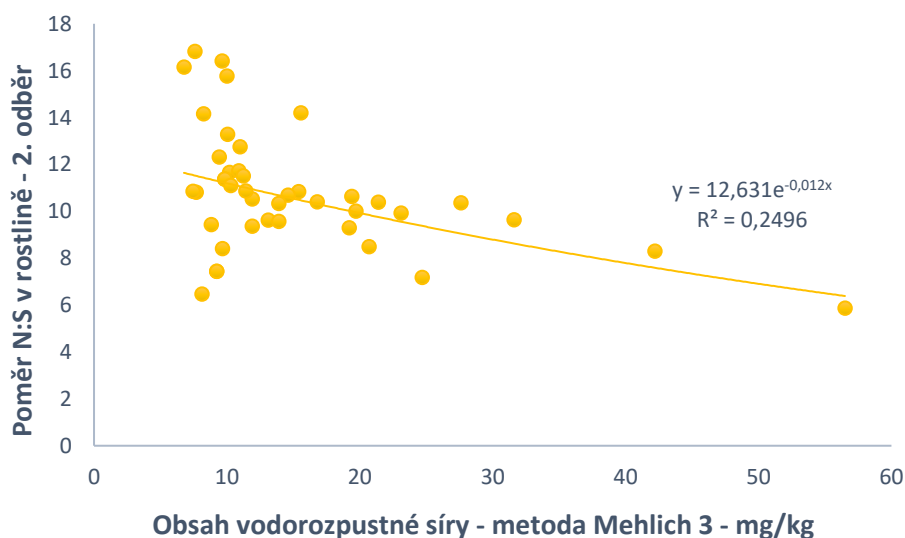
V grafu č. 12 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině na počátku sloupkování (BBCH 30–31) s půdní sírou stanovenou Mehlichem 3. Jedná se o negativní silnou míru korelace s korelačním koeficientem $r = -0,627$. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 12. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu



V grafu č. 13 je sledována korelace mezi poměrem N:S v rostlině ke konci kvetení (BBCH 65–69) s půdní sírou stanovenou Mehlichem 3. Jedná se o negativní mírnou sílu korelace s korelačním koeficientem $r = -0,499$. Vztah byl vyjádřen exponenciální funkcí.

Graf 13. Korelace poměru N:S u ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



6 Diskuse

Soubor hodnot se skládal ze 49 vzorků z nealkalických půd (pH <7). Hodnoty obsahu síry v půdě byly naměřeny třemi způsoby, a to vodným výluhem, Mehlich 3 vyluhovadlem a pomocí aniontovýměnných membrán.

Nejprve byl zjištěn procentuální obsah síry v rostlině. Mengel (2001) uvádí, že obsah síry v rostlinách se pohybuje v rozmezí 0,1-0,5 % (1000–5000 ppm) síry v sušině. Camberato & Casteel (2017) uvádí, že optimální obsah síry v nadzemní biomase činí 0,2–0,3 % (2000–3000 ppm). Podle Matuly (2007) je kritická hodnota obsahu síry v nadzemní biomase v době sloupkování 1900 ppm a v době kvetení 1500 ppm. V měření bylo zjištěno, že se hodnoty pohybují v rozmezí 1228–7100 ppm při prvním měření na počátku sloupkování, přičemž průměrný obsah síry činil 2347 ppm. Na konci kvetení byly zjištěny hodnoty v rozmezí 926–3000 ppm a průměrný obsah byl 1543 ppm neboli těsně nad kritikou hranicí obsahu síry v nadzemní biomase.

Matula (2007) konstatuje, že poměr N:S v nadzemní biomase pšenice ozimé by měl činit optimálně 14,1:1 na začátku prodlužovacího růstu. Calvo et al. (2008) zase uvádějí jako hraniční hodnotu poměru N:S 16:1 v prodlužovacím růstu. Qian & Schoenau (2007) odhalili, že nejvyšší výtěžky sušiny byly dosaženy v jejich pokusech tam, kde byly naměřeny poměry dostupného N:S do 13:1 v prodlužovacím růstu. Reussi et al. (2012) došli k závěru, že za vhodných podmínek dostupnosti N a S je možné potvrdit, že poměr N:S v nadzemní biomase není během období růstu stabilní. Blake-Kalff et al. (2000) zase konstatují, že poměr N:S odráží relativní poměr množství dusíku a síry, ale nikoli skutečné množství (zásobenost). Je tedy možné změřit nízký poměr N:S (což naznačuje dostatečnou dodávku S), když N i S jsou ve skutečnosti nedostatečné. Naopak vysoký poměr N:S může být způsoben nadměrnou zásobeností dusíku, i když síry je také dostatek. Z výsledků z polních provozů byly zjištěny průměry poměrů N:S na začátku odnožování 17,53:1 a na konci kvetení 10,77:1. K těmto výsledkům bych se vyjádřil kladně, hodnota 17,53:1 nemá k optimálnímu poměru daleko. Navíc se v době odnožování spotřebovává značné množství dusíku.

6.1 Optimální obsah síry v půdě na základě optimálního obsahu síry (resp. N:S) v rostlině.

Do grafu, který se věnuje korelaci obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu Mehlich 3 ($y = 93,576x + 973,83$), bylo dosazeno za y spodní kritickou hranici obsahu síry v nadzemní biomase, tj. 1900 ppm. Dosazením bylo zjištěno $x = 9,90$ ppm z vyluhovadla Mehlich 3, obsah síry v půdě ve výluhu Mehlich 3 by tedy neměl klesnout pod hranici 9,90 ppm. Vzhledem k výše uvedeným výsledkům z polních provozů vyplývá, že z polních provozů vyšly hodnoty v průměru 14,5 ppm ve výluhu Mehlich 3. Pro představu, kdybychom využili aniontovýměnných membrán ve

fázi sloupkování, došli bychom přes rovnici z grafu, který se zabývá korelací obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování a obsahu síry v půdním výluhu ($y = 58,647x + 1872,3$), k výsledku $x = 0,47$ ppm. Tato rovnice však popisovala jen slabou korelaci ($r = 0,217$). Zajímavé ale je to, že při měření ve fázi kvetení (BBCH 65) nám korelovala metoda aniontovýměnných membrán značně více, dokonce více než při použití vyluhovadla Mehlich 3, a to s hodnotou korelačního koeficientu $r = 0,570$. Dosazením kritické hodnoty obsahu síry ve fázi kvetení (1500 ppm) do rovnice $y = 62,341x + 992,5$ dostaneme hodnotu $x = 8,14$ ppm síry v roztoku připraveném pro metodu využití aniontovýměnných membrán.

6.2 Vztah mezi obsahem síry v půdě a v rostlině na nealkalických půdách

Vzhledem k výše uvedeným výsledkům z polních provozů vyplývá, že nejsilnější korelace byla zjištěna při prvním měření (na počátku sloupkování) u vyluhovadla Mehlich 3 s hodnotou korelace $r = 0,747$. Podle Kulhánka et al. (2013) je metoda Mehlich 3 vhodná pro stanovení rostlinám přístupné síry minimálně do té míry, jako za tímto účelem běžně používané a ověřené metody. Pomyslné 2. místo zaujal vodný výluh s korelačním koeficientem $r = 0,555$ a nejslabší korelace byla zjištěna při metodě AEM s hodnotou korelace pouhých $r = 0,217$.

Druhé měření (na konci kvetení) dopadlo patrně odlišně. Na konci kvetení měla nejsilnější korelaci metoda AEM s hodnotou $r = 0,570$ a metoda Mehlich 3 s korelačním koeficientem $r = 0,552$. Tyto metody tedy vykazují rovnocenné síly korelací. Slabší korelaci vykazoval vodný výluh se silou korelace $r = 0,463$.

Celkové zhodnocení vztahu mezi sírou v půdě a sírou v rostlině bych zhodnotil tak, že v prvním měření selhala pouze metoda AEM, přičemž metoda s vyluhovadlem Mehlich 3 dosahovala silné korelace. V druhém měření se překvapivě osvědčila metoda AEM, která nám poskytla středně silnou korelaci stejně jako Mehlich 3.

6.3 Vztah mezi poměrem N:S v rostlině a půdní sírou na nealkalických půdách

Vzhledem k výše uvedeným výsledkům z polních provozů vyplývá, že nejsilnější korelace mezi N:S a S-M3 byla zjištěna na počátku sloupkování (BBCH 30–31) u vyluhovadla Mehlich 3 se silou korelace $r = -0,627$. Na druhém místě skončil vodný výluh se silou korelace mezi N:S a S-H₂O $r = -0,464$ a nejslabší korelaci vykazovala metoda AEM se silou korelace mezi N:S a S-AEM pouhých $r = 0,110$.

Při měření ke konci kvetení (BBCH 65–69) byla nejsilnější korelace mezi N:S a S-M3 s hodnotou $r = -0,499$ u metody s vyluhovadlem Mehlich 3, druhé místo opět zaujmul vodný výluh se silou korelace mezi N:S a S-H₂O $r = -0,435$ a nejslabší korelaci vykazovala metoda AEM se silou korelace mezi N:S a S-AEM $r = -0,348$.

Zbývá prodiskutovat ještě jednu otázku. Je lepším indikátorem výživného stavu rostlin sírou obsah síry v rostlině nebo poměr N:S? Vzhledem k výše uvedeným výsledkům z polních provozů vycházely silnější korelace vždy u obsahu síry v nadzemní biomase, a to vždy v průměru o 0,100 vyšší korelační koeficient. Shrnul bych to tedy tak, že ve fázi od konce prodlužovacího růstu po kvetení může být lepší využit poměr N:S ke sledování zásobenosti S v rostlině, ve fázi od začátku vývoje po konec prodlužovacího růstu zase může být poměr N:S zavádějící (např. vysoký poměr N:S může být kvůli nadměrné zásobenosti dusíku, i když síry je také dostatek).

7 Závěr

- Nebyla dostatečně potvrzena hypotéza o tom, že je metoda s využitím aniontovýměnných membrán spolehlivá pro stanovení přijatelného obsahu síry v nealkalických půdách při pěstování pšenice ozimé. Je tomu tak z důvodů následujících. Obsahy síry v půdě vyluhované pomocí AEM korelovaly slaběji s obsahem síry v rostlinách a také měly jednotlivé korelace vysoké výkyvy v průběhu vegetace. Na základě vztahu mezi obsahem síry v půdě a obsahem síry v rostlinách byla zjištěna optimální hodnota přijatelné síry v půdě ve fázi sloupkování 0,47 ppm ($r = 0,217$) a ve fázi kvetení 8,14 ppm ($r = 0,570$) při stanovení obsahu přijatelné síry v půdě pomocí AEM membrán.
- Nejlépe z výsledků z polních provozů dopadla metoda Mehlich 3, která vykazovala vysoké a stabilní korelace mezi obsahem síry v půdě a obsahem síry v rostlině. Byla zjištěna optimální hodnota přijatelné síry v půdě ve fázi sloupkování 9,90 ppm ($r = 0,747$) a ve fázi kvetení 14,36 ppm ($r = 0,552$).
- Vodný výluh vykazoval středně silné, ale během vegetace stabilní korelace mezi obsahem síry v půdě a obsahem síry v rostlinách. Tuto metodu lze posoudit jako spolehlivou. Podle rovnic byla zjištěna optimální hodnota přijatelné síry v půdě ve fázi sloupkování 7,44 ppm ($r = 0,555$) a ve fázi kvetení 11,29 ppm ($r = 0,463$) ve vodném výluhu.
- Nejsilnější korelace s poměrem N:S v nadzemní biomase ozimé pšenice byly opět zjištěny při stanovení obsahu přijatelné síry v půdě ve výluhu Mehlich 3. Metoda s aniontovýměnnými membránami vykazovala opět výkyvy v korelacích během vegetace, a tudíž nemůžeme připisovat těmto výsledkům velkou váhu.
- Skutečnost, že je poměr N:S v nadzemní biomase spolehlivější parametr hodnocení výživného stavu ozimé pšenice sírou, než obsah síry v nadzemní biomase nemůžeme potvrdit u žádného z vyluhovadel, neboť ve všech případech vykazovaly silnější korelace s obsahem přijatelné síry v půdě obsahy síry v nadzemní biomase než poměry N:S.
- Významným výsledkem z polních provozů také je, že 63 % vzorků ozimé pšenice nebylo deficitní na síru v době začátku sloupkování (překonalu hraniční hodnotu 1900 ppm S), jejich obsahy se pohybovaly v rozmezí 1228–7100 ppm. Ve fázi kvetení nebylo 51 % vzorků ozimé pšenice deficitní na síru (překonalu hraniční hodnotu 1500 ppm S) a jejich obsahy se pohybovaly v rozmezí 926–3000 ppm.

8 Literatura

BLAKE-KALFF, Mechteld M. A., Malcolm J. HAWKESFORD, Fang-Jie ZHAO a Steve P. McGRATH. Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*. 2000, **225**(1-2), s. 95-107.

BOZEK, Jadwiga, Alexandru SIN, Tadeusz GRABOWSKI, Czesław NOWAK a Joanna NOWAKOWSKA-GRUNT. Structure And Dynamics Of Major Crops Sown In The European Union. *Romanian Agricultural Research*. Rumunsko: Nardi Fundulea. 2016, **33**, s. 332-337.

BUCHANAN, Bob B., Wilhelm GRUISSEM a Russell L. JONES. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. ISBN 978-0-943088-39-6.

CALVO, Nahuel Ignacio Reussi, Hernán Eduardo ECHEVERRIA a Hernán Sainz ROZAS. Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. *Journal of Plant Nutrition*. 2008, **31**(9), s. 1612-1623.

CAMBERATO, Jim a Shaun CASTEEL. *Sulfur deficiency*. Purdue Univ. Dep. of Agronomy, Soil Fertility Update, 2017.

Český statistický úřad [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt-parametry&katalog=30840&z=T&sp=A&skupId=346&pvo=ZEM02A>

Český statistický úřad [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2019>

DUCHOŇ, František a Jan HAMPL. *Agrochemie*. Československá akademie. Praha, 1962.

ERIKSEN, Jørgen. Sulphur cycling in Danish agricultural soils: turnover in organic S fractions. *Soil Biology and Biochemistry*. 1997, **29**(9-10), s. 1371-1377.

FERNÁNDEZ-ESCOBAR, Ricardo, Manuel BENLLOCH, E. HERRERA a Jorge M. GARCIA-NOVELO. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching. *Scientia horticultrae*. 2004, **101**(1-2), s. 39-49.

FRENEY, John R. Forms and reactions of organic sulphur compounds in soils. *Sulphur in Agriculture*. Madison: Am. Soc. Agron. 1986, **27**, s. 207-232.

HANEKLAUS, Silvia, Eric J. EVANS a Ewald SCHNUG. Baking quality and sulphur content of wheat. I. Relations between sulphur and protein content and loaf volume. *Sulphur in Agriculture*. 1992. **16**, s. 31-34.

JAVOR, Tomáš, Jindřich ČERNÝ, Jiří BALÍK a Martin KULHÁNEK. Optimalizace hnojení ozimé pšenice sírou pro výnos a kvalitu zrna. *Úroda*. Praha: ProfiPress. 2018, **66**(3), s. 22-28.

KOWALENKO, C. Grant. Extraction times and analysis methods influence soil test measurements of phosphorus and sulphur. *Canadian Journal of Soil Science*. 2008, **88**(5), s. 733-747.

KULHÁNEK, Martin, Jiří BALÍK, Ondřej SEDLÁŘ, Jiří ZBÍRAL, Michaela SMATANOVÁ a Pavel SURAN. *Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2018. ISBN 978-80-213-2893-8.

KULHÁNEK, Martin, Jiří BALÍK, Václav VANĚK, Daniela PAVLÍKOVÁ a Jindřich ČERNÝ. *Využití analýz frakcí minerální síry v půdě k optimalizaci hnojení: certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013. ISBN 978-80-213-2376-6.

KUONO, Kenji, Yasuhiro TUCHIYA a Tadao ANDO. Measurement of soil microbial biomass phosphorus by an anion exchange membrane method. *Soil Biology and Biochemistry*. 1995, **27**(10), s. 1353-1357.

KŮST, František. Produkce pšenice ve světě a v Evropské unii. *Pšenice: Odborná příloha časopisu Úroda*. Praha: ProfiPress, 2019, **67**(8), s. 22-30.

LEE, Hyun Kyung, Inkyin KHAINÉ, Myeong Ja KWAK, et al. The relationship between SO₂ exposure and plant physiology: A mini review. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 2017, **58**(6), s. 523-529.

MARSCHNER, Horst a Petra MARSCHNER. *Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed.* Waltham, MA: Elsevier/Academic Press, 2012. ISBN 01-238-4905-5.

MATULA, Jiří. *Výživa a hnojení sírou*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2007. ISBN 978-80-87011-15-7.

MEHLICH, Adolf. Mehlich-3 soil test extractant – A modification of Mehlich-2 extractant. Communications. *Soil Science and Plant Analysis*. 1984, **15**(12), s. 1409-1416.

MENGEL, Konrad. *Principles of plant nutrition*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. ISBN 07-923-7150-X.

MESSICK, Deborah L., Ming-Xia FAN a Cristobal De BREY. Global sulfur requirement and sulfur fertilizers. *Landbauforsch Völkenrode*. 2005, **283**, s. 97-104.

NGUYEN, Minhthy L. a Kuan M. GOH. Sulphur cycling and its implications on sulphur fertilizer requirements of grazed grassland ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Nový Zéland. 1994, **49**(2), s. 173-206.

PETR, Jiří. *Pěstování pšenice podle užitkových směrů*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 2001. ISBN 80-727-1090-7.

PILBEAM, David J. a Allen V. BARKER. *Handbook of Plant Nutrition*. FL: CRC Press, 2007, s. 183-238.

POLIŠENSKÁ, Ivana, Slavoj PALÍK, Ondřej JIRSA a Marie VÁŇOVÁ. *Vliv předplodiny na kvalitu ozimé pšenice* [online]. 2017 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/sklizen-a-skladovani/sklizen-1/vliv-predplodiny-na-kvalitu-ozime-psenice>

QIAN, Pingping a Jeff J. SCHOENAU. Using an anion exchange membrane to predict soil available N and S supplies and the impact of N and S fertilization on canola and wheat growth, *Pedosphere*. 2007, **17**(1), s. 77-83.

REUSSI Nahuel, Hernán Eduardo ECHEVERRIA a Hernán Sainz ROZAS. Stability of foliar Nitrogen: Sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve, *Journal of Plant Nutrition*. 2012, **35**(7), s. 990-1003.

RYANT, Pavel a Luděk HŘIVNA. Vliv síry na kvalitu produkce. In: *Racionální použití hnojiv: zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin*. Praha: Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, ČZU, 2011, s. 40-45. ISBN 978-80-213-2224-0

SEARLE, Philip Lee. The extraction of sulphate and mineralisable sulphur from soil with an anion exchange membrane. *Communications in soil science and plant analysis (USA)*. 1992, **23**(17-20), s. 2087-2095.

SHI, Yichao, Noura ZIADI, Aimé J. MESSIGA a Roger LALANDE. Nongrowing season soil surface nitrate and phosphate dynamics in a corn–soybean rotation in eastern Canada: in situ evaluation using anionic exchange membranes. *Canadian Journal of Soil Science*. 2016, **96**(2), s. 136-144.

SLAVÍČKOVÁ, Kateřina. *Živá a neživá příroda II Koloběh látek v přírodě* [online]. In: . 2010 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3814341/>

STEVENSON, Frank J. a Michael A. COLE. *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients - 2nd ed.* New York: Wiley, 1999. ISBN 04-713-2071-4.

TAIZ, Lincoln, Eduardo ZEIGER, Ian M. MØLLER a Angus MURPHY. *Plant Physiology and Development*. 6. Massachusetts: Sinauer Associates, 2014. ISBN 9781605353265.

TIESSSEN, Holm a Jacqueline O. MOIR. Characterization of available phosphorus by sequential extraction. In: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, 1993, s. 75-86.

TLUSTOŠ, Pavel, Daniela PAVLÍKOVÁ, Václav VANĚK a Jan HABART. Síra v životním prostředí. In: *Racionální použití hnojiv: zaměřené na problematiku síry ve výživě rostlin*. Praha: Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin, ČZU, 2011, s. 15-19. ISBN 978-80-213-2224-0

VANĚK, Václav, Jiří BALÍK, Milan PAVLÍK, Daniela PAVLÍKOVÁ a Pavel TLUSTOŠ. *Výživa a hnojení polních plodin*. Praha: Profi Press, 2007. ISBN 976-80-86726-25-0

VYAS, Punita V., Bhagwan G. SHAH, Grishma S. TRIVEDI, Prabir RAY, Sajal Kumar ADHIKARY, a Raghavan RANGARAJAN. Characterization of heterogeneous anion-exchange membrane. *Journal of Membrane Science*. 2001, **187**(1-2), s. 39-46.

WILHELM SCHERER, Heinrich. Sulfur in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2009, **172**(3), s. 326-335.

ZBÍRAL, Jan, Eva ČIŽMÁROVÁ, Elena OBDRŽÁLKOVÁ, Miloš RYCHLÝ, Vladimíra VILAMOVÁ, Jaroslava SRNKOVÁ, a Alena ŽALMANOVÁ. *Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy*. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Národní referenční laboratoř, Brno, 2016.

ZELENÝ, František a Eva ZELENÁ. *Síra a její potřeba pro výživu rostlin: Sulphur and its need for plant nutrition*. Praha. Ústav zemědělských a potravinářských informací, 1997. ISBN 80-861-5362-2.

ZHAO, Fang-Jie, Malcolm J. HAWKESFORD a Steve P. McGRATH. Sulphur Assimilation and Effects on Yield and Quality of Wheat. *Journal of Cereal Science*. 1998, **30**(1), s. 19.

ZIMOLKA, Josef. *Pšenice: pěstování, hodnocení a užití zrna*. Praha: Profi Press, 2005. ISBN 80-867-2609-6.

