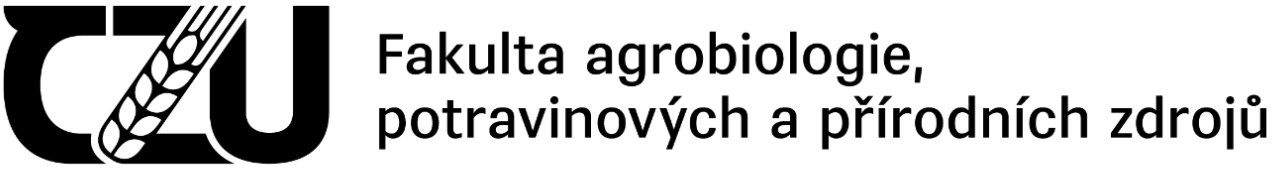
Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Vyjádření výživného stavu pšenice sírou na základě modelu zřeďovací křivky

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Josef Král

Obor studia: Rostlinná produkce

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

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vyjádření výživného stavu pšenice sírou na základě modelu zřeďovací křivky" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.4.2022 _____

Poděkování

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

Vyjádření výživného stavu pšenice sírou na základě modelu zřeďovací křivky

Souhrn

Síra je jedním z nejdůležitějších makroprvků ve výživě rostlin, a to z důvodu její funkce při syntéze bílkovin. Síra je též součástí aminokyselin, například cysteinu či methioninu, též hraje důležitou roli při odolnosti pšenice vůči biotickému a abiotickému stresu. Síra je limitním faktorem při tvorbě výnosu pšenice, zároveň ale případný deficit síry zhoršuje pekařskou kvalitu zrna. Pro zajištění správného množství přijatelné síry dodaného pšenici je potřeba určit, jakými metodami je možné toto množství správně stanovit.

Cílem této diplomové práce bylo vyjádření výživného stavu ozimé pšenice na základě modelu zřeďovací křivky, které reflektovalo obsah přijatelné síry v půdě. Data představovala vzorky půdy a nadzemní biomasy odebrané z polních provozů na území České republiky v letech 2015-2020. Pro hodnocení byly odebrány vzorky nadzemní biomasy ve dvou fázích, a to na počátku sloupkování (BBCH 30–31) a ke konci kvetení (BBCH 65–69). Pomocí regresních a korelačních analýz se posléze porovnávaly způsoby vyjádření obsahu síry v rostlině, a to pomocí zřeďovací křivky (SNI), poměru N/S a samotného obsahu síry v nadzemní biomase nejprve s obsahem půdní síry stanoveným vodným výluhem a poté s hmotností sušiny (t/ha).

Z regresních analýz bylo zjištěno, že nejsilněji koreluje s půdní sírou stanovenou vodným výluhem obsah síry v nadzemní biomase, a to ve fázi sloupkování ($r = 0{,}512$) i ve fázi kvetení ($r = 0{,}490$). Vyjádření výživného stavu ozimé pšenice pomocí zřeďovací křivky korelovalo nejlépe z možných způsobů s hmotností sušiny, a to jen ve fázi sloupkování ($r = 0{,}422$). Bylo též zjištěno, že silněji koreluje s poměrem N/S v obou odběrech obsah síry v nadzemní biomase než obsah dusíku v nadzemní biomase. Se sírou v nadzemní biomase koreloval poměr N/S ve fázi sloupkování velmi silně ($r = -0{,}860$), navíc $p \leq 0{,}001$ dokazuje, že je tento vztah statisticky velmi významný. Ve fázi kvetení korelovala síra v rostlině s N/S silně ($r = -0{,}680$), opět na hladině významnosti $p \leq 0{,}001$.

Metodu indexu výživy rostlin sírou (SNI) nelze zcela jednoznačně doporučit pro sledování optimálního obsahu síry v rostlině, jelikož s půdní sírou stanovenou vodným výluhem koreloval SNI slaběji než obsah síry v nadzemní biomase i poměr N/S. Ideálním řešením by se mohla stát kombinace poměru N/S a SNI.

Klíčová slova: dusík, poměr N/S, pšenice, síra, SNI, vodný výluh

Sulphur Status of Wheat Expressed Using the Model of Dilution Curve

Summary

Sulphur is one of the most important macroelements in plant nutrition, due to its function in protein synthesis. Sulphur is also part of amino acids such as cysteine or methionine. Sulphur also plays an important role in wheat's resistance to biotic and abiotic stress. Sulphur is a limiting factor in wheat yield production, but at the same time, a possible sulphur deficit worsens the baking quality of the grain. In order to ensure the correct amount of available sulphur delivered to wheat, it is necessary to determine by which methods this amount can be determined correctly.

The aim of this diploma thesis was to express the nutritional status of winter wheat based on the model of the dilution curve, which reflected the content of acceptable sulphur in the soil. The data represented soil and above-ground biomass samples taken from field operations in the Czech Republic from 2015 to 2020. Aboveground biomass samples were taken for evaluation in two phases, at the beginning of the stem elongation (BBCH 30-31) and at the end of flowering (BBCH 65-69). Using regression and correlation analyses, the methods for expressing the sulphur content of the plant were then compared, namely the sulphur nutrition index (SNI), the N/S ratio and the sulphur content of the aboveground biomass (ppm) first with the soil sulphur determined by water extraction (ppm) and then with dry weight (t/ha).

From the regression analyses, it was found that the sulphur content in the aboveground biomass correlates most strongly with the soil sulphur determined by the water extraction, both in the stem elongation ($r = 0.512$) and in the flowering phase ($r = 0.490$). The expression of the nutritional status of winter wheat using the dilution curve (SNI) correlated the best of the possible methods with the dry weight, and only in the stem elongation phase ($r = 0.422$). It was also found that the sulphur content in the aboveground biomass correlates more strongly with the N/S ratio in both samples than the nitrogen content in the aboveground biomass. The N/S ratio correlated very strongly with sulphur in the aboveground biomass in the column phase ($r = -0.860$), moreover, $p \leq 0.001$ proves that this relationship is statistically very significant. In the flowering phase, sulphur in the plant correlated strongly with N/S ($r = -0.680$), again at the level of significance $p \leq 0.001$. The sulphur nutrition index (SNI) method cannot be unequivocally recommended for monitoring the optimal sulphur content in the plant, as SNI correlated weakly with soil sulphur determined by water extraction than the sulphur content in aboveground biomass and the N/S ratio. A combination of N/S and SNI ratio could be an ideal solution.

Key words: nitrogen, N/S ratio, SNI, sulphur, water extraction, wheat

Obsah

1 Úvod 8

2 Cíl práce 9

2.1 Hypotézy 9

3 Literární rešerše 10

3.1 Pšenice setá 10

3.1.1 Produkce pšenice seté 10

3.1.1.1 Česká republika 10

3.1.1.2 Evropa a svět 10

3.1.2 Agrotechnika 11

3.1.2.1 Vliv předplodiny 11

3.1.2.2 Vliv přípravy půdy 11

3.1.2.3 Doba setí a výsevek 12

3.1.3 Charakteristika druhu 12

3.1.3.1 Kořenový systém 12

3.1.3.2 Listy 12

3.1.3.3 Stéblo 12

3.1.3.4 Květ 12

3.1.3.5 Plod 13

3.1.3.6 Chemické složení pšeničného zrna 13

3.1.4 Výživa a hnojení pšenice 14

3.1.4.1 Hnojení sírou 14

3.1.4.2 Hnojení dusíkem 16

3.2 Síra 16

3.2.1 Formy síry 16

3.2.1.1 Přírodní 16

3.2.1.2 Jiné 17

3.2.2 Síra v životním prostředí 17

3.2.3 Síra v půdě 19

3.2.3.1 Metody stanovení přístupné síry v půdě 21

3.2.4 Síra v rostlině 21

3.2.4.1 Nadbytek síry 23

3.2.4.2 Deficit síry 24

3.2.4.3 Interakce mezi metabolismy síry a dusíku v rostlinách 26

3.2.4.4 Interakce mezi metabolismy síry a uhlíku v rostlinách 26

3.2.4.5 Interakce mezi metabolismy síry a fosforu v rostlinách 26
3.2.4.6 Poměr N/S 26
3.2.4.7 SNI (Sulphur nutrition index) 27
3.2.5 Hnojiva obsahující síru 28

4 Metodika 30
4.1 Odběr vzorků z polních provozů 30
4.2 Chemické analýzy rostlinného materiálu 30
4.3 Chemické analýzy půd 32
4.3.1 Stanovení obsahu síry ve vodném výluhu 32
4.3.2 Stanovení obsahu síry metodou Mehlich 3 32
4.4 Statistická vyhodnocení 32

5 Výsledky 34
5.1 Korelace půdní reakce (pH) s obsahem síry v půdě 34
5.2 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s poměrem N/S 35
5.3 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s obsahem síry v půdě 36
5.4 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s hmotností sušiny (t/ha) 37
5.5 Korelace obsahu síry v nadzemní biomase s obsahem síry v půdě 38
5.6 Korelace obsahu síry v nadzemní biomase s hmotností sušiny 39
5.7 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s obsahem síry v půdě 40
5.8 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s hmotností sušiny 41
5.9 Korelace poměru N/S s obsahem síry v nadzemní biomase 42
5.10 Korelace poměru N/S s obsahem dusíku v nadzemní biomase 43

6 Diskuse 44
6.1 Srovnání půdní síry vyluhované vodným výluhem s indexem výživy rostlin sírou (SNI), poměrem N/S a obsahem síry v nadzemní biomase 45
6.2 Srovnání hmotnosti sušiny s indexem výživy rostlin sírou (SNI), poměrem N/S v nadzemní biomase a obsahem síry v nadzemní biomase 46
6.3 Srovnání poměru N/S s obsahem síry a dusíku v nadzemní biomase 46

7 Závěr 47

8 Literatura 48

1 Úvod

Pšenice ozimá je v České republice nejpěstovanejší obilninou a zároveň jednou z nejpěstovanějších plodin na světě. Její potenciál znali již naši předci, a to již v neolitu, tzn. 5000 let př. n. l. Zrno pšenice ozimé se využívá k potravinářským, krmivářským a semenářským účelům. Výhodou pšenice, tak jako u jiných obilovin, je jednoduchá skladovatelnost a poměrně dlouhá trvanlivost zrna. Plochy oseté ozimou pšenicí se stabilně pohybují v České republice okolo 760 000 hektarů. Pšenice je středně náročnou plodinou na dostatek přijatelných živin v půdě. Konkrétně síry je odčerpáváno průměrně 4,2 kg na 1 tunu zrna pšenice.

Síra je jedním z významných makroprvků, který se účastní mnoha enzymatických a metabolických procesů v rostlinách. V rostlině síra podporuje syntézu bílkovin a některé aminokyseliny mají síru jako jeden ze stavebních prvků, například cystein nebo methionin. Síra má též nezastupitelnou funkci při redukci nitrátů, a to z důvodu její přítomnosti v enzymunitrátreduktáza. V procesu odolnosti rostlin vůči biotickému a abiotickému stresu hraje síra taktéž důležitou roli. Rostlina síru přijímá aktivně přes kořeny nebo průduchy na listech převážně ve formě síranového aniontu. Problémem v posledních 20 letech ale je fakt, že z důvodu odsiřování uhelných elektráren se síra v našich podmínkách stává limitujícím prvkem při tvorbě výnosu celého spektra plodin, jehož součástí je i pšenice ozimá. Proto je zde nutností zjistit způsob, který by nám charakterizoval výživný stav pšenice, zejména ve vztahu síry v rostlině.

V současné době se počítá zejména s poměrem N/S, u nějž by poměr vyšší než 20 měl indikovat deficitní výživu plodiny sírou. Použití pouze poměru N/S k zjištění optimálního množství síry v rostlině má jisté problémy. Jedním z problémů je, že přebytek jednoho z těchto prvků lze interpretovat jako nedostatek toho druhého. Kromě toho stanovení poměru N/S vyžaduje dvě přesné analýzy měření. Jistým řešením problémů, které se vážou na poměr N/S, může být model tzv. zřeďovací křivky obsahu síry v nadzemní biomase. Takový model bere v úvahu jen aktuální hmotnost nadzemní biomasy, na jejímž základě je vyjádřen optimální obsah síry v nadzemní biomase, s nímž je poté porovnáván skutečně naměřený obsah síry.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je vyjádření výživného stavu ozimé pšenice na základě modelu zřeďovací křivky, které bude reflektovat obsah přijatelné síry v půdě.

2.1 Hypotézy

- Vyjádření výživného stavu ozimé pšenice pomocí zřeďovací křivky je v těsnějším vztahu s přijatelnou půdní sírou než poměr N/S v nadzemní biomase a obsah síry v nadzemní biomase.
- Vyjádření výživného stavu ozimé pšenice pomocí zřeďovací křivky je v těsnějším vztahu s hmotností nadzemní biomasy než poměr N/S v nadzemní biomase a obsah síry v nadzemní biomase.
- Poměr N/S v nadzemní biomase ozimé pšenice koreluje silněji s obsahem dusíku v nadzemní biomase než se sírou.

3 Literární rešerše

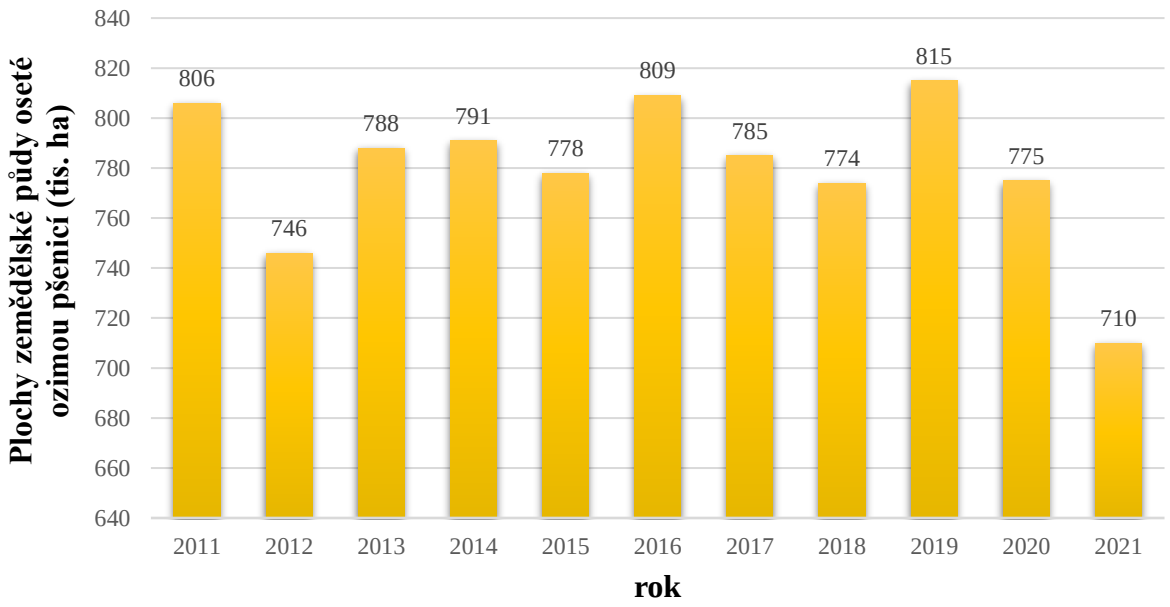
3.1 Pšenice setá

3.1.1 Produkce pšenice seté

3.1.1.1 Česká republika

Zrno pšenice ozimé má využití pro potravinářské a krmivářské zpracování, přičemž pro potravinářské účely se využívá 28–32 % z celkové produkce pšenice v ČR, ke krmným účelům 55–58 % a na osivo asi 6 % (Tauferová et al. 2014). Na základě definitivní sklizně obilovin podle ČSÚ je stanovena produkce pšenice ozimé v roce 2021 ve výši 4 563 tis. tun. Co se týče průměrného výnosu, v České republice byl v roce 2021 6,76 t/ha (ČSÚ 2021). Vývoj osevních ploch ozimé pšenice uvádí graf 1.

Graf 1: Plochy zemědělské půdy oseté ozimou pšenicí setou (ha) v letech 2011–2021 v České republice (ČSÚ 2021)



3.1.1.2 Evropa a svět

Plocha osetá pšenicí se v jednotlivých státech EU výrazně liší. V Portugalsku se plocha osetá pšenicí podílí přibližně 17,3 % z celkové plochy, zatímco v Bulharsku tvoří plocha osetá pšenicí přibližných 61,8 % z celkové plochy (Bozek et al. 2016). Celková produkce obilovin v marketingovém roce 2021/2022 je podle Evropské komise odhadována meziročně mírně vyšší na úrovni 292,2 mil. t. Důvodem je zejména nárůst produkce pšenice, jejíž osevní plocha a hektarový výnos se meziročně zvýšily. Výroba ve Francii, Rumunsku a v Belgii se odrazila od loňského minima a významně přispěla k výkonnosti celé EU. Růst produkce nastal navzdory

častým letním srážkám, které zabraňovaly sklizni ozimých a jarních plodin. Nižší světová dostupnost pšenice, zejména kvůli průběhu počasí v Rusku, USA a Kanadě, drží ceny pšenice na vysoké úrovni. To by mělo vést k podpoře vývozu pšenice z EU, a to navzdory obavám o její kvalitu (Filgasová 2022).

3.1.2 Agrotechnika

Pšenice ozimá je nejnáročnější obilninou na půdní podmínky a živiny. Nejvhodnější jsou střední až těžké půdy s neutrálním slabě kyselou půdní reakcí (pH 6,2–7,0) (Tauferová et al. 2014). 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).

3.1.2.1 Vliv předplodiny

Pšenice ozimá je dosti náročná na předplodinu, přičemž nejvhodnějšími jsou jeteloviny, luskoviny, olejniny a okopaniny. Ze všech obilnin nejcitlivěji reaguje výnosem na předplodinu, přičemž intenzivním hnojením nelze nahradit nevhodnou předplodinu (Tauferová et al. 2014).

Velmi dobrými předplodinami pro ozimou pšenici jsou širokolisté plodiny, případně plodiny hnojené hnojem. Jsou to víceleté pícniny, kromě sušších oblastí, kde mohou zhoršovat vodní režim pro následnou plodinu. Časná (3–4 týdny před setím) zaorávka drnu jetelovin zlepšuje vláhové poměry v půdě a tím zvyšuje výnos následné pšenice. Další velmi dobré předplodiny jsou luskoviny (hrách je lepší než bob), ozimá řepka, luskovinoobilné směsky na zeleno, rané a polorané brambory, kukuřice na siláž, tabák, cibule aj. Středně dobrými předplodinami jsou jeteloviny, okopaniny a kukuřice na zrno včas sklizená (i přednostně sklizená cukrovka s následným zjednodušeným zpracováním půdy), luskovinoobilné směsky na zrno, mák, případně len (Křen et al. 2015).

Zařazení pšenice ozimé po obilnině zvyšuje nebezpečí vyššího výskytu chorob (zvláště chorob pat stébel) a škůdců a zhoršuje výnosovou stabilitu pšenice. V sušších podmínkách je riziko chorob pat stébel nižší. Zcela nevhodný je sled pšenice po pšenici (Tauferová et al. 2014).

3.1.2.2 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 seťového lůžka. Pro pšenici se zdá nejvhodnější klasický způsob přípravy půdy s včasným naoráním před orbou a se současnou úpravou ornice. Dosáhne se tak přirozené ulehlosti půdy a lépe se připravuje seťové lůžko (Petr 2001).

3.1.2.3 Doba setí a výsevek

Pšenice ozimé se vysévá 3–6 MKS, což odpovídá 180–240 kg/ha. Hloubka setí by měla optimálně činit 3–6 cm a ideálně by se mělo zasít od 10.9. do 15.11. Termín setí se ale odvíjí zejména od klimatických podmínek (OSEV jih s.r.o. 2017).

3.1.3 Charakteristika druhu

Pšenice setá (*Triticum aestivum*) je ozimá nebo jarní trsnatá jednoletá obilnina z čeledi *Poaceae* (Zimolka 2005). U ozimů působí dlouhodobý vliv nižších teplot (většinou nad bodem mrazu) na odstranění blokády vývoje. Toto působení je označováno jarovizací, která probíhá na podzim do předjaří. Délka období jarovizace je podle druhu a odrůdy v rozmezí 25–60 dní. Jarovizace v kombinaci s reakcí rostlin na délku dne, tzv. fotoperiodickou reakci, a dále s intenzitou osvětlení umožňuje iniciaci květních orgánů a přechod z vegetativního období vývoje rostlin do generativního (Tauferová et al. 2014).

3.1.3.1 Kořenový systém

Kořenový systém je u pšenice svazčitý, složený z velkého množství slabších kořenů. Jejich hlavní podíl je v horní vrstvě půdy, v ornici, i když některé kořeny zasahují hlouběji. Mohutnost tohoto systému závisí na pěstitelských podmínkách a na průběhu počasí (Tauferová et al. 2014).

3.1.3.2 Listy

Listy jsou hlavním asimilačním orgánem rostliny. Na stéble vyrůstá z každého kolénka po jednom listu. List se skládá z válcovité listové pochvy a volně do prostoru spočívají listové čepele (Tauferová et al. 2014). 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 (Zimolka 2005).

3.1.3.3 Stéblo

Pšenice v průběhu vegetačního období vytváří nízké trsy z odnoží a listů. Při dalším vývoji vzrostných vrcholů se začíná vytvářet nejspodnější článek (internodium) stébla a nejspodnější, první kolénko (Tauferová et al. 2014). Stéblo je duté, tenkostěnné, tvořené obvykle pěti články oddělenými kolénky (Zimolka 2005).

3.1.3.4 Květ

Květenstvím je čtyřhranný klas. Vřeteno klasu je tuhé a nelámavé (Zimolka 2005). Na článcích klasového vřeténka nebo na konci větévek laty jsou klásky (většinou 2–5 květů)

ohraničené dvojicí plev. Klásky jsou tvořeny kvítky. Kvítek se skládá z obalů – pluchy a plušky (Tauferová et al. 2014). Pluchy mohou být osinaté nebo bezosinné (Zimolka 2005). Uvnitř jsou samčí pohlavní orgány (3 tyčinky) a jeden samičí orgán (pestík), na jehož bázi je pár drobných útvarů, zvaných lodikuly (plenky). Lodikuly rozevírají pluchu a plušku v době kvetení (Tauferová et al. 2014).

3.1.3.5 Plod

U pšenice se plod nazývá obilka (Zimolka 2005). Obilka má tři hlavní části: obalové vrstvy, endosperm a klíček. Obaly chrání obilku před vnějšími vlivy. Podíl obalů na hmotnosti obilky je asi 8 %. Na povrchu je oplodí, těsně pod oplodím je osemení. Při mletí mouky přecházejí obaly (oplodí a osemení) do otrub, které jsou po sléze zkrmovány. Endosperm tvoří asi 89 % hmotnosti obilky. Vnější část tvoří aleuronová vrstva buněk se zvýšeným obsahem bílkovin. Vlastní endosperm je složen z velkých buněk se škrobovými zrny. Klíček je nejmenší (1,6–3 %), zato však nejsložitější částí obilky. Svrchu jej kryje oplodí a osemení. Palisádovými buňkami a štítkem přiléhá k endospermu, odkud jsou v době klíčení a vzcházení převáděny zásobní látky (Tauferová et al. 2014).

3.1.3.6 Chemické složení pšeničného zrna

Pšeničné zrno je tvořeno z minerálních a organických látek, především ze sacharidů, bílkovin a lipidů. Sacharidy tvoří nejpodstatnější podíl pšeničného zrna. Patří sem především polysacharidy škrob, celulosa, hemicelulosy, pentosany, slizy, oligosacharidy a monosacharidy a také sacharidy jako součást komplexů s lipidy a bílkovinami – glykolipidy a glykoproteidy. Obsah škrobu v pšeničném zrnu se pohybuje od 50–70 % v závislosti na odrůdě a agroekologických podmínkách. Škrob se skládá ze dvou polysacharidů – amylasy s přímým řetězcem glukosových zbytků a z amylopektinu, který má rozvětvený řetězec. Kromě těchto polysacharidů obsahuje škrob minerální látky (hlavně kyselinu fosforečnou) a vyšší mastné kyseliny. V zrnu pšenice je přítomno 1,5–3,0 % lipidů, tvořených jednak vlastními tuky složenými hlavně z kyseliny linolové a olejové a jednak fosfatidy, které obsahují kyselinu fosforečnou a dusíkatou bázi. Typickým představitelem je licithin s dusíkatou bází cholinem. Hlavní podíl lipidů je soustředěn do klíčkové části zrna (Tauferová et al. 2014). Bílkoviny tvoří zhruba 10 až 15 % pšeničného zrna a najdeme je jak v endospermu, tak v obalových vrstvách. Dělí se na gluteliny, gliadiny, albuminy a globuliny podle jejich rozpustnosti ve vodě, solích, alkoholu a zředěných kyselinách nebo zásadách. Proteiny jsou odpovědné za rheologické vlastnosti pšeničného těsta (Wang et al. 2020).

Obsah minerálních látek v zrnu pšenice se pohybuje mezi 1,4–3,0 % v závislosti na odrůdě, půdě a podmínkách v průběhu vegetace. Zrno obsahuje průměrně ve 100 g sušiny asi 450 mg fosforu, 380 mg draslíku, 160 mg síry, 140 mg hořčíku, 60 mg vápníku, 30 mg sodíku, 5 mg 54 železa, 4,5 mg manganu, 3 mg zinku, 2,5 mg bóru, 0,7 mg mědi a v nepatrných

množstvích ještě další minerální prvky. Nejvíce minerálií je soustředěno v klíčku a v obalech zrna (Tauferová et al. 2014).

3.1.4 Výživa a hnojení pšenice

Pšenice ozimá koření poměrně mělce a má bohatou kořenovou síť. Většina kořenů je soustředěna v ornici nebo do hloubky 40 cm. Tím je také ovlivněna osvojovací schopnost obilovin pro živiny, která je výrazně nižší než u okopanin a bobovitých pícnin (Vaněk et al. 1998).

Příjem živin i jejich konečný odběr sklizní ozimé pšenice je značně závislý na půdních a povětrnostních podmínkách, intenzitě růstu, dosaženém výnosu i pěstované odrůdě (Vaněk et al. 2007). Ve sklizených produktech pšenice odčerpává z půdy poměrně velké množství živin. V zrnu je hlavním exportním prvkem dusík a fosfor. Draslík je soustředěn převážně ve slámě a jeho obsah se může značně měnit podle povětrnostních podmínek ke konci vegetace, proto jeho velká část zůstává na pozemku nebo se vrací v organických hnojivech (Vaněk et al. 1998). Na 1 tunu výnosu zrna z jednoho hektaru je odčerpáváno z půdy okolo 25 kg dusíku, 5 kg fosforu, 20 kg draslíku, 4 kg vápníku, 2,4 kg hořčíku a 4,2 kg síry (Škarpa et al. 2016). Hlavní příjem živin je v období intenzivního růstu (fáze sloupkování) a většinou vrcholí v době květu (Vaněk et al. 2007).

Škarpa et al. (2016) doporučují při předseťové přípravě půdy optimalizovat půdní reakci s následnou úpravou zásoby fosforu, draslíku a hořčíku. Jejich dávka se odvíjí od plánovaného výnosu zrna s korekcí na jejich obsah v půdě a případné množství živin, dodávaných organickými hnojivy nebo posklizňovými zbytky.

3.1.4.1 Hnojení sírou

Hnojení sírou 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 SH2O v půdě a při zohlednění výnosové úrovně ozimé pšenice na stanovišti (Javor et al. 2018)

Obsah vodorozpustné síry (S_{H2O}) (ppm)	**Kategorie obsahu síry (S_{H2O})**	**Potřeba přihnojení sírou (kg/ha)**
0–3,5	extrémě 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 výnos vyšší než 9,5 t/ha)
>20,0	velmi dobrá	nepřihnojovat

Javor et al. (2018) doporučují přihnojení pšenice sírou optimalizovat podle analýz půd na obsah S_{H2O} na základě provedeného odběru vzorků půdy v období počátku sloupkování. Výsledky analýz obsahu S_{H2O} dodané laboratoří doporučují vyhodnotit validovaným nástrojem uvedeným v tabulce 1, stanovujícím kategorii obsahu přijatelné síry – S_{H2O} v půdě a příslušnou korekční dávku síry pro období plného sloupkování až metání (BBCH 31-51).

Podle Černého et al. (2020) jsou pro hnojení ozimé pšenice sírou často využívána dusíkatá hnojiva s obsahem síranu amonného (SA, DASA, SAM), ze kterého jsou sírany v půdě velice dobře pohyblivé. Pro hnojení sírouje vhodné použití těchto hnojiv pro produkční přihnojení. Vzhledem k převažující formě „pomalejšího“ amonného dusíku však tato hnojiva upřednostňujeme pro dřívější termíny (regenerační přihnojení). V některých letech lze nalézt vhodný kompromis pro jejich aplikaci při posouzení vývoje porostu, stavu půdy (zejména obsahu vody a hodnotě pH) a mobilitou jednotlivých forem živin (sírany vs. amonný dusík). V poslední době se však „díky“ suchu tento kompromis hledá stále obtížněji. Ovšem i pro produkční hnojení jsou v sortimentu firem hnojiva se sírou, a to na bázi ledku amonného (např. LAS, Sulfan) nebo močoviny. Velmi vhodná je také společná aplikace LAV s Kieseritem. Pokud nelze využít laboratorních analýz, Javor et al. (2018) doporučují paušální přihnojení výnosných odrůd pšenic realizovat nejdříve na počátku sloupkování v dávce síry alespoň 30 kg/ha.

Síra je aplikována zpravidla do půdy. Může však být aplikována i foliárně. Foliárně aplikovaná síranová forma síry se do listů dostává velmi rychle. Sírany 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 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).

3.1.4.2 Hnojení dusíkem

U ozimé pšenice lze nalézt téměř lineární vztah mezi potřebou dusíku a výnosem (Černý et al. 2020). Na 1 tunu výnosu zrna z jednoho hektaru je odčerpáváno z půdy okolo 25 kg dusíku (Škarpa et al. 2016).

U ozimé pšenice se většinou nevyužívá podzimní hnojení před založením porostu nebo přihnojení po vzejití. Jsou k tomu oprávněné důvody. Především to je malý odběr dusíku, který i u dobře (rovnoměrně) vzešlého, zapojeného a případně odnožujícího porostu nepřesahuje 30 kg N/ha. Pro případné hnojení dusíkem pod pšenici na podzim by měly být objektivní důvody, a to především stanovení obsahu minerálního dusíku v půdě (N_{min}) nebo výpočet záporné bilance dusíku po pěstované předplodině. Regenerační dávka dusíku pro první jarní hnojení by měla vycházet z předpokládaného odběru dusíku v období plného odnožování. Obvykle je to kolem 40–60 kg N/ha, s přihlédnutím k odrůdě, stavu porostu po zimě, půdním vlastnostem a termínu „otevření“ jara. Jako „produkční“ je označováno hnojení na konci odnožování či počátku sloupkování. Kvalitativní přihnojení by mělo být aplikováno v období metání nebo krátce po něm. Pšenice je však v období kolem metání ještě značně „zranitelná“ průběhem počasí (Černý et al. 2020).

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 (Duchoň & 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

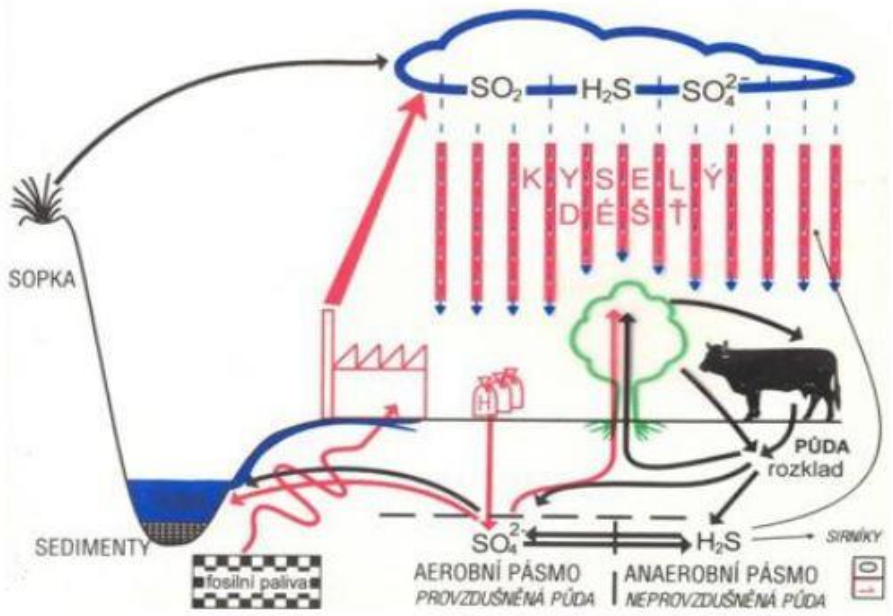
Síra patří mezi prvky s největším výskytem na Zemi. V přírodě se nejčastěji vyskytuje jak v oxidované formě jako sádrovec ($CaSO_4 . 2H_2O$), tak i v redukované formě sulfidů

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 ($24{,}3.10^{18}$ kg) a v hydrosféře ($1{,}3.10^{18}$ kg). V půdě se nachází síry mnohem méně ($2{,}6.10^{14}$ kg) a z toho je přibližně 5 % vázáno v půdní organické hmotě. Množství síry v rostlinách je mnohem nižší a je odhadováno na $7{,}6.10^{11}$ kg. Nejméně síry se nachází v atmosféře ($4{,}8.10^{9}$ 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 kapalné fázi. V plynné fázi může probíhat především přímá či nepřímá fotooxidace, v kapalné 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 (Mengel 2001).

Obvykle je pH dešťové vody 5,6 až 5,7, ale kyselé deště mohou způsobit pokles pH až k 2,0. Množství rozpuštěné síry se během ročních srážek pohybuje v rozmezí 10 kg S/ha v méně industrializovaných oblastech až 100 kg S/ha ve vysoce industrializovaných oblastech (Gowariker et al. 2009).



Obrázek 2: Koloběh síry (Slavíčková 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 České republiky na produkci energie z této suroviny vedla k extrémní produkci oxidu siřičitého. V roce 1980 činily emise SO_2 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).

3.2.3 Síra v půdě

Celkový obsah síry v ornici půd se pohybuje nejčastěji v rozmezí 85–250 ppm. 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 (Scherer 2009).

Množství SO_4^{2-} 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 SO_4^{2-} 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).

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. 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 významá 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).

Síra se z půdy může ztrácet tvorbou těkavé sloučeniny síry jak v aerobních, tak i anaerobních podmínkách. Hlavní sloučeniny vzniklé v procesu volatilizace je sirouhlík, methanthiol, dimethylsulfid a dimethyldisulfid. dimethylsulfidy tvoří více než 55 %

volatilizované síry. Volatilizace síry v půdách s nízkým obsahem organických látek je zanedbatelná, ale zvyšuje se s rostoucím obsahem organické hmoty v půdě. Sirouhlík, methanthiol, dimethylsulfid a dimethyldisulfid jsou také silnými inhibitory nitrifikace (Gowariker et al. 2009).

3.2.3.1 Metody stanovení přístupné síry v půdě

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. Pro kombinovanou extrakci rozpustného a adsorbovaného SO_4^{2-} je doporučeno několik extraktantů: $Ca(H_2PO_4)_2$, $NaHCO_3$ a octan amonný. Dále byly doporučeny roztoky obsahující fosfor ve formě KH_2PO_4 nebo $Ca(H_2PO_4)$. Oba roztoky obsahují dost fosfátů k výměně většiny adsorbované síry a množství adsorbovaného SO_4^{2-} extrahovaného $Ca(H_2PO_4)_2$ se může pohybovat od <1 až do několika tisíc ppm půdy (Kulhánek et al. 2018).

Extrakční postup Mehlich 3 je oficiální analytickou metodou používanou v současné době v rámci systému agrochemického zkoušení zemědělských půd pro stanovení obsahu přístupného P, K, Mg a Ca (Čermák et al. 2017). Podle Matuly (2007) zasahuje Mehlich 3 oproti ostatním testům příliš hluboko do celkové zásoby síry v půdě, uvolňuje i značný podíl nedostupné síry pro rostliny.

3.2.4 Síra v rostlině

Síra hraje důležitou roli v procesu odolnosti rostlin vůči biotickému a abiotickému stresu. Existuje mnoho látek obsahujících síru související s odolností rostlin vůči stresu, včetně glutathionu, proteinů obsahujících S, fytochelatinů a glukosinolátů. Tyto sloučeniny obsahující síru mohou zvýšit odolnost rostlin při různých stresech (Li et al. 2020).

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 roztou 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 m^3 vzduchu způsobuje již poškození rostlin. Vzhledem

k tomu, že k poškození rostlin přispívjí 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 fytosteroly, 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. Sírany 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 ktalyzována enzymem ATPsulfurylázou. APS reaguje s další molekulou ATP za vzniku fosfoadenosinfosfosulfátu (PAPS). Sulfát z APS je přenesen na redukovaný 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 mezifetězcové 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 redukci 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 sirné heterocyklické sloučeniny. Dimethylsulfid a dimethyltrisulfid jsou součástí aroma brukvovitých zelenin, malin, černého rybízu, zelí a česneku (Vaněk et al. 2007).

3.2.4.1 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 vzcházivost, ale i pozdější růst citlivějších rostlin k vyšší koncentraci solí (zejména některé květiny a okrasné rostliny, například primule, kapradiny, asparágusy, 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, snížují 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 SO_2 v 1 m^3 vzduchu působí již poškození pletiv rostlin, zvláště citlivých jehličnatých stromů. Plošné znečištění SO_2 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).

3.2.4.2 Deficit síry

V posledních letech se v důsledku široké aplikace hnojiv bez obsahu síry nebo jen s nízkým obsahem, omezování průmyslových emisí odpadních plynů obsahujících síru a intenzivního zemědělství snížila hladina síry v půdě (Li et al. 2020). Nedostatek síry je obvykle viditelný za podmínek, kdy půda obsahuje méně než 10 ppm vodorozpustné síry (Gowariker et al. 2009).

Příznaky nedostatku síry v pšenici jsou charakterizovány chlorózou nejprve u mladých listů, zatímco starší listy mohou zůstat po nějakou dobu zelené. Nedostatek síry v rostlinách má za následek mnohem větší pokles obsahu chlorofylu a míru asimilace CO_2 u mladých, vyvíjejících se listů než u zralých listů (Zhao et al. 1999). Projev nedostatku síry je podobný jako u dusíku, ovšem počáteční příznaky jsou při nedostatku síry vždy nejprve lokalizovány na vrcholové části rostlin (Vaněk et al. 2007). 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. To, zda nedostatek S také zvýšil remobilizaci organické síry, je méně jasné. (Zhao et al. 1999).

Zatímco Sunarpi & Anderson (1996) pozorovali nízkou remobilizaci nerozpustné síry v listech sóji v reakci na nedostatek této živiny, existovaly důkazy o degradaci a remobilizaci síry obsažené v Rubiscu, hlavním proteinu zelených tkání, v plně vyvinutých listech pšenice a sóji. Síran uložený v mezofylových vakuolách je také relativně nehybný, a tudíž je export tohoto síranu při deficitu síry pomalý. Naproti tomu existují jasné důkazy, že velká část síranu dodávaného z kořenů do stonků přes xylém se nemísí s vakuolárním síranem ve zralých listech. Rychle přechází do floému a znovu se distribuuje do mladých listů a kořenů (Zhao et al. 1999).

Charakteristické pro deficit síry také je, že rostliny špatně rostou, jsou sice vzpřímené, ale velmi slabé a nízké – svým habitem zjevně připomínají strádající rostliny. Nedostatek síry 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 SO_2 v ovzduší (Vaněk et al. 2007).

Nedostatek síry se nejprve projevuje omezením syntézy bílkovin, včetně enzymů (výrazně například nitrátreduktázy). 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 dusík 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 u pšenice ozimé (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 zrnu. Naopak rezistence těsta se zvyšuje s rostoucím poměrem NS (Ryant & Hřivna 2011). Deficit síry způsobuje zřetelně pevnější a méně tažné těsto. Síra přispívá k vyššímu obsahu N-látek v zrnu a vyšší sedimentační hodnotě, která pozitivně koreluje s objemem pečiva. Vztah mezi obsahem síry v zrnu a objemem pečiva je dokonce silnější než s obsahem bílkovin (Zhao et al. 1999).

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.

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

Některé publikace uvádějí, že nedostatek síry snižuje příjem nitrátového dusíku, ale výrazněji se neprojevuje na příjmu amonného dusíku. To je důvodem proč se význam hnojení sírou zvyšuje při hnojení „ledky“ (např. LAV), oproti močovině, která se rozkládá nejdříve na amonnou formou dusíku a později mění na nitráty. Na dobu setrvání amonné formy dusíku v půdě má však významný vliv teplota půdy a případné využití inhibitorů nitrifikace. Pokud je amonná forma dusíku aplikována v hnojivech se síranem amonným (DASA, SA apod.), pak by se mohlo zdát, že se otázka síry „nemusí řešit“. Avšak pozor na její nadbytek (Černý et al. 2018).

3.2.4.3 Interakce mezi metabolismy síry a dusíku v rostlinách

Nedostatek výživy sírou ovlivňuje využití dusíku v rostlinách. Deficit síry inhibuje vychytávání dusičnanů a snižuje aktivitu nitrátreduktázy, což vede k akumulaci dusičnanů a snížení využití dusíku v rostlinách (Prosser et al. 2001). Stres z nedostatku síry vede k poklesu obsahu aminokyselin obsahujících síru a celkovou síru v rostlinách, což může být příčinou ztížené syntézy proteinů a hromadění neproteinových forem dusíku (Hawkesford et al. 2006).

3.2.4.4 Interakce mezi metabolismy síry a uhlíku v rostlinách

Absorpci a metabolismus síry ovlivňuje také metabolismus uhlíku v rostlinách (Jobe et al. 2019). Přítomnost glukosy může zvyšovat expresi sírových přenašečů a zvýšit aktivitu a úroveň transkripce adenosinfosfosulfátreduktázy (Hesse et al. 2003). Za podmínek bez CO_2 jsou inhibovány absorpce a transport síry v rostlině, přičemž aktivita a úroveň transkripce adenosinfosfosulfátreduktázy jsou v rostlinách sníženy (Kopriva et al. 2002).

3.2.4.5 Interakce mezi metabolismy síry a fosforu v rostlinách

Dle studie Allahham et al. (2020) existuje mezi metabolismy síry a fosforu v rostlinách korelace. Sulfolipidy jsou rychle syntetizovány, aby nahradily fosfolipidy za podmínek nedostatku fosforu, a zároveň fosfolipidy mohou také nahradit sulfolipidy za podmínek nedostatku síry (Sugimoto et al. 2007). Transportéry síry a fosforu mají podobné topologické struktury a mechanismy molekulární regulace (Smith et al. 2000). Například absorpce a transport síry a fosforu v rostlinách jsou negativně regulovány cytokininy (Li et al. 2020).

3.2.4.6 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 (Matula 2007). Gowariker et al. (2009) konstatují, že je poměr N/S stejně důležitý jako obsah síry nebo samotného síranu v rostlině. Preferovaný N/S poměr v rostlinách je 10–15/1 a v půdní organické hmotě 7–10/1. Imobilizace síry závisí na obsahu síry v materiálu rozkládajícím se v půdě, a je nejvyšší pro vysoký poměr N/S, Naproti tomu je síra více mineralizována v půdách s nízkými N/S nebo C/S poměry. Pro pšenici ozimou Matula (2007) odvodil kritický poměr N/S 14,1/1. Obecně poměr větší než 20 by měl indikovat deficitní výživu plodiny sírou. Zhao et al. (1999) jako hraniční hodnotu N/S u pšenice ozimé stanovili 17/1. Calvo et al. (2008) zase uvádějí ve své studii jako hraniční hodnotu poměru N/S 16/1 ve fázi sloupkování pšenice. Qian & Schoenau (2007)

odhalili, že nejvyšší výtěžky sušiny byly dosaženy v jejich pokusech tam, kde byly naměřeny poměry dostupného N/S do 13/1 ve fázi sloupkování pšenice. 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.

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).

Podle Blake-Kalff et al. (2000) se kritické hodnoty koncentrací celkové síry v listech 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.

Studie Steinfurth et al. (2012) naznačila, že hnojení sírou snížilo poměry N/S ve všech částech rostlin. Během zrání se poměry N/S snižovaly ve variantě pozdního hnojení sírou, zatímco poměry N/S se zvýšily u nehnojených rostlin a rostlin s nízkým obsahem síry. V zrnech byl poměr N/S pouze mírně ovlivněn hnojením.

3.2.4.7 SNI (Sulphur nutrition index)

Jistým řešením problémů, které se vážou na poměr N/S, může být model tzv. zřeďovací křivky obsahu síry v nadzemní biomase vyjádřený např. pro pšenici autory Reussi et al. (2012). Takový model bere v úvahu jen aktuální hmotnost nadzemní biomasy, na jejímž základě je vyjádřen optimální obsah síry v nadzemní biomase, s nímž je poté porovnáván skutečně naměřený obsah síry (Kulhánek et al. 2018).

Účinnost využití živin je obecně negativně spojena s koncentrací živin v sušině v důsledku ředění živin při vyšších úrovních biomasy. Rostliny vyžadují minimální koncentraci živin na jednotku hmotnosti sušiny, aby maximalizovaly růst, což je známé jako kritická koncentrace živin. Kritické koncentrace živin jsou obvykle odvozeny ze zřeďovacích křivek, které zohledňují alometrické vztahy mezi koncentrací živin a hmotností biomasy plodiny. Vyhodnocení kritické koncentrace živin a dynamiky akumulace pomáhá kvantifikovat potřebu živin rostlin během vegetačního období (De Oliveira Silva et al. 2021). Nutriční index (NI) je jedním z nejrobustnějších nástrojů pro hodnocení nutričního stavu rostlin během sezóny při zvažování ředění živin s rostoucí biomasou rostlin (Sadras & Lemaire 2014).

Nutriční indexy (NNI, PNI a SNI) se často používají k charakterizaci výživného stavu plodin. Hodnoty rovné 1 znamenají, že úroveň výživy plodiny je optimální. Hodnoty nižší

než 1 znamenájí omezení živin a vyšší než 1 znamenají nadbytek živin nebo luxusní spotřebu (De Oliveira Silva et al. 2021).

Kritická koncentrace síry v nadzemní biomase pšenice (Sc) byla vypočítána dle Reussi et al. (2012) následovně:

$$\mathbf{Sc = 0{,}37\ DM^{-0.169}}$$

Kde DM je hmotnost sušiny nadzemní biomasy v t/ha.

Index výživy rostlin sírou se dle Sedláře et al. (2020) počítá jako poměr obsahu síry naměřeného v nadzemní biomase rostlin (Sr) a kritického obsahu síry (Sc).

$$\mathbf{SNI = Sr/Sc}$$

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).

Síran amonný ($(NH_4)_2SO_4$) je ve vodě rozpustná krystalická sůl. Jedná se o dusíkaté hnojivo obsahující asi 21 % dusíku a 24 % síry. Vyskytuje se přirozeně jako minerální maskagnit a nabízí mnoho výhod jako hnojivo, jako je nízká hygroskopičnost, dobré fyzikální vlastnosti, vynikající chemická stabilita, dobrá agronomická účinnost a dlouhá skladovatelnost. Hlavní nevýhody síranu amonného jsou jeho kyselotvorná povaha, nízké procento dusíku a vysoké náklady na balení, skladování a přepravu (Gowariker et al. 2009).

Ostatní dusíkatá hnojiva se sírou – Jejich základ zpravidla tvoří dusičnan amonný, obsahující přídavek 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 je a bílá krystalická sloučenina, středně hygroskopická, k dispozici v krystalické, granulované a semigranulované formě. Obsahuje 48 až 54 % draslíku (jako K_2O) a 17 až 20 % síranu. Plodiny citlivé na chloridy, jako je tabák, hrozny a brambory vyžadují draslík bez chloridových forem. Proto se tyto plodiny přihnojují síranem draselným, i když je dražší než chlorid draselný (Gowariker et al. 2009).

Kieserit obsahuje 14–15 % hořčíku a 18 % síry. Jedná se o velmi dobrý těchto makroprvků. 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 (Matula 2007).

Sirný bentonit je hnojivo na bázi síry, obsahující 90 % elementární síry a 10 % bentonitu. Sirný bentonit se běžně mísí s NPK hnojivy. Když se takové hnojivo aplikuje do půdy, bentonitová část absorbuje vlhkost, což způsobuje rozpad síry na jemnější částice, které se posléze snadno oxidují na sírany. Tento druh hnojiva se aplikuje 4 až 5 měsíců před setím, neboť proces oxidace síry na síran a dostupnost síranu pro rostlinu vyžaduje čas (Gowariker et al. 2009).

Hořká sůl ($MgSO_4 . 7 H_2O$) 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).

Superfosfát se získává úpravou fosfátové horniny s kyselinou sírovou, kyselinou fosforečnou nebo jejich směsí. Superfosfát obsahuje 9 % fosforu a 8–12 % síry (Gowariker et al. 2009).

4 Metodika

V diplomové práci byly využity výsledky z polních provozů odebíraných v letech 2015–2020. Významný vliv na přijatelnost živin a funkci extrakčních činidel půdní reakce, kterou jsme stanovili ve výluhu 0,01 mol/l $CaCl_2$ s hodinovým třepáním dle jednotných pracovních postupů ÚKZÚZ (Zbíral et al. 2016).

4.1 Odběr vzorků z polních provozů

Vzorky půdy a nadzemní biomasy byly odebírány z polních provozních ploch v letech 2015–2020 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 výšku 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 rostlinného materiálu

Rostlinný materiál určený k analýzám byl homogenizován laboratorním střižným mlýnem SM 100 (Retsch, Spolková republika Německo) (obrázek 3).

Obrázek 3: Přístroj Retsch SM 100 (VERKON s.r.o. 2022)

Rostlinný materiál byl mineralizován rozkladem na suché cestě. Obsah živin v rostlinném materiálu byl stanoven optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem na přístroji ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA) (obrázek 4).

Obrázek 4: Přístroj ICP-OES Agilent 720 (SpectraLab Inc.)

Obsah celkového dusíku v nadzemní biomase byl stanoven metodou podle Kjeldahla na přístroji Vapodest 50S (Gerhardt, Spolková republika Německo) (obrázek 5).

Obrázek 5: Přístroj Vapodest 50S (Josef Král)

4.3 Chemické analýzy půd

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.

4.3.1 Stanovení obsahu síry ve vodném výluhu

Výluh byl stanoven dle Kowalenko (2008). K 1 g vzorku jemnozemě (<2 mm) bylo doplněno 10 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 60 minut a následně filtrovány. Ve vzniklých extraktech byl analyzován obsah síry prostřednictvím optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem – ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

4.3.2 Stanovení obsahu síry metodou Mehlich 3

Pro analýzy půd byl použit extrakční roztok Mehlich 3 dle Mehlich (1984), který se skládá z kyseliny octové (0,2 mol/l), kyseliny dusičné (0,013 mol/l), dusičnanu amonného (0,25 mol/l), fluoridu amonného (0,015 mol/l) a kyseliny ethylendiamintetraoctové (0,001 mol/l). Ke 3 g vzorku jemnozemě (<2 mm) bylo doplněno 30 ml extrakčního činidla Mehlich 3. Vzorky byly třepány 10 minut. Získaný roztok byl zfiltrován a ve vzniklých extraktech byl analyzován obsah síry prostřednictvím optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem –ICP-OES Agilent 720 (Agilent Technologies Inc., USA).

4.4 Statistická vyhodnocení

K zpracování a vyhodnocení výsledků byly využity programy Microsoft Excel (Microsoft Corporation) a STATISTICA 12 (StatSoft CR s.r.o.). V těchto programech byly vypočítány popisné charakteristiky, zejména průměry, které můžeme pozorovat v tabulkách 3 a 4. K výsledkům byly použity korelační a regresní analýzy. Čím je regresní koeficient blíže 1,0, tím silnější vztah mezi sledovanými parametry existuje: 0,0 – 0,2 velmi slabý vztah, 0,2 – 0,4 slabý, 0,4 – 0,6 středně silný, 0,6 – 0,8 silný a 0,8 – 1,0 velmi silný vztah. Statisticky významné regresní koeficienty jsou označené podle hladiny významnosti $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ a $p \leq 0,001$, které udávají tzv. interval spolehlivosti 95 %, 99 % a 99,9 %. Tyto intervaly spolehlivosti vyjadřují statistickou jistotu, s jakou bude mezi sledovanými parametry nějaký vztah (Sedlář et al. 2020).

Tabulka 2: Průměrné množství síry v půdě (ppm)

vodný výluh	Mehlich 3
16,2 (n=96)	**22,6** (n=138)

Tabulka 3: Průměrné množství síry a dosíku v nadzemní biomase, poměr N/S v nadzemní biomase a SNI

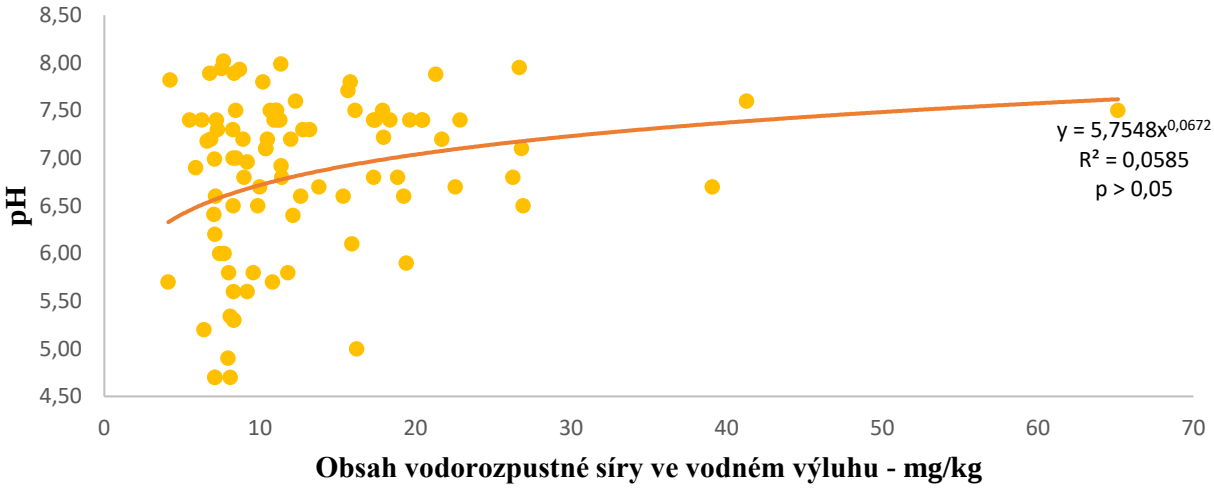
parametr	1. odběr – na počátku sloupkování (BBCH 30–31)	2. odběr – ke konci kvetení (BBCH 65–69)
S v rostlině (ppm)	**2478,4** (n=96)	**1584,9** (n=115)
N v rostlině (%)	**3,50** (n=114)	**1,66** (n=126)
poměr N/S	**16,21** (n=113)	**11,12** (n=114)
SNI	**0,48** (n=40)	**0,43** (n=38)

5 Výsledky

5.1 Korelace půdní reakce (pH) s obsahem síry v půdě

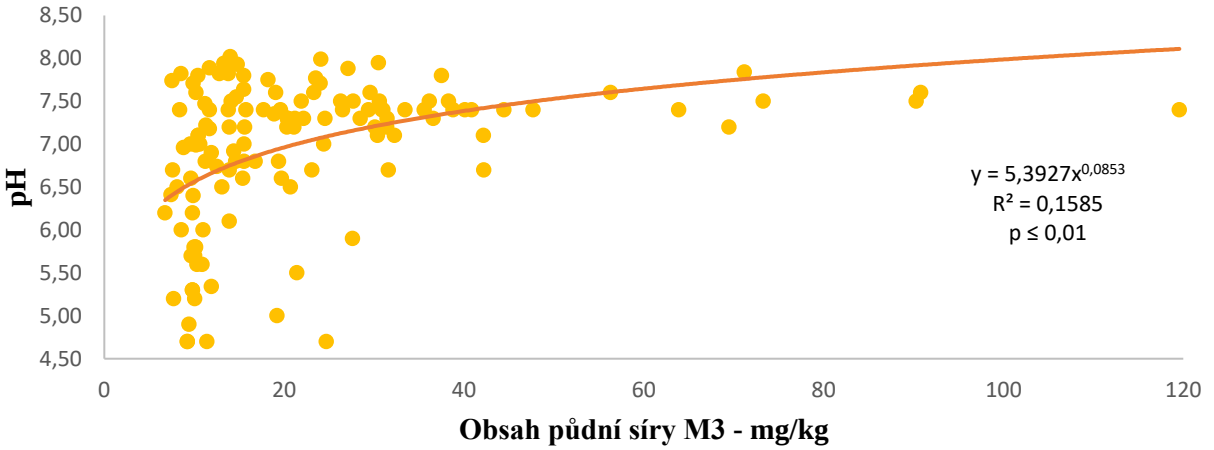
Vztah půdní reakce (pH) s půdní sírou stanovenou vodným výluhem byl zaznamenán v grafu č. 2. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,242 značí slabou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

Graf 2: Korelace pH půdy s obsahem půdní síry vyluhované ve vodě



Vztah půdní reakce (pH) s půdní sírou stanovenou Mehlichem 3 byl pozorován v grafu č. 3. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,398 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

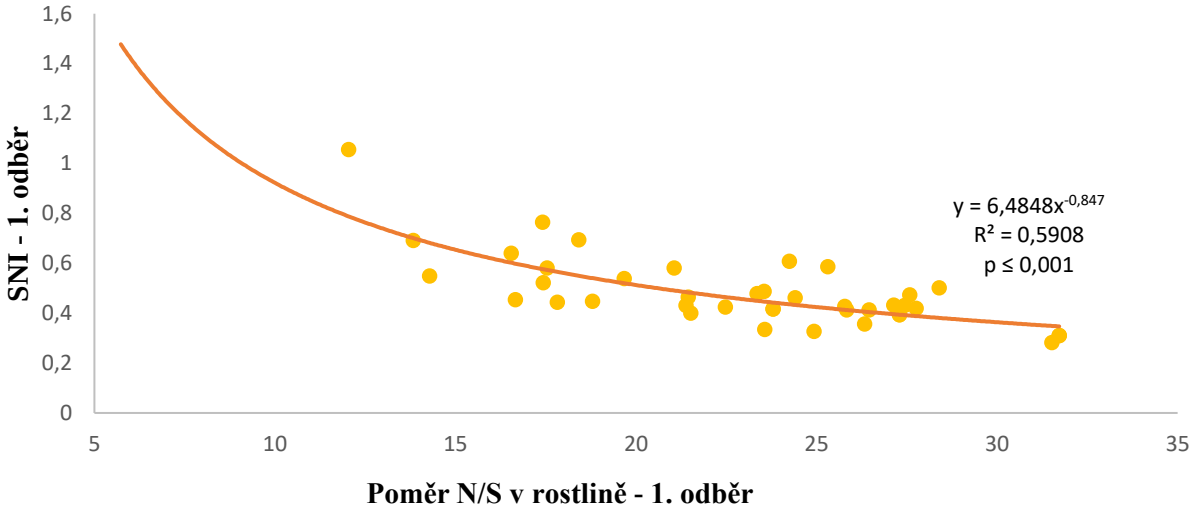
Graf 3: Korelace pH půdy s obsahem půdní síry vyluhované Mehlichem 3



5.2 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s poměrem N/S

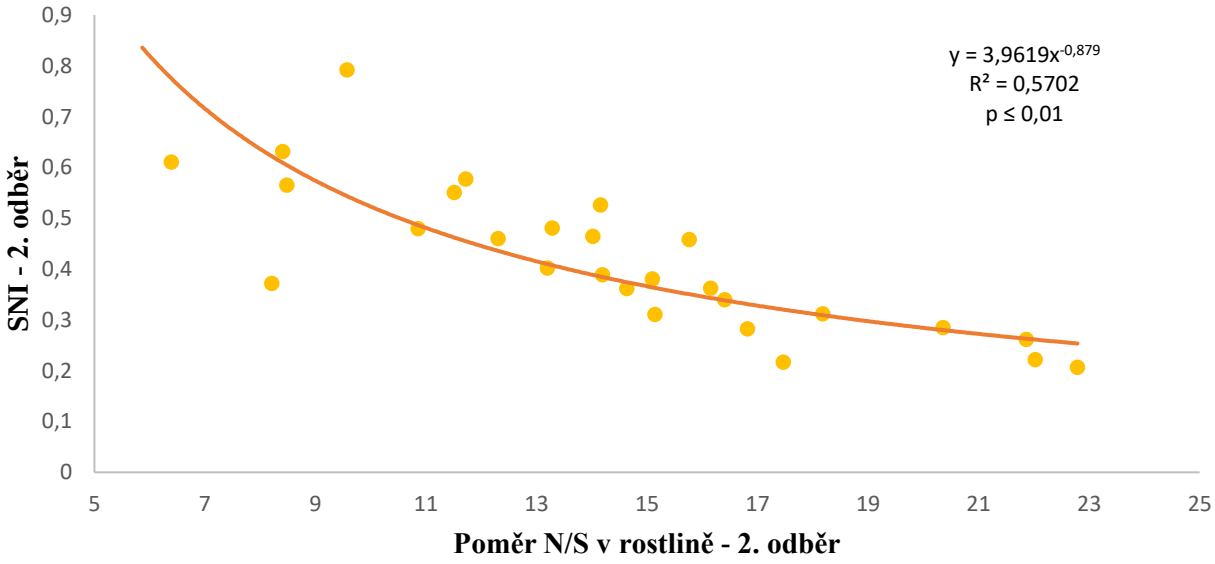
Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s poměrem N/S při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 4. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,769 značí velmi silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

Graf 4: Korelace SNI v ozimé pšenici na počátku sloupkování s poměrem N/S



Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s poměrem N/S při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl zaznamenán v grafu č. 5. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,755 značí silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

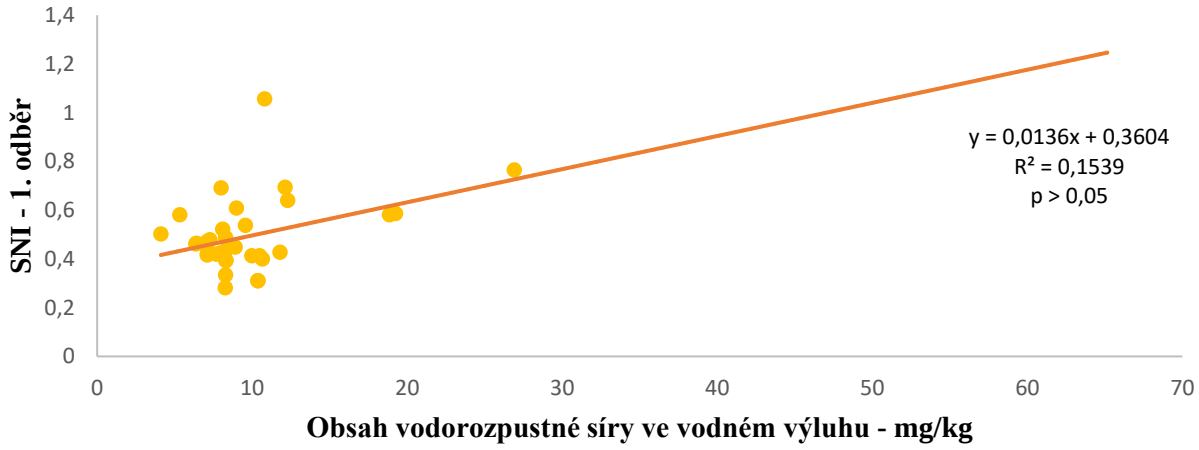
Graf 5: Korelace SNI v ozimé pšenici ke konci kvetení s poměrem N/S



5.3 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s obsahem vodorozpustné síry v půdě

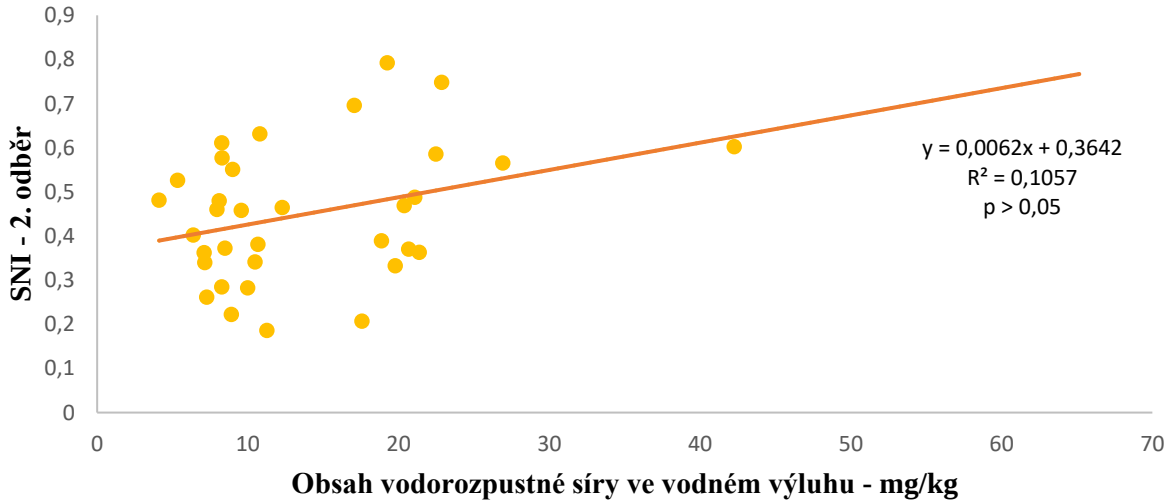
Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 6. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,392 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 6: Korelace SNI v ozimé pšenici na počátku sloupkování s půdní sírou stanovenou vodným výluhem



Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl pozorován v grafu č. 7. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,325 značí slabou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

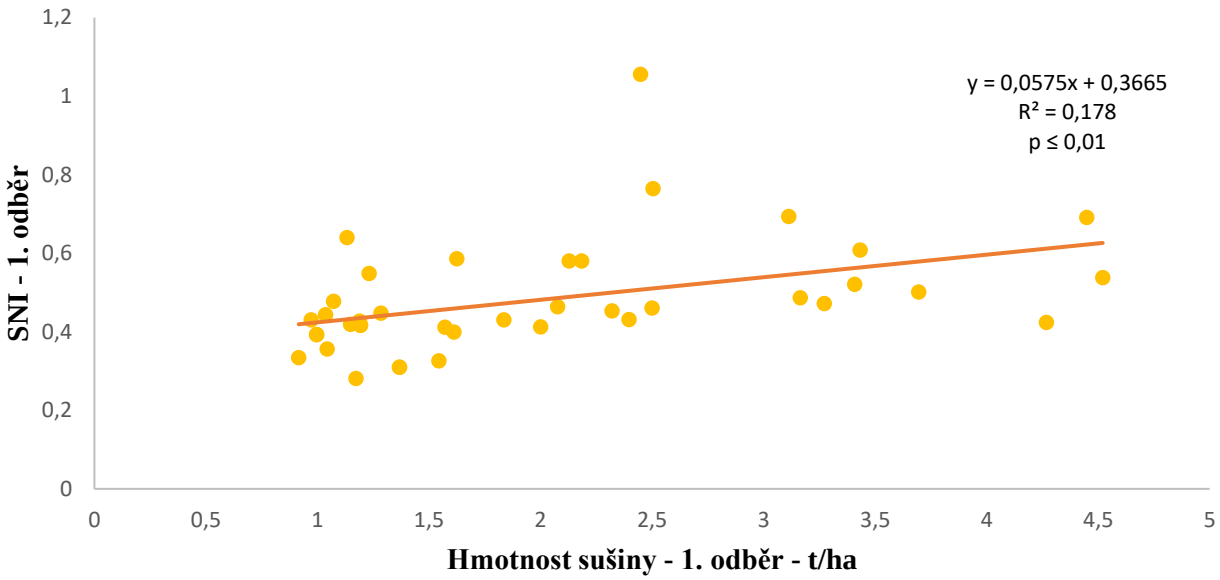
Graf 7: Korelace SNI v ozimé pšenici ke konci kvetení s půdní sírou stanovenou vodným výluhem



5.4 Korelace indexu výživy rostlin sírou (SNI) s hmotností sušiny (t/ha)

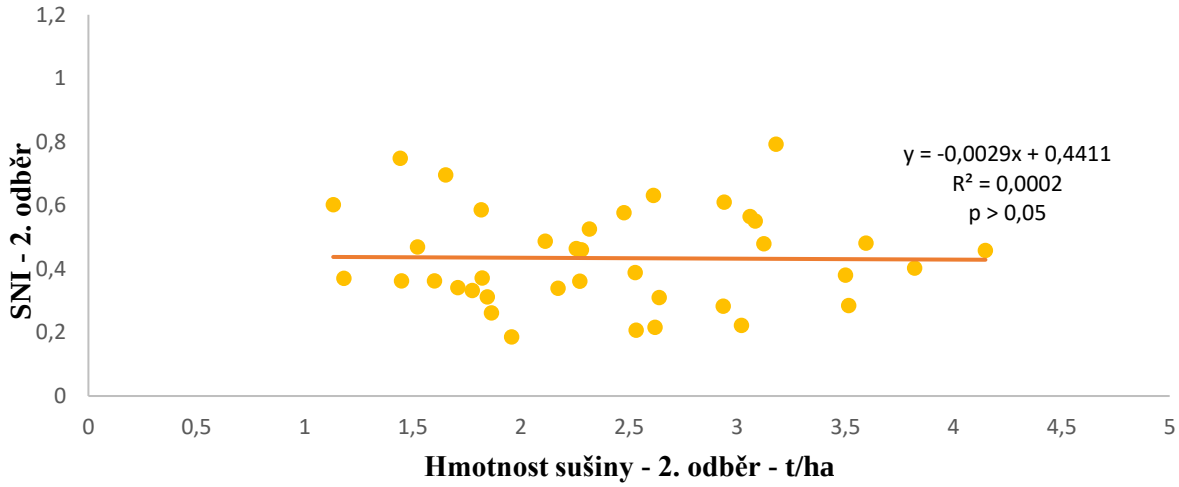
Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s hmotností sušiny (t/ha) při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 8. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,422 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 8: Korelace SNI v ozimé pšenici na počátku sloupkování s hmotností sušiny (t/ha)



Vztah indexu výživy rostlin sírou (SNI) s hmotností sušiny (t/ha) při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl pozorován v grafu č. 9. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu záporné korelace s korelačním koeficientem r = -0,045. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

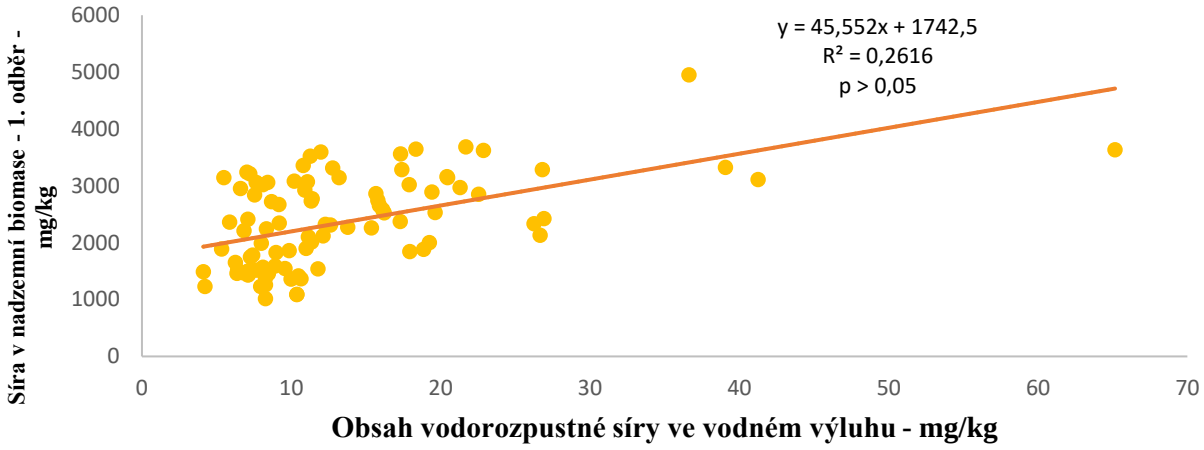
Graf 9: Korelace SNI v ozimé pšenici ke konci kvetení s hmotností sušiny (t/ha)



5.5 Korelace obsahu síry v nadzemní biomase s obsahem vodorozpustné síry v půdě

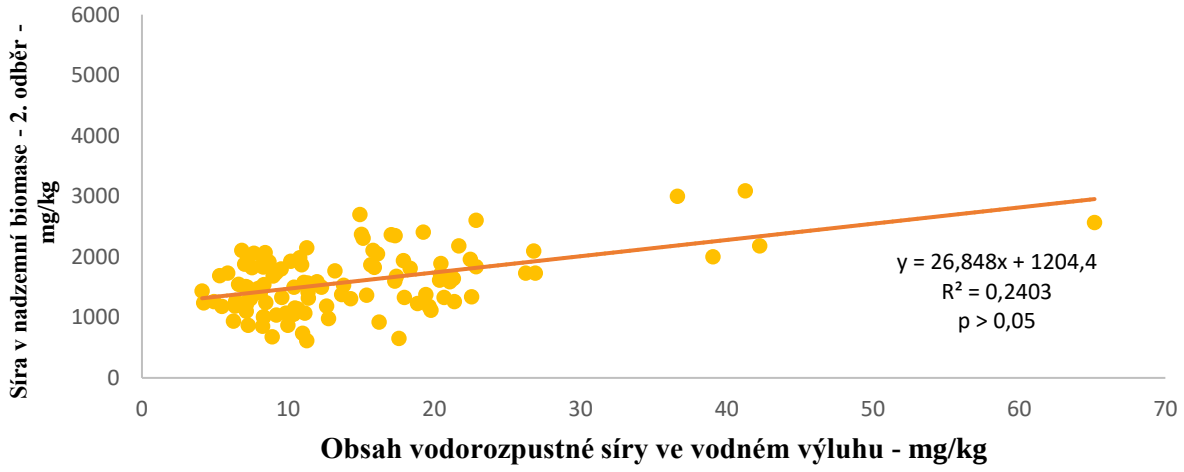
Vztah obsahu síry v rostlině s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 10. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,512 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 10: Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování s obsahem půdní síry vyluhované ve vodě



Vztah obsahu síry v rostlině s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl pozorován v grafu č. 11. Pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,490 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

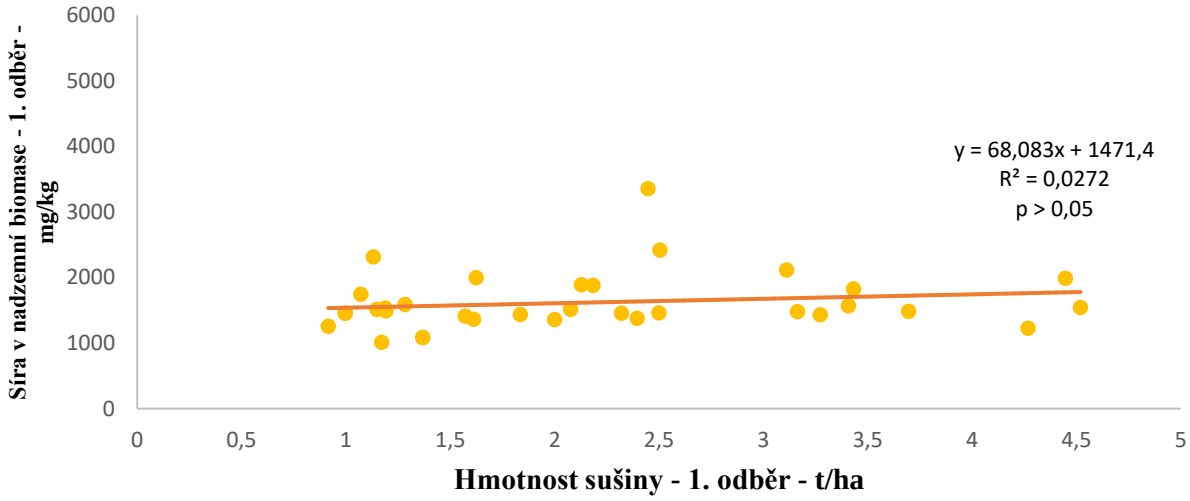
Graf 11: Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice ke konci kvetení a obsahu síry v půdním výluhu



5.6 Korelace obsahu síry v nadzemní biomase s hmotností sušiny

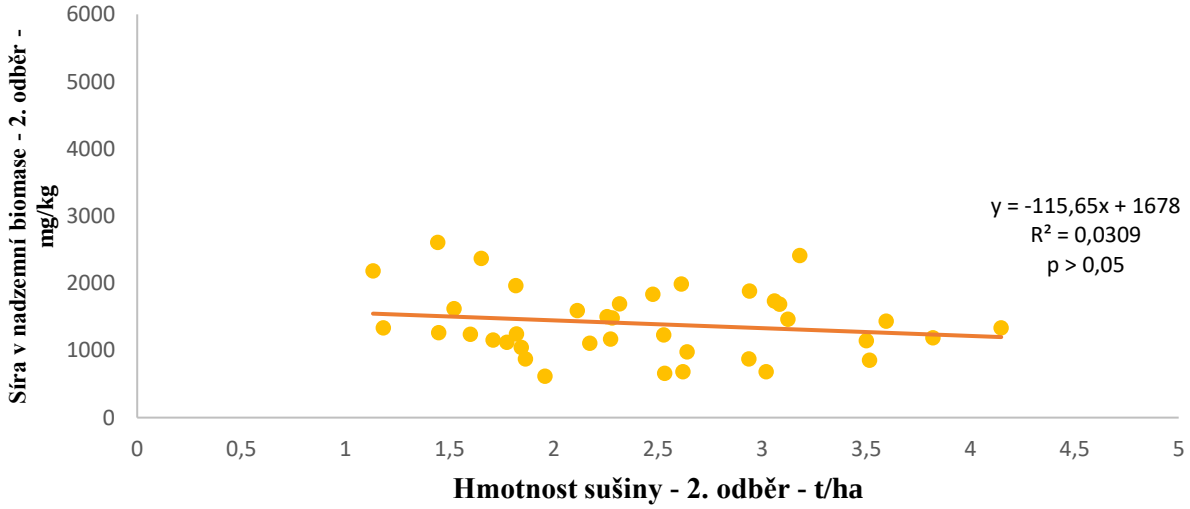
Vztah obsahu síry v nadzemní biomase s hmotností sušiny (t/ha) při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 12. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,165. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 12: Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice na počátku sloupkování s hmotností sušiny



Vztah obsahu síry v nadzemní biomase s hmotností sušiny (t/ha) při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl pozorován v grafu č. 13. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu záporné korelace s korelačním koeficientem r = -0,176. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

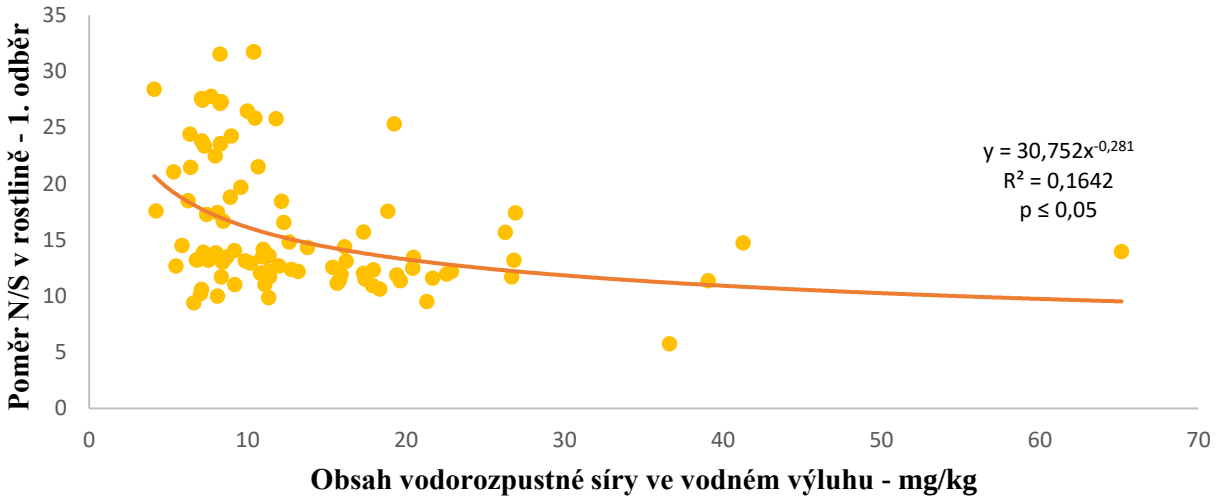
Graf 13: Korelace obsahu síry v nadzemní biomase ozimé pšenice ke konci kvetení s hmotností sušiny



5.7 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s obsahem vodorozpustné síry v půdě

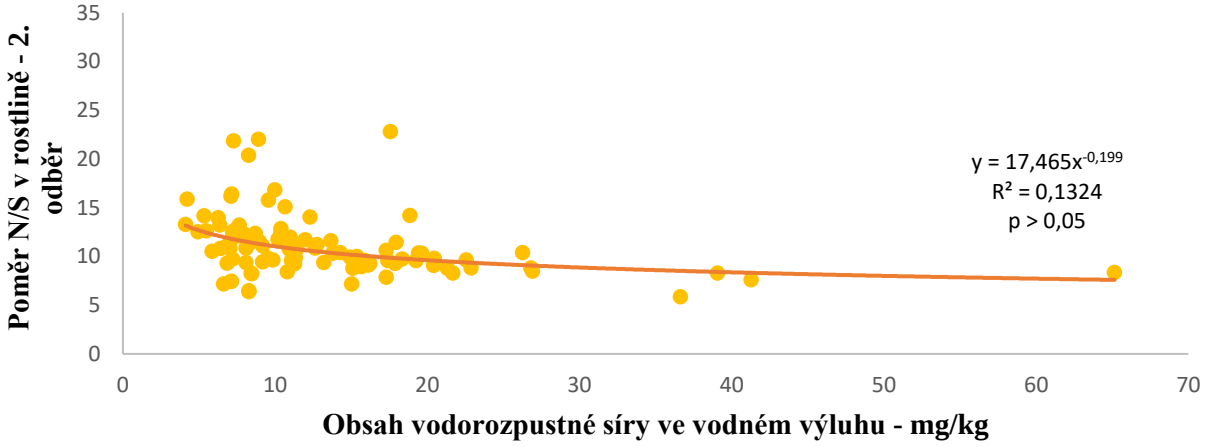
Vztah poměru N/S v rostlině s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 14. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,405 značí středně silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

Graf 14: Korelace poměru N/S v ozimé pšenici na počátku sloupkování s obsahem síry v půdním výluhu



Vztah poměru N/S v rostlině s půdní sírou stanovenou vodným výluhem při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl zaznamenán v grafu č. 15. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,364 značí slabou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

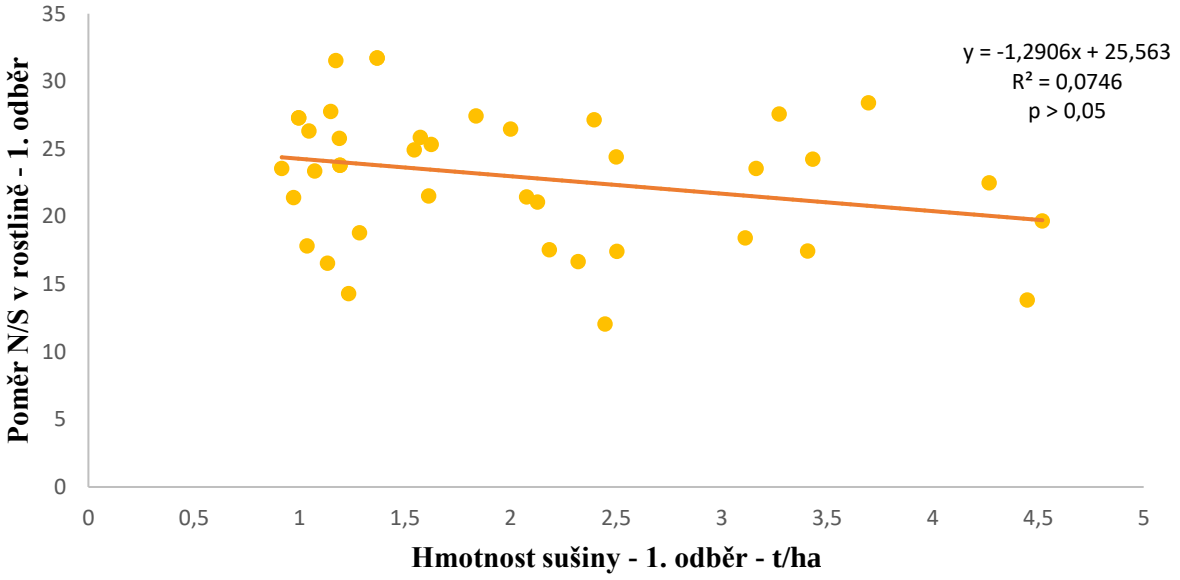
Graf 15: Korelace poměru N/S v ozimé pšenice ke konci kvetení s obsahem síry v půdním výluhu



5.8 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s hmotností sušiny

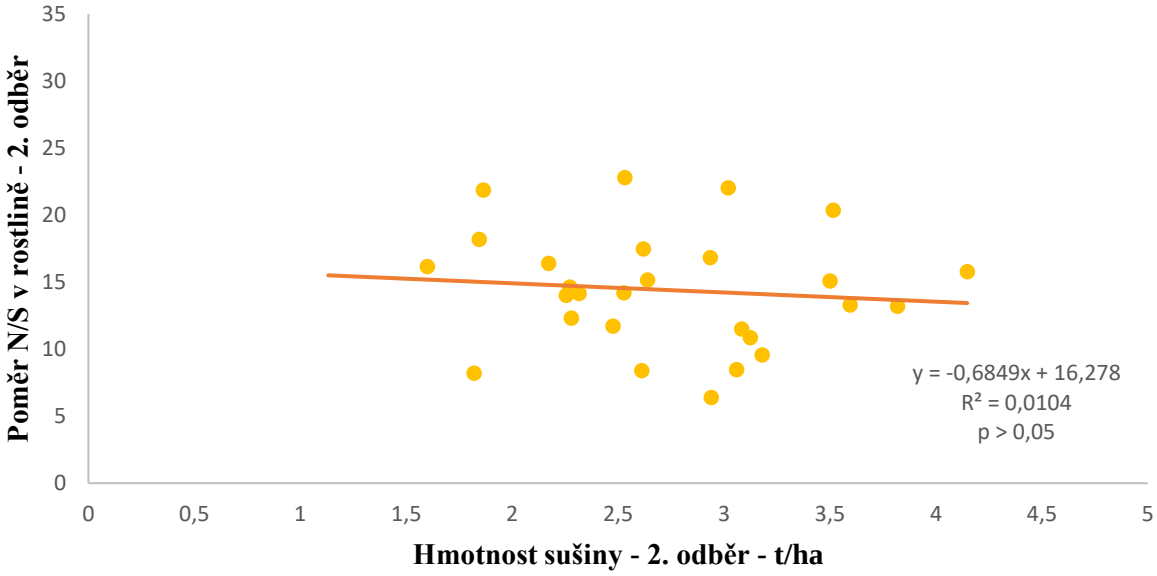
Vztah poměru N/S v rostlině s hmotností sušiny (t/ha) při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 16. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,273 značí slabou korelaci. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 16: Korelace poměru N/S v ozimé pšenici na počátku sloupkování s hmotností sušiny



Vztah poměru N/S v rostlině s hmotností sušiny (t/ha) při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl zaznamenán v grafu č. 17. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu záporné korelace s korelačním koeficientem r = -0,102. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

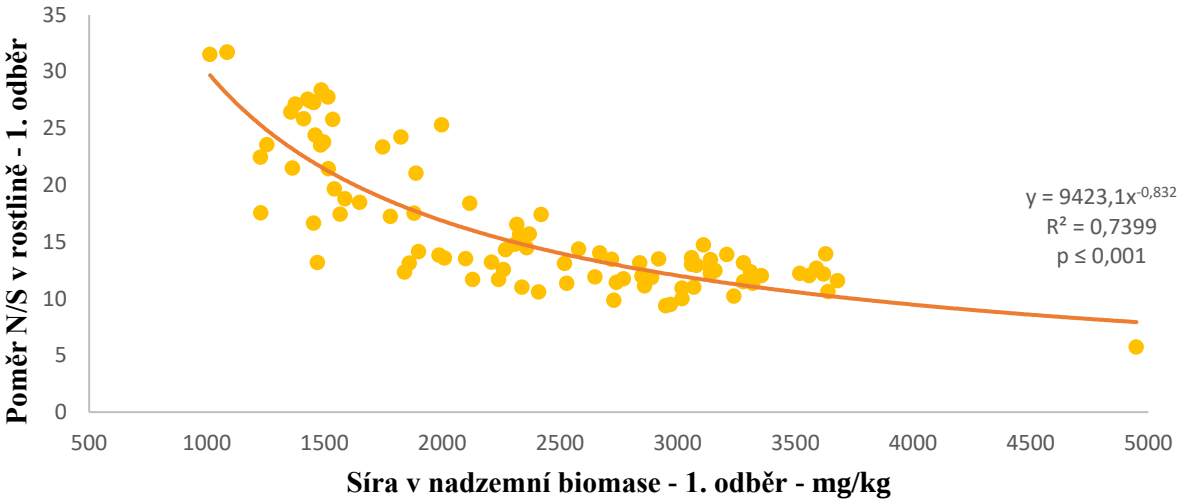
Graf 17: Korelace poměru N/S v ozimé pšenici ke konci kvetení s hmotností sušiny



5.9 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s obsahem síry v nadzemní biomase

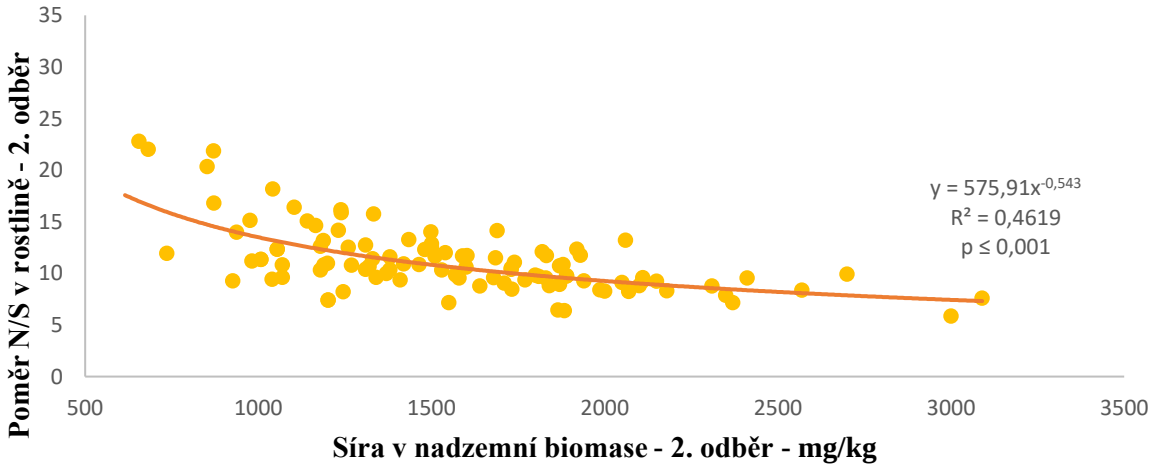
Vztah poměru N/S v rostlině s obsahem síry v nadzemní biomase při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 18. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,860 značí silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

Graf 18: Korelace poměru N/S v ozimé pšenici na počátku sloupkování s obsahem síry v nadzemní biomase



Vztah poměru N/S v rostlině s obsahem síry v nadzemní biomase při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl zaznamenán v grafu č. 19. Záporná korelace s korelačním koeficientem r = -0,680 značí silnou korelaci. Vztah byl vyjádřen mocninnou funkcí.

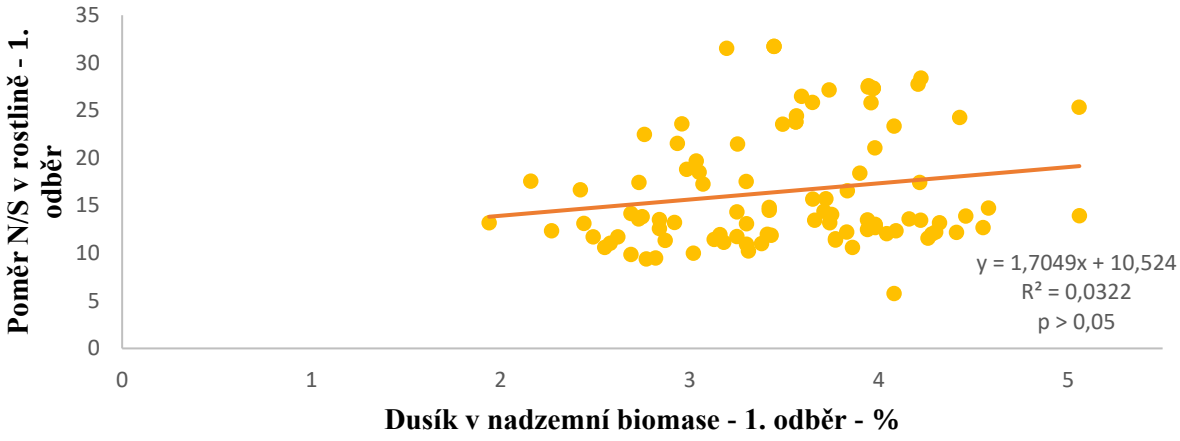
Graf 19: Korelace poměru N/S v ozimé pšenici ke konci kvetení s obsahem síry v nadzemní biomase



5.10 Korelace poměru N/S v nadzemní biomase s obsahem dusíku v nadzemní biomase

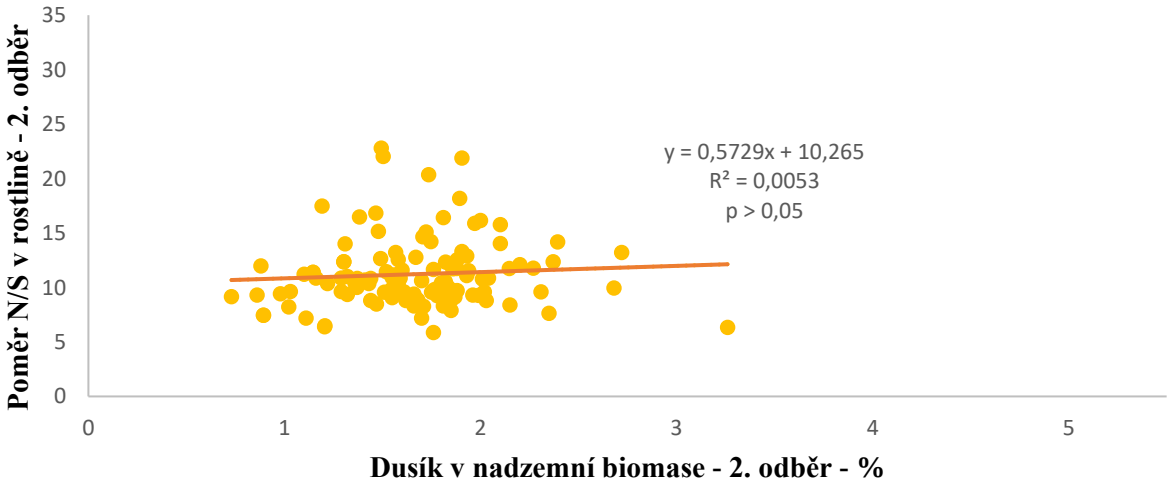
Vztah poměru N/S v rostlině s obsahem dusíku v nadzemní biomase při prvním odběru (na počátku sloupkování (BBCH 30–31)) byl zaznamenán v grafu č. 20. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,179. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 20: Korelace poměru N/S v pšenici ozimé na počátku sloupkování s obsahem dusíku v nadzemní biomase



Vztah poměru N/S v rostlině s obsahem dusíku v nadzemní biomase při druhém odběru (ke konci kvetení (BBCH 65–69)) byl zaznamenán v grafu č. 21. Nebyl nalezen žádný vztah, a to z důvodu pozitivní korelace s korelačním koeficientem r = 0,073. Vztah byl vyjádřen lineární funkcí.

Graf 21: Korelace poměru N/S v pšenici ozimé ke konci kvetení s obsahem dusíku v nadzemní biomase



6 Diskuse

V této diplomové práci byl použit ke srovnání a interpretaci výsledků půdní síry vodný výluh. Podle Matuly (2007) koreluje zejména obsah rostlinám přístupné síry ve vodném výluhu velmi dobře s obsahem síry v rostlinách. Vyluhovadlo Mehlich 3 nebylo využito z důvodu jeho velmi silné extrakční schopnosti, tudíž by se ve výsledcích mohly objevovat i množství síry v půdě, jenž není rostlina schopna ze značné části využít. Metoda aniontovýměnných membrán nebyla použita z důvodu jejího slabého vztahu s obsahem síry v nadzemní biomase. Tento vztah byl pozorován v mé bakalářské práci (Král 2020).

Model zřeďovací křivky podle Reussi et al. (2012) je relevantní pouze pro hmotnost nadzemní biomasy vyšší než 1,0 t/ha, což je problém pro určení stavu síry v prvotních růstových fázích. Navíc Reussi et al. (2012) ve své studii z Argentiny konstatují, že model zřeďovací křivky je relevantní jen po fázi sloupkování. V této práci nebyl problém v hmotnostech nadzemní biomasy, jelikož 100 % vzorků vážilo více než 1 t/ha. Co se týče indexu výživy rostlin sírou, při odběru ve fázi sloupkování se pohybovaly hodnoty v rozmezí 0,28–1,05 a průměrná hodnota činila SNI 0,48. Tato hodnota se může jevit jako nízká, neboť například výsledky studie Sedláře et al. (2019) vykazovaly ideální hodnotu indexu výživy rostlin sírou ve fázi sloupkování získanou dosazením do rovnice 0,73. Rostliny se podle těchto výsledků mohou tedy jevit jako mírně deficitní na síru. Ve fázi kvetení se pohybovaly hodnoty SNI v rozmezí 0,19–0,79 a průměrná hodnota činila 0,43. Ve studii De Oliveira Silva et al. (2021) vycházela hodnota SNI ve fázi kvetení 0,47 na nehnojených stanovištích a 0,66 na hnojených stanovištích sírou. Přestože hodnoty ze studie De Oliveira Silva et al. (2021) byly nižší než jedna, nepozorovali žádný vizuální nedostatek živin a všechny vzorky rostlin rostly na vysoce úrodných půdách ve státě Kansas v USA.

Vztah mezi SNI a poměrem N/S byl sledován v grafech 4 a 5. Tyto korelace vykazovaly silné pouto, ve fázi sloupkování se jednalo o korelační koeficient r = -0,769, tedy silná korelace (při $p \leq 0,001$). Qian & Schoenau (2007) odhalili, že nejvyšší výnosy zrna pšenice byly dosaženy tam, kde byly naměřeny poměry N/S do 13:1 ve fázi sloupkování. Dosazením tohoto poměru N/S za x do rovnice ($y = 6,4848 \times x^{-0,847}$), jež vycházela ze vztahu SNI s poměrem N/S ve fázi sloupkování, dostáváme ideální hodnotu SNI 0,74. Ve fázi kvetení už tento model podle Reussi et al. (2012) není tolik průkazný, ale podle našich výsledků byla síla korelace SNI s poměrem N/S i ve fázi kvetení vysoká, a to r = -0,755 (při $p \leq 0,01$). Steinfurth et al. (2012) ve své studii udává poměr N/S 11:1 ve fázi konce kvetení až mléčné zralosti, a to při vyváženém hnojení dusíkem a sírou. Dosazením tohoto poměru N/S za x do rovnice ($y = 3,9619 \times x^{-0,879}$), jež vycházela ze vztahu SNI s poměrem N/S ve fázi kvetení, dostáváme ideální hodnotu SNI 0,48. Průměr hodnot SNI ve fázi kvetení u vzorků této práce činil 0,43.

Obsah síry v nadzemní biomase je další způsob určení výživného stavu rostlin sírou. Mengel (2001) uvádí, že obsah síry v rostlinách se pohybuje v rozmezí 0,1–0,5 %, což odpovídá 1000–5000 ppm síry v sušině. Camberato & Casteel (2017) uvádí, že optimální obsah síry v nadzemní biomase pšenice ozimé činí 0,2–0,3 %, což odpovídá 2000–3000 ppm. V této práci vycházely obsahy síry v době sloupkování v rozmezí 1013–4950 ppm a průměrný obsah síry činil 2351 ppm. Podle Matuly (2007) je kritická hodnota obsahu síry v nadzemní biomase pšenice ozimé v době sloupkování 1900 ppm. Obsahy síry se v době kvetení pohybovaly v rozmezí 615–3090 ppm a průměrný obsah síry dosáhl hodnoty 1568 ppm. Matula (2007) uvádí jako kritickou hranici obsahu síry v nadzemní biomase pšenice ozimé ve fázi kvetení 1500 ppm.

Jelikož je v této práci použit jako extraktant půdní síry vodný výluh, můžeme podle rovnic z grafů 10 a 11 vyvodit kritické hodnoty síry vyluhované z půdy. Vztah síry v rostlině se sírou v půdě vykazoval středně silné korelace. Ve fázi sloupkování se jednalo o korelační koeficient r = 0,512, tedy středně silná korelace. Dosazením kritické hodnoty obsahu síry v nadzemní biomase ve fázi sloupkování za y do rovnice (y = 45,552x + 1742,5), tedy podle Matuly (2007) 1900 ppm, dostáváme optimální hodnotu síry vyluhované vodou 3,46 ppm. Ve fázi kvetení se jednalo o korelační koeficient r = 0,490, tedy opět středně silnou korelaci. Dosazením kritické hodnoty obsahu síry v nadzemní biomase ve fázi kvetení za y do rovnice (y = 26,848x + 1204,4), tedy podle Matuly (2007) 1500 ppm, dostáváme optimální hodnotu síry vyluhované vodou 11,01 ppm. Průměrný obsah síry vyextrahovaný z vodného výluhu dosahoval v této práci hodnoty 16,2 ppm. Škarpa et al. (2016) považují hodnoty obsahu síry v půdě do 8 ppm stanovené vodným výluhem za nízké. Černý et al (2018) konstatují, že při použití vodného výluhu je obecně stanoveno, že malý obsah přístupné síry je pod 10 mg S_{H2O}/kg půdy.

6.1 Srovnání půdní síry vyluhované vodným výluhem s indexem výživy rostlin sírou (SNI), poměrem N/S a obsahem síry v nadzemní biomase

Matula (2007) ve své metodice vyzdvihuje vodný výluh jako metodu, která extrahuje síru přístupnou rostlinám a která koreluje velmi dobře s obsahem síry v rostlinách. V této práci korelovala S_{H2O} nejlépe s obsahy síry v rostlině, a to v obou odběrech, tedy ve fázi sloupkování (r = 0,512) a ve fázi kvetení (r = 0,490). S_{H2O} korelovala slaběji se SNI i s poměrem N/S. S poměrem N/S korelovala S_{H2O} ve fázi sloupkování středně (r = -0,405) a ve fázi kvetení slabě (r = 0,364). S indexem výživy rostlin sírou korelovala S_{H2O} ve fázi sloupkování slabě (r = 0,392) a ve fázi kvetení opět slabě (r = 0,325).

6.2 Srovnání hmotnosti sušiny s indexem výživy rostlin sírou (SNI), poměrem N/S v nadzemní biomase a obsahem síry v nadzemní biomase

V této práci korelovala hmotnost sušiny nejtěsněji s indexem výživy rostlin sírou, a to ve fázi sloupkování ($r = 0,422$) při $p \leq 0,01$. Ve fázi kvetení ale dosahovala korelace velmi slabých hodnot ($r = -0,045$). Hmotnost sušiny korelovala slaběji s obsahem síry v nadzemní biomase i s poměrem N/S. S poměrem N/S korelovala hmotnost sušiny ve fázi sloupkování slabě ($r = - 0,273$) a ve fázi kvetení velmi slabě ($r = -0,102$). S obsahem síry v nadzemní biomase korelovala hmotnost sušiny ve fázi sloupkování velmi slabě ($r = 0,165$) a ve fázi kvetení opět velmi slabě ($r = -0,176$) a navíc i se záporným korelačním koeficientem.

6.3 Srovnání poměru N/S v nadzemní biomase s obsahem síry a dusíku v nadzemní biomase

Podle Steinfurth et al. (2012) způsobuje hnojení sírou snížení poměru N/S ve všech částech rostlin. V této práci koreloval poměr N/S silněji s obsahem síry v nadzemní biomase než s obsahem dusíku v nadzemní biomase. Se sírou v nadzemní biomase koreloval poměr N/S ve fázi sloupkování velmi silně ($r = -0,860$), navíc $p \leq 0,001$ dokazuje, že je tento vztah statisticky velmi významný. Ve fázi kvetení korelovala síra v rostlině s N/S silně ($r = -0,680$). Opět $p \leq 0,001$ dokazuje, že je tento vztah statisticky velmi významný. S dusíkem v nadzemní biomase koreloval poměr N/S ve fázi sloupkování velmi slabě ($r = 0,179$) při $p > 0,05$ a ve fázi kvetení opět velmi slabě ($r = 0,073$) při $p > 0,05$.

7 Závěr

- Nebyla dostatečně potvrzena hypotéza o tom, že je vyjádření výživného stavu ozimé pšenice pomocí zřeďovací křivky v těsnějším vztahu s vodorozpustnou půdní sírou než poměr N/S v nadzemní biomase a obsah síry v nadzemní biomase. Nejtěsnější vztah s přijatelnou půdní sírou vykazoval obsah síry v nadzemní biomase, a to v obou odběrech, tedy ve fázi sloupkování ($r = 0,512$) a ve fázi kvetení ($r = 0,490$).

- Byla potvrzena hypotéza o tom, že je vyjádření výživného stavu ozimé pšenice pomocí zřeďovací křivky v těsnějším vztahu s hmotností nadzemní biomasy než poměr N/S v nadzemní biomase a obsah síry v nadzemní biomase, tedy ve fázi sloupkování (BBCH 30–31), a to při korelačním koeficientu $r = 0,422$ (při $p \leq 0,01$).

- Nebyla potvrzena hypotéza o tom, že poměr N/S v nadzemní biomase ozimé pšenice koreluje silněji s obsahem dusíku v nadzemní biomase než se sírou. Se sírou v nadzemní biomase koreloval poměr N/S v nadzemní biomase ve fázi sloupkování velmi silně ($r = -0,860$), navíc $p \leq 0,001$ dokazuje, že je tento vztah statisticky velmi významný. Ve fázi kvetení korelovala síra v rostlině s N/S v nadzemní biomase silně ($r = - 0,680$), opět při $p \leq 0,001$. Zatímco s obsahem dusíku koreloval poměr N/S v nadzemní biomase slabě ve fázi sloupkování i ve fázi kvetení.

- Významným výsledkem z polních provozů této práce je, že podle obsahu síry v nadzemní biomase nebylo 64,5 % odběrů pšenice deficitní na síru ve fázi sloupkování (>1900 ppm) a průměrný obsah síry dosáhl hodnoty 2351 ppm. Ve fázi kvetení (>1500) nebylo deficitní na síru 51,2 % vzorků pšenice ozimé a průměrný obsah síry dosáhl hodnoty 1568 ppm. Podle indexu výživy rostlin sírou bylo 95 % vzorků pod kritickou hranicí (<0,73) ve fázi sloupkování a 92 % ve fázi kvetení (<0,66). Průměrné indexy byly ve fázi sloupkování 0,48 a ve fázi kvetení 0,43.

- Dalším významným poznatkem je úzká závislost mezi indexem výživy rostlin sírou a poměrem N/S. Ve fázi sloupkování (BBCH 30–31) se jednalo o korelační koeficient $r = -0,769$, tedy silná korelace (při $p \leq 0,001$) a ve fázi kvetení dosahoval korelační koeficient výše $r = -0,755$ (při $p \leq 0,01$).

- Je lepším indikátorem výživného stavu rostlin sírou obsah síry v rostlině, poměr N:S nebo SNI? Vzhledem k výše uvedeným výsledkům z polních provozů vycházely silnější korelace u obsahu síry v nadzemní biomase se sírou extrahovanou vodným výluhem. Co se týče korelací s hmotnostmi sušiny, nejlépe vycházela korelace s indexem výživy rostlin sírou, a to pouze ve fázi sloupkování. Může to být důkaz tvrzení ze studie Reussi et al. (2012), že relevantní výsledky jsou zaručeny pouze po fázi sloupkování. Ostatní korelace s hmotností sušiny jsou v našich polních provozech neprůkazné.

8 Literatura

ALLAHHAM, Alaa, Satomi KANNO, Liu ZHANG a Akiko MARUYAMA-NAKASHITA. Sulfur Deficiency Increases Phosphate Accumulation, Uptake, and Transport in Arabidopsis thaliana. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, **21**(8), 2971.

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), 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**, 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), 1612–1623.

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

ČERMÁK, Pavel, Gabriela MÜHLBACHOVÁ, Martin KÁŠ, Radek VAVERA a Miroslava PECHOVÁ. *Metodický postup pro stanovení obsahu mikroelementů metodou Mehlich 3 a návrh hodnocení kritérií jejich obsahu v zemědělských půdách: certifikovaná metodika pro praxi*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby v Ruzyni, 2017. ISBN 978-80-7427-266-0.

ČERNÝ, Jindřich, Martin KULHÁNEK, Ondřej SEDLÁŘ, Jiří BALÍK, Tomáš JAVOR a Pavel SURAN. Vhodná dávka síry a termín aplikace při jarním hnojení ozimé pšenice. *Agromanuál*. 2020, **15**(4), 74–77.

ČERNÝ, Jindřich, Ondřej SEDLÁŘ, Martin KULHÁNEK, Jiří BALÍK a David ŠILER. Hnojení ozimé pšenice dusíkem podle vývoje porostu a vědeckých poznatků. *Agromanuál*. 2020, **15**(3), 94–98.

ČERNÝ, Jindřich, Ondřej SEDLÁŘ, Martin KULHÁNEK, Tomáš JAVOR a Jiří BALÍK. Nevyzpytatelné hnojení sírou u jarního ječmene. *Agromanuál*. 2018, **13**(3), 81–84.

Český statistický úřad [online]. [cit. 2022-02-26]. 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. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2020

DE OLIVEIRA SILVA, Amanda, Brent R. JAENISCH, Ignacio A. CIAMPITTI, Romulo P. LOLLATO. Wheat nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake dynamics under different management practices. *Agronomy Journal.* 2021, **113**(3), 2752–2769.

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), 1371–1377.

FILGASOVÁ, Anežka. Situace na trhu obilovin ve světě a v Evropě v roce 2021/2022. *Úroda.* Praha: ProfiPress. 2022, **70**(2), 36–38

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

GOWARIKER, Vasant, V.N. KRISHNAMURTHY, Sudha GOWARIKER, Manik DHANORKAR a Kalyani PARANJAPE. *The Fertilizer Encyklopedia*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

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**, 31–34.

HAWKESFORD, Malcolm J. a Luit J. DE KOK. Managing sulphur metabolism in plants. *Plant Cell Environ.* 2006, **29**(3), 382–395.

HESSE, Holger, Nadine TRACHSEL, Marianne SUTER, Stanislav KOPRIVA, Peter von BALLMOOS, Heinz RENNENBERG a Christian BRUNOLD. Effect of glucose on assimilatory sulphate reduction in Arabidopsis thaliana roots. *Journal of Experimental Botany.* 2003, **54**(388), 1701–1709.

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), 22–28.

JOBE, Timothy O., Ivan ZENZEN, Parisa RAHIMZADEH KARVANSARA a Stanislav KOPRIVA. Integration of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in

transition from C3 to C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 2019, **70**(16), 4211–4221.

KOPRIVA, Stanislav, Marianne SUTER, Peter von BALLMOOS, Holger HESSE, Urs KRÄHENBÜHL, Heinz RENNENBERG a Christian BRUNOLD. Interaction of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in Lemna minor. *Plant Physiology*. 2002, **130**(3), 1406–1413.

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

KRÁL, Josef. *Využití aniontovýměnných membrán ke stanovení přijatelného obsahu síry pro pšenici pěstovanou v nealkalických půdách*. Praha, 2020. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.

KŘEN, Jan, Lubomír NEUDERT, Blanka PROCHÁZKOVÁ a Vladimír SMUTNÝ. *Obecná produkce rostlinná – 1. část*. Brno: Mendelova univerzita, 2015. ISBN 978-80-7509-325-7

KULHÁNEK, Martin, Jiří BALÍK, Ondřej SEDLÁŘ, Jiří ZBÍRAL, Michaela SMATANOVÁ a Pavel SURAN. *Stanovení přístupné síry v půdě metodou Mehlich 3*. Praha: 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.

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

LI, Qian, Yan GAO a An YANG. Sulfur Homeostasis in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, **21**(23), 8926.

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), 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**, 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), 173–206.

OSEV jih s.r.o. Přehled výsevků [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.osevjih.cz/prehled-vysevku/

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

PROSSER, Ian M., Judith V. PURVES, Leslie R. SAKER a David T. CLARKSON. Rapid disruption of nitrogen metabolism and nitrate transport in spinach plants deprived of sulphate. *Journal of Experimental Botany*. 2001, **52**(354), 113–121.

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), 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), 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, 40–45. ISBN 978-80-213-2224-0

SADRAS, Víctor Oscar a Gilles LEMAIRE. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research.* 2014, **164**, 54–64.

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

SLAVÍČKOVÁ, Kateřina. *Živá a neživá příroda II Koloběh látek v přírodě* [online]. 2010 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/3814341/

SEDLÁŘ, Ondřej, Jiří BALÍK, Martin KULHÁNEK, Pavel SURAN a Martina MATĚCHOVÁ. *Inovace diagnostiky výživného stavu plodin fosforem a sírou: certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2020. ISBN 978-80-213-3033-7.

SMITH, Frank W., Anne L. RAE a Malcolm J. HAWKESFORD. Molecular mechanisms of phosphate and sulphate transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2000, **1465**(1–2), 236–245.

SPECTRALAB Scientific Incorporation [online]. [cit. 2022-04-08] Dostupné z: https://spectralabsci.com/equipment/varian-720-es-icp-oes-with-asx-520-autosampler/

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.

SUGIMOTO, Koichi, Norihiro SATO a Mikio TSUZUKI. Utilization of a chloroplast membrane sulfolipid as a major internal sulfur source for protein synthesis in the early phase of sulfur starvation in *Chlamydomonas reinhardtii*. *FEBS Letters*. 2007, **581**(23), 4519–4522.

SUNARPI a John W. ANDERSON. Effect of Sulfur Nutrition on the Redistribution of Sulfur in Vegetative Soybean Plants. *Plant Physiology*. 1996, **112**(2), 623–631.

ŠKARPA, Petr, Pavel RYANT a Jiří ANTOŠOVSKÝ. Základní hnojení pšenice ozimé. *Agromanuál*. 2016, **11**(8), 58–60.

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

TAUFEROVÁ, Alexandra, Michaela PETRÁŠOVÁ, Jana POKORNÁ, Bohuslava TREMLOVÁ a Pavel BARTL. *Rostlinná produkce.* Brno: Fakulta veterinární hygieny a ekologie, VFU, 2014. ISBN 978-80-7305-717-6

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, 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

VANĚK, Václav, Jiří BALÍK, Radek NĚMEČEK, Daniela PAVLÍKOVÁ a Pavel TLUSTOŠ. *Výživa a hnojení polních plodin, ovoce a zeleniny*. Praha: Farmář-Zemědělské listy, 1998. ISBN 80-902413-1-X

VERKON s.r.o. [online]. [cit. 2022-03-02] Dostupné z: https://www.verkon.cz/mlyn-strizny-retsch-sm-100/

WANG, Xiaolong, Rudi APPELS, Xiaoke ZHANG, Ferenc BEKES, Dean DIEPEVEEN, Wujun MA, Xinzhong HU a Shahidul ISLAM. Solubility variation of wheat dough proteins: A practical way to track protein behaviors in dough processing. *Food Chemistry*, 2020, **312**.

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.* 1999, **30**(1), 1–17.

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