

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Hnojení pšenice ozimé dusíkatým hnojivem se sírou ve
formě CaSO_4**

Diplomová práce

Autor práce: Helena Janoušková

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulhánek, PhD.

© 2017 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Hnojení pšenice ozimé dusíkatým hnojivem sírou ve formě CaSO_4 " jsem vypracovala 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 13. dubna 2017

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Martinu Kulhánkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování mé diplomové práce.

Hnojení pšenice ozimé dusíkatým hnojivem se sírou ve formě CaSO_4

Souhrn

Diplomová práce se zabývá výživou vyšších rostlin sírou. Zejména z ekologických důvodů (odsíření uhelných elektráren a tepláren), ale také vzhledem k tomu, že se stále více pěstují plodiny náročné na síru a používá se méně hnojiva s balastní sírou, jako je jednoduchý superfosfát, je vstup síry dříve zapříčiněný depozicemi plynných sloučenin síry do půdy a na vegetaci znatelně menší. Stále častěji se mnoha regionech setkáváme s nedostatečným obsahem minerální síry v půdě. Nedostatek síry v půdách se stává hlavním problémem ve výživě rostlin v zemědělství severní části Evropy. Proto se věnuje stále větší pozornost významu tohoto prvku ve výživě rostlin.

Teoretická část práce je věnována literárnímu přehledu problematiky různých forem síry v půdě a jejich transformaci, mineralizaci a imobilizaci, příjmu, transportu a metabolismu síry v rostlinném těle a v neposlední řadě také tvorbě výnosu a kvality s ohledem na příjem síry, příznakům nedostatku síry, půdní anorganické síře, analýze půdy a rostlin a hnojivům s obsahem síry.

Praktická část práce se zabývá stanoveními obsahu minerální síry v půdě a celkového obsahu v rostlině a jejich změnami v různých schematech pokusného hnojení směsí dusičnanu amonného a málo rozpustného síranu vápenatého CaSO_4 (LAS 24 - 6). Dále je diskutováno působení hnojiva.

Při vstupních odběrech byly na všech stanovištích zjištěny velmi nízké obsahy mobilní síry v ornici. Po aplikaci dusíku a síry ve formě CaSO_4 došlo ke zvýšení obsahu mobilní síry v půdě, což se částečně projevilo v nejmladších listech a nadzemní hmotě pšenice i řepky. To pak částečně ovlivnilo výnosy pšenice a řepky.

Klíčová slova: síra, síra v půdě, síra v rostlině, hnojiva, tvorba výnosu, deficiencie (nedostatek) síry, LAS, CaSO_4 , sádra

Winter wheat fertilizing using nitrogen fertilizer with sulfur in the CaSO₄ form

Summary

The diploma thesis is aimed at sulphur nutrition of higher plants. Namely due to ecological reasons (desulphurization of the coal power plants and heat plants) but also due to other factors like growing crop species with high sulphur demand and using less „ballast“ fertilizers such as single superphosphate, the input of sulphur caused previously by deposition of gaseous sulphur compounds to soil and vegetation has significantly diminished. More often deficiency of the mineral sulfur-content is found in many regions and sulphur deficiency has become one of the major nutritional problems in northern European agriculture. Therefore greater attention is given to the importance of this element in plant nutrition.

The theoretical part of this work is devoted to the literary review dealing with various forms of sulphur in soil and their transformations, mineralisation and immobilization, the uptake, transport and sulphur metabolism in plants and last but not least the yield formation and quality as regards to sulphur uptake, its deficiency indices in the plant, mineral sulfur soil and plant analysis and sulphur fertilizers.

The practical part deals with mineral sulphur contents in soil and total sulphur content in plant and their changes in various patterns of experimental fertilizing by mixture of ammonium nitrate and low soluble calcium sulphate (gypsum, CaSO₄) (ANS). The effects of the fertilizing are discussed.

The initial sampling of the soil showed overall very low contents of mobile sulphur in soil. After the treatment of the soil by nitrogen + sulphur in the form of CaSO₄ the contents of mobile sulphur in the soil increased which to some extent influenced the total sulphur content in the youngest leaves and in the above grown plant material. Consequently, the yields of winter wheat and winter rape were, to some extent, were influenced.

Key words: sulphur, sulphur in soil, sulphur in plant, fertilizers, yield formation, sulphur deficiencies, ANS, CaSO₄, gypsum

Obsah

1.0	Úvod	1
2.0	Vědecká hypotéza a cíle práce	3
2.1	Vědecká hypotéza	3
2.2	Cíle práce	3
3.0	Přehled literatury	4
3.1	Síra v půdě	4
3.2	Anorganická půdní síra a adsorpce SO_4^{2-}	6
3.3	Půdní organická síra	10
3.4	Mineralizace a imobilizace síry	13
3.5	Ztráty vyplavováním	19
3.6	Vliv hnojení	20
3.7	Příjem síry a její transport v rostlině	21
3.8	Asimilace a redukce síranů	22
3.9	Tvorba výnosu a vliv na kvalitu sklizně u pšenice	23
3.10	Projevy nedostatku síry u obilnin	27
3.11	Analýza půdy	28
3.12	Analýza rostlin	30
3.13	Hnojiva s obsahem síry	31
4.0	Materiál a metody	38
4.1	Půdně klimatická charakteristika pokusných míst a agrochemická charakteristika pokusných míst	38
4.2	Postup při provedení pokusu	38
5.0	Výsledky	40
5.1	Výsledky - ozimá pšenice	40
5.2	Výsledky - ozimá řepka	42
6.0	Diskuse	46
6.1	Pšenice ozimá	46
6.1.1	Porovnání obsahů mobilní síry v půdě před hnojením a po sklizni	46
6.1.2	Porovnání obsahů mobilní síry v ornici a v podorničí	46
6.1.3	Porovnání obsahů mobilní síry v půdě po aplikaci hnojiv	47
6.1.4	Porovnání obsahů celkové síry v rostlinách pšenice ozimé po aplikaci hnojiv	47
6.1.5	Porovnání výnosů zrna pšenice ozimé po aplikaci hnojiv	49
7.0	Závěr	50
7.1	Obsahy síry v půdě	50
7.2	Obsahy síry v rostlinách	50
8.0	Seznam literatury	50

1.0 Úvod

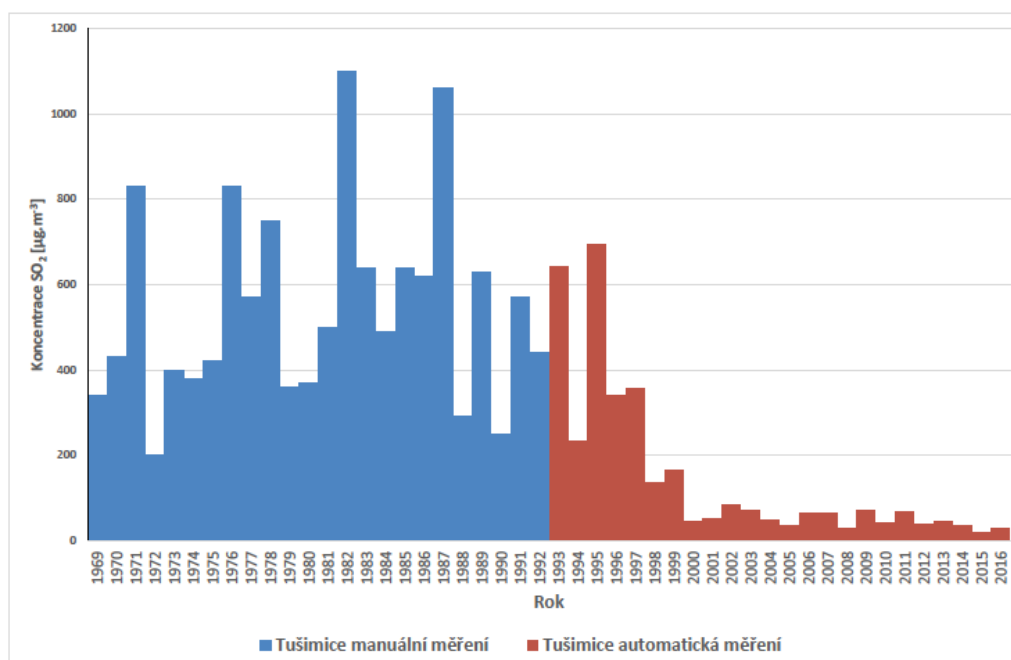
V minulosti se síře jako rostlinné živině věnovala jen malá pozornost. Jednak byla aplikována jako doprovodný prvek v běžných dusíkatých, fosforečných a draselných hnojivech, jednak byl její přísun z ovzduší ve formě spadů většinou „nadlimitní“ až nežádoucí.

Vzhledem k tomu, že v současné době dochází k poklesu obsahů síry v půdě, stává se hnojení sírou stále více aktuálním problémem v České republice (Balík et al., 2009; Matula, 2007) i v ostatních evropských zemích (Scherer, 2001, Lehmann et al., 2008 aj.).

Hlavní příčinou nutnosti hnojení sírou je pokles atmosférických depozic. Vstup SO_2 do půdy v roce 1990 činil v ČR 1 870 tis. t/rok. To odpovídá po přepočtu přibližně 120 kg čisté síry na hektar. V důsledku odsíření elektráren došlo k postupnému poklesu vstupů S až do roku 1998, kdy se hodnoty zastavily na zhruba 230 tis. t SO_2 za rok, tj. cca 15 kg S/ha za rok. V letech 2008 a 2009 klesly celkové emise dokonce pod hodnotu 200 tis. t SO_2 za rok. Vstupy síry do půdy prostřednictvím atmosférických emisí jsou tedy 8x nižší než před dvaceti lety (Kulhánek et al. 2013).

Šilar (1973) IN Ryant (2003) uvádí, že v bývalé ČSSR se v letech 1966 - 1968 aplikovalo ročně v průměru 263 102 tun síry v minerálních hnojivech. Z tohoto množství připadalo 54 % na fosforečná hnojiva (hlavně superfosfát) a 34 % na dusíkatá hnojiva (zejména síran amonný). Půda byla tedy ročně obohacována 37 kg síry na hektar z minerálních hnojiv (Zelený a Zelená, 1996, 1999 IN Ryant (2003)).

Jako doklad tohoto vývoje přikládám graf zpracovaný z dat získaných od ČHMÚ, ilustrující vývoj koncentrací SO_2 v ovzduší v oblasti, kde žiji a kde je změna poměrů v „zásobování“ půdy sírou atmosférickým spadem velmi zřejmá. Data ukazují přehled emisní situace pro SO_2 od počátku měření na meteorologické stanici Tušimice v okrese Chomutov.



Obr. 1: Graf maximálních denních hodnot koncentrací SO_2 v ovzduší (Tušimice). Zdroj: ČHMÚ Praha

Podobně tomu bylo i v ostatních zemích. S vývojem tzv. bezbalastních vysoce koncentrovaných hnojiv typu NPK s nepatrným nebo nulovým obsahem síry došlo v letech 1960 - 1970 k rapidnímu poklesu spotřeby tohoto prvku v minerálních hnojivech (Ceccotti et al., 1998; Eriksen et al., 1998), a to např. v Irsku v letech 1965 -75 až o 80 % (Murphy cit. Eriksen et al., 1998 IN Ryant, 2003).

Nižší aplikace síry v minerálních hnojivech byla umocněna také poklesem jejich spotřeby v celé Evropě (Ceccotti a Messick, 1994), který byl v České republice díky společenským změnám a liberalizaci cen daleko dramatičtější. Konkrétně byl zaznamenán pokles spotřeby tzv. čistých živin z 266,7 kg N, P₂O₅ a K₂O na 1 ha zemědělské půdy v roce 1983 až na 65 kg č.ž..ha⁻¹ v roce 1991 (Mezulianik, 1992). V průběhu minulého desetiletí se spotřeba pohybovala v rozmezí 65,6 - 82,8 kg č.ž..ha⁻¹ a poslední údaj za rok 2000 činí 75,9 kg č.ž..ha⁻¹ (Klír, 2001). Tento vývoj dospěl až do situace, kdy snížené vstupy síry z atmosféry a minerálních hnojiv (Dämmgen et al., 1998) již nestačily krýt rostoucí potřeby kulturních plodin a rostliny začaly vykazovat symptomy deficitu.

Tento stav se začíná postupně odrážet i v současně používaném sortimentu minerálních hnojiv.

Dalšími příčinami poklesů obsahů síry v půdě je méně časté používání hnojiv obsahujících síru (např. jednoduchý superfosfát) a rovněž častější zařazení plodin náročných na síru do osevních postupů (Scherer, 2001). Rovněž nižší návratnost síry v organických (statkových) hnojivech, možnost značných ztrát síranů z půdy v průmyslných půdách vyplavením vyústily v zápornou bilanci recyklace síry v polní rostlinné produkci (Matula, 2007).

V půdě se síra nachází ve formě anorganické a organické. Anorganická síra je ve většině zemědělských půd zastoupena méně než organicky vázaná síra. Zatímco organická síra tvoří hlavní zásobu síry v půdě, anorganická síra je vysoce dynamickou složkou, která je hlavním přístupným zdrojem S pro rostliny a tvoří většinou pouze 10 - 20 % z celkové síry (Tisdale et al., 1993). Anorganická síra je v zemědělských půdách přítomna zpravidla ve formě síranů a v nižších oxidačních stavech sulfidů, polysulfidů, siřičitanů, thiosíranů a elementární síry. V dobře provzdušněných půdách je nejběžnější síranová forma. Síraný se v půdách vyskytují jako vodorozpustné soli, síraný adsorbované na půdní koloidy nebo nerozpustné formy síranů (Barber, 1995). Příjem síranů a jejich koncentrace v půdě je ovlivněna hodnotou pH půdy, chováním půdních koloidů, množstvím oxidů Fe a Al a organickými ligandy.

Organická síra se v půdě nachází v rozmanitých sloučeninách, jako jsou sirné aminokyseliny methionin a cystein, cholinsulfát, sulfolipidy, sulfonové kyseliny a sulfátované polysacharidy. Organická S se dělí do dvou skupin: (1) estericky vázaná síra, která není přímo vázaná na uhlík (např. sulfátové estery C - O - S, sulfamáty C - N - S, sulfátové thioglyceridy N-O-S) a (2) síra přímo vázaná na uhlík (např. v sirných aminokyselinách, merkaptanech, disulfidech a sulfonových kyselinách) (Freney, 1986).

Hnojení sírou se stává stále aktuálnější problémem a zásobování půdy sírou je nutno věnovat mnohem větší pozornost než tomu bylo v minulosti.

2.0 Vědecká hypotéza a cíle práce

2.1 Vědecká hypotéza

Síra ve formě síranu vápenatého se poměrně obtížně dostává do rostlinám přístupných forem. Přesto lze při současném nedostatku síry v půdě předpokládat, že aplikace této formy spolu s dusíkem povede ke zvýšení výnosů pšenice ozimé, a rovněž ke zvýšení obsahu přístupné síry v půdě a celkové síry v rostlinách.

2.2 Cíle práce

Cílem práce je sledování vlivu aplikace dusíkatého hnojiva se sírou ve formě síranu vápenatého (Lovofert LAS - 24% N, 6% S ve formě CaSO_4) na obsah mobilní síry v půdě a celkový obsah síry v rostlinách a výnosy pšenice ozimé v různých půdně - klimatických podmínkách.

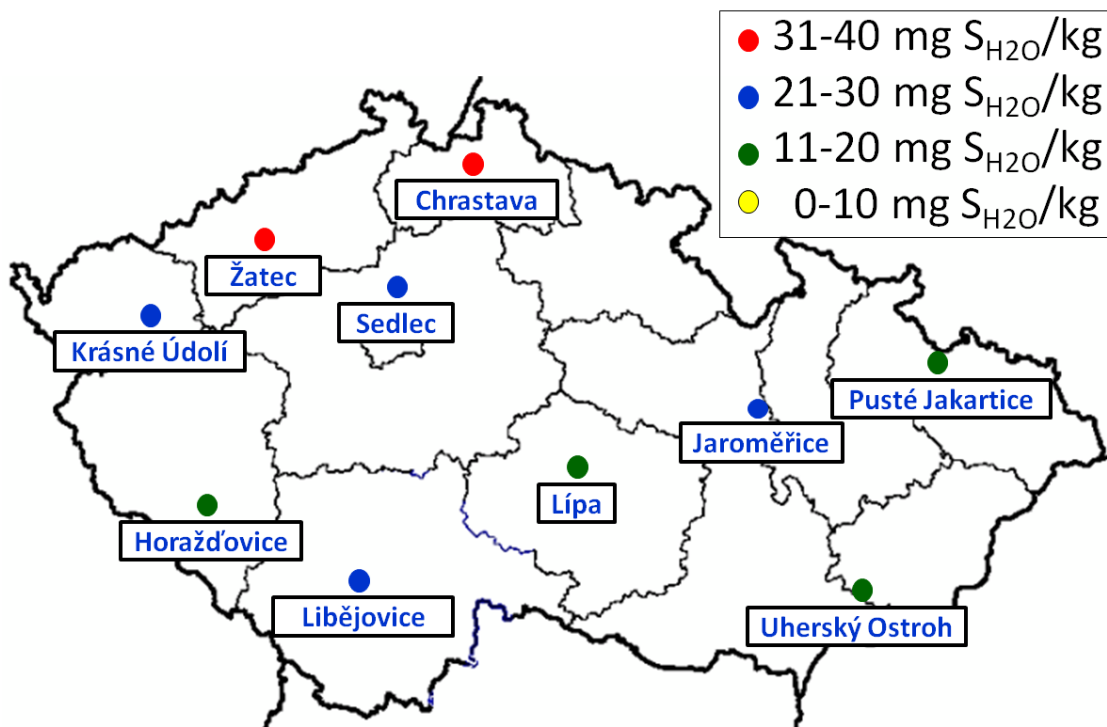
3.0 Přehled literatury

3.1 Síra v půdě

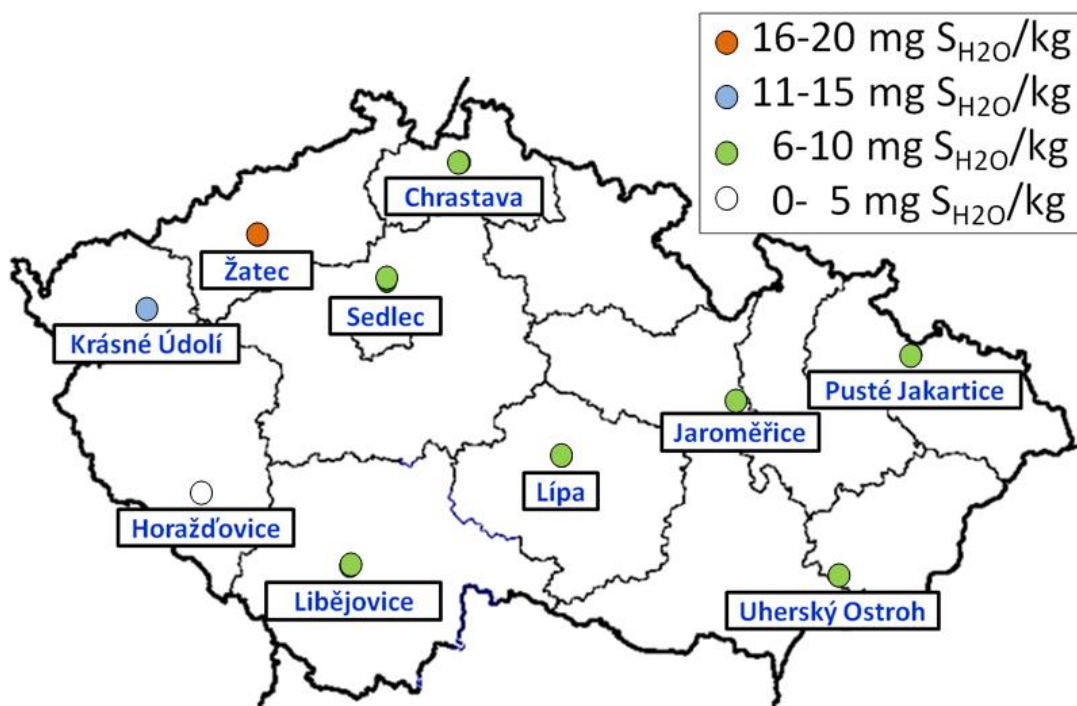
Z hlediska výživy rostlin sírou v praxi je nejdůležitější znalost hodnot přístupné frakce síry v půdě, tj. koncentrace síranů stanovitelných ve vodném výluhu. Na **Obr. 2** a **Obr. 3** jsou znázorněny obsahy síry v půdě stanovené ve vodném výluhu v letech 1981 a 2007 na nehnojených variantách dlouhodobých přesných polních pokusů ÚKZÚZ. Zatímco v roce 1981 hodnoty běžně dosahovaly 20 mg S/kg; v roce 2007 byly stanoveny 2x nižší obsahy. Je tedy zřejmé, že v uplynulém období došlo k výraznému poklesu obsahu rostlinám přístupné síry v půdě (Kulhánek et al., 2013).

Je zde rovněž patrné ovlivnění zásobenosti síry atmosférickými depozicemi. V oblasti severních Čech, kde dříve docházelo ke zvýšeným emisím především z důvodu neodsířených tepelných elektráren, jsou stále patrné zvýšené obsahy rostlinám přístupné síry v půdě (Kulhánek et al., 2013).

Obr. 2: Obsah síry extrahované vodným výluhem - rok 1981. Zdroj: Kulhánek et al., 2013.



Obr. 3: Obsah síry extrahované vodným výluhem - rok 2007. Zdroj: Kulhánek et al., 2013.

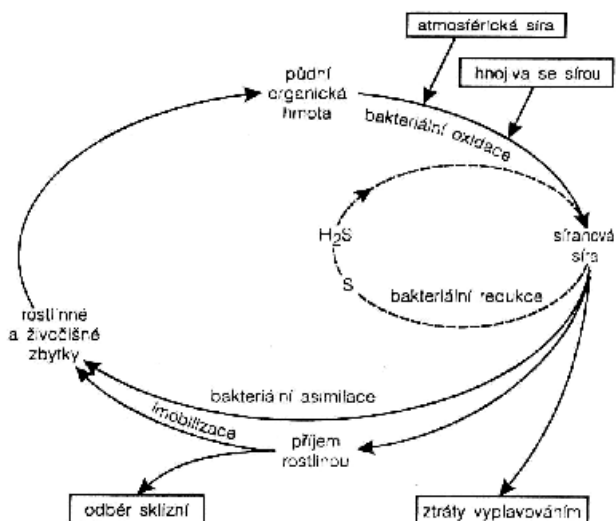


Síra je geogenicky hojný prvek (Clark cit. Schnug, Haneklaus, 1998) a v přírodě se vyskytuje v různých formách. Jako jedna z mála látek se v přírodě nachází také v elementární podobě. Vyskytuje se také jako sloučenina s dalšími prvky ve formě sulfidů, síranů nebo organických látek v sedimentárních, metamorfovaných a vyvřelých horninách nebo fosilních palivech (Bixby et al. cit. Ceccotti et al., 1998). Poměr mezi obsahem organické a anorganické síry v půdě značně kolísá a závisí zejména na půdním druhu a hloubce (Ryant et al., 2003).

V aridních oblastech mohou být v půdách nahromaděná vysoká množství solí (CaSO₄, MgSO₄, Na₂SO₄) (Mengel, Kirkby, 1978). Koncentrace síranů v půdách během roku kolísá v závislosti na atmosférických spadech, intenzitě mineralizace organických zbytků, dodávce hnojiv, míře vyplavení, příjmu rostlinami a mikrobiální aktivitě. V zimním a jarním období jsou obvykle zaznamenávány nízké hladiny síranů. Důvodem může být vyplavení, příjem rostlinami a nízká úroveň mineralizace při nízkých teplotách (Castellano, Dick, 1990; Ghani et al. cit. Eriksen et al., 1998). Podíl síranů na celkovém obsahu síry v půdě v rozmezí 10 - 15 % popisuje již Harward a Reisenauer (1966). K podobným výsledkům u analýz ornice hnědozemě dospěli Ivanič a Jedlovská (1989), kteří zjistili v průměru 19 % podíl síranové síry. Naproti tomu Schnug (1988) uvádí pro půdy Německa pouze 1,5 % lehce extrahovatelné síry z celkového množství síry v půdě.

Významným faktorem ovlivňujícím obsah celkové síry v půdách je podloží, resp. matečná hornina. Vyvřelé horniny obsahují 0,02 - 0,3 % síry, přičemž bazické horniny vykazují větší množství síry než kyselé horniny. Ta se zde nachází převážně ve formě sulfidů (sirníků) Fe, Zn, Cu a Ni (pyrit FeS₂, markasit FeS, chalkopyrit CuFeS₂, sulfan H₂S) (Tesař et al., 1997; Ryant et al., 2003).

Během zvětrávání, v aerobních podmínkách, jsou sulfidy oxidovány na sírany, takže v sedimentech se při aerobních podmínkách anorganicky vázaná síra vyskytuje téměř výhradně ve formě sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), který může obsahovat až 15 % síranové síry. V normálních zdravých půdách je nejvíce síry ve formě sádry a tato sloučenina i přes poměrně malou rozpustnost ve vodě (asi 2 g.l^{-1} vody) může rostlinám během vegetace zajistit potřebné množství síry. Při vysychání půdy se množství síranu v půdním roztoku rychle snižuje (Ryant et al., 2003) (**Obr. 4**).



Obr. 4: Koloběh síry v půdě (Tandon, 1991) IN Ryant et al. (2003)

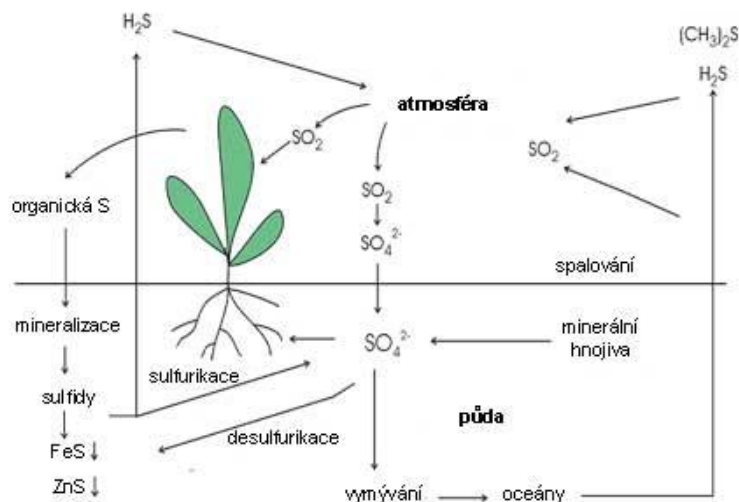
Celkový obsah síry v ornici půd se pohybuje nejčastěji v rozmezí 85 - 250 mg S/kg (Matula, 2007), celkový obsah síry v půdě je mezi 0,01 - 0,1 % (Černý et al., 2012) nebo od 0,01 - 2% (Ryant et al, 2003). Ve většině zemědělských půd je to od 50 - 500 mg síry /kg (Vaněk, 2007). Fecenko a Ložek (2000) udávají celkový obsah síry v půdách většinou od 100 do 5000 ppm, tj. 0,01 - 0,5 %. Písčité půdy však mohou obsahovat i méně než 100 mg/kg síry, zatímco organické půdy i nad 0,5 % (Zelený, Zelená, 1996). Na půdách humidnějších oblastí činí její celkový obsah 0,02 - 2 % (Scheffer, Schachtschnabel, 1992), resp. 0,01 - 1,5 % (Wainwright cit. Mengel, 1993). Matula (2007) stanovil v jarním období, po zimě, v našich půdách obsah aktuálně dostupné síry pro rostliny ve formě síranů nejčastěji v rozmezí hodnot 4 -13 mg S/kg ornice.

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).

3.2 Anorganická půdní síra a adsorpce SO_4^{2-}

Rostliny přijímají síru hlavně ve formě aniontu SO_4^{2-} , který představuje cca 1% z celkového obsahu síry v půdě. Z dalších anorganických forem jsou potenciálním zdrojem sírany adsorbované na povrchu půdních částic a síra okludovaná v síranech vápenatých a hořečnatých. Při hodnocení obsahu síry ve vztahu k rostlinám je nutné posuzovat její přístupnost, nikoliv jen obsah celkové síry v půdě, neboť tato forma je z větší části ve stabilním stavu, nebo jen obsah síranů, jelikož tato forma je poměrně variabilní. Podmínky půdního prostředí výrazně ovlivňují zpřístupňování síry, nebo naopak její akumulaci. Vstupy zahrnují atmosférickou depozici, většinou ve formě srážek, síru z hnojiv a síru, která je uvolněna mineralizací půdní organické hmoty. Mezi výstupy je zahrnováno vyplavování síranů z půdy a odběr síry rostlinami (Černý et al., 2012). Koloběh síry znázorňuje **Obr. 5**.

Koloběh síry v přírodě (Delwiche, 1983)



Obr. 5: Koloběh síry v přírodě (Delwiche, 1983) IN Ryant et al. (2003)

Náročnost na síru je možné vyjádřit odběrem nadzemní hmotou rostlin. Pohybuje se mezi 10 až 90 kg S . ha⁻¹ (Matula, 1999a). Vysoké požadavky na přísun síry mají plodiny z čeledi *Brassicaceae* (Mengel a Kirkby, 1978; Schnug cit. Eriksen et al., 1998). Travniny mají střední požadavky, zatímco obilniny a většina kořenových plodin spíše nižší. Plodiny s vysokými nároky mohou přijmout 70 - 90 kg S . ha⁻¹. Trávy a pšenice přijímají výrazně nižší množství, 20 - 30 kg S . ha⁻¹ (Schmalenbach et al., 1997; Jordan a Ensminger cit. Eriksen et al., 1998; Matula, 1999a). Pro výnos obilnin 3,5 t . ha⁻¹ uvádí Fecenko (cit. Fecenko, Ložek, 2000) potřebu síry 10,2 - 13,6 kg . ha⁻¹. Pedersen et al. (cit. Bloem, 1998) doporučuje pro obilniny aplikovat dávku 10 - 20 kg S . ha⁻¹ a Paulsen a Schnug (1996) až 30 kg S . ha⁻¹.

Síranový anion je v půdním roztoku vysoce mobilní, neboť je odpuzován od povrchu půdních částic se souhlasným (záporným) nábojem (Matula, 2007).

Ve většině zemědělských půd se anorganická síra vyskytuje obecně daleko méně často než síra organicky vázaná (Bohn et al., 1986). V zemědělských půdách, za aerobních podmínek, je dominantní a stabilní formou anorganické síry síranový anion (síran, sulfát). Obsah sloučenin s nižším oxidačním číslem představuje za těchto podmínek jen zanedbatelné procento (Bohn et al., 1986).

Síran může být v půdě jako anion SO_4^{2-} rozpuštěn v půdním roztoku, jako adsorbovaný SO_4^{2-} a jako minerální síra (Barber, 1995). Síra se může vysrážet v půdě v síranové formě jako síran vápenatý, síran hořečnatý a síran sodný. Síranový anion SO_4^{2-} se také vyskytuje ve formě příměsí (nečistot) buď v krystalické či vysrážené podobě s uhličitanem vápenatým CaCO_3 a představuje významný podíl celkové síry ve vápenatých (uhličitanových) půdách (Tisdale et al., 1993).

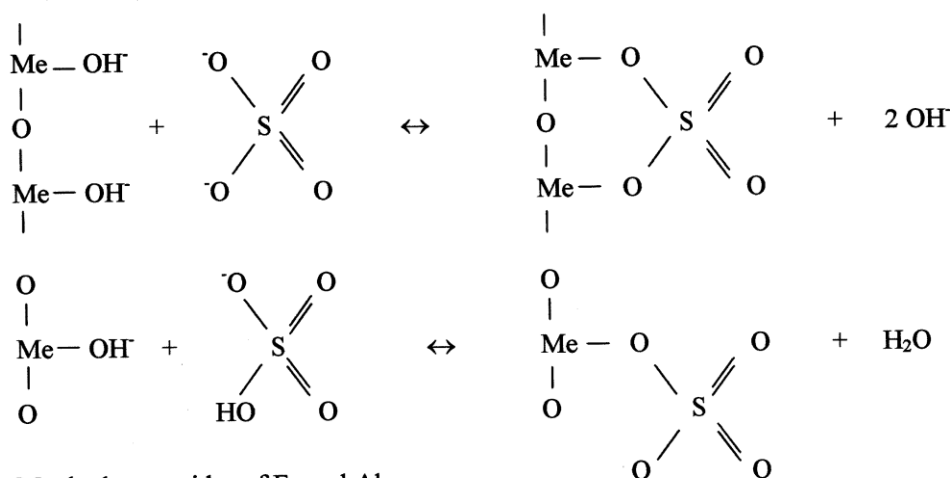
Anorganické sloučeniny síry obsahují 10 - 60 % celkového obsahu síry v půdě. Síra se v nich může vyskytovat v několika oxidačních stupních, od - 2, 0, + 2, + 4, + 6, což po řadě odpovídá sulfanu (H_2S), elementární síře (S_8), thiosíranům ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), siřičitanům (SO_3^{2-}) a síranům (SO_4^{2-}) (Scheffer, Schachtschnabel, 1992; Zelený a Zelená, 1996; Eriksen et al., 1998).

V přílivových bažinách se kumulují velká množství sulfidů kovů, jako např. pyrit (FeS_2). Po vysušení těchto oblastí jsou sloučeniny síry oxidovány na sírany, což je

doprovázeno poklesem pH. Sírany v půdním roztoku jsou v rovnováze se sírany v pevné fázi (Mengel a Kirkby, 1987; Tisdale et al., 1993) a jsou podobně jako fosfáty adsorbovány na jílové minerály a sesquioxidy. Síla, kterou je síranový anion vázán k minerálům, je však menší než je tomu u fosfátů. Se stoupající koncentrací síranů v půdním roztoku stoupá množství adsorbovaného síranového aniontu. Poznatek, že adsorpce síranového a fosforečnanového (fosfátového) aniontu jsou úzce korelovány, navozuje otázku, zdali nejsou mechanismy adsorpcí obou iontů podobné (Barrow, 1967). Hingston et al. (1967) zjistili, že anionty SO_4^{2-} jsou poutány ve větší míře, než by vyplývalo z rovnovážných poměrů. Anion SO_4^{2-} je však fosfátem snadno desorbován z půdy. Množství síranu, které se může adsorbovat, je důležité z hlediska zachycování síranu v půdním profilu jako prostředku k zamezení ztrát síry vyplavováním s důsledky na dostupnost síry.

Adsorbovaný síran je důležitou frakcí v půdách s velkým množstvím oxidů Al a Fe (Bohn et al., 1986). Na výzkumu v půdách severovýchodního Skotska se ukazuje, že síranový anion pravděpodobně více závisí na aktivním Fe než Al (Scott, 1976). Podle Kparamwang et al. (1997) adsorpce síranu pozitivně koreluje s množstvím železa, extrahovatelného dithioničitanem ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) a závisí na počtu adsorpčních míst na hranách vrstev jílovosilikátových minerálů. Obecně se adsorpce aniontu SO_4^{2-} na vodíkem nasycených jílech dá vyjádřit pořadím kaolinit > illit > montmorillonit.

Vzhledem k značnému podílu náboje závisícího na pH půdy závisí dále adsorpce síranového aniontu na pH rovnovážného roztoku (Couto et al., 1979). Adsorpce je velmi silná při nízkém pH půdy (Martini a Mutters, 1984), a proto negativně koreluje s pH půdy (Kparamwang et al., 1997). Adsorpce dosahuje zanedbatelných hodnot při $\text{pH} = 6,5$. Půdy mohou adsorbovat síranový anion hydratovanými oxidy železa a hliníku podle následujícího schématu (**Obr. 6**):



Me: hydrous oxides of Fe and Al

Me: hydratované oxidy Fe a Al

Obr. 6: Adsorpce aniontů SO_4^{2-} hydratovanými oxidy Fe a Al (Scherer, 2001).

Další uskutečněné výzkumy ohledně adsorpcí síranů v půdě dospěly k následujícím závěrům: jednak, že míra retence je závislá na charakteru koloidního systému, hodnotě pH, koncentraci sulfátů a obsahu ostatních iontů v půdním roztoku (Harward, Reisenauer cit. Eriksen et al., 1998). Dále bylo potvrzeno, že sírany jsou adsorbovány hydratovanými oxidy železa a hliníku a hranami aluminosilikátů jílových částic (Turner a Kramer, 1991; Harward et al. cit. Blair et al., 1994; Parfitt cit. Eriksen et al., 1998). Bylo zjištěno, že sírany jsou adsorbovány zejména elektrostatickými mechanismy (Marsch et al. cit. Eriksen et al., 1998), ale že významnou roli zde hraje též chemická sorpce náhradou za OH^- a H_2O (Rajan cit. Bohn et al., 1986; Parfitt a Smart cit. Eriksen et al., 1998) a že množství adsorbovaných síranů závisí na povrchové ploše jílových minerálů a na povrchovém náboji, a proto vyšší obsah hliníku zvyšuje adsorpci aniontů (Bohn et al., 1986). Nodvin et al. (1986) potvrdili, že

adsorbované sírany jsou významnou frakcí zejména na kyselých půdách a že s klesající hodnotou pH jejich podíl roste a vrcholu dosahuje při $\text{pH} = 4$. Při těchto hodnotách pH je síran vázán s hydratovanými oxidy hliníku (např. jurbanit, hydrát AlSO_4OH) a při hodnotách $\text{pH} < 4$ je adsorbován hlavně do hydratovaných oxidů železa (např. jarosit $[\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2]$). Tento poznatek má význam zvláště v extrémně kyselých půdách pod lesní vegetací nebo v rašelinných půdách (Scheffer, Schachtschnabel, 1992) a také v hlubších horizontech půdního profilu (Matula, 1999a). Většina zemědělských půd má však hodnotu pH daleko vyšší. Martini a Mutters (1984) potvrdili, že s hodnotou pH je přístupnost síranů zvyšována. Curtin a Syers (1990) došli ke stejnému závěru, zjistili, že v půdách Velké Británie a Irska s $\text{pH} > 6$ se všechny sírany nacházely v půdním roztoku. Bylo také dokázáno, že vápnění zvyšuje vyplavení síry (Bolan et al. cit. Eriksen et al., 1998) následkem desorpce síranů a zvýšené mineralizace. Adsorpce síranů je také ovlivněna přítomností ostatních aniontů, její pevnost klesá v pořadí $\text{OH}^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- = \text{Cl}^-$ (Tisdale et al. cit. Eriksen et al., 1998). Ačkoliv adsorbované sírany hrají jen velmi malou roli pro přímou výživu rostlin sírou, mohou mít značný význam pro vyváženou bilanci síry v celém agroekosystému (Eriksen et al., 1998).

V anaerobních podmínkách se půdní síra vyskytuje zejména ve formě sulfidů a při přechodu k aerobním půdním podmínkám dochází k postupné oxidaci. Jako meziprodukt může být vytvořena elementární síra a dále až kyselina sírová, která může při absenci CaCO_3 způsobovat silné snížení hodnoty pH, v extrémních případech až na $\text{pH} = 2$ (Scheffer a Schachtschnabel, 1992).

Pokud není adsorbovaný síranový anion pohotově dostupný rostlinám, měla by vždy úprava půdy směřovat ke snížení zadržování síranového iontu v pevné fázi a odpovídající vzestup jeho koncentrace v půdním roztoku by měl zvýšit dostupnost síranu rostlinám (Elkins a Ensminger, 1971). Mehlich (1964) objevil, že uvolnění adsorbovaného SO_4^{2-} iontu odpovídá postupnému přidávání $\text{Ca}(\text{OH})_2$. K tomuto jevu dochází v důsledku zvýšeného pH. Proto je možné ve svrchní přiměřeně vápněné vrstvě půdy očekávat jen nízkou adsorpci SO_4^{2-} iontu (Evans, 1986), a tudíž současná aplikace vápence a sádry má za následek zvýšení dostupnosti síranu (Serrano et al., 1999).

Kromě toho je síran snadno desorbován fosfátovými ionty. Proto, kromě vápnění, vede ke snížení retence síranu také aplikace superfosfátu (Ensminger, 1954).

Vyšší koncentrace síranu v půdním roztoku nejsvrchnější vrstvy půdy může být také způsobena aplikací hnojiv obsahujících síru a dalšími vstupy síry (Eriksen, 1996).

Dále je možno se domnívat, že svrchní vrstva půdy adsorbuje méně aniontů SO_4^{2-} než podorniční vrstva, protože kumulace organické hmoty a fosfátů je považována za hlavní faktor, který blokuje adsorpční místa síranových aniontů.

Výsledky výzkumu vlivu hloubky půdního profilu na adsorpci síranového aniontu nejsou jednotné. Zatímco Barton et al. (1999) zjistili, že hlubší vrstvy půdního profilu jeví menší kapacitu adsorpce síranu, Couto et al. (1979) zaznamenali, že adsorpce síranového iontu rostla s hloubkou půdního profilu. Podle jejich výsledků je rozdíl mezi různým chováním půdních horizontů připisován vyššímu obsahu půdní organické hmoty ve svrchní vrstvě půdy. Johnson a Todd (1983) zjistili, že adsorpce síranů je v negativní korelaci s obsahem půdní organické hmoty, poněvadž adsorpční místa Fe a Al hydroxidů mohou být blokována anionty organické půdní hmoty. Dále mohou organické anionty, vzniklé rozkladem organické půdní hmoty, ovlivnit adsorpci síranů obsazením adsorpčních míst (Martinez et al., 1998), a to přednostní adsorpci podle počtu funkčních skupin obsahujících kyslík (Inskeep, 1989). Spodnější horizonty půdy vykazují větší sorpci síranů.

Při tomto mechanismu výměnné sorpce dochází k poklesu půdní kyselosti, tj. ke zvýšení hodnoty pH (Matula, 2007).

Při studiu a ovlivňování stavu síranů v půdě jsou užitečnou pomůckou adsorpční křivky, poněvadž jednak zachycují historii zásahů v půdě, jednak zobrazují mnohé aspekty půdní mineralogie a chemie (Pasricha a Fox, 1993). Rovnovážná koncentrace síranů v půdě, sorbovaných či desorbovaných, odečtená podle adsorpčních a desorpčních křivek, poskytuje informace o výživě rostlin. Indikuje okamžitou koncentraci síranů, které by měly být dostupné rostlinám, stejně tak jako jejich koncentraci v půdním roztoku příslušného horizontu (Fox, 1982). To dále ukazuje, zda jsou rostliny přiměřeně zásobovány sírou - vhodná koncentrace půdního roztoku bývá obvykle 0,10 - 0,15 mol/l síranové síry.

Podobným způsobem se chovají všechny základní látky poskytující hydroxylové skupiny. Z tohoto důvodu má vápnění za následek zvýšení koncentrace síranů v půdním roztoku (Evans, 1986).

3.3 Půdní organická síra

Až více než 95 % veškeré síry v půdě je vázáno organicky. Pro rostliny přístupná forma síry tvoří tedy pouze malou část jejího celkového množství v půdě (Freney, 1967; Freney, 1986; Tabatabai a Bremner, 1972; Tabatabai, 1982; Anderson et al., 1992; Germida et al., 1992; Scheffer a Schachtschnabel, 1992; Golov, 1994).

Organická síra půdy je rozdělována do dvou skupin podle způsobu vazby k sousednímu atomu. Síra je buď přímo vázána na uhlíkový skelet organické sloučeniny, např. v sirných aminokyselinách, merkaptanech, disulfidech a sulfonových kyselinách, nebo nepřímo přes další atom, například kyslíku za vzniku sulfátových esterů (C - O - S), dusíku za vzniku sulfamatů (C - N - S) nebo síry za vzniku sulfátovaných thioglycidů (C - S - S). Přitom platí, že síra nepřímo vázaná na uhlík je snadněji zapojována do biologických transformací v půdě (Matula, 2007).

Bloem (1998) uvádí, že až 98% celkové půdní síry může být vázáno jako organické sloučeniny síry a je představováno heterogenní směsí zbytků rostlinných a živočišných těl a půdních mikroorganismů (Freney, 1986). Průběh koncentrací organické půdní síry obecně sleduje průběh koncentrací půdní organické hmoty v závislosti na hloubce (Probert, 1980).

Půdní organická síra, ač dosud nedostatečně charakterizovaná, je patrně chemicky různorodá a dělí se na dvě skupiny: jedna skupina obsahuje atom síry v oxidované formě, což znamená, že atom síry poskytuje elektrony vazebným partnerům - v případě síranu je to šest elektronů. Druhá skupina obsahuje atom síry v redukované formě, kde atom síry přijme dva elektrony od vazebných partnerů. Příkladem jsou sloučeniny odvozené od sulfanu (sirovodíku, H₂S), kde každý vodíkový atom poskytne do vazby se sírou jeden elektron (Scherer, 2001).

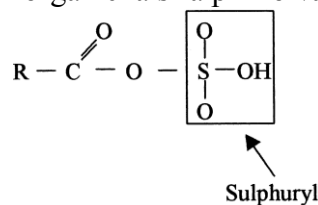
Výsledky studia stability forem půdní organické síry jsou různé: Bettany et al. (1973) dospěli k závěru, že sulfátové estery jsou nejlépe rozložitelnou sirnou organickou hmotou. Ghani et al. (1991) uvádí, že síra vázaná na uhlík, především ve formě aminokyselin, přispívá nejvíce k obsahu mineralizované síry v půdě. Studie hydrolýzy sulfátových esterů v půdě poukázaly na roli enzymů sulfatáz, které katalyzují uvolňování síranu (Speir a Ross, 1978; Germida et al., 1992). Hlavními zdroji sulfatáz v půdě jsou bakterie a houby, kořeny rostlin a také moč savců (Fitzgerald cit. Eriksen et al., 1998). Stanovením koncentrací arylsulfatáz v půdě se zabývali Germida et al., (1992).

Sjöqvist (1994) se zabýval faktory ovlivňujícími aktivitu arylsulfatázy v půdě. Dospěl k závěru, že optimální pH této reakce je 5,5 - 6,5 a její aktivita pozitivně koreluje s obsahem organické hmoty. Množství mineralizované síry tvořilo podle výzkumů Eriksena (1994) (viz výše) ročně 1,7 - 3,1% z organické síry v půdě odpovídá závěrům ostatních autorů, kteří zjistili mineralizaci síry v mezích 0,5 - 3,0 % (Freney, 1986; Keer et al. cit. Eriksen et al., 1998). Eriksen et al. (1995) konstatovali, že čistá mineralizace je ovlivněna mikrobiální

aktivitou, systémem obhospodařování a především typem půdy; dále také tedy imobilizačními pochody, při kterých může být síran velmi rychle zpětně zabudován do organických forem.

V půdě jsou rovněž významné imobilizační pochody, kdy je síran pohotově zpětně zabudován do organických forem. Tyto pochody jsou řízeny opět mikrobiální aktivitou a značně ovlivněny druhem substrátu. Imobilizace síry pozitivně koreluje s poměrem C : S v substrátu a přidavkem organických uhlíkatých látek s obsahem síry nižším než 0,13 % se značně zvyšuje inkorporace síranů do organických sloučenin. Zaorávka slámy obilnin, které mají široký poměr C:S, může tedy během krátké doby zvýšit imobilizaci síry a snížit její dostupnost rostlinám (Wu et al., 1995; Eriksen, 1997a; Chapman, 1997; Tlustoš et al., 2001).

Chemické charakteristiky těchto skupin látek byly většinou odvozeny z komparativní reaktivity půdní síry s různými redukčními činidly (Tabatabai, 1982). Organická síra se v půdě nachází v rozmanitých sloučeninách jako jsou sírné aminokyseliny, methionin a cystein, cholinsulfát, sulfolipidy, sulfonové kyseliny a sulfátované polysacharidy (Freney, 1986). Významnou skupinou sloučenin organické oxidované půdní síry jsou sulfoestery nebo všechny sloučeniny, ve kterých sulfurylová skupina substituuje vodíkový atom nebo jiný radikál. V těchto sloučeninách není organická síra přímo vázána na uhlík (**Obr. 7**):



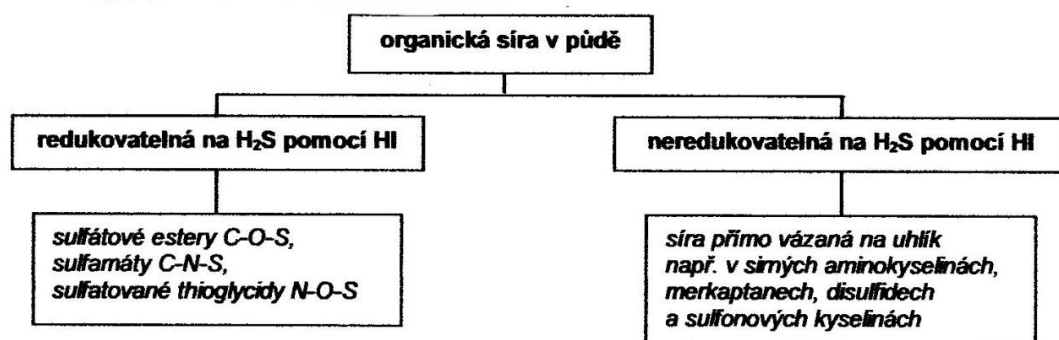
Obr. 7: Uspořádání atomů v sulfoesteru (Scherer, 2001)

Půdní organickou hmotu obsahující síru lze rozdělit podle mnoha hledisek (Eriksen et al., 1998). Tradiční způsob separace organické síry v půdě spočívá dělení podle ochoty reagovat s redukčním činidlem, kterým je jodovodík (kyselina jodovodíková) (Tabatabai, 1982). Tímto způsobem vznikají dvě skupiny sírných organických sloučenin - redukovatelné a nerdukovatelné jodovodíkem. Stevenson (1986) zjistil, že sírné sloučeniny redukovatelné kyselinou jodovodíkovou tvoří 30-60 % organické síry v půdě. Fitzgerald a Strickland (1982) popisují tvorbu jejich dominantního podílu, kterým jsou sulfátové estery.

Během frakcionace sloučenin půdní organické síry je síra redukována na H₂S (sulfan, sirovodík) kyselinou jodovodíkovou. Síra redukovatelná kyselinou jodovodíkovou (HI - redukovatelná síra) představuje 30 - 70% organické síry v půdě (Cooper, 1972; Tabatabai a Bremner, 1972a). Velké rozdíly v získaných výsledcích jsou připisovány klimatickým vlivům, organickým vstupům i způsobu využití půdy (Freney, 1961; Bettany et al., 1973). Stanovení spočívá v redukcí síry redukčním činidlem obsahujícím směs kyselin jodovodíkové, mravenčí a fosforové (H₃PO₂). Tato směs vytváří sulfan (H₂S) pouze z organických sloučenin síry obsahujících estersulfátovou vazbu C - O - S a z některých organických sulfitů jako dimethyl- nebo diethylsulfit (Fitzgerald, 1978). Má se však za to, že HI - redukovatelná síra je většinou síra estersulfátová (Lou a Warman, 1992a). Nguyen a Goh (1992) zjistili, že mezi HI - redukovatelnou sírou a estersulfáty existuje velmi významná korelace ($r = 0,99$). Bylo zjištěno, že hydrolyzovatelný estersulfát se skládá z 35 - 55% jódem redukovatelné síry (Whalen a Warman, 1996).

Rozdělení organických forem síry v půdě je znázorněné na **Obr. 8**.

Ačkoliv přesná struktura sulfátů v půdě není známa, jsou to pravděpodobně arylsulfáty a polysacharidové sulfáty jako cholinsulfát, chondroitinsulfát a keratinsulfát. Zdroje těchto sloučenin jsou rostlinné materiály, těla živočichů a jejich exkreta a látky vytvořené ze sulfátů autochtonní mikroflórou (Zinder a Brock, 1978). Podrobněji původ estersulfátů, jejichž obsah je významně korelován s obsahem organického uhlíku v půdě (Nguyen a Goh, 1992), zkoumal Fitzgerald (1976, 1978).

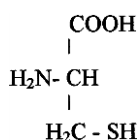


Obr. 8: Rozdělení organických forem síry v půdě - zpracováno podle Freneye (1967, 1986), Sjöqvista (1994) a Eriksena et al. (1998) IN Ryant et al. (2003)

Analýzy třinácti půdních profilů v Iowě dokladují, že obsah celkové síry ve formě sulfoesteru se zvyšuje s rostoucí hloubkou půdy (Tabatabai a Bremner, 1972b). Castellano a Dick (1991), Lou a Warman (1992a) a Eriksen (1996) došli k závěru, že období kumulace estersulfátů pravděpodobně odrážejí zabudování větších množství anorganického síranu. Tento závěr je v souladu s výsledky, ke kterým dospěli Saggiar et al. (1981b). Zkoumáním čistých kultur plísň tito autoři zjistili, že rostoucí hladiny anorganického síranu v roztoku měly za následek zvyšující se obsah cholinsulfátu.

Shan et al. (1997) uvádějí, že vedle vodorozpustného a adsorbovaného síranu představují estersulfáty většinu dostupné síry v půdě. Součet těchto tří frakcí síry může být použit jako indikátor stavu půdní síry.

Síra vázaná přes uhlík představuje rozdíl mezi celkovou půdní organickou sírú a sírú redukovanou jodovodíkem na sulfan (H_2S) a je tvořena většinou sírú aminokyselin cysteinu (**Obr. 9**) a methioninu, ale také merkaptanů, disulfidů atd. (Freney, 1986). Síra vázaná přes uhlík, o níž bylo zjištěno, že její obsah je v korelaci s obsahem mikrobiální biomasy, je spíše stavební složkou než formou ukládání síry v mikrobiální biomase.



Obr. 9: Aminokyselina cystein (Scherer, 2001)

Síra vázaná přes uhlík je méně ovlivněna koncentrací síranů v půdě a její obsah se mění se změnami mikrobiální populace (Castellano a Dick, 1991). Vykazuje klesající tendenci s rostoucí hloubkou půdy v půdním profilu (Tabatabai a Bremner, 1972a). Síra vázaná přes uhlík je dále navázána na aromatická jádra huminových kyselin (Bettany et al., 1973).

Důležitou roli v přeměnách půdní organické hmoty hraje síra v mikrobiální biomase. Chapman (cit. Eriksen et al., 1998) stanovil její podíl na celkové organické síře zemědělských půd na 0,9 - 2,6 %. Tento závěr koresponduje s ostatními autory udávajícími rozmezí 1 - 4 % (Saggiar et al., 1981; Banerjee et al., 1993). Wu et al. (1993) dokázali, že síra je v případě imobilizace mikrobiální biomasou přímo transformována do půdní organické hmoty a je tak pro rostliny nepřístupná, dokud není remineralizována. Část půdní organické síry (0,5 - 1,5 %) může také přecházet do půdního roztoku, kde činí 15 - 40 % celkové síry půdního výluhu (Nguyen a Goh, 1992a,b).

Stevenson (1986) dospěl k výsledkům, podle kterých mohou být 1 - 3% půdní organické síry zahrnuta do mikrobiální biomasy. Současnější práce naznačují, že síra v půdní

mikrobiální biomase obecně představuje 1,5 - 5% celkové půdní organické síry (Banerjee et al., 1993; Wu et al., 1993). Hlavní formou zabudování síry v buňkách mikrobusů jsou bílkoviny a aminokyseliny (Banerjee a Chapman, 1996). Obsah síry, přepočtený na sušinu, se pohybuje u většiny půdních mikroorganismů od 1 do 10 $\mu\text{g/g}$, poměr C : S od 57 : 1 do 85 : 1 a poměr N : S je kolem 10 : 1. Je však už známo, že poměr C : S není u biomasy pevný, ale může se rychle měnit v závislosti na přísunu síry. Pokud se síra stane limitujícím faktorem, buď proto, že její koncentrace v substrátu je nízká nebo proto, že její odběr plodinou je vysoký, může poměr C : S u biomasy dosáhnout hodnot 80 - 100 (Banerjee et al., 1993).

Germida et al. (1992) potvrdili, že organická frakce síry pozitivně koreluje s obsahem organických látek v půdě. Výjimkou mohou být půdy zasolené, vápenité nebo zamokřené, kde se může vyskytnout vysoká hladina anorganických forem síry. Pak bývá celkový podíl organické síry uváděn v rozpětí 40 - 90 % (Fecenko a Ložek, 2000).

Důležitým ukazatelem stavu půdní organické hmoty, půdní síry a stavu půdy obecně je znalost poměru N : S, popř. C : N : S. Stevenson (1986) uvádí pro zemědělské půdy hodnoty poměru C : N : S v průměru 107 : 7,7 : 1. K podobnému výsledku, poměru C : N : S v průměru 100 : 7,7 : 1 došel Freney (1986). Rovněž byla nalezena užší korelace mezi N a S než mezi C a S (Tabatabai a Bremner, 1972). Odchyly mezi jednotlivými půdními typy jsou vysoké a tyto vzájemné vztahy se liší také mezi různými půdními organickými frakcemi (Bettany et al., 1979). Vzhledem k tomu, že organické formy tvoří převážnou část celkového množství síry v půdě, můžeme tyto hodnoty porovnat s poměrem celkových obsahů C : N : S v půdách ČR, pro které uvádí Matula (1999a) rozpětí 78 - 126 : 8 - 13 : 0,5 - 1,5 (Ryant et al., 2003). Matula (2007) zjistil poměrné zastoupení celkového obsahu síry k obsahu celkového uhlíku a dusíku vyjádřené poměrem C/N/S v následném poměrném rozpětí: 78 - 126/8 - 13/0,5 - 1,5.

Mikrobiální biomasa je relativně labilní. Předpokládá se, že představuje nejpohotovější složku pro přeměny síry v půdě (Stevenson, 1986). Obecně lze říci, že aplikace organických látek do půdy zvyšuje obsah mikrobiální biomasy včetně mikrobiální síry. Obsah mikrobiální síry se pravděpodobně zvyšuje s teplotou a snižuje s klesajícím obsahem půdní vlhkosti (Gupta a Germida, 1989; Ghani et al., 1990). Wu et al. (1993) ve své studii zjistili, že 20% síry ve slámě ječmene a kolem 30% síry v listech řepky zapravené do půdy se během 5 dní při teplotě 25° C přeměnilo na síru mikrobiální.

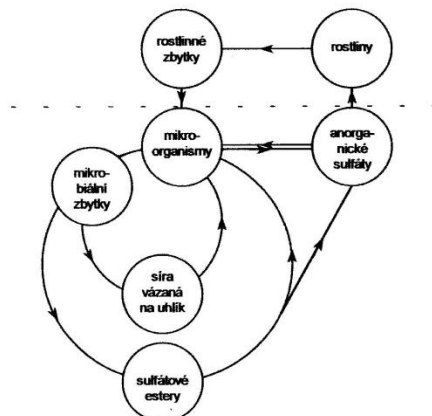
Matula (2007) zaznamenal významnou biologickou sorpci síranů, kdy po aplikaci síranu amonného do půdy bylo imobilizováno až 20 % z aplikované dávky síry.

3.4 Mineralizace a imobilizace síry

Půdní síra se nepřetržitě přeměňuje z anorganické síry na organickou a naopak. Sloučeniny organické síry jsou rostlinám nepřístupné a musí jim být zpřístupněny biochemickou nebo mikrobiologickou mineralizací za vzniku anorganického síranového iontu (Castellano a Dick, 1991). Tohoto procesu se účastní enzymy i mikroorganismy a je značně ovlivněn podmínkami prostředí. Zatímco biochemická mineralizace představuje hydrolýzu sulfátových esterů různými sulfatázami (jejichž hlavními skupinami, pojmenovanými podle substrátu, který katalyzují, jsou aryl-, alkyl-, steroid-, gluko-, chondro- a mykosulfatázy), mikrobiologická mineralizace síry vázané přes uhlík závisí na aktivitě půdních mikrobusů, které potřebují organický uhlík k pokrytí své potřeby energie, zatímco síra se uvolňuje jako vedlejší produkt oxidace uhlíku na CO₂ (Eriksen et al., 1998).

Koncepční model koloběhu organického C, N, S a P přes půdní organickou hmotu navrhli McGill a Cole (1981), kde mineralizace síry zahrnuje dva typy dějů - biologickou a biochemickou mineralizaci (**Obr. 10**). Biologická mineralizace je řízena mikrobiální potřebou organického uhlíku pro získání energie. Síra uvolněná jako síran je vedlejším produktem oxidace C na CO₂. Při biochemické mineralizaci je uvolňování síry vázané v sulfátových

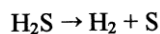
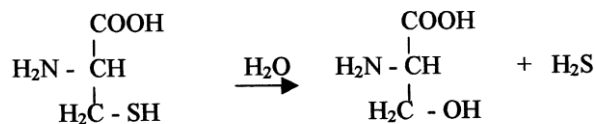
esterech katalyzováno extracelulárními enzymy. **Obr. 10** znázorňuje úlohu síry vázané na uhlík (C - S) a úlohu sulfátových esterů (C - O - S). Mineralizace C - S síry je přímo závislá na mikrobiální aktivitě. Sulfátové estery mohou být pohotově hydrolyzovány sulfatázovými enzymy v půdě, a proto je biochemická mineralizace kontrolována spíše zásobou síry než potřebou energie (Ryant et al., 2003).



Obr. 10: Schematické znázornění vzájemných vztahů koloběhu uhlíku a síry v systému půda – rostlina (podle McGilla a Coleho, 1981) IN Ryant et al., 2003

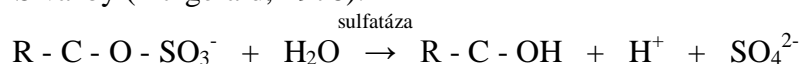
Různí autoři (Walker cit. Eriksen et al., 1998; White cit. Eriksen et al., 1998) původně předpokládali, že vzhledem k úzkému vztahu mezi sírou a dusíkem v organické hmotě by měl také poměr mineralizovaného N a S odpovídat poměru N : S v půdní organické hmotě (Ryant et al., 2003). Výsledky jsou však v rozsahu od mnohem širšího (Kowalenko a Lowe cit. Freney, 1986) k užšímu (Tabatabai a Al - Khafaji, 1980) poměru N:S v produktech mineralizace, což není vzhledem k popsáním dvěma mechanismům (McGill a Cole, 1981) nijak překvapující (Ryant et al., 2003).

V následující části je popsána přeměna sloučenin, které jsou považovány za nejlabilnější formu půdní organické síry (Schnitzer, 1991) a podléhají více vlivům ročníku než síra vázaná přes uhlík. McLaren et al. (1985) v krátkodobých pokusech se značenou sírou v iontu SO_4^{2-} dokázali, že estersulfáty jsou přechodnější povahy než síra vázaná přes uhlík a že slouží jako dočasné úložiště půdních sulfátů. Po aplikaci značeného iontu SO_4^{2-} do půdy bylo 60 - 90 % síry rychle zabudováno do frakce s estersulfáty a velký podíl síry přijatý později rostlinou pocházel z tohoto poolu. McLaren et al. (1985) ve své práci zabývající se krátkodobým oběhem síry v půdě také ukazuje, že estersulfáty jsou pro rostliny pohotovým zdrojem síry. Nicméně Klose et al. (1999) našli během 2 let vzorkování v obsahu estersulfátů jenom malé odchylky. Je proto pravděpodobné, že ne všechny skupiny skupiny estersulfátů v půdní organické hmotě jsou stejně stabilní. Lou a Warman (1992b) a Nannipieri et al. (1990) uvádějí, že biochemická stabilita estersulfátů pravděpodobně závisí na jejich poloze ve struktuře huminových polymerů. Zatímco estersulfátové skupiny umístěné na vnějších površích těchto polymerů mohou být přístupné sulfatázám a snadno mineralizovatelné, sulfátové skupiny nacházející se ve vnitřní struktuře polymerů jsou dostupné méně. Eriksen et al. (1998) předpokládají, že sulfátesterová frakce je frakce organických sloučenin s velmi odlišnou přístupností rostlinám sahající od rozpustných sloučenin k fyzikálně chráněným a jilem spojeným estersulfátům. Z tohoto důvodu je třeba brát v úvahu, že kromě koncentrace síry může rychlost mineralizace ovlivnit stabilita těchto sloučenin a že je zapotřebí dalšího studia, abychom odhalili složitost chování estersulfátů v půdách (**Obr. 11**).



Obr. 11: Mineralizace síry vázané přes uhlík (Scherer, 2001)

Hlavní podíl půdních estersulfátů je hydrolyzován, pravděpodobně pomocí mikrobiálních enzymů. Výsledný minerální sulfát je přístupný kořenům rostlin. Půdní enzymy jsou považovány za známku existence specifických biochemických reakcí celé mikroflory v půdách (Nannipieri et al., 1990) a celková aktivita enzymů v půdách je odvozena od aktivity akumulovaných enzymů a proliferaujících mikroorganismů (Tabatabai a Fu, 1992). A to ve vztahu k obratu estersulfátů, které významně přispívají k příjmu síry rostlinami (Shan et al. 1997). Několik typů sulfatáz se vyskytuje v přírodě (Tabatabai a Bremner, 1970) a jsou zjevně charakterizovány vysokou specifitou k organickému zbytku molekuly. Nicméně většina prací se soustřeďuje na arylsulfatázu (arylsulfátsulfohydrolázu), která byla první zjištěnou sulfatázou v přírodě a která katalyzuje hydrolyzu estersulfátů na anorganické sírany rozštěpením O - S vazby (Fitzgerald, 1978):



Reakce je nevratná a dosud není známo, zda se jí zúčastňuje nějaký jiný akceptor sulfátů než voda či zda se do katalýzy zapojuje nějaký jiný kovový iont (Al - Khafaji a Tabatabai, 1979). Obecně platí, že kolem 45% veškeré aktivity arylsulfatázy se odehrává vně buňky, zatímco cca 55% aktivity je přisuzováno mikrobiální biomase (Klose a Tabatabai, 1999). Podle druhu organismu probíhá hydrolyza substrátu v periplazmatickém nebo v intracelulárním prostoru.

Knauff a Scherer (1998) spojují aktivitu arylsulfatázy s obsahem půdního humusu. Její aktivita klesá s přibývajícím hloubkou půdního profilu (Tabatabai a Bremner, 1970). Roli regulátorů aktivity arylsulfatázy hrají také patrně půdní vlhkost a teplota. V pokusech, které uskutečnili Castellano a Dick (1991), byla nejvyšší aktivita enzymu zaznamenána na osetých pozemcích počátkem léta, což ukazuje na zvýšený potenciál mineralizace organických sloučenin síry, způsobený jednak kořenovými exudáty, jednak stárnutím kořenů a listů. Deng a Tabatabai (1997) a Klose et al. (1999) zjistili, že aktivita arylsulfatázy byla v době vzorkování významně ovlivněna střídáním plodin a typem rostlinného pokryvu. Vyšší aktivita v půdách s obilninářsko - pastvinářskými osevními postupy v porovnání s kontinuálním pěstováním sóji nebo kukuřice se připisuje pozitivnímu vlivu diverzifikovaných osevních postupů, vyšší hustotě kořenů, stabilizovanému mikroklimatu a téměř celoroční přítomnosti rhizosféry a rostlinného pokryvu.

V pokusech provedených ve sterilních podmínkách se ukázalo, že aktivita enzymů je inhibována síranovými ionty a aminokyselinami obsahujícími síru. Dále je zkoumána inhibice arylsulfatázy orthofosfátovými ionty jako konečnými produkty mineralizace fosforu nebo jejich přidáním do půdy jako hnojiva (Al - Khafaji a Tabatabai, 1979). Nevýrazný vztah mezi aktivitou arylsulfatázy a mineralizací síry v inkubačních pokusech může mít příčinu v inhibičním působení rozpustného orthofosfátu v půdě (Kowalenko a Lowe, 1975; Knauff a Scherer, 1999).

Dále je diskutována degradace redukováných organických sloučenin síry. Tyto redukované organické sloučeniny síry jsou převážně přítomny v bílkovinách a v aminokyselinách obsahujících síru. U bílkovin je první krok degradace hydrolyza, takže vznikají aminokyseliny obsahující síru. Dalším krokem tohoto procesu je tvorba sulfanu (H_2S), který za aerobních podmínek rychle podléhá autooxidaci na síranový anion (Mengel a Kirkby, 1987). Za anaerobních podmínek je sulfan oxidován na elementární síru chemotrofními sírnými bakteriemi ze skupiny *Beggiatoa* - *Thiothrix*. Tyto bakterie mohou také, za aerobních podmínek, oxidovat síru na kyselinu sírovou, což má za následek vzestup půdní acidity.

Oxidaci H_2S a elementární síry v půdě, tzv. sulfurikaci, provádějí fotosyntetizující a chemolitotrofní bakterie. Oxidace se odehrává buď bezbarvými sírnými bakteriemi (v půdě rod *Thiobacillus*, v bahně rody *Beggiatoa*, *Thiotrix*, *Thiospirillum*, *Thiophysa*) anebo anaerobně fotosyntetizujícími purpurovými nebo zelenými sírnými bakteriemi (čeleď *Thiorhodaceae*, *Chlorobacteraceae*). Hlavními zástupci bakterií účastnících se redukčních pochodů s produkcí H_2S , nazývajících se desulfurikace, jsou bakterie rodu *Desulfovibrio* (Mengel a Kirkby, 1978; Ložek et al., 1998).

Výskyt anorganických sloučenin síry nižšího oxidačního stupně (S^{2-}) v půdě je spojen s anaerobními podmínkami. Signalizuje vysoký stupeň redukčních pochodů v půdě, kterému běžně předchází produkce toxických produktů (Mn^{2+} , Fe^{2+} a alkoholů vzniklých z organických kyselin), v nadměrné koncentraci pro rostliny (Matula, 2007).

Na podmáčených půdách, za redukčních podmínek, je sulfan nejdůležitějším konečným produktem anaerobní degradace síry (Mengel a Kirkby, 1987; Ložek et al., 1998). Využitím vodíku ze sulfanu na fotosyntetický transport elektronů mohou purpurové a fotosyntetické zelené bakterie oxidovat sulfan na elementární síru. Redukce síranového aniontu za redukčních podmínek je vesměs způsobena bakteriemi rodu *Desulfovibrio*, které používají síranový kyslík jako konečný akceptor elektronu v dýchacím řetězci (Scherer, 2001).

Mikrobiální mineralizace sloučenin organické síry je samozřejmě ovlivněna půdní teplotou (Swift, 1985). Jaggi et al. (1999) studovali vliv tří různých teplotních režimů na mineralizaci sloučenin půdní organické síry a skutečně potvrdili výrazný vliv teploty, přičemž rychlost mineralizace byla nejvyšší při $36^\circ C$. MacDonald et al. (1995) prováděli inkubační pokusy při pěti různých teplotních hladinách, mezi $5 - 25^\circ C$, po dobu 32 týdnů. Rychlost mineralizace vzrostla s teplotou. Jejich výsledky napovídají, že rychlosti mikrobiální respirace a mineralizace síry se mohou vztahovat k omezení mikrobiálního přístupu ke zdroji v substrátu. Omezujícím faktorem je přítom teplota.

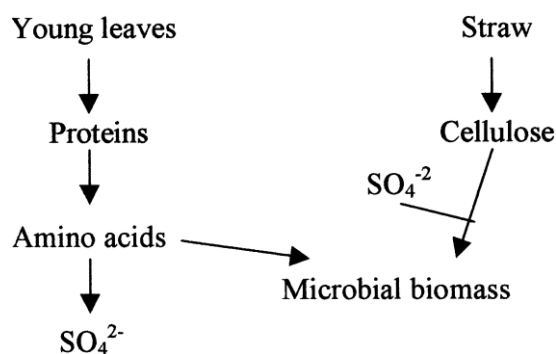
Ačkoliv mikrobiálně vázaná síra představuje pouze malou frakci celkové organické síry v půdě a množství síry v biomase se pohybuje mezi 0,81 - 13,44 mg/kg půdy se střední hodnotou 6,15 mg/kg půdy (Chowdhury et al., 1999), toto malé množství může rychle cirkulovat a má v půdě zásadní význam (Randlett et al., 1992). Za použití rychlosti obratu 0,70 byl určen roční tok síry biomasou, který činil přibližně $9,7 \text{ kg síry ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (Chowdhury et al., 1999). Mineralizace sloučenin půdní organické síry při nepoužití elementární síry a imobilizace aplikované elementární síry do organických sloučenin síry naznačuje důležitost role půdní mikrobiální biomasy jako zdroje S v dlouhodobém hospodaření se sírou (Jaggi et al., 1999). Rychlost obratu síry v mikrobiálním podílu síry je důležitým faktorem v dynamice sloučenin organické síry v půdě. Nicméně studií ke změnám množství síry v mikrobiální biomase v průběhu vegetačního období je stále velmi málo (Banerjee a Chapman, 1996).

Matula (2007) se zabýval otázkou, do jaké míry může mineralizace organické hmoty v našich půdách přispět k výživě porostů sírou, a to zvláště v období intenzivního jarního růstu řepky. Došel k závěru, že v kritickém jarním období nelze počítat s dostatečným doplňováním

síranů v půdě z mineralizace organické půdní hmoty. Během šedesáti dnů na přirozeně úrodných půdách nepřevyšovala produkce síranů hodnotu 4 kg S/ha, zatímco u ostatních půd, (s četností zastoupení v souboru kolem 50 %) byl registrován spíše úbytek, tj. imobilizace minerální síry. Významným poznatkem je, že hnojení dusíkem snižovalo produkci síranů z mineralizace organické složky půdy a u půd s imobilizační tendencí bylo poutání síry ještě intenzivnější.

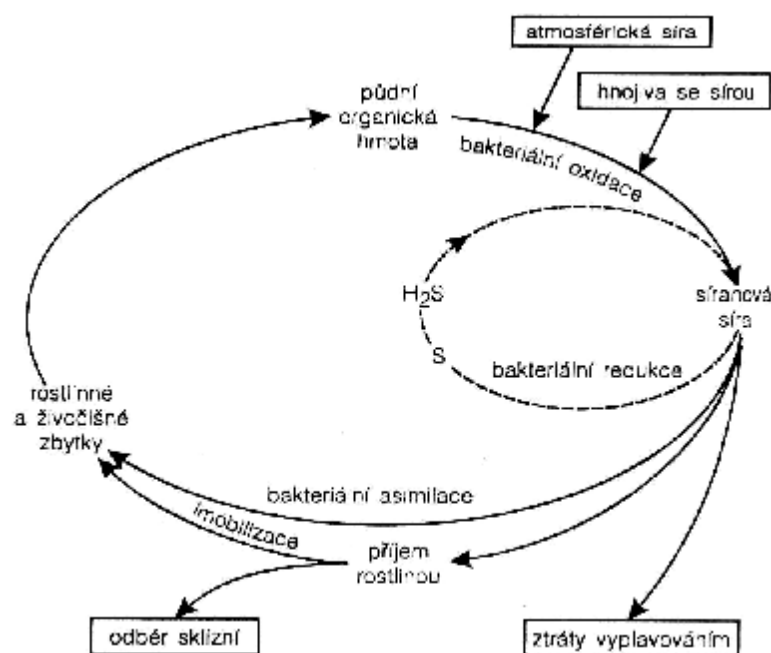
Eriksen et al. (1995) zjišťovali rozsah mineralizace síry v pěti dánských půdách v průběhu dvou po sobě jdoucích vegetačních období a zjistili, že čistá mineralizace se pohybovala mezi 3,3 - 6,7 mg/kg půdy za rok, což představuje 1,7 - 3,1% celkové půdní organické síry. To řádově odpovídá hodnotám rychlosti mineralizace, ke kterým dospěl Preuschoff (1995) na německých luvisolech na spraších. Bloem (1998) zjistila na třech různých stanovištích v severní části Německa, že mineralizací bylo do půdy dodáno během jednoho vegetačního období 7 - 49 kg síry na hektar. V pokusech s půdami z Mississippi byla v průměru 4 % celkové organické půdní síry po 3 měsících v inkubátoru mineralizována a 6% síry bylo mineralizováno po 6 měsících inkubace (Nelson, 1964). Celková množství zpřístupněné síry během 6 měsíců inkubace se pohybovala od 5 - 26 kg S na hektar. V inkubačních pokusech zjistil Williams (1967) počáteční velkou rychlost produkce síranů, trvající 1 - 4 týdny podle použité půdy. Poté rychlost produkce síranů poklesla, ustálila se na konstantní hodnotě nebo dokonce klesala. Zatímco množství čisté mineralizace síry nebylo významně korelováno s celkovou organickou sítou, sulfoesterovou sítou nebo sítou vázanou přes uhlík, byla čistá mineralizace korelována se sítou v biomase. Mineralizace byla také významně ovlivněna volbou pěstovaných plodin.

Značná část síry přijaté rostlinami se může vrátit do půdy ve formě reziduí. U některých plodin se znovu zužitkuje až 85% síry z nadzemních částí rostliny (Nelson, 1973). Uvolnění přístupné síry z rozkládajících se zbytků závisí především na obsahu síry v těchto reziduích. Analogicky s mineralizací dusíku, kterou detailně popisuje Mengel (1996), probíhá čistá mineralizace síry tehdy, pokud je zapravena do půdy hmota bohatá na síru, např. mladé listy řepky. Nicméně zabudování organické hmoty na síru chudé (např. sláma) má za následek imobilizaci síry (**Obr. 12**).



Obr. 12: Mineralizace a imobilizace síry po zabudování různých součástí organické hmoty do půdy. Zdroj: Scherer (2001)

Eriksen (1997a) zjistil, že přítomnost pohotově přístupného zdroje uhlíku způsobila rychlé snižování množství půdního anorganického sulfátu a redukcí příjmu síry. K minimalizaci imobilizace síry a zajištění maximální rychlosti rozkladu se ukázalo jako dostatečné množství cca 1,5 g S kg⁻¹ pšeničné slámy (Stewart et al., 1966). Na **Obr. 13** je schematicky znázorněn koloběh síry v půdě.



Obr. 13: Koloběh síry v půdě (Tandom, 1991) IN Ryant et al., 2003)

V mnohých půdách je dostupnost síry pro rostliny vysoce korelována s obsahem půdní organické hmoty (Tabatabai a Bremner, 1972b) a poměr C : S v půdní organické hmotě poskytuje orientační přehled o schopnosti uvolňování síranů (Barrow, 1960). Zatímco se sírany kumulují při poměru C : S < 200 : 1, k imobilizaci dochází při poměru C : S > 400 : 1. Pro poměr 200 < C : S < 400 platí, že sírany jsou buď uvolňovány z půdní organické hmoty, nebo jsou do ní zabudovávány.

White (1959) předpokládá, že relativní rychlosti mineralizace síry a dusíku z půdní organické hmoty jsou podobné a že prvky jsou uvolňovány ve stejném poměru, v jakém se vyskytují v půdní organické hmotě. Nicméně Barrow (1961) a nověji také Swift (1985) zjistili, že se uvolňuje více dusíku než síry, zatímco Tabatabai a Al-Khafaji (1980) a Link (1997) potvrdili větší uvolňování síry než dusíku. Vysvětlením různého chování síry a dusíku při rozkladu může být inhibice konečného produktu biochemické mineralizace síry (Bettany a Stewart, 1983), různá účinnost mikroorganismů a různá stabilita extracelulárních enzymů (Biederbeck, 1978).

V inkubačních pokusech Williams (1967) zaznamenal, že dávkování CaCO₃ způsobilo zvýšení koncentrace rozpustných síranů a mineralizace síry probíhala zcela proporcionálně až do pH = 7,5. Nad tuto hodnotu koncentrace síranů rostla rychleji, což napovídá, že chemické procesy mají dopad na mobilizaci síranů.

V polních pokusech zjistili Birch (1960) a podobně i Williams (1967) a Freney et al. (1975) v inkubačních pokusech, že střídavé vysušování a zvlhčování půd podporovalo mineralizaci síry, což je připisováno zrychlenému rozkladu půdních organických sloučenin, popř. také lýze mikrobiálních tkání. Proto Barrow (1961) vyslovil domněnku, že střídavé vysušování a zvlhčování půd jsou hlavní faktory ovlivňující dostupnost síry v polních podmínkách.

Poněvadž je část uvolněné síry též použita pro syntézu materiálu nových buněčných stěn půdních mikrobů, probíhá mineralizace a imobilizace současně (Maynard, 1982). Wu et al. (1995) monitorovali imobilizaci síry a mikrobiální transformaci v jílech za použití značeného síranu, glukózy a řepkových listů a slámy jako rostlinných zbytků. Aplikace glukózy a zbytků obou rostlin měla za následek zvýšenou imobilizaci značených síranů. Rozsah imobilizace tedy závisel na poměru C : S v přidaných rostlinných zbytcích. Během

prvních 3 dnů experimentu byla imobilizovaná množství z dodané síry korelována lineárně s množstvím síry pocházející z půdní mikrobiální biomasy. Poté se množství imobilizované značené síry představující S v biomase snížilo. V inkubačních pokusech s ječnou slámou pozoroval Chapman (1997) zvýšenou imobilizaci síry při poměru 0,4 - 0,7 g S kg⁻¹ slámy a zpomalenou dekompozici při pokusech bez přídavku síry. Kritická koncentrace síry pro imobilizaci byla odhadnuta na 1,3 g S kg⁻¹ sušiny nebo na poměr C : S ve zbytcích 340 : 1. Chapman (1997) dokázal, že v regionech s deficiencí síry může mít, podle druhu půdy, zabudování rostlinných zbytků chudých na obsah síry za následek omezený růst rostlin a zpomalenou dekompozici těchto zbytků.

Z toho vyplývá, že přídavek zdroje uhlíku (Saggar et al., 1981a) nebo přítomnost metabolizovatelné organické hmoty (Goh a Gregg, 1982) přispívá ke zvýšení množství síranů imobilizovaných do organických forem.

K posouzení významu nově imobilizované síry jako zdroje síry rostlinám dostupné bylo provedeno několik pokusů. Všechny pokusy ukazují, že tato síra je pohotověji remineralizována a představuje snadněji dostupný pool rostlinám přijatelné síry než půdní organická síra jako celek (Tsuiji a Goh, 1979; Goh a Gregg, 1982).

3.5 Ztráty vyplavováním

Vyplavování je potenciálně jedním z nejdůležitějších příspěvatelů ke ztrátám síry. Dochází k němu tehdy, když množství vody pohybující se vertikálně dolů půdním profilem je větší než příjem vody rostlinou, vypařování a množství vody nutné k nasycení půdního profilu.

Nerozpustná frakce síranů je jen nepatrně vyplavována a není přístupná pro rostliny. Někdy se vyskytuje na vápencových půdách, kde je blokována v chemické vazbě s uhličitánem vápenatým (Williams, Steinbergs, 1962). Vodorozpustná frakce je velmi mobilní a může být vyplavena, adsorbována, imobilizována nebo přijata rostlinami, zvláště v jarním a letním období, kdy jsou aktivní kořeny (Ryant et al., 2003).

Množství adsorbovaného síranu je dáno rozdílem mezi obsahem síry v půdách při podobných srážkových poměrech (Tisdale et al., 1986). Mezi hlavní faktory ovlivňující stupeň vyplavování patří zvláště půdní textura, způsob obdělávání (oseto nebo úhor), hnojení sírou, intenzita mineralizace, zvětrávání, imobilizace a řada dalších půdních procesů. (Ryant et al., 2003).

Roční ztráty vyplavením se podle odhadů pohybují od 1 - 60 kg.ha⁻¹ (Eriksen et al., 1998). Matula (1999a) však dokumentoval i ztráty síranů vyplavením z ornice přes 100 kg S.ha⁻¹.rok⁻¹. Šilar (1973) a Scheffer a Schachtschnabel (1992) uvádějí průměrné ztráty vyplavením u nás a v Německu kolem 50 kg S.ha⁻¹.rok⁻¹.

Adsorpce síranů je reverzibilní proces závisející na adsorpční kapacitě. Proto je odolnost vůči vyplavování především ovlivněna různými půdními faktory jako obsah jílu, obsah železa a hliníku a pH půdy. Obsah vodorozpustných síranů závisí na půdním typu a liší se v jednotlivých horizontech, uplatňuje se vliv ročníku i okamžitý stav počasí; dále je ovlivňován aplikací hnojiva i jeho rozpustností ve vodě. Ve vápnatých půdách, kde téměř nerozpustný síran vápenatý může představovat velkou část celkových síranů, může být ztráta síry vyplavováním zanedbatelná (Tisdale et al., 1986).

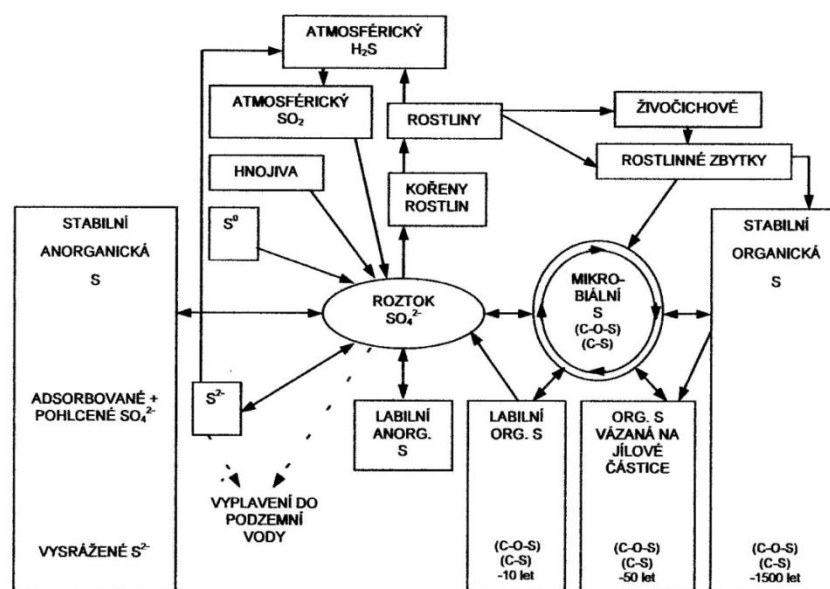
V porovnání s těžkými půdami je vyplavování síry vyšší v písčitéch půdách, což je způsobeno nižší síranovou sorpční kapacitou a vyšším množstvím vody pohybující se vertikálně. Podle výsledků, ke kterým dospěla Bloem (1998), je zřejmé, že na vyplavování síry má také vliv výška hladiny spodní vody.

Obyčejně je vyplavování síry také vyšší po aplikaci hnojiv obsahujících sírany v porovnání s hnojivy tvořícími sírany. V regionech, které jsou náchylné k vyplavování, se tudíž doporučuje aplikace pyritu (Nesheim et al., 1997) nebo elementární síry.

Kvantifikovat ztráty vyplavováním je velice obtížné kvůli změnám faktorů, které je ovlivňují. Proto je většina výsledků získána z lyzimetrických pokusů, ačkoliv tyto hodnoty mohou mít omezenou použitelnost. Obecně platí, že lyzimetrické studie ukázaly, že vyplavování je nižší v obdělávaných půdách než na ladem ležících půdách (Kirchmann et al., 1996) a minimální za rostlinného pokryvu (Garwood a Tyson, 1973). Starší lyzimetrické studie, které provedl Pfaff (1963) na půdách se střední texturou ukázaly, že se ročně ztrácí vyplavováním cca 130 kg S ha^{-1} . Shepherd a Bennett (1998) provedli na orné písčité půdě střední Anglie během 7 let dva lyzimetrické roční pokusy zaměřené na množství ztrát vyplavované síry za rok. V případě bez dodání chlévského hnoje byly celkové roční ztráty vysoce závislé na množství perkolátu. Průměrné koncentrace síranů v lyzimetrické vodě během obou pokusů dosahovaly $38 - 57 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Po aplikaci drůbežního hnoje byla koncentrace síranů $125 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. V lyzimetrických pokusech bez aplikace síry zjistili Kühn a Weller (1977), že střední hodnota ročního vyplavování síry byla 40 kg S ha^{-1} , zatímco při aplikaci 63 kg S ha^{-1} došlo k vyplavení 110 kg S ha^{-1} . Stauffer a Rust (1954) prováděli lyzimetrické pokusy na osmi půdách z Illinois bez rostlinného pokryvu a došli k ročním ztrátám síry mezi $2 - 64 \text{ kg S ha}^{-1}$. Mansfeld (1994) zjistil, že na orné půdě severní části Německa dosahovaly roční ztráty síry vyplavováním mezi $32 - 77 \text{ kg S ha}^{-1}$. Tyto ztráty se rámcově shodují se ztrátami síry vyplavováním, ke kterým došla Bloem (1998) a které dosahovaly téměř 60 kg S ha^{-1} . Obecně lze říci, že ztráty síry vyplavováním jsou normálně nižší během vegetační doby (Garwood a Tyson, 1973) a vyšší na půdě bez rostlinného pokryvu (Kirchmann et al., 1996). Matula (2007) zdokumentoval ztráty síranů vyplavením z ornice v hodnotách 30 až 80 kg S/ha/rok .

Další možností ztrát živin je půdní eroze, která je však na půdách v oblasti mírného klimatu pouze kolem $0,1 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Till cit. Eriksen et al., 1998). Povrchový smyve (Smith et al. Cit. Eriksen et al., 1998) nebo plynné ztráty mohou činit u hnojených půd $2 - 3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Eriksen et al., 1998).

Koncepční diagram koloběhu síry podle Krouse et al., 1991 IN Ryant et al., 2003 je znázorněn na **Obr. 14**.



Obr. 14: Koncepční diagram koloběhu síry (Krouse et al., 1991) IN Ryant et al., 2003

3.6 Vliv hnojení

Mezi další významné vstupy síry do půdy patří přísun organickými a minerálními hnojivy, posklizňovými zbytky i pesticidy a jako součást osiv. Síra z minerálních hnojiv je sice pro rostlinu dobře přístupná, ale takto dodaná síra není dlouhodobě akumulována v půdě

a pokud není využita rostlinami, dochází k jejím ztrátám. Obsah síry v organických hnojivech poměrně kolísá podle druhu hnojiva, jeho složení a dalších faktorů, např. také vzhledem k obsahu síry např. v podestýlce. Na stanovištích s deficitem síry je její nižší obsah ve slámě i v krmivu a následně i v organických hnojivech (Černý et al., 2012).

3.7 Příjem síry a její transport v rostlině

Ačkoliv jsou vyšší rostliny schopny přijímat a zužitkovat také atmosférický oxid siřičitý, nejdůležitějším zdrojem síry pro ně zůstávají sírany přijímané kořeny rostlin. V rozmezí fyziologického pH je dvoumocný anion SO_4^{2-} přijímán v relativně malém množství a na velké vzdálenosti veden převážně xylémem. V určitých ohledech je asimilace síry odobná příjmu dusíku, například tím, že k zabudování síry do aminokyselin, proteinů a koenzymů je nutná její redukce, a tím, že redukčním činidlem síranů je ferredoxin v zelených částech rostliny. Na rozdíl od nitrátového dusíku však může být také síran rostlinou zužitkován, aniž by byl redukován, a může být zabudován do základních organických struktur jako jsou sulfolipidy v membránách nebo polysacharidy v agaru (Marschner, 1997). Redukovaná síra může být také, na rozdíl od dusíku, v rostlinách reoxidována. Při této reakci se redukovaná síra v cysteinu oxiduje na síran (Sekiya et al., 1982a), který představuje „nejbezpečnější“ skladovatelnou formu síry v rostlinách. Oxidace redukováných sloučenin síry také pravděpodobně působí jako negativní signál zpětné vazby redukce síranů (Schmidt, 1986).

Síra je vesměs rostlinou přijímána kořeny z půdního roztoku jako dvoumocný anion SO_4^{2-} . Hlavním místem příjmu síranů je oblast kořenového vlášení (Cacco et al., 1980). Současnější výzkumy potvrzují předpoklad, že síranový anion je přijímán spolu s vodíkovým kationtem ($\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$) (Clarkson et al., 1993; Leusteck a Saito, 1999). Přítok SO_4^{2-} je nejrychlejší při pH = 4,0 a klesá s rostoucí hodnotou pH (Leggett a Epstein, 1956). Zatímco seleničitany (SeO_3^{2-}) konkurují příjmu SO_4^{2-} , nitráty, fosfáty a chloridy v půdním roztoku zde nevykazují žádný měřitelný vliv. Jak zjistili Bowen a Rovira (1971), příjem SO_4^{2-} kořeny pšenice je nejvyšší na délce prvních 5 cm od kořenové špičky.

Rostliny jsou schopny využívat i SO_2 z ovzduší, ovšem jen určitou část celkové potřeby (asi do 30%) (Vaněk et al., 2012). Ukládání atmosférických depozic SO_2 do rostlinného pokryvu představuje významný zdroj síry pro rostliny (Faller, 1972; Baldocchi, 1993). Mnohé studie ukazují, že oxid siřičitý vstupuje do rostliny hlavně průduchovou štěrbinou (Taylor a Tingey, 1983; Olszyk a Tingey, 1985). Garsed (1985) prokázal, že touto cestou bylo uloženo v listech mezi 75 - 90% oxidu siřičitého. Příjem SO_2 převažuje v denní fázi, ale vegetační pokryv absorbuje SO_2 i v noci díky jeho vysoké rozpustnosti ve vodě. Po vstupu do stomat je oxid siřičitý distribuován v rostlině a zabudován do různých siřičitých sloučenin.

V polním pokusu u řepky a ova pěstovaných v půdách s téměř deficitní koncentrací síry pocházela cca polovina celkové síry přijaté během vegetační doby z těkavých atmosférických sloučenin síry (Simán a Jansson, 1976). Střední hodnoty příjmu síry u opadavých stromů během léta činily mezi 1 - 2 kg S ha⁻¹. V pokusech s příjmem oxidu siřičitého u sazenic smrku ztepilého Kaiser et al. (1993) zjistili, že kumulace oxidu siřičitého v jehlicích stromu je lineární funkcí koncentrací tohoto plynu v atmosféře. Zatímco nízké koncentrace SO_2 (1,5 mg m⁻³) mají příznivý efekt na zmírnění deficitu síry (Faller, 1972; Cowling a Lockyer, 1976), už krátkodobá expozice vysokým koncentracím oxidu siřičitého (50 mg m⁻³) může způsobit dlouhodobý pokles fotosyntézy (Keller, 1981). Vaněk et al. (2012) uvádí, že zatímco při malé koncentraci SO_2 v ovzduší a při nedostatku síranů v půdě je využití SO_2 vyšší a působí příznivě, od koncentrací 1,0 - 1,5 mg SO_2 m⁻³ vzduchu působí již poškození rostlin, k němuž ovšem přispívají i další složky emisí, které se do ovzduší dostávají s SO_2 . Pak může být pro rostliny nebezpečná i podstatně nižší koncentrace. Pro jednoleté

rostliny je kritická koncentrace $120 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$, pro vytrvalé rostliny je to zhruba polovina této hodnoty (Saalbach, 1984).

Příjem sulfanu (sirovodíku, H_2S) listy také převažuje v denní fázi vegetace (Marschner, 1995) při otevírání a zavírání průduchů. Pro citlivé rostliny (špenát) je sulfan toxický už při koncentracích pod $0,7 \text{ mg H}_2\text{S m}^{-3}$ (DeKok et al, 1989).

Ztráty síry emisemi sulfanu a ostatních těkavých sloučenin síry z listů mohou dosáhnout značných hodnot. Předpokládá se, že se jedná o jeden způsob detoxikačního mechanismu poté, co byla rostlina vystavena vysokým koncentracím atmosférického oxidu siřičitého (Sekiya et al., 1982). Výzkumy na listech *Cucurbita pepo* ukazují, že při nadbytečném přívodu síry není omezena syntéza cysteinu redukcí sulfátů, přítomností *o*-acetylserinu (Rennenberg, 1983). V takovém případě je přebytečná síra redukována na sulfan a vylučována do atmosféry.

Podle výsledků, ke kterým dospěli Grundon a Asher (1986), jsou emise těchto sloučenin síry výrazně spojené s denním rytmem s maximem v poledne. Spektrum vylučovaných sloučenin a jejich množství záleží na druhu rostliny a během vegetační doby nabývá hodnot od cca 100 g do několika kilogramů látky na hektar. Rostliny pěstované v neznečištěném ovzduší a za dodávání síry jen v podobě síranů v půdě rovněž uvolňují průduchy podstatná množství těkavých sloučenin síry (Rennenberg et al., 1990). Hlavní vylučovanou složkou byl SO_2 , jehož emise stoupaly s obsahem síry v půdě. U řepky a ovsa dosáhly emise těkavých sloučenin mezi $0,2$ až $2 - 3 \text{ kg S ha}^{-1}$ podle míry zásobení půdy sírou (Simán a Jansson, 1976).

Ačkoliv sloučeniny organické síry mohou být syntetizovány v kořenech, síra je převážně translokována do nadzemní části rostliny jako sulfát. Translokace síry z kořenů do chloroplastů pletiv zelené části rostliny, kde probíhá redukce a asimilace, zahrnuje několikanásobný transmembránový transport xylémem na dlouhé vzdálenosti (Clarkson et al., 1993). Kinetické studie, které prováděl Smith (1976), ukázaly, že síranový anion působí jako kompetitivní inhibitor transportu síranů. Sycení xylému síranovými anionty zákonitě ovlivňuje rychlost vertikálního pohybu vody. Transpirační proud je hybnou silou translokace síranů do listů (Rennenberg et al., 1979). Tam se sírany ukládají do buněk mezofylu. Transport na dlouhé vzdálenosti stejně tak jako alokace zdroje síry má význam v zemědělství ve vztahu k zabudování redukované síry do sklizených částí rostlin (Hell a Rennenberg, 1998). V redukované formě je S translokována jako cystein, který je poté začleněn do molekuly glutathionu (Zhao et al., 1999a).

Hell a Rennenberg (1998) zjistili, že síran je univerzální složkou floémové tekutiny. Nicméně je otázkou k diskusi, zda pohyb sulfátu floémem sleduje hmotnostní tok sacharózy. Také nejsou dosud známy hodnoty transportní rychlosti sulfátů. Hlavní přívod redukované síry z nadzemní části rostliny ke kořenům je představován zejména prouděním roztoku glutathionu.

3.8 Asimilace a redukce síranů

Ve vyšších rostlinách jsou enzymy asimilační redukce síranů lokalizovány hlavně v chloroplastech zelených listů. Redukce je silně závislá na intenzitě světla (Frankhauser a Brunold, 1978; Schmutz a Brunold, 1984). Dosud není známo, zda ostatní orgány jsou též schopny redukovat sírany. Sulfátová asimilační redukce v plastidech kořenů je zanedbatelná. U vyšších rostlin a u zelených řas je prvním krokem asimilace síry aktivace síranového iontu pomocí ATP. Asimilace síry začíná tedy tvorbou adenosinfosfosulfátu. Reakce je katalyzována ATP-sulfurylázou (ATP-sulfátadenyltransferázou). Tento enzym, který se nachází u mnoha druhů vyšších rostlin, je zde považován za hlavní sulfotransferázu. Je regulován různými vnějšími (např. světlo) a vnitřními (např. redukované sloučeniny síry) vlivy. Jak je ilustrováno na Obr. 15, reakce je výměnou sulfurylové skupiny, přenášené ze

síranu na ATP, za dvě fosfátové (fosforečnanové) skupiny, přičemž vzniká adenosinfosfosulfát (APS) a pyrofosfát ($P_2O_7^{4-}$).

APS se může fosforylovat pomocí ATP za vzniku fosfoadenosinfosfosulfátu (PAPS). PAPS je považován za univerzální donor sulfurylových skupin tvorby sulfoesterů (Schiff et al., 1993). PAPS-sulfotransferáza byla nalezena v bakteriích, cyanobakteriích i ve špenátu. Navazující, ještě komplikovanější proces asimilace (redukce) sulfurylové skupiny není dodnes zcela osvětlen. Na **Obr. 16** jsou popsány nejdůležitější reakční kroky, jak je popisuje Schiff et al. (1993). V této posloupnosti reakcí slouží APS jako donor sulfurylové skupiny.

Krok 1: APS přenáší svou sulfurylovou skupinu na enzym za tvorby sulfurylovaného enzymu (E-SH).

Krok 2: Sulfurylová skupina je přenesena na dosud neznámý nosič, na němž je vodík thiolové skupiny ($^{\cdot}SH$) substituován za sulfurylovou skupinu, čímž se vytvoří disulfidický můstek.

Krok 3: Sulfurylová skupina nosiče je redukována elektronem z ferredoxinu, čímž se vytvoří $^{\cdot}SH$ skupina vázaná na atom síry komplexu nosiče.

Krok 4: Thiolová skupina ($^{\cdot}SH$) je přenesena na acetylserin a cystein za vzniku kyseliny octové. Reakce vyžaduje dva elektrony, které poskytuje ferredoxin. Katalyzujícím enzymem je *o*-acetylserinsulfurhydroláza. Hawkesford et al. (1995) zjistili, že rostliny pěstované za naprostého nedostatku síry vykazovaly 5x vyšší aktivitu ATP-sulfurylázy a také zvýšenou aktivitu nosiče síry na plasmatické membráně.

Redukce sulfitové (siřičitanové, SO_3^{2-}) skupiny vázané na sulfidový (S^{2-}) nosič se pravděpodobně účastní thiosulfátreduktáza nebo sulfitreduktáza (Brunold, 1993). Volné sulfidové anionty (S^{2-}), katalyzované cysteinsyntázou, mohou reagovat s acetylserinem za tvorby cysteinu. Cystein, první stabilní produkt asimilační redukce sulfátů, se chová jako prekurzor syntézy všech ostatních sloučenin obsahujících redukovanou síru (Marschner, 1995).

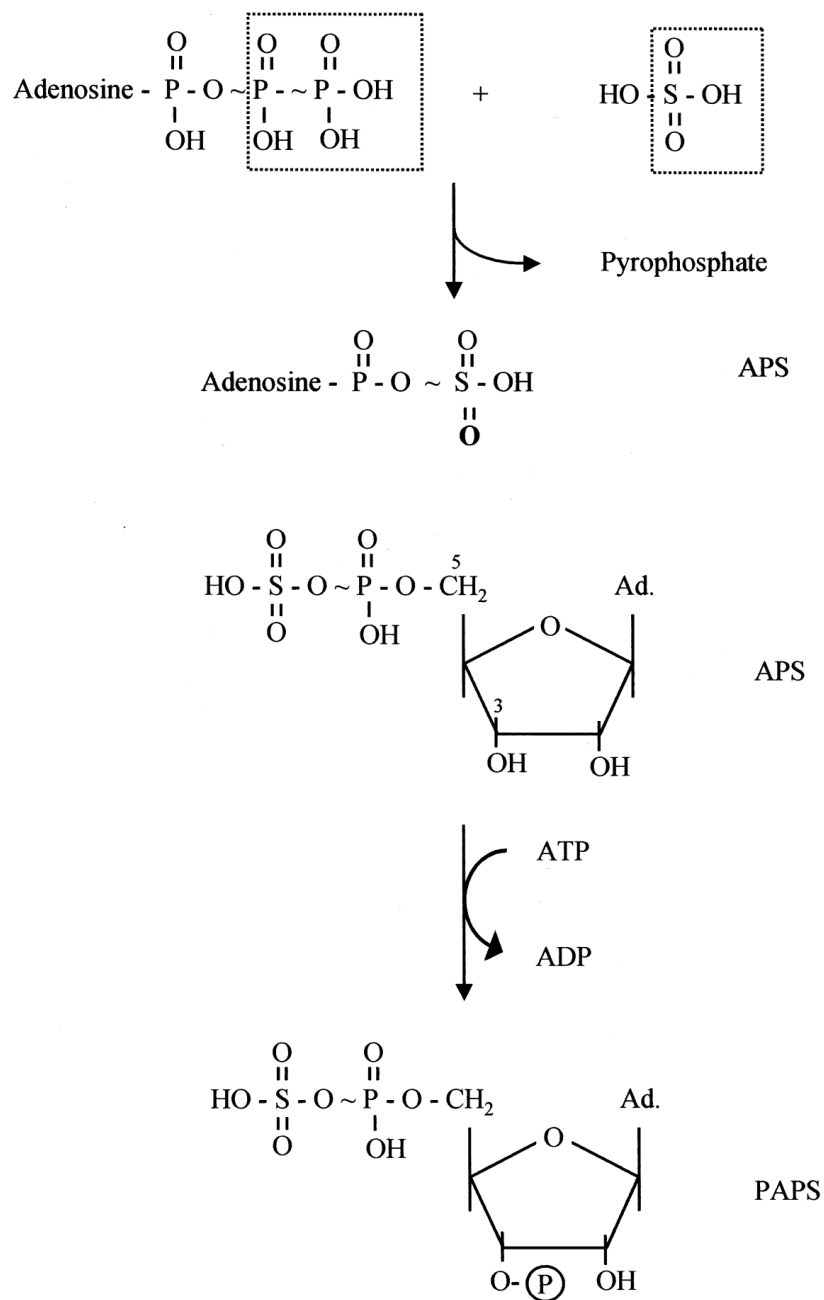
3.9 Tvorba výnosu a vliv na kvalitu sklizně u pšenice

Požadavky rostlin na celkovou síru se podstatně liší podle druhu plodiny a podle vývojového stádia rostliny. Obecně platí, že požadavky na síru jsou nejvyšší u rodů *Brassicaceae* a *Liliaceae* a nejmenší u drobnozrnných obilovin. Rod *Fabaceae* je svými nároky uprostřed těchto hodnot. Řepka olejná pěstovaná na semeno odčerpá z jednoho hektaru 20 - 30 kg S, zatímco obiloviny 10 - 15 kg S (Walker a Booth, 1992).

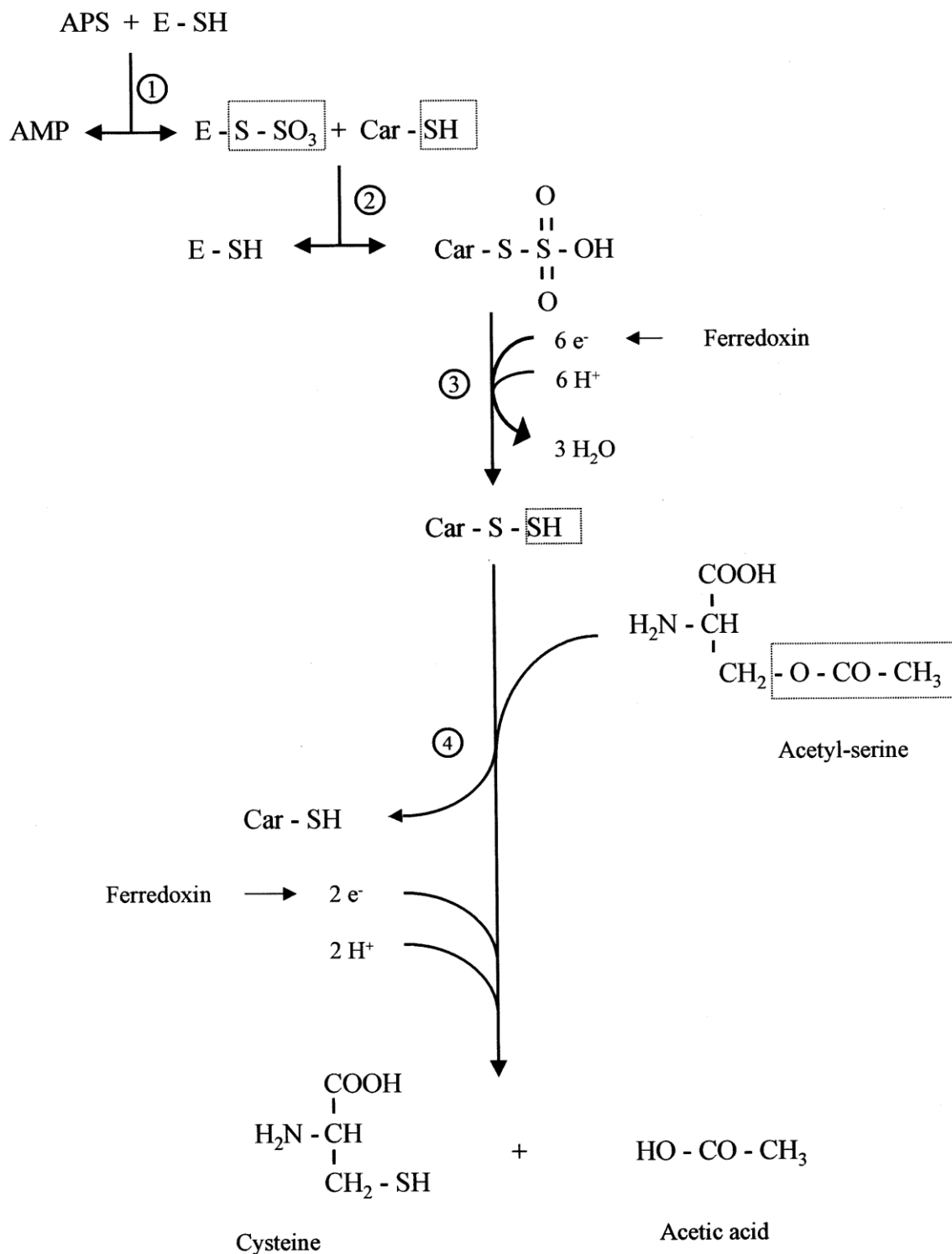
Pšenice má relativně nízký požadavek na přívod síry, který činí cca 20 kg S ha^{-1} při výnosu zrna 8 Mg ha^{-1} (McGrath et al., 1996). Přiměřená hladina síry v rostlině je nutná nejen pro uspokojivý růst plodiny, ale také k zajištění optimálních koncentrací aminokyselin obsahujících síru v znu. Zdá se, že rostlina pšenice v reprodukční fázi růstu je citlivější k nedostatku síry než ve fázi vegetativního růstu (Zhao et al., 1999a), přičemž za podmínek omezeného přívodu síry dochází ke snížení velikosti zrna. V nádobových pokusech s rostlinami pšenice za přívodu síry v různých stádiích vývoje od výsevu až do konce kvetení Haneklaus et al. (1995) zjistili, že pokud se má zabránit ztrátám na výnosu, je nutný opravný zásah dříve než se objeví symptomy nedostatku.

V polních podmínkách nejsou symptomy nedostatku síry u obilnin lehké identifikovatelné, protože mohou být zaměněny za projevy nedostatku dusíku. Ztráty na výnosech mohou nastat už v případě hraničních hodnot živiny, kdy se její nedostatek ještě neprojeví viditelnými symptomy (Zhao et al., 1996). Karmoker et al. (1991) dokázali, že první reakcí rostliny na omezení přívodu síry u ječmene je kumulace amidů v kořenech. Tito autoři také při nedostatku síry zaznamenali kumulaci asparaginu a glutaminu v listech. I když vlivem stresů z vnějšího prostředí může docházet ke kumulaci amidů (Rabe, 1990), účelnost

posuzování koncentrace amidů jako indikátoru nedostatku síry musí být dále potvrzena (Zhao et al., 1996).



Obr. 15: Tvorba adenosinfosulfátu (APS) a adenosin-3'-fosfo-5'-fosfosulfátu (PAPS)
Zdroj: Scherer (2001)



Obr. 16: Pravděpodobný sled reakcí redukce sulfátu (modifikováno podle Schiff et al., (1993)
IN Scherer (2001))

Ačkoliv jsou požadavky na síru u obilnin mnohem menší než u řepky, nedostatek síry zde zjistili už Scott et al. (1984) ve Skotsku. Při zkoumání úrodnosti na 44 stanovištích ve středním a severním Oregonu pozorovali Kauka (1993), Withers et al. (1995) a McGrath et al.

(1996) po aplikaci síry jen malé zvýšení výnosu zrna pšenice u výnosů pod 2 t/ha. Pokud však výnos překročil tuto hranici, 27 % stanovišť vykazovalo na aplikaci síry průkaznou odezvu.

Kromě vlivu aplikace síry na utváření výnosu má výživa sírou dopad na kvalitu sklizně. Požadavky na kvalitu jsou určeny zejména konečným užitím produktu. Castle a Randall (1987), kteří studovali vliv přívodu síry během tvorby zrna, zjistili, že jak syntéza, tak kumulace hlavních zásobních proteinů nastala u pšenice za nedostatečného přívodu síry dříve, než v případě jejího dostatečného přívodu. Tyto výsledky mohou být vysvětleny tak, že nedostatek síry zkracuje počáteční dobu vývoje zrna, která je charakterizována vysokou rychlostí dělení buněk a nízkou rychlostí akumulace proteinu.

Ve zralých zrnech pšenice je většina síry přítomna ve formě bílkovin obsahujících aminokyseliny s obsahem síry (methionin, cystein a cystin). Bylo provedeno několik studií s cílem určit, zda výživa plodiny sírou má vliv na obsah těchto aminokyselin. Obecně platí, že s vyšším obsahem síry stoupá obsah aminokyselin obsahujících síru. V souladu s tím zjistili Wrigley et al. (1980) a Byers et al. (1987) v nádobových pokusech s půdou za nedostatku síry, že její deficit má za následek snížení koncentrací methioninu a cysteinu v zrně, což vyjádřili jako procento celkových uvolněných aminokyselin. Dále nedostatek síry zvýšil obsah nebílkovinného dusíku. Zhao et al. (1999b) ukázali, že za omezené výživy sírou přednostně probíhá syntéza a akumulace na síru chudých zásobních bílkovin a podjednotek gluteninu o vysoké molekulární hmotnosti na úkor sírou bohatých proteinů.

Nedostatek síry u pšenice nejenom snižuje její výživovou hodnotu, ale má také nepříznivý vliv na pekařskou kvalitu mouky. Tímto problémem se zabývalo několik studií (Haneklaus et al., 1992; Haneklaus a Schnug, 1992). V sedmi polních pokusech v r. 1995 - 1996 s pšenicí tvrdou v různých oblastech pěstování v Anglii Zhao et al. (1999b) zjistili, že ve čtyřech pokusech byl objem bochníku chleba pečeného z mouky s dostatkem síry významně větší.

Zatímco odezvy na zvýšení výnosu byly omezeny na aplikaci 20 kg S ha⁻¹, další vzrůst v objemu bochníku nastal při aplikacích síry zvýšených až na 100 kg S ha⁻¹. Odezvy aplikace síry na pekařskou kvalitu pozorovali také Schnug et al. (1993) v Německu, kdy aplikace 46 kg S ha⁻¹ zvýšila objem bochníku (Rapid-mix-test) o 6 %.

Disulfidické můstky, tvořené mezi sulfhydrylovými (thiolovými, -SH) skupinami zbytků molekul cysteinu zodpovídají za polymerizaci frakcí glutelinu (Ewart, 1978). Polymerní gluteniny obsahují vazby, které spojují různé části jedné bílkoviny (vnější meziřetězcové vazby) a vazby, které spojují různé polypeptidy (vnitřní meziřetězcové vazby) a tudíž hlavně přispívají k elasticitě těsta (Shewry a Tatham, 1997). Mouka z pšenice s deficitní sírou dává vznik těstu se sníženou roztažností a zvýšeným odporem proti tahu, což má za následek snížený objem bochníku. Moss et al. (1983), zjistili že roztažnost těsta pozitivně korelovala s koncentrací síry v mouce v oblasti od 0,8 - 1,8 mg g⁻¹, zatímco s rostoucí koncentrací síry v mouce se odpor těsta snížil.

Některé odchylky ve velikosti odezvy koncentrace síry je tedy třeba přičíst rozdílům v příjmu dusíku. Protože síra i dusík jsou složky strukturálních proteinů, dají se očekávat interakce mezi oběma prvky (Rendig, 1986) a to, že rovnováha mezi sírou a dusíkem v zrně je zásadní pro pekařskou kvalitu pšenice (Randall a Wrigley, 1986). Eppendorfer (1975) zjistil lineární vzestup koncentrace methioninu, cysteinu a cystinu v sušině se stoupající koncentrací dusíku u drobnozrnných cereálií, s výjimkou pokusu bez přidání síry.

Udržovat vysokou koncentraci síry v zrně není důležité tolik pro krmnou pšenicí jako pro pšenicí pekařskou. Nicméně některé práce ukazují, že vážný nedostatek síry má za následek snížení koncentrací esenciálních aminokyselin v zrně a tedy i sníženou nutriční hodnotu krmiva (Randall a Wrigley, 1986).

Co se týká řepky olejné, upozorňují Schnug a Haneklaus (1994), že vzhledem k tomu, že v zemědělství severní Evropy je deficiencie síry jedním z hlavních problémů ve výživě

roślin, je zvláštní pozornost věnována rodu *Brassica* pro jeho vysoké nároky na síru. Totéž platí i pro ČR.

3.10 Projevy nedostatku síry u obilnin

Vzhledem ke klesajícím atmosférickým emisím síry se v evropských zemích stává stále důležitější znalost požadavků rostlin na síru (Eriksen, 1997a). Užitečnými nástroji, zřejmě se doplňujícími, jsou pro diagnostiku deficiencie síry analýzy půdy a rostliny (Ensminger a Freney, 1966). Rostliny však často nejeví nedostek síry včas, v době, kdy ještě možné uplatnit opravný zásah, a pak už bývá na nápravu pozdě (Scherer, 2001).

Typickým vizuálním projevem nedostatku síry na rostlinách je žloutnutí listů, které začíná od nejmladších listů a při trvalejším nedostatku síry přechází i na spodní listy. Projev nedostatku síry je podobný nedostatku dusíku, ale při nedostatku síry jsou počáteční příznaky vždy lokalizovány na vrcholové části rostlin (**Obr. 17**). Charakteristické také je, že rostliny špatně rostou, jsou slabé a nízké, jejich habitus připomíná strádající rostliny. Častý je výskyt houbových chorob a škůdců jako následek omezení produkce specifických látek obranného systému rostlin. V úvahu připadá i zvýšený infekční tlak některých chorob v důsledku snížení obsahu SO₂ v ovzduší (Vaněk, 2007).



Obr. 17: Projev nedostatku síry na pšenici pěstované na velmi lehké půdě s nízkým obsahem organické hmoty v Sussex County, Delaware. Patrná je všeobecná chloróza a žloutnutí zvláště nových přírůstků a značné zakrňování rostlin.

Zdroj: <http://agdev.anr.udel.edu/weeklycropupdate/?tag=barley&paged=3>

3.11 Analýza půdy

Vzhledem ke klesajícím atmosférickým emisím síry se v evropských zemích stává stále důležitější znalost požadavků rostlin na síru (Eriksen, 1997a). Užitečnými nástroji pro diagnostiku deficiencie síry, navzájem se doplňujícími, jsou analýzy půdy a rostliny (Ensminger a Freney, 1966). Rostliny však často nejeví nedostatek síry včas, v době, kdy je ještě možné uplatnit opravný zásah, a pak už bývá na nápravu pozdě.

K vyhodnocení obsahu síry v půdě byly vyvinuty různé zkušební metody, zahrnující chemickou extrakci různě vázaných forem síry, stanovení síry uvolněné v inkubačních pokusech nebo působením mikrobů (Jones, 1986). Koncentrace anorganické síry v půdách se během roku mění (Ghani et al., 1991) a je výsledkem změn rovnováhy mezi aktivitou mikrobiální biomasy, ztrátami vyplavením a povrchovým splavem, hnojením, stárnutím rostliny, atmosférickými vstupy a příjmem plodinou. Proto se každá analytická hodnota koncentrace síranů ve vzorku půdy vztahuje víceméně jen k té době, během které byl vzorek odebírán (Schnug a Haneklaus, 1998).

Ke stanovení různých kategorií síry v půdě byla vyvinuta mnohá extrakční činidla. K extrakci síry, která představuje její nejdostupnější formu (Shan et al., 1997), byla navržena voda (Walker a Doomenbal, 1972) nebo roztoky solí s CaCl_2 , NaCl nebo LiCl (Tabatabai, 1982; Saalbach a Aigner, 1987). Vzhledem k problémům s disperzitou v případě extrakcí vodou se dává přednost solným roztokům. Matula (1999) zjistil, že hlavní překážkou, která omezuje užití roztoku CaCl_2 ke stanovení vodorozpustné síry, je nebezpečí srážení síranů při extrakci, což má za následek snížení koncentrace síry v půdním extraktu. Potvrdil naopak výborně fungující korelaci mezi obsahem síry v rostlině a jejím obsahem získaným extrakcí vodou. Link (1997) stanovoval v časném jarním období přístupný síran ve vrstvě půdy 0 - 90 cm extrakcí půdy jednak 0,05 M CaCl_2 a jednak směsí 1 M NaCl + 0,2 M CaCl_2 . Pokusné pole s řepkou vykazovalo 11 - 238 kg síranů ha^{-1} se střední hodnotou 68 kg ha^{-1} . Určil, že hodnota 60 kg síranů ha^{-1} ve vrstvě půdy 0 - 60 cm je dostatečná k pokrytí požadavků řepky na síru. Timmermann et al. (1995) extrahovali půdu různými extrakčními činidly (H_2O ; 0,03 M H_3PO_4 ; směsí 0,01 M CaCl_2 + 0,02 M DTPA (kys. dietyltriampentaoctová); směsí $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + CH_3COOH) a nenašli vztah mezi extrahovanou sírou a příjmem síry řepkou. Tito autoři vyslovili domněnku, že poměr $N_{\min} : S_{\min}$ (oba parametry získané extrakcí směsí 0,01 M CaCl_2 + 0,02 M DTPA) je vhodnou pomůckou pro hnojení sírou, vhodnější než samotný obsah dostupné síry.

Pro kombinovanou extrakci rozpustných a adsorbovaných síranů byly doporučeny extrakce pomocí CaCO_3 (Williams a Steinbergs, 1959), NaHCO_3 (Kilmer a Nearpass, 1960) a roztokem octanu amonného (NH_4OAc , amoniumacetátu) (Bardsley a Lancaster, 1960). Tabatabai (1982) zjistil, že rozlišení mezi rozpustným a adsorbovaným anorganickým síranem je důležité zejména pro frakcionaci celkové síry ve vzorcích podorníci, kde jsou větší množství adsorbovaných síranů. K extrakci rozpustných a adsorbovaných síranů byly doporučeny roztoky obsahující fosfor jako KH_2PO_4 (Ensminger, 1954) nebo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (Fox et al., 1964). Oba roztoky obsahují dostatek fosfátů pro výměnu většiny adsorbované síry. Množství adsorbovaných síranů extrahovaných $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ se může lišit od hodnot < 1 až po několik tisíc mg kg^{-1} půdy. Vzájemná srovnání obou extrakčních činidel odhalila, že oběma metodami byla z půdy extrahována víceméně stejná množství síranů (Link, 1997).

Wada et al. (1994) zhodnotili použití běžného roztoku $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ s obsahem 500 mg P l^{-1} k extrakci rozpustného a adsorbovaného síranu. Jejich výsledky ukazují, že v případě pěti po sobě jdoucích extrakcí při poměru půda : roztok = 1 : 10 došlo ke kvantitativnímu uvolnění dodaného síranu a že vysušení vzorku půdy na vzduchu po aplikaci síranů nemělo vliv na jeho extrahovatelnost. Výsledky extrakce, které byly porovnány s odezvou plodiny na hnojení sírou u červeného jetele, jílku a pšenice v růstové komoře ukázaly, že roztok $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ je

ideálním extrakčním činidlem pro stanovení rostlinám přístupné půdní síry (Warman a Sampson, 1992).

Při stanovování požadavků pastvin na síru za použití různých rozborů půd zjistili Anderson et al. (1998), že tyto pokusy byly vesměs neúspěšné, protože extrakční činidla buď nadhodnotila nebo podhodnotila přístupnost sloučenin organické síry. Tito autoři došli k závěru, že výslednou schopnost půdy poskytovat síru podle potřeb plodiny je třeba dále ověřovat v polních pokusech, s ohledem na proces mineralizace a vyplavování síry.

Schoenau et al. (1993) referují o studii využití iontovýměnnou membránou k posouzení přístupnosti půdní síry rostlinám. Pro určení množství síry přístupné rostlinám se proužek aniontové výměnné membrány představovaný vrstvou bikarbonátu, vloží do půdy s obsahem vody odpovídající polní kapacitě. Po určité době je pruh odstraněn z půdy a promýván 0,5 M HCl. S klesajícím obsahem půdní vláhy a s klesající teplotou od 30° C do 4° C množství adsorbovaných síranů na membráně klesá. Byl zjištěn úzký vztah mezi množstvím síranů extrahovaných aniontovým membránovým iontoměničtem a roztokem 0,001 M CaCl₂. Nicméně koeficienty determinace (*r*) mezi celkovým příjmem síry řepkou a předpovězenou dostupností síry byly lepší pro metodu s membránovým iontoměničtem než pro extrakci s CaCl₂. Proto Schoenau et al. (1993) doporučili svoji metodu jako jednoduchý a účinný nástroj pro extrakci síranů z půdy a vyhodnocení stavu rostlinám přístupných síranů.

Protože sloučeniny organické síry jsou schopny doplnit zásobu anorganické půdní síry, platí pro půdy obsahující značná množství organické hmoty, že frakce organické síry by měly být chápány jako potenciální zdroj síry pro rostliny, což by mělo být vzato v úvahu při analýze půdní síry. Kromě toho alkalická síranová extrakční činidla jako je NaHCO₃ a CaCO₃ extrahují i část organické síry, přičemž NaHCO₃ extrahuje více organické síry než CaCO₃ (Tabatabai, 1982). Protože při vyšším pH je extrahováno více půdní síry, Kilmer a Nearpass (1960) vyslovili názor, že zásaditost roztoku NaHCO₃ je příčinou hydrolyzy půdní organické síry.

Stanovení mineralizačního potenciálu půd představuje inkubaci půdních vzorků za aerobních podmínek a stanovení množství síry uvolněné během pokusu. Nicméně inkubační metody k vyhodnocení přístupné síry včetně síry organických sloučenin síry, kopírující postup používaný při stanovení přístupného dusíku, se neseťkaly s úspěchem (Tabatabai a Bremner, 1972a), protože množství mineralizované síry je ovlivněno přítomností nebo absencí rostlin na pozemku (Nicolson, 1970). Předpokládá se, že v přítomnosti rostlinných kořenů je mineralizace vyšší, protože organická síra z kořenových exudátů a odumřelé části kořenů mohou být mineralizovány na sírany (Castellano a Dick, 1991). Mineralizace dále závisí na metodě inkubace. Množství síranů mineralizovaných za laboratorních podmínek je zpravidla nízké. V aerobním inkubačním pokusu s ornici z Iowy zjistili Tabatabai a Bremner (1972a), že během 10 týdnů bylo mineralizováno 2,8 mg S kg⁻¹, což představuje kolem 1,3% celkové půdní síry. Podle jejich výsledků množství mineralizovatelné síry nebylo významně korelováno s obsahy celkové půdní síry, síranů, celkového dusíku nebo celkového uhlíku. Eriksen (1994) zjistil, že za rok je mineralizováno 1,7 – 3,1 % zásoby půdní organické síry.

Mineralizace probíhala rychleji, když byl inkubační pokus prováděn v extrakční koloně s přerušovaným vyluhováním 0,01 M KCl (Tabatabai a Al-Khafaji, 1980).

Vhodnost užití půdní analýzy závisí na její korelaci s výnosem plodiny (Haneklaus a Schnug, 1994). V případě síry se stav síry v rostlině považuje za vhodný parametr ke kalibraci různých metod zkoušení půdy. Finck (1976) uvedl, že k výběru spolehlivé metody a spolehlivému stanovení deficitu síry a k účinnému použití hnojiv je nutný minimální koeficient korelace dat $r^2 = 0,84$.

Nesourodost mezi půdními analýzami síry a výkonností plodiny jsou obecně známy. Vlivy počasí a vymývání síranů limitují použitelnost půdních analýz ke stanovení odezvy rostlin na hnojení sírou (Robson et al., 1995).

3.12 Analýza rostlin

Obecně je přijímán názor, že analýza rostlinných tkání poskytuje pravdivější obraz o stavu síry v půdě než její rozbor, a tedy lepší podklad k posouzení nutnosti aplikace síry (Zhao et al., 1996). K tomuto účelu bylo navrženo několik diagnostických ukazatelů, avšak zatím bez obecné shody na tom, který z nich poskytuje nejlepší výsledky. Užití analýzy rostlin místo analýzy půdy k diagnóze deficitu síry v půdě je založeno na předpokladu, že každý esenciální prvek je přítomen v rostlině v takovém množství, které je právě dostatečné pro její neomezený růst (Ensminger a Freney, 1966).

K posouzení stavu síry v rostlině je často používána celková koncentrace síry v nadzemní části rostliny nebo v jejích specifických částech (Jones, 1986). Obecně platí, že kritická koncentrace síry závisí hlavně na druhu rostliny, ale také na odebrané části rostliny, stadiu vývoje a úrovni výnosu (Haneklaus a Schnug, 1994; Hahtonen a Saarela, 1995). K předpovědi výživného stavu rostliny sírou doporučují tito autoři odebrat k analýze mladší části rostlin a to v období nejvyšších požadavků na síru, tzn. od období dlouhivého růstu do začátku květu. Generativní materiál je pro diagnostické účely méně vhodný (Gupta, 1976). U jednoděložných je nejvhodnější praporečový list nebo celá rostlina před objevením druhého nodu (Bergmann, 1983). S rostoucím stářím rostliny klesají koncentrace síry (Robson et al. 1995). U dvouděložných rostlin jsou k analýze doporučovány mladé plně rozvinuté listy, ve kterých je koncentrace síry největší (Haneklaus a Schnug, 1996). K zamezení vzniku nejasností v interpretaci analytických dat by měly být části rostliny a časy vzorkování standardizovány (Jones 1986). Spencer et al. (1984) a Schnug (1989) uvádějí jako nejdůležitější argument proti použití celkové síry jako diagnostického kritéria stavu síry v rostlině závislost koncentrace síry na vývojovém stadiu rostliny. Freney et al. (1978) zjistili, že koncentrace celkové síry v nadzemních částech starších rostlinek pšenice je kolem $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny, klesá na cca $1,1 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny v polovině vegetace a je $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny v mléčné zralosti zrna. Obecně je kritická celková koncentrace síry kolem 2 g kg^{-1} sušiny, ale může dosahovat hodnot $1 - 3 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny i více.

Podle různých autorů je síranová síra citlivější ukazatel nedostatku než celková síra; je u ní totiž větší rozdíl mezi koncentrací u dostatečně zásobených rostlin a rostlin s deficitem síry. Koncentrace síranové síry v rostlinách mají vztah ke stavu síry v půdách u leguminóz (Jones a Martin, 1964) a u jílku vytrvalého a řepky olejné (Maynard et al., 1983). Toto platí obecně pro všechny analýzy rostlinných tkání. Koncentrace síranů ve vakuole je považována za spolehlivý indikátor výživového stavu sírou podobně jako je tomu u fosfátů (Bollons a Barraclough, 1997). Při nedostatku síry jsou sírany z kořenů a nadzemních částí během několika dnů mobilizovány. Někdy může se může dokonce zvýšit obsah síranů v dospělých listech, zatímco mladé listy trpí jejich nedostatkem (Cram, 1990). V rostlinných druzích s vyšším obsahem glukosinolátů může i po odebrání vzorku vzrůst koncentrace síranů vlivem jejich enzymatického štěpení (Schnug, 1988).

Jako index ke stanovení odezvy rostliny na hnojení dusíkem a obzvláště sírou se používá poměr N : S. Pokud jsou všechny růstové faktory kromě síry optimální, jsou kritické hodnoty poměru N : S jsou považovány stabilnější ukazatel v různých růstových stádiích rostlin než celková síra (Jones et al., 1980). Proto Rasmussen et al. (1977) uvádějí, že poměr N : S je lepší ukazatel stavu síry v rostlinné tkáni pšenice než její celková koncentrace.

Jeden z problémů použití poměru N : S je, že přebytek jednoho z těchto prvků může být interpretován jako nedostatek druhého. Dalším problémem je, že síra je v rostlinách značně nepohyblivá a starší listy mívají vyšší koncentraci síry než mladé, zatímco dusík je mobilní a mladé listy mívají koncentrace vyšší než listy staré (Pasricha a Fox, 1993). Proto není správné se domnívat, že poměr N : S je stabilnější u konkrétních rostlinných pletiv, stadií zralosti nebo stáří rostliny v porovnání s celkovou sírou nebo se sírany. Spencer a Freney (1980) ve studii na pšenici ukázali, a podobně Spencer et al. (1977) na jeteli, že kritická

hodnota poměru N : S je méně ovlivněna stářím rostliny a přívodem dusíku než kritická koncentrace celkové síry a je užitečným nástrojem diagnostiky deficiencie síry v obilninách a luskovinách.

Bell et al. (1995) zjistili, že kořeny rostlin reagují na přerušení přívodu síry rychlou kumulací amidů. Proto může analýza těchto sloučenin poskytnout včasnou informaci o stavu síry v rostlině (Zhao et al., 1996). Problematika koncentrace amidů jako včasného indikátoru nedostatku síry musí být potvrzena dalšími výzkumy.

3.13 Hnojiva s obsahem síry

V následující části jsou uvedena nejdůležitější hnojiva obsahující síru. Hnojení sírou je nejčastěji spojeno s použitím dusíkatých hnojiv, kdy je dusíkaté hnojivo vyráběné s přídavkem síry (např. močovina se sírou, LAS, DASA) nebo vícesložková hnojiva se sírou (např. Synferta N - 22). K základnímu hnojení dáváme přednost použití síranu amonného a dále draselných a hořečnatých hnojiv v síranové formě (síran draselný, Patentkali, Kieserit, hořká sůl aj.), zejména u rostlin, které nesnášejí chlór. K přihnojení během vegetace je výhodnější použití dusíkatých hnojiv s přídavkem síry (DASA, Sulfan, LAS aj.) (Vaněk et al., 2012).

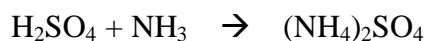
Dnes u nás používaná fosforečná hnojiva většinou neobsahují příliš mnoho síry (Balík et al., 1999), avšak v zahraničí se vyrábí i superfosfát obalovaný sírou s obsahem 27 - 45 % S (Tomáš, 1998). Ceccotti et al. (1998) uvádějí, že v roce 1995 tvořila fosforečná hnojiva 52 % celosvětově spotřebované síry. Přehled nejdůležitějších hnojiv obsahujících síru je uveden v **Tab. 1**.

Tab. 1: Přehled hnojiv s obsahem síry (podle Ryant et al., 2003):

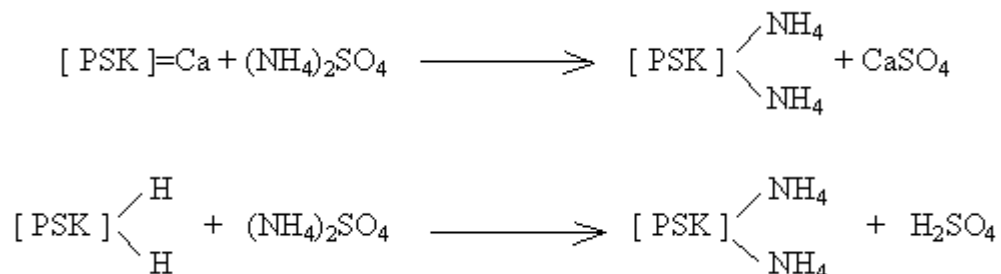
HNOJIVO	% síry	HNOJIVO	% síry
Síran draselný	18	Elementární síra	80 - 90
Síran hořečnatý	13	SAM 240	6
Kieserit	20 - 21	Pregips	16
Síran amonný	24	DASA	13
Superfosfát jednoduchý	11	HYDROSULFAN	5,6
Síran vápenatý	15 - 18	Fosmag MK	7
Patenkali	17	LAS 24 - 6	6
Kamex	4	GSH - různého složení	9 až 20
Kainit	8 - 10		

Síran amonný, (NH₄)₂SO₄

Důležité dusíkaté hnojivo užívané na celém světě. Obsahuje vedle 21% N také 24% S. Hodí se k základnímu hnojení (Vaněk et al., 2012). Dnes je síran amonný dostupný jako granulovaný materiál, s jednoduchou manipulací, který se může používat do sypkých směsí. Vyrábí se také ve formě čirého roztoku a suspenze (Hagstrom, 1986). Při 0°C nasycený roztok síranu amonného obsahuje 8,8% N a 10% S (Scherer, 2001). V půdách má síran amonný okyselující efekt. Je fyziologicky i chemicky kyselý. K acidifikaci dochází při nitrifikaci iontu amonného NH₄⁺, ze kterého vzniká kyselina dusičná HNO₃. Ekvivalent 100 kg hnojiva představuje 45 kg alkalicky působícího Ca, což odpovídá 112 kg uhličitanu vápenatého (Vaněk et al., 2012). Hagstrom (1986) uvádí síran amonný jako výborný zdroj přístupné síry pro rostliny. Síran amonný vzniká jako vedlejší produkt plynáren a koksáren, jako vedlejší produkt při výrobě kaprolaktamu, popř. se vyrábí přímo. Přímá výroba spočívá v neutralizaci kyseliny sírové plynným amoniakem podle rovnice (Tesař et al., 1992):



Síran amonný se v půdě rychle rozpouští v půdním roztoku a vstupuje do výměnných reakcí s kationty kapalné i tuhé půdní fáze. Značná část kationtů NH_4^+ přechází do půdního sorpčního komplexu výměnou za jiné kationty (Hlušek et al., podle Ryant et al., 2003):



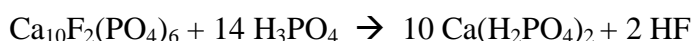
Snižuje se tím pohyblivost iontů NH_4^+ a tím možnost vyplavení v humidnějších podmínkách. Hodí se k plodinám, které snášejí kyselou reakci (brambory, oves, žito, pohanka) (Ryant et al., 2003).

Jednoduchý superfosfát, JSP

Hnojivo obsahující 8% P a 12 - 14% S se vyrábí reakcí přírodní fosfátové horniny s kyselinou sírovou H_2SO_4 . Obsahuje směs dihydrogenfosforečnanu vápenatého $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a sádry CaSO_4 v poměru zhruba 1 : 1 (Scherer, 2001). Vyrábí se z přírodních fosfátů rozkladem kyselinou sírovou o koncentraci 62 - 70%. V počátku reakce uvolní kyselina sírová z povrchu tuhých částic fosfátu kyselinu fosforečnou za vzniku sádry a fluorovodíku:



V dalším vzniklá kyselina ortofosforečná rozkládá zbývající fosfát v reakční směsi za tvorby dihydrogenfosforečnanu vápenatého, který je vodorozpuštěným fosforečným hnojivem (Ryant et al., 2003):



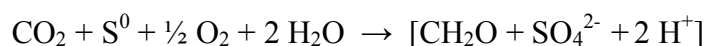
Jednoduchý superfosfát byl po mnoho let široce rozšířen a běžně používané fosforečné hnojivo. V posledních 40 letech se jeho význam snižuje a průmysl nabízí spíše amonizované fosfáty a kombinovaná hnojiva (Hagstrom, 1986).

Dnes se síran amonný a jednoduchý superfosfát považují za hnojiva víceživinová, dodávající spíše síru než pouze dusík nebo fosfor (Ceccotti, 1994).

Elementární síra, S^0

Elementární síra, žlutá, inertní, ve vodě nerozpustná pevná krystalická látka, je stále častěji používána jako alternativní hnojivo s obsahem síry v zemědělství Nového Zélandu (Ghani et al., 1997). Tato nejkoncentrovanější forma síry s nízkými náklady na dopravu a aplikaci se může rozprašovat přímo na povrch půdy. Aby se síra zpřístupnila rostlinám, musí se oxidovat na síran. Rychlost oxidační reakce je ovlivňována velikostí částice elementární síry (Donald and Chapman, 1998). V případě malých částic probíhá oxidace rychle a efekt hnojení odpovídá řádově hnojení síranovými hnojivy (Watkinson, 1993). Příčina tohoto jevu je připisována většímu specifickému povrchu, který je k dispozici pro mikrobiální kolonizaci. Nejdůležitější skupinou organismů oxidujících síru jsou autotrofní bakterie rodu *Thiobacillus*.

Thiobacily jsou typické chemolitotrofní bakterie. Tisdale et al. (1993) popisují jejich aktivitu následovně:



Weir (1975) doporučuje užívat částice elementární síry o různé velikosti, aby v delším časovém úseku docházelo ke stejnoměrnému uvolňování síranu. Janzen a Bettany (1987) upozornili na další fyzikální faktory, jako vlhkost půdy a teplota, které hrají důležitou roli při oxidaci síry. Lawrence a Germida (1988) poukázali na důležitou úlohu velikosti a aktivity heterotrofní mikrobiální biomasy v oxidaci síry v zemědělských půdách. Síra se oxiduje rychleji v půdách, ve kterých je přítomna početná aktivní mikrobiální populace. Půdy v oblastech se středními a hojnými srážkami a s nedostatkem síry mohou profitovat z aplikace elementární síry, která nepodléhá ztrátám z vyplavování (Donald a Chapman, 1998). Výzkum obsahu elementární síry v porovnání se síranu ve Skotsku ukázal ekvivalentní účinnost elementární síry aplikované na začátku vegetační doby (Walker and Booth, 1992).

Gupta et al. (1988) poukazují na negativní dopad opakované aplikace elementární síry na zemědělskou půdu, kdy vesměs docházelo k významnému poklesu pH a obsahu organického uhlíku. Kromě toho byla redukována aktivita mikrobiální půdní biomasy a biomasy hub. Byl též pozorován negativní dopad na aktivitu různých půdních enzymů.

K překonání problémů s manipulací s jemně mletou sírou, které omezovaly užití jemně mleté síry jako hnojiva (Beaton and Fox, 1971) se v poslední době na trhu objevují ve stále větší míře nová hnojiva s obsahem síry. Zájem se obrací k hnojivům s pomalým uvolňováním síry, jako například k takovým, která obsahují jak jemně mleté částice síry spolu s rychleji se uvolňujícími, ale také snadněji vyplavení podléhajícími síranu (Braithwaite and Brown, 1994). Granulací sodného bentonitu s roztavenou sírou vznikají tvrdé, stabilní a neprášivé granule. Po navlhčení se rozpadají a uvolňují do půdy jemně mletou síru. Přístupnost síry rostlinám z granulovaných bentonitů s obsahem síry je však běžně menší, než přístupnost z vodorozpustných síranů (Hagstrom, 1986). Ačkoliv v polních pokusech bylo dosaženo dobrých výsledků s experimentálními produkty (Boswell a Friesen, 1993), ukázalo se, že komerční výroba je neekonomická (Braithwaite a Brown, 1994).

Elementární síra byla již dříve úspěšně využita v granulovaných hnojivech typu NPK, trojitým superfosfátu a amonných fosfátech (Coleman, 1966).

Síra působí také fungicidně, ale výrazně snižuje hodnotu půdní reakce (Finck, 1982; Eriksen et al., 1998; Richter et al., 1999). Její spotřeba roste v oblastech, kde hrozí vyšší vyplavení síranů. Po její aplikaci však není přímo přístupná rostlinám, a proto je doporučováno aplikovat spolu s elementární sírou i malé množství síranové síry (Solberg et al. IN Eriksen et al., 1998). Tandon (1992) doporučuje aplikovat elementární síru 3 - 4 týdny před setím, aby mohla být oxidována na rostlinám přístupný síran. Její použití je podle autora zvláště efektivní na alkalických, vápenatých půdách. Při pokusech Mitchella a Mullinse (1990) vykazovala elementární síra v porovnání s thiosíranovou a síranovou sírou stejný efekt.

Také foliární aplikace elementární síry nachází své opodstatnění. Její využitelnost závisí zejména na schopnosti adheze k vnitřnímu nebo vnějšímu povrchu listu, která odolá smyvu srážkovou vodou.

Další skupinou hnojiv, ve kterých nachází užití elementární síra, jsou hnojiva typu „slow release“. Síra se používá k obalování vodorozpustné granule hnojiva. Pomalu rozpustná síra jednak brání poškození mladých rostlinek při jednorázové aplikaci vyšší dávky dusíku, jednak zabraňuje velkým ztrátám vyplavením živin, opět hlavně dusíku, a tím poškození životního prostředí. Příkladem takového hnojiva je močovina obalovaná sírou (SCU) (32 - 37% N a 14 - 30% S).

Síran vápenatý CaSO₄, sádra

Již v 19. století bylo u nás doporučováno hnojení **sádro**, zejména pro pěstování jetele na semeno (Duchoň, 1948). Později se s nástupem síranových forem hnojiv a superfosfátu, který obsahuje 50 % sádry, její spotřeba omezila (Duchoň, Hamppl, 1959). Dnes lze pozorovat návrat k jejímu používání, obsahuje 12-18 % síry a měla by se aplikovat na půdy s optimální půdní reakcí (Richter et al., 1999).

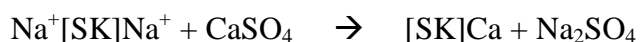
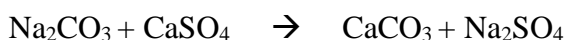
Síran vápenatý (sádra) podle původu a stupně hydratace obsahuje 14 - 18% síry. Vyznačuje se nízkou rozpustností ve vodě. Podle Yan and Mengel (1992) se sádra uplatňuje jako vhodné hnojivo s obsahem síry, které také dodává do půdy vápník.

Protože přirozený sádrovec se vyskytuje málo, využívá se více odpadní fosfosádra od výroby kyseliny fosforečné. Je to hnojivo fyziologicky kyselé a slouží jako meliorační prostředek pro zúrodnování zasolených půd. K odstranění půdní kyselosti ji využívat nelze, protože je to sloučenina silné kyseliny a silné zásady. Po vytěsnění H⁺ z nenasyceného sorpčního komplexu vápníkem ze sádry do půdního roztoku se s ionty SO₄²⁻ vytvoří H₂SO₄ a tím se ještě více prohloubí půdní kyselost. V posledních letech je možno použít také odpadní sádrovec **Pregips H**. Pregips H, hydratovaný síran vápenatý **CaSO₄ · 2 H₂O**, je práškové hnojivo obsahující vápník a síru. Pregips H je syntetický síran vápenatý vyrobený neutralizací vyčleněných kyselých vod z výroby titanové běloby vodnou suspenzí velmi jemně mletého vápence. Hnojivo je určeno pro základní hnojení sírou a vápníkem zemědělských plodin ve všech půdních a klimatických podmínkách.

Jako odpad při výrobě dvojitého superfosfátu nebo kyseliny fosforečné byla získávána **fosfosádra** s obsahem síry 8 - 10 %. Tento produkt však nenabyl širšího uplatnění i přes jeho pozitivní vliv na fyzikální vlastnosti půdy (Duchoň, Hamppl, 1959; Tomáš, 1998). Použitím fosfosádry jako zdroje síry pro pícniny na Floridě se zabýval Rechcigl (1992) a jako zdroj síry je využívána také v zemědělství Indie (Tandon, 1992).

Sádrování zasolených půd

Zásaditá reakce půd je podmíněna přítomností Na⁺ v sorpčním komplexu a CaCO₃ v půdním roztoku. Vzniká alkalická reakce pH 8,3 - 11, přičemž dochází k peptizaci a translokaci minerálních i organických koloidů, které ve spodní části profilu koagulují a tam se shromažďují. Takovéto půdy mají špatné fyzikální vlastnosti, těžko se obdělávají a jejich využití je minimální pro malou úrodnost. Přítom alkalická reakce je škodlivá pro kulturní rostliny. Pro zlepšení vlastností a proto obtížně vyplavitelných sloučenin sodíku na silně disociovanou a snadno vyplavitelnou sloučeninu Na₂SO₄ (Ryant et al., 2003):



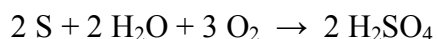
Při velkém množství Na₂SO₄ je třeba jej odstranit promýváním. Dávka sádry se pohybuje v rozmezí 3 - 12 t/ha, při zavlažování se může snížit o 25 - 30 %. Efektivnost sádrování se zvyšuje hlubokou orbou při současném hnojení iontů Na⁺ v sorpčním komplexu nad 10%. Průkazný vliv sádrování na úrodnost se projevuje po dobu 8 - 10 let, efekt se rok od roku zvyšuje (Ryant et al., 2003).

Thiosíran amonný, sirnatan amonný, (NH₄)₂S₂O₃

Thiosíran amonný, bílá pevná látka, je zdroj síry s vysokou rozpustností a dobrou mísitelností s různými dalšími ionty. Je používán v tekutých hnojivech (Ceccotti, 1994). Komerční produkt obsahuje ve vodném roztoku 12 % N a 26 % S. Je mísitelný v libovolném poměru s vodným roztokem čpavku a s dusíkatými roztoky stejně tak jako s neutrálními či

slabě kyselými fosfáty ve formě suspenzí. Thiosíran amonný se dá dobře použít jako kapková závlaha i k postřiku. Po aplikaci se v půdě rozkládá na téměř shodná množství elementární síry a síranu. Výsledky výzkumu z Arizony dokladují, že thiosíran amonný účinně snižuje pH půdy (Stroehlein and Pennington, 1986).

Oxidace elementární síry na síran, konečný produkt této reakce, způsobuje acidifikaci půdy. Proto se, pokud je pokles půdního pH žádoucí, aplikace elementární síry úspěšně používá v mnoha částech pro rekultivaci vápenitých půd (Stroehlein a Pennington, 1986). Po aplikaci má být elementární síra zapravena do půdy, kde je oxidována půdními mikroorganismy za tvorby H_2SO_4 . Tvorba sulfátů může být zjednodušeně vyjádřena takto:



Nejpříznivější podmínky pro mikrobiálně oxidační reakci jsou v oblasti tenze par půdní vlhkosti blízko polní kapacity s ostrým poklesem pod a nad touto hladinou vlhkosti (Konopka et al., 1986).

Polysulfid amonný (NH_4S_x)

Polysulfid amonný je doporučován k užití do vodných roztoků amoniaku i do koncentrovaného amoniaku. Společná aplikace polysulfidu amonného a bezvodého amoniaku je v některých malých obilninářských oblastech v USA běžný způsob, jak do půdy dodat jak dusík, tak síru (Tisdale et al., 1993).

Síran hořečnatý, hořká sůl, $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ (Bittersalz)

Hlavní složkou hnojiva je síran hořečnatý heptahydrát. Obsahuje 10% hořčíku a 13% síry. Slouží jako výborný zdroj síry zejména na půdách s nízkým obsahem hořčíku. Dobře se rozpouští ve vodě, proto je vhodným hnojivem pro listovou aplikaci ve formě 2 - 4% roztoku. Hodí se k základnímu hnojení i přihnojování během vegetace (Vaněk, 2007). Reaguje fyziologicky kysele, doporučuje se tedy na půdy neutrální až zásadité. (Ryant et al., 2003). Může se kombinovat s kapalnými hnojivy (DAM - 390, NP roztoky).

Další skupinou hnojiv s obsahem síry jsou **vícetložková hnojiva**. Většinou jsou to směsná dusíkatá hnojiva, kde základem je dusičnan amonný s přídatkem síry ve formě síranu amonného nebo síranu vápenatého, nebo hnojiva typu NPK se sírou, nebo močovina s přídatkem síranu amonného nebo síranu vápenatého.

Kieserit ESTA, síran hořečnatý s příměsí chloridu draselného, $MgSO_4 + KCl$

Dodává se v krystalické nebo v granulované formě. Je směsí síranu hořečnatého a chloridu draselného. Obsahuje asi 15% hořčíku, 21% síry a maximálně 3% chlóru. MgO . Používá se k základnímu hnojení i k přihnojování během vegetace (Vaněk, 2007).

DASA, ledek amonný se sírou (LAS), síran amonný a dusičnan amonný, ledek síranoamonný ($NH_4NO_3 \cdot (NH_4)_2SO_4$ (26% N, 13% S)

Hnojivo je určeno pro regenerační přihnojování během vegetace (Ložek et al., 1997). , nebo Hydrosulfan (24 % N, 5,6 % S). U tohoto hnojiva se uplatňuje jako přídatek síran vápenatý. V Lovosicích je vyráběn ve dvou variantách. S poměrem N : S = 24 : 6 nebo 27 : 4. V registru hnojiv je pak uveden ledek amonný se síranem vápenatým - LAS 24 + 6 % S a LAS ledek amonný se síranem vápenatým s obsahem 27 % N a 4 % S. Kromě toho firma Hydro dodává dvě hnojiva, a to Hydro sulfan 24 N+5 S a HYDRO SULFAN 24 N + 5,6 S, jejichž podstatou je rovněž ledek amonný se síranem vápenatým (Ryant et al., 2003). Do této skupiny hnojiv patří řada dalších obdobných hnojiv rozdílných komerčních názvů.

Síran - fosforečnan amonný $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$

Síran - fosforečnan amonný, který je upřednostňován jako fosforečné hnojivo v severozápadním Pacifiku, západně od USA, obsahuje 8 % P, 16 % N a 13 % S (Scherer, 2001). Protože je nehygroskopický, může se používat pro výrobu sypkých směsí. Vzhledem k jeho kyselé povaze je na každých 100 kg tohoto hnojiva nutné použít 75 - 110 kg uhličitanu vápenatého k jeho neutralizaci (Hagstrom, 1986).

Síran draselný K_2SO_4 a síran draselno - hořečnatý $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$

Hojně používaná draselná hnojiva k plodinám citlivým na chloridy jsou síran draselný K_2SO_4 (42 % K a 18 % S) a síran draselno - hořečnatý $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$ (25 % K, 6 % Mg, 18 % S) (Finck, 1992), (Tomáš, 1998). V těchto hnojivech se kromě hnojení draslíkem a hořčíkem významně uplatňuje síra (Ceccotti, 1994). Dříve běžně používaný síran draselný se vzhledem k jeho cenové náročnosti aplikuje v omezeném množství. Vzniká podvojnými reakcemi mezi KCl a MgSO_4 . Je to bílý až nažloutlý prášek s obsahem 42 % draslíku. Obsahuje 17 – 18 % síry (Vaněk, 2007). Obsah chlóru nemá překročit 2 %. Používá se k plodinám citlivým na chlór - hnojení tabáku, chmelnic, vinohradů, při předseťové přípravě nebo do krátkodobé zásoby také při hnojení brambor a některých zelenin. Z Německa se dováží toto hnojivo také pod názvy Síran draselný - Hortisul a Hortisul (síran draselný) s obsahem 52 % K_2O a 18 % S (Ryant et al., 2003).

Patentkali (Kalimagnesia) $\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$

Jde o hnojivo granulované, ve kterém je převážná část draslíku (80 - 90 %) vázána v síranové formě. Je to směs síranu draselného a hořečnatého. Obsahuje minimálně 23,5 % draslíku, 6 % hořčíku, 18 % síry a maximálně 3 % chlóru. Doporučuje se aplikovat zejména k plodinám citlivým na chlór a náročným na hořčík (zelenina, drobné ovoce, peckoviny, okrasné dřeviny) (Vaněk, 2007).

Magnesia – Kainit (KA), Kainit s hořčíkem, $\text{MgSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KCl} + \text{NaCl} + \text{CaSO}_4$

Granulované draselno – hořečnaté hnojivo je směsí síranu hořečnatého, síranu draselného, síranu vápenatého, chloridu draselného a chloridu sodného. Je dobře rozpustný ve vodě. Obsahuje 7,5 % draslíku, 2,5 % hořčíku, 8 – 10 % síry, 15 % sodíku a 29 % chlóru. Doporučuje se aplikovat na půdy s nízkou zásobou hořčíku, na travní porosty a pícniny a ke hnojení řepy a ječmene. Hnojivo je třeba aplikovat delší dobu před setím. Na půdách lehkých s nízkou zásobou hořčíku se aplikuje při přípravě půdy (Vaněk, 2007).

Kamex granulovaný (KX), $\text{KCl} + \text{MgSO}_4 + \text{NaCl}$

Obsahuje 33% draslíku, 3,6 % hořčíku, 4 % síry, 3 – 4 % sodíku a 36 % chlóru. Je směsí chloridů sodného a draselného a síranu hořečnatého. Hodí se k halofytním rostlinám, je nevhodné na těžké jílovité půdy náchylné ke slévání (Vaněk, 2007).

Významnou roli sehraávají také **kapalné formy** hnojiv se sírou. Pro svou rozpustnost a slučitelnost s různými ionty je výhodným zdrojem síry např. **thiosíran amonný**, jehož obchodní forma jako 60 % vodný roztok obsahuje 12 % N a 26 % S. Aplikovat jej lze přímo na půdu nebo se závlahovou vodou na list. V půdě se rozkládá na přibližně stejné množství síranů a elementární síry. Dalšími zdroji síry mohou být také thiosíran draselný (25 % K, 17 % S) a **thiosíran vápenatý**, pokusně aplikovaný v USA (Ceccotti, 1994).

Obsah a formy síry v organických hnojivech

Vzhledem k tomu, že se na značnou část zemědělské půdy aplikuje **prasečí a hovězí kejda**, zkoumali Eriksen et al. (1995) formy a přístupnost síry v kejdách. Obsah síry v kejdě

se může značně lišit v závislosti na druhu zvířat a druhu a množství krmiva (Bird a Hume, 1971). Koncentrace celkové síry v kejďě se pohybuje mezi 0,15 – 0,7 kg S . m⁻³ (Eriksen et al., 1995). Pedersen et al. (1998) uvádějí, že celková síra ve stájovém hnoji se sestává ze 40% síry vázané na uhlík, 20% sulfidické síry a kolem 40% organické a anorganické sulfátové síry.

Poměr N : S se v prasečí kejďě pohybuje od hodnot 13 : 1 do 25 : 1, v hovězí kejďě od 7 : 1 do 17 : 1. Pokud budeme uvažovat průměrnou hodnotu obsahu celkové síry v hovězí kejďě kolem 0,35 kg/m³, pak aplikace 50 m³/ha dodá do půdy 17,5 kg síry (Eriksen, 1997b). Protože kejda už před aplikací na půdu prošla značnou dekompozicí, podle nádobových pokusů se obsah přístupné síry v hovězí a prasečí kejďě pohyboval jen mezi 5 - 7%. Předpokládá se, že v polních podmínkách bude ještě nižší (Eriksen et al., 1995). Eriksen et al. (1998) považuje za velice obtížné vyhodnotit agronomický význam aplikace síry v kejďě, protože labilní síra z moči může být snadno vyplavena, zatímco stabilnější formy síry z výkalů musí být nejdříve mineralizovány. Proto je stájový hnůj jako zdroj síry pro rostliny považován autory za téměř bezcenný a v praxi jej nezahrnují mezi hnojiva s obsahem síry, i když může obsahovat značné množství síry. Ani působení reziduí vlivem dlouhodobé aplikace stájového hnoje nemělo významný vliv na hladinu dostupné síry pro plodiny s krátkou vegetační dobou (Eriksen a Mortensen, 1999).

4.0 Materiál a metody

Hlavním cílem pokusu bylo testování vlivu stupňovaného hnojení sírou v hnojivu Lovofert (24 % N, 6 % S ve formě CaSO₄) na obsah mobilní síry v půdě, celkové síry v rostlinách a výnosy pšenice ozimé a řepky ozimé (jako kontrolní plodiny) a využití případných pozitivních výsledků jako diagnostických prostředků k optimalizaci hnojení sírou.

4.1 Půdně klimatická charakteristika pokusných míst a agrochemická charakteristika pokusných míst

Práce byla zaměřena na určení vlivu aplikace dusíkatého hnojiva se sírou u pšenice ozimé. Řepka ozimá je uvedena jako další plodina, k porovnání dosažených výsledků.

Pokus zaměřený na aplikaci dusíku spolu se sírou u pšenice ozimé a řepky ozimé v hůře přístupné formě síranu vápenatého byl založen roku 2008 na stanovištích Humpolec, Hněvčeves (pšenice ozimá a řepka ozimá) a Uhříněves (jen řepka ozimá v letech 2008 a 2009). Půdně klimatické charakteristiky těchto stanovišť jsou uvedeny v Tab. 2 a základní agrochemické charakteristiky v Tab. 3. Obsahy živin zde byly stanoveny v extraktu Mehlich 3 (Mehlich, 1984).

Tab. 2: Půdně klimatická charakteristika pokusných míst

Stanoviště (zkratka okresu)	nadmoř. výška (m)	průměrné roční		půdní typ	půdní druh
		srážky (mm)	teplota (°C)		
Hněvčeves (HK)	265	573	8,2	HM	jh
Humpolec (PE)	525	665	7,0	KM	ph
Uhříněves (Praha)	295	575	8,3	HM	jh

Tab. 3: Agrochemická charakteristika pokusných míst

Stanoviště	P	Ca	Mg	K	pH
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	0,01 M CaCl ₂
Hněvčeves	81	2970	105	143	5,9
Humpolec	97	1343	102	156	5,1
Uhříněves	137	2793	133	153	6,6

4.2 Postup při provedení pokusu

Schéma pokusů je uvedeno v Tab. 4 a Tab. 5. Jednotlivé varianty byly založeny vždy ve čtyřech opakováních. První dávka hnojiv byla u obou plodin aplikována vždy na jaře (fáze regeneračního hnojení). U pšenice byly dávky hnojiv aplikovány ve fázi regenerace a pak ve fázích BBCH 30 - 32 a BBCH 57 - 59. Druhá a třetí dávka u řepky následovala ve fázích BBCH 30 - 32 a BBCH 50 - 52.

V průběhu pokusů byly pravidelně prováděny odběry rostlinného a půdního materiálu. Půdní i rostlinné vzorky byly odebírány v termínu dosažení růstových fází uvedených v Tab. 6. Listy byly odebírány vždy nejmladší, nejméně z 80 % vyvinuté.

Ke stanovení celkové síry v rostlinném materiálu byl proveden tzv. suchý rozklad vzorku. Odebraná nadzemní hmota rostliny se usuší a rozdrtí. Poté se podrobí suchému (mikrovlnnému) rozkladu při 500°C. Vzorky se pak rozpustí v 1,5 % kyselině dusičné (Mader

et al., 1998). Vzniklý extrakt byl analyzován pomocí optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP - OES) (Varian VistaPro, Australia).

Odebrané půdní vzorky byly extrahovány vodným výluhem modifikovaným dle Luscombe et al. (1979). Navážka 10 g jemnozeme (< 2 mm) byla zhomogenizována a doplněna do 100 ml demineralizovanou vodou. Vzorky byly protřepávány 1 hodinu na třepače. Vodné výluhy byly pak zfiltrány. Vzniklé extrakty byly analyzovány na obsah rostlinám přístupné síry pomocí optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP - OES).

K vyhodnocení výsledků byl použit program Excel (Excel, 2010) a k podrobnějším statistickým analýzám program STATISTICA (StatSoft, 2016), kde byla provedena analýza ANOVA, při použití Scheffého testu pro stanovení průkaznosti rozdílů.

Tab. 4: Schéma hnojení pšenice ozimé

Varianta	rozdělení dávek síry	Lovofert		množství N z LAV (kg N/ha)	rozdělení dávek N kg N/ha			celkem kg N/ha
		kg S/ha	kg N/ha		1.	2.	3.	
A	0 + 0 + 0	0	0	200	80	80	40	200
B	10 + 0 + 0	10	40	160	80	80	40	200
C	20 + 0 + 0	20	80	120	80	80	40	200
D	20 + 20 + 0	40	160	40	80	80	40	200

Tab. 5: Schéma hnojení řepky ozimé

Varianta	rozdělení dávek síry	Lovofert		množství N z LAV (kg N/ha)	rozdělení dávek N kg N/ha		celkem kg N/ha
		kg S/ha	kg N/ha		1.	2.	
A	0 + 0 + 0	0	0	200	100	100	200
B	12,5 + 0 + 0	12,5	50	150	100	100	200
C	25 + 0 + 0	25	100	100	100	100	200
D	25 + 25 + 0	50	200	0	100	100	200

Tab. 6: Schéma odběrů rostlinného materiálu a půdy

Rostlina	fáze	odebrané části rostliny	hloubky odběru půdy v cm
řepka	vstupní odběry	nadzemní hmota	0 - 30, 30 - 60
	BBCH 18 - 20	30 listů (cca 5 g sušiny), nadz. hmota.	0 - 30
	BBCH 30 - 32	30 listů (cca 5 g sušiny), nadz. hmota.	0 - 30
	BBCH 50 - 52	30 listů (cca 5 g sušiny), nadz. hmota.	0 - 30
	po sklizni	sláma, semeno	0 - 30
pšenice	vstupní odběry	-----	0 - 30, 30 - 60
	BBCH 26 - 28	listy (cca 10 g sušiny), nadz. hmota	0 - 30
	BBCH 30 - 32	listy (cca 10 g sušiny), nadz. hmota	0 - 30
	BBCH 37 - 39	listy (cca 10 g sušiny), nadz. hmota	0 - 30
	BBCH 49 - 51	listy (cca 10 g sušiny), nadz. hmota	0 - 30
	po sklizni	sláma, zrno	0 - 30

5.0 Výsledky

5.1 Výsledky - ozimá pšenice

Ze vstupních odběrů (Tab. 7) je zřejmé, že vyšší obsahy mobilní síry byly stanoveny téměř vždy v podorničí. Obsahy síry se zde pohybovaly mezi 1,1 a 14,6 mg S/kg a často bylo dosaženo výrazných rozdílů mezi jednotlivými bloky.

Obsahy síry v ornici byly naproti tomu vyrovnané a pohybovaly se mezi 0,8 a 5,2 mg S/kg. Nejnižší hodnoty byly podobně jako u řepky naměřeny v roce 2008. Mezi roky 2009 a 2010 nebyly zjištěny významné rozdíly.

Tab. 7: Obsahy mobilní síry v půdě (mg S/kg) v odběrech před hnojením

	Blok	2008		2009		2010	
		0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
Hněvčeves pšenice	1	1,6	2,3	4,5	7,7	2,8	7,8
	2	1,5	2,3	3,5	6,3	3,3	6,0
	3	1,5	1,7	2,8	5,4	5,2	14,6
	4	1,6	1,5	2,2	5,1	3,9	2,7
Humpolec pšenice	1	1,8	2,1	3,9	7,2	5,3	8,5
	2	0,8	1,1	3,3	11,8	3,3	4,6
	3	1,3	2,0	2,6	8,3	3,9	4,7
	4	2,2	3,3	2,4	8,2	2,6	3,6

Výsledky průběžných analýz půdních vzorků odebraných ve vybraných vegetačních fázích jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8: Průměrné obsahy mobilní síry v půdě - stanoviště Hněvčeves a Humpolec

veg. fáze	var.	2008	2009	2010	průměr	dávka S*
		mg S/kg				kg/ha
BBCH 26-28	A	3,0	8,7	18,8	10,1	0
	B	4,7	11,1	17,6	11,1	10
	C	8,9	11,7	15,6	12,0	20
	D	7,2	9,4	17,7	11,4	20
BBCH 30-32	A	2,6	3,5	10,1	5,4	0
	B	3,4	5,4	12,1	7,0	10
	C	4,6	5,9	15,5	8,6	20
	D	5,7	5,6	10,7	7,3	20
BBCH 37-39	A	3,4	3,5	13,0	6,6	0
	B	2,7	5,9	11,9	6,8	10
	C	3,1	9,0	15,2	9,1	20
	D	11,7	13,0	14,8	13,1	40
BBCH 49-51	A	1,1	3,5	10,9	5,1	0
	B	2,1	7,2	11,2	6,8	10
	C	1,9	9,6	7,1	6,2	20
	D	9,0	14,2	8,8	10,6	40
po sklizni	A	0,4	5,7	8,2	4,7	0
	B	0,6	5,6	6,7	4,3	10
	C	0,8	5,9	5,8	4,2	20
	D	1,4	8,4	8,0	5,9	40

Rozdíly mezi variantami hnojení nebyly statisticky průkazné, a proto bylo možné stanovit pouze určité trendy ve změnách obsahu mobilní síry v závislosti na hnojení. Kontrolní, sírou nehnojená varianta vykazovala ve všech sledovaných vegetačních fázích nejnižší obsahy mobilní S v půdě. Nejvyšší obsahy byly naproti tomu zpravidla stanoveny u varianty hnojené 40 kg S/ha, a to zejména ve vegetační fázi BBCH 37-39, kdy byl rozdíl oproti ostatním variantám dokonce statisticky průkazný. Nejvyšší průměrné obsahy mobilní síry byly stanoveny ve vegetační fázi BBCH 26-28. To lze vysvětlit tím, že ještě v plné míře neprobíhal odběr síry rostlinami.

V Tab. 9 jsou uvedeny výnosy ozimé pšenice hnojené podle stanovené metodiky dávkami od 0 do 40 kg S/ha. V porovnání s později zmiňovanou řepkou ozimou nebyly rozdíly ve výnosech pšenice ozimé tak výrazné. Nejnižší výnosy byly zjištěny zpravidla na kontrolní, sírou nehnojené variantě, nejvyšší zpravidla u varianty hnojené 40 kg S/ha. Rozdíly mezi variantami však nebyly statisticky průkazné. Na stanovišti Hněvčeves bylo dosahováno vždy vyšších výnosů než v Humpolci. Průměrné výnosy byly ve všech ročnicích podobné a pohybovaly se okolo 10 t/ha.

Na stanovišti Humpolec byly zjištěny výraznější rozdíly mezi variantami hnojení. Nejnižší výnosy byly zjištěny vždy na kontrolní variantě a nejvyšší naopak na variantě hnojené nejvyšší dávkou síry. Průměrný rozdíl mezi těmito variantami činil 0,3 t/ha. Vyšší efektivitu hnojení sírou lze zdůvodnit menší úrodností stanoviště v porovnání s Hněvčevsi. Na stanovišti Humpolec byly zaznamenány vyšší rozdíly mezi výnosy v jednotlivých ročnicích. V roce 2008 zde průměrný výnos zrna pšenice činil 9,9 t/ha, v roce 2009 7,3 t/ha a v roce 2010 pouze 7,0 t/ha. To bylo pravděpodobně způsobeno především rozdílnými povětrnostními podmínkami v daných ročnicích.

Tab. 9: Výnosy zrna ozimé pšenice při 14 % vlhkosti (t/ha)

	Blok	2008	2009	2010
Hněvčeves	A	10,24	9,47	10,65
	B	10,86	9,43	10,65
	C	10,54	9,52	10,61
	D	10,70	9,65	10,67
Humpolec	A	9,72	7,20	6,79
	B	9,77	7,24	7,00
	C	9,96	7,23	7,03
	D	10,00	7,48	7,17

K doplnění informací o efektivitě hnojení sírou byl průběžně sledován i výživný stav porostu charakterizovaný procentem celkové síry v nadzemní hmotě i v nejmladších listech. Výsledky jsou zaneseny v Tab. 10.

Podobně jako u ozimé řepky se ani zde nevyskytovaly průkazné rozdíly mezi sledovanými variantami, ani nelze usuzovat na vzestupné tendence obsahu síry v nadzemní hmotě nebo v listech se stoupající dávkou síry v hnojivu. Byly však pozorovány určité rozdíly v obsahu síry v závislosti na vegetačních fázích.

Nejvyšší obsahy síry v nadzemní hmotě pšenice byly zaznamenány ve vegetační fázi BBCH 26 - 28, poté docházelo k postupnému poklesu až po BBCH 49 - 51. To lze rovněž vysvětlit působením zředovacího efektu. Podobného trendu bylo na obou stanovištích dosaženo i u odebraných nejmladších listů. Zde byly obsahy síry zpravidla vyšší než v nadzemní hmotě.

Tab. 10: Průměrné obsahy síry v nadzemní hmotě a v listech oz. pšenice (2008 - 2010)

veg. fáze	var.	Hněvčeves	Humpolec	Hněvčeves	Humpolec	dávka S*
		Nadzemní hmota		Nejmladší listy		
		%				
BBCH 26-28	A	0,27	0,24	0,22	0,39	0
	B	0,31	0,28	0,25	0,40	10
	C	0,28	0,31	0,26	0,45	20
	D	0,29	0,29	0,26	0,48	20
BBCH 30-32	A	0,21	0,20	0,29	0,34	0
	B	0,24	0,20	0,32	0,35	10
	C	0,23	0,17	0,34	0,31	20
	D	0,22	0,17	0,35	0,31	20
BBCH 37-39	A	0,16	0,15	0,30	0,29	0
	B	0,17	0,15	0,32	0,28	10
	C	0,17	0,16	0,32	0,30	20
	D	0,16	0,16	0,33	0,32	40
BBCH 49-51	A	0,10	0,10	0,26	0,25	0
	B	0,09	0,11	0,26	0,28	10
	C	0,12	0,08	0,28	0,25	20
	D	0,11	0,12	0,32	0,31	40

5.2 Výsledky - ozimá řepka

Experimenty s ozimou řepkou byly realizovány podobně jako s ozimou pšenicí, tj. během pokusu byly průběžně monitorovány změny obsahů mobilní síry v půdě.

Před obdobím jarní regenerace byly analyzovány vzorky ornice a podorničí za účelem zjištění původních hodnot mobilní síry v půdě před zahájením pokusu. Výsledky analýz jsou znázorněny v Tab. 11.

Obsahy síry v ornici byly u všech stanovišť nižší než v podorničí. To bylo pravděpodobně způsobeno vyšší biologickou aktivitou v ornici a částečně i odběrem síry rostlinami. Obsahy síry se poměrně výrazně lišily v závislosti na ročníku a zřejmě tedy i na termínu odběru. Zatímco se průměrné obsahy síry v ornici v letech 2008 a 2010 pohybovaly v úzkém rozmezí mezi 2 a 3 mg/kg, v roce 2009 činila průměrná hodnota přibližně 7 mg S/kg.

Rozdíly mezi stanovišti nebyly statisticky průkazné. Podstatné je, že obsahy síry v ornici byly ve všech sledovaných blocích vyrovnané a stanoviště tedy byla vhodná k založení experimentu.

Tab. 12: Obsah mobilní síry v půdě (mg S/kg) - vstupní odběry před hnojením

	Blok	2008		2009		2010	
		0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
Hněvěves	1	5,4	6,3	8,6	13,3	3,50	7,07
	2	1,6	2,0	8,1	14,4	2,45	3,02
	3	1,2	1,8	5,7	13,9	2,36	2,54
	4	1,5	2,3	10,3	14,8	1,61	2,08
Humpolec	1	2,5	2,2	7,6	10,0	3,35	10,56
	2	1,9	8,2	6,2	8,2	4,47	8,35
	3	1,9	2,9	3,9	5,7	2,93	13,21
	4	3,0	3,5	4,0	6,2	3,57	7,01
Uhříněves	1	1,8	2,3	3,4	7,5	---	---
	2	2,3	2,1	6,8	7,3	---	---
	3	1,5	1,7	8,8	15,1	---	---
	4	1,7	7,3	8,2	10,1	---	---

Obsahy síry v půdě po aplikaci hnojiv vykazovaly v rámci sledovaných ročníků podobné trendy, a proto je v Tab. 12 uveden pouze průměrný obsah S na jednotlivých stanovištích.

Tab. 12: Průměrné obsahy síry v půdě z let 2008, 2009 a 2010

veg. fáze	var.	Hněvěves	Humpolec	Uhříněves*	průměr	dávka S**
		mg S/kg				
BBCH 18-20	A	5,3	4,8	4,7	4,9	0
	B	9,0	5,9	4,7	6,5	12,5
	C	8,2	7,0	11,3	8,8	25
	D	13,1	11,3	13,2	12,5	25
BBCH 30-32	A	6,7	5,6	4,4	5,6	0
	B	14,4	6,0	5,2	8,5	12,5
	C	14,1	5,7	6,6	8,8	25
	D	12,9	7,1	6,6	8,9	25
BBCH 50-52	A	3,7	5,1	5,2	4,7	0
	B	9,8	6,8	10,5	9,0	12,5
	C	7,4	11,3	8,9	9,2	25
	D	12,1	9,7	17,7	13,2	50
po sklizni	A	14,3	5,5	8,0	9,3	0
	B	16,7	6,0	10,2	11,0	12,5
	C	16,4	6,8	8,8	10,7	25
	D	17,0	8,1	10,5	11,9	50

Jak je zřejmé, hnojení sírou ve formě CaSO₄ zpravidla pozitivně ovlivnilo obsah mobilní síry v půdě. Nejnižší obsahy byly vždy naměřeny na kontrolní sírou nehnojené variantě a nejvyšší naopak zpravidla na nejvíce hnojených variantách. Mezi jednotlivými stanovišti se přitom nevyskytovaly výrazné rozdíly. V experimentu nebyly zaznamenány výrazné změny v obsahu mobilní síry v půdě mezi odběry v jednotlivých vegetačních periodách. Pouze v odběrech po sklizni došlo zpravidla k mírnému zvýšení obsahu mobilní S v půdě. To bylo pravděpodobně způsobeno částečným uvolněním síry z rostlinných zbytků.

Průměrné obsahy mobilní síry v půdě u kontrolní sírou nehnojené varianty dosahovaly 4,9 mg S/kg ve vegetační fázi BBCH 18-20, 5,6 mg S/kg v BBCH 30-32, 4,7 mg S/kg v BBCH 50-52 a po sklizni došlo ke zvýšení na 9,3 mg S/kg. Naproti tomu u nejvíce hnojené varianty, kam bylo postupně dodáno 50 kg S/ha bylo naměřeno 12,5 mg S/kg (BBCH 18-20), 8,9 mg S/kg (BBCH 30-32), 13,2 mg S/kg (BBCH 50-52) a 11,9 mg S/kg (po sklizni).

Je tedy zřejmé, že hnojení sírou ve formě CaSO_4 pozitivně ovlivnilo obsahy mobilní síry v půdě. Je však nutné současně dodat, že uvedené hodnoty vypovídají pouze o určitých trendech změn v obsazích síry v půdě. Při provedení podrobnější statistické analýzy bylo zjištěno, že rozdíly mezi variantami nebyly zpravidla statisticky průkazné.

V Tab. 13 jsou uvedeny výnosy semene ozimé řepky dosažené v experimentu s hnojivem Lovofert LAS. Jak je zřejmé, nejvyšších výnosů bylo dosahováno na stanovišti Hněvčeves, kde bylo v roce 2010 dosaženo dokonce extrémních výnosů pohybujících se okolo 7 t/ha. V ostatních případech se výnosy semene pohybovaly běžně v rozmezí 3 - 4 t/ha. Pokus nebyl realizován pouze na stanovišti Uhříněves v roce 2010, kdy došlo ke špatnému přezimování porostu.

Při srovnání jednotlivých variant hnojení bylo zjištěno, že nejvyšší výnosy vykazovaly téměř vždy varianty hnojené 50 kg S/ha, tedy nejvyšší dávkou S. Nejnižších výnosů bylo naopak dosaženo na kontrolní, sírou nehnojené variantě. Z tabulky je tedy patrné, že se stoupající dávkou síry do půdy stoupaly zpravidla i výnosy semene ozimé řepky. Při podrobnější statistické analýze bylo zjištěno, že rozdíly mezi variantami hnojení nebyly statisticky průkazné a proto lze pouze usuzovat na pozitivní trendy ve výnosu se stoupající dávkou síry do půdy.

Tab. 13: Průměrné výnosy semene ozimé řepky v t/ha

	Blok	2008	2009	2010
Hněvčeves	A	3,93	4,05	6,84
	B	4,21	4,36	6,88
	C	4,03	4,54	6,85
	D	4,33	4,90	7,02
Humpolec	A	3,06	3,13	2,70
	B	3,27	3,15	4,00
	C	3,15	3,27	3,59
	D	3,25	3,21	4,48
Uhříněves	A	3,65	4,17	---
	B	3,49	4,18	---
	C	3,59	4,23	---
	D	3,64	4,87	---

Další součástí experimentu bylo sledování obsahu celkové síry v rostlinách ozimé řepky a tím i posouzení faktu, zda se s dodáním vyššího množství síry ve formě CaSO_4 do půdy zvýší i obsah S v rostlinném materiálu. Za tímto účelem byl měřen obsah síry v celé nadzemní hmotě i v nejmladších, nejméně z 80 % vyvinutých listech.

Výsledné obsahy celkové síry v nadzemní hmotě i v listech jsou uvedeny v Tab. 14 a Tab. 15. Z dosažených výsledků vyplývá, že hnojení sírou se na obsahu síry v nadzemní hmotě rostlin výrazně neprojevovalo.

Průkazné rozdíly mezi jednotlivými variantami nebyly prakticky pozorovány. V odběrech provedených ve vegetačních fázích BBCH 18 - 20 a BBCH 30 - 30 byly výsledky velmi vyrovnané a pohybovaly se v rozmezí 0,41 - 0,45 % S.

Ve vegetační fázi BBCH 50 - 52 došlo k mírnému poklesu na průměrných 0,33 - 0,36 %S. To lze vysvětlit působením zředovacího efektu, vznikajícího intenzivní tvorbou nadzemní biomasy. Tento efekt byl nejlépe pozorovatelný na stanovišti Humpolec, kde k poklesu obsahu S v nadzemní hmotě došlo již ve druhém odběru (BBCH 30-32). Pro bližší určení vlivu hnojení S na rostliny je rovněž vhodné vypočítat odběry S rostlinou. Důležitějším cílem tohoto pokusu však bylo hodnocení výnosů a proto byly z pozemku odebírány pouze vzorky pěti rostlin, které byly pro reprezentativní výpočet odběrů nedostačující.

Tab. 14: Průměrné obsahy síry v nadzemní hmotě ozimé řepky z let 2008, 2009 a 2010

veg. fáze	var.	Hněvčeves	Humpolec	Uhříněves*	průměr	dávka S**
		%				
BBCH 18-20	A	0,40	0,51	0,39	0,43	0
	B	0,41	0,52	0,40	0,44	12,5
	C	0,44	0,51	0,41	0,45	25
	D	0,44	0,49	0,38	0,44	25
BBCH 30-32	A	0,50	0,41	0,31	0,41	0
	B	0,52	0,44	0,34	0,43	12,5
	C	0,52	0,46	0,34	0,44	25
	D	0,53	0,48	0,34	0,45	25
BBCH 50-52	A	0,38	0,28	0,35	0,34	0
	B	0,38	0,31	0,39	0,36	12,5
	C	0,35	0,30	0,33	0,33	25
	D	0,33	0,30	0,37	0,33	50

Obsahy síry v nejmladších listech byly podobné jako v celé nadzemní biomase, pouze ve vegetační fázi BBCH 50 - 52 byly zaznamenány obsahy vyšší. To bylo pravděpodobně způsobeno faktem, že rostlina transportovala síru ze starších orgánů do mladších. Obecně se tedy nepotvrdil předpoklad, že výživný stav porostu se bude lépe odrážet v obsahu S v mladších listech, protože rozdíly mezi variantami hnojení byly podobné jako v nadzemní hmotě statisticky neprůkazné.

Tab. 15: Průměrné obsahy síry v listech ozimé řepky z let 2008, 2009 a 2010

veg. fáze	var.	Hněvčeves	Humpolec	Uhříněves*	průměr	dávka S**
		% S				
BBCH 18-20	A	0,46	0,55	0,36	0,46	0
	B	0,47	0,58	0,37	0,47	12,5
	C	0,41	0,57	0,36	0,45	25
	D	0,42	0,58	0,38	0,46	25
BBCH 30-32	A	0,52	0,38	0,38	0,43	0
	B	0,54	0,40	0,40	0,45	12,5
	C	0,49	0,38	0,44	0,44	25
	D	0,48	0,39	0,46	0,44	25
BBCH 50-52	A	0,43	0,45	0,33	0,40	0
	B	0,40	0,43	0,34	0,39	12,5
	C	0,39	0,44	0,35	0,39	25
	D	0,40	0,44	0,38	0,41	50

6.0 Diskuse

Z analýz půdy od roku 1981 do roku 2007 vyplývá, že během této doby došlo k znatelnému poklesu obsahů všech frakcí minerální síry v půdě (Kulhánek et al., 2013). Důvody pro menší vstupy síry do půdy jsou jednak ekologické (odsíření elektrárenských a teplárenských provozů), jednak to, že se ve větší míře pěstují odrůdy náročnější na síru a používá se méně hnojiv s balastní sírou (např. jednoduchý superfosfát).

Menší vstupy této důležité živiny se již projevují v méně příznivých hodnotách různých frakcí síry v půdě. Problematice hnojení sírou je v současnosti věnováno po právu stále více odborných prací, jak ostatně vyplývá z provedené rešerše.

Z dlouhodobých přesných pokusů ÚKZÚZ vyplývá, že např. v r. 2007 došlo ke snížení koncentrací vodorozpustné síry na polovinu oproti r. 1981, kdy byly běžné hodnoty 20 mg S/kg půdy. V dalším jsou diskutovány změny obsahu vodorozpustné síry v půdě a v rostlině v pokusu prováděném v letech 2008 - 2010 s pšenicí ozimou a pro porovnání s řepkou ozimou. Obsah vodorozpustné síry do 8 mg S/kg půdy je těmito autory už považován za nízký.

6.1 Pšenice ozimá

6.1.1 Porovnání obsahů mobilní síry v půdě před hnojením a po sklizni

Na stanovištích s pšenicí ozimou byl zjištěn obsah mobilní síry v půdě (vstupní odběry před hnojením) v ornici od 0,8 - 2,2 mg S/kg půdy pro rok 2008, od 2,2 - 4,5 mg S/kg půdy pro rok 2009 a od 2,61 - 5,3 mg S/kg půdy pro rok 2010.

Pro podorničí činily hodnoty od 1,5 - 3,3 mg S/kg půdy pro rok 2008, od 5,1 - 11,8 mg S/kg půdy pro rok 2009 a od 2,7 - 14,6 mg S/kg půdy pro rok 2010.

Vstupní odběry pro Hněvčeves ukázaly hodnoty pro ornici od 1,5 - 1,6 mg S/kg půdy v r. 2008, od 2,2 - 4,5 mg S/kg půdy v r. 2009, od 2,8 - 5,2 mg S/kg půdy v r. 2010. Na stejném stanovišti (Hněvčeves) byly hodnoty pro podorničí od 1,5 - 2,3 mg S/kg půdy v r. 2008, od 5,1 - 7,7 mg S/kg půdy v r. 2009 a od 2,7 - 14,6 mg S/kg půdy v r. 2010.

Na stanovišti Humpolec byly vstupní hodnoty obsahu vodorozpustné síry pro ornici od 0,8 - 2,2 mg S/kg půdy v r. 2008, od 2,4 - 3,9 mg S/kg půdy v r. 2009, od 2,6 - 5,3 mg S/kg půdy v r. 2010. Na stejném stanovišti (Humpolec) byly hodnoty pro podorničí od 1,1 - 3,3 mg S/kg půdy v r. 2008, od 7,2 - 11,8 mg S/kg půdy v r. 2009 a od 3,6 - 8,5 mg S/kg půdy v r. 2010 (Tab. 11).

Po sklizni (na obou stanovištích) byly průměrné obsahy vodorozpustné síry na nehnojené variantě A 4,7 mg S/kg půdy, na variantě B (dávka síry 10 kg/ha) 4,3 mg S/kg, na variantě C (20 kg/ha) 4,2 mg S/kg a na variantě D (40 kg S/ha) 5,9 mg S/kg.

Z porovnání hodnot obsahů vodorozpustné síry v půdě před hnojením a po sklizni v pokusu s pšenicí ozimou vyplývá, že hnojení sírou ve formě CaSO_4 pozitivně ovlivnilo obsahy mobilní síry v půdě. Při provedení podrobnější statistické analýzy se ukázalo, že rozdíl mezi variantami nebyly zpravidla statisticky průkazné.

Proto můžeme pouze usuzovat, že uvedené hodnoty vypovídají pouze o určitých trendech změn v obsazích síry v půdě. Ukazuje se, že některé naměřené hodnoty koncentrací vodorozpustné síry v našem pokusu lze v souladu s tvrzením autorů (Kulhánek et al., 2013) považovat za nízké, dokonce horší, než ukázala jejich stanovení v r. 2007. Důvodem může být jednak odběr síry rostlinou, jednak stále se zhoršující negativní bilance vstupů síry do půdy (od r. 2007 dále) a jednak probíhající imobilizace síranů do organických sloučenin způsobená mikrobiální aktivitou.

6.1.2 Porovnání obsahů mobilní síry v ornici a v podorničí

Ze vstupních odběrů před hnojením (Tab. 12) je rovněž zřejmé, že vyšší obsahy mobilní síry byly stanoveny téměř vždy v podorničí. Obsahy vodorozpustné síry se zde

pohybovaly mezi 1,1 a 14,6 mg S/kg. Mezi jednotlivými bloky byly často výrazné rozdíly v obsahu vodorozpustné síry.

Obsahy vodorozpustné síry v ornici byly naproti tomu vyrovnanější a pohybovaly se mezi 0,8 a 5,3 mg S/kg. Nejnižší hodnoty byly podobně jako u řepky naměřeny v roce 2008. Mezi roky 2009 a 2010 nebyly zjištěny významné rozdíly.

Vstupní odběry před hnojením nevykazovaly zpravidla rozdíly mezi variantami hnojení (totéž platilo pro řepku ozimou). V podorničí byly naměřené obsahy mobilní síry vždy vyšší než v ornici. To může být způsobeno také tím, že svrchní vrstva půdy adsorbuje méně aniontů SO_4^{2-} než podorniční vrstva, protože kumulace organické hmoty a fosfátů je považována za hlavní faktor, který blokuje adsorpční místa síranových aniontů. Ani v literatuře (viz rešerše) neexistuje na otázku vlivu hloubky půdního profilu na adsorpci síranového aniontu jednoznačná odpověď.

Některé práce ukazují, že hlubší vrstvy půdního profilu jeví menší kapacitu adsorpce síranu (Barton et al., 1999), jiné (Couto et al., 1979) však zaznamenaly s hloubkou půdního profilu rostoucí adsorpci síranového iontu. Johnson a Todd (1983) zjistili, že adsorpce síranů je v negativní korelaci s obsahem půdní organické hmoty. Jako důvod uvádějí, že adsorpční místa Fe a Al hydroxidů mohou být blokována anionty organické půdní hmoty a rovněž fakt, že vyšší obsah síranů v podorniční vrstvě může být způsoben přítomností organických aniontů, vzniklých rozkladem organické půdní hmoty, v ornici. Martinez et al. (1998) uvádějí, že tyto anionty mohou účinně ovlivnit adsorpci síranů obsazením adsorpčních míst, přičemž přednostně se adsorbují částice s vyšším počtem funkčních skupin obsahujících kyslík (Inskeep, 1989). V důsledku tohoto jevu vykazují tedy spodnější horizonty půdy větší sorpci síranů.

6.1.3 Porovnání obsahů mobilní síry v půdě po aplikaci hnojiv

Rozdíly mezi variantami hnojení opět zpravidla nebyly statisticky průkazné, a proto lze popisovat pouze určité trendy ve změnách obsahu mobilní síry v závislosti na hnojení. Kontrolní, sírou nehnojená varianta vykazovala ve všech sledovaných vegetačních fázích nejnižší obsahy mobilní síry v půdě. Již po aplikaci první dávky hnojiv v období jarní regenerace došlo ke zvýšení obsahů mobilní síry v půdě. Toto zvýšení bylo zpravidla patrné i v dalších sledovaných vegetačních fázích.

Nejvyšší obsahy vodorozpustné síry v půdě byly zpravidla stanoveny u varianty hnojené 40 kg S/ha, a to zejména ve vegetační fázi BBCH 37 - 39, kdy byl rozdíl oproti ostatním variantám dokonce statisticky průkazný. Hodnoty zde dosahovaly 11,7 mg S/kg půdy v r. 2008, 13,0 mg S/kg půdy v r. 2009 a 14,8 mg S/kg půdy v r. 2010, přičemž průměrná hodnota pro tuto variantu byla 13,1 mg S/kg půdy. Nejvyšší průměrné obsahy mobilní síry byly stanoveny ve vegetační fázi BBCH 26 - 28, kde po řadě pro varianty A - D hodnoty činily 10,1 mg S/kg půdy, 11,1 mg S/kg půdy, 12,0 mg S/kg půdy a 11,4 mg S/kg půdy. Tuto skutečnost je možné vysvětlit tak, že ještě v plné míře neprobíhal odběr síry rostlinami.

Z výsledků vyplývá, že hnojení sírou ve formě CaSO_4 pozitivně ovlivnilo obsahy mobilní síry v půdě, i když se při provedení podrobnější statistické analýzy ukázalo, že rozdíly mezi variantami nebyly zpravidla statisticky průkazné. Proto je možné tedy jen usuzovat na určité trendy změn v obsazích síry v půdě.

6.1.4 Porovnání obsahů celkové síry v rostlinách pšenice ozimé po aplikaci hnojiv

Součástí pokusu bylo sledování obsahu vodorozpustné síry v rostlinách ozimé pšenice a tím i posouzení faktu, zda se s dodáním vyššího množství síry ve formě CaSO_4 do půdy zvýší i obsah síry v rostlinném materiálu.

Obecně je přijímán názor, že analýza rostlinných tkání poskytuje pravdivější obraz o stavu síry v půdě než její rozbor, a tedy lepší podklad k posouzení nutnosti aplikace síry (Zhao et al., 1996). K tomuto účelu bylo navrženo několik diagnostických ukazatelů, avšak zatím bez obecné shody na tom, který z nich poskytuje nejlepší výsledky. Užití analýzy rostlin místo analýzy půdy k diagnóze deficitu síry v půdě je založeno na předpokladu, že každý esenciální prvek je přítomen v rostlině v takovém množství, které je právě dostatečné pro její neomezený růst (Ensminger a Freney, 1966).

K posouzení stavu síry v rostlině je často používána celková koncentrace síry v nadzemní části rostliny nebo v jejích specifických částech (Jones, 1986). Obecně platí, že kritická koncentrace síry závisí hlavně na druhu rostliny, ale také na odebrané části rostliny, stadiu vývoje a úrovni výnosu (Haneklaus a Schnug, 1994; Hahtonen a Saarela, 1995). K předpovědi výživného stavu rostliny sírou doporučují tito autoři odebírat k analýze mladší části rostlin a to v období nejvyšších požadavků na síru, tzn. od období dlouhivého růstu do začátku květu.

Generativní materiál je pro diagnostické účely méně vhodný (Gupta, 1976). U jednoděložných je nejvhodnější praporečkový list nebo celá rostlina před objevením druhého nodu (Bergmann, 1983). S rostoucím stářím rostliny klesají koncentrace síry (Robson et al. 1995). U dvouděložných rostlin jsou k analýze doporučovány mladé plně rozvinuté listy, ve kterých je koncentrace síry největší (Haneklaus a Schnug, 1996). K zamezení vzniku nejasností v interpretaci analytických dat by měly být části rostliny a časy vzorkování standardizovány (Jones 1986). Spencer et al. (1984) a Schnug (1989) uvádějí jako nejdůležitější argument proti použití celkové síry jako diagnostického kritéria stavu síry v rostlině závislost koncentrace síry na vývojovém stadiu rostliny. Freney et al. (1978) zjistili, že koncentrace celkové síry v nadzemních částech starších rostlinek pšenice je kolem $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny, klesá na cca $1,1 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny v polovině vegetace a je $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny v mléčné zralosti zrna. Obecně je kritická celková koncentrace síry kolem 2 g kg^{-1} sušiny, ale může dosahovat hodnot $1 - 3 \text{ g kg}^{-1}$ sušiny i více.

Podle různých autorů je síranová síra citlivější ukazatel nedostatku než celková síra; je u ní totiž větší rozdíl mezi koncentrací u dostatečně zásobených rostlin a rostlin s deficitem síry.

Koncentrace síranové síry v rostlinách mají vztah ke stavu síry v půdách u leguminóz (Jones a Martin, 1964) a u jílku vytrvalého a řepky olejné (Maynard et al., 1983). Toto platí obecně pro všechny analýzy rostlinných tkání.

Koncentrace síranů ve vakuole je považována za spolehlivý indikátor výživového stavu sírou podobně jako je tomu u fosfátů (Bollons a Barraclough, 1997). Při nedostatku síry jsou sírany z kořenů a nadzemních částí během několika dnů mobilizovány. Někdy může se může dokonce zvýšit obsah síranů v dospělých listech, zatímco mladé listy trpí jejich nedostatkem (Cram, 1990).

K analýze byly odebírány vždy nejmladší listy, nejméně z 80 % vyvinuté, a dále celá nadzemní hmota rostliny.

Podobně jako u ozimé řepky se ani zde nevyskytovaly průkazné rozdíly mezi sledovanými variantami. Rovněž nelze usuzovat na vzestupné tendence obsahu S v nadzemní hmotě nebo v listech se stoupající dávkou síry v hnojivu. Byly však pozorovány určité rozdíly v obsahu síry v závislosti na vegetačních fázích. Nejvyšší obsahy síry v nadzemní hmotě pšenice byly zaznamenány ve vegetační fázi BBCH 26 - 28, kdy se hodnoty pro nadzemní hmotu na stanovišti Hněvčeves pohybovaly od 0,27 - 0,31 % a od 0,22 - 0,26 % pro nejmladší listy pro varianty A - D. Na stanovišti Humpolec se hodnoty pohybovaly od 0,24 - 0,31 % pro nadzemní hmotu a 0,39 - 0,48 % pro nejmladší listy pro varianty A - D.

Poté docházelo k postupnému poklesu až po BBCH 49 - 51. Pro nejmladší listy tyto hodnoty činily na stanovišti Hněvčeves od 0,26 - 0,32 % a pro nadzemní hmotu od 0,09 - 0,12

% pro varianty A - D. Pro nejmladší listy tyto hodnoty činily na stanovišti Humpolec od 0,25 - 0,31 % a pro nadzemní hmotu od 0,08 - 0,12 % pro varianty A - D. To lze rovněž vysvětlit působením zředovacího efektu. Trendy u nejmladších listů a u nadzemní části rostliny jsou souhlasné. Přitom obsahy síry byly u odebraných nejmladších listů zpravidla vyšší než v nadzemní hmotě.

6.1.5 Porovnání výnosů zrna pšenice ozimé po aplikaci hnojiv

Rozdíly ve výnosech pšenice ozimé nebyly tak výrazné jako v předchozím experimentu s řepkou ozimou. Nejnížší výnosy byly zjištěny zpravidla na kontrolní, sírou nehnojené variantě, nejvyšší zpravidla u varianty hnojené 40 kg S/ha. Rozdíly mezi variantami však nebyly statisticky průkazné. Na stanovišti Hněvčeves bylo dosahováno vždy vyšších výnosů než v Humpolci. Průměrné výnosy byly ve všech ročnících podobné a pohybovaly se okolo 10 t/ha. Důvodem vysokých výnosů na stanovišti Hněvčeves může být příznivá půdně klimatická charakteristika místa (nízká nadmořská výška, vyšší průměrná roční teplota a dobrý půdní typ i půdní druh). Oproti tomu se na stanovišti Uhříněves plně projevil vliv nepříznivého počasí.

Na stanovišti Humpolec byly zjištěny výraznější rozdíly mezi variantami hnojení. Nejnížší výnosy byly zjištěny vždy na kontrolní variantě a nejvyšší naopak na variantě hnojené nejvyšší dávkou síry. Průměrný rozdíl mezi těmito variantami činil 0,3 t/ha. Vyšší efektivitu hnojení sírou lze připsat menší úrodnosti stanoviště v porovnání s Hněvčevsi. Na stanovišti Humpolec byly zaznamenány vyšší rozdíly mezi výnosy v jednotlivých ročnících. V roce 2008 zde průměrný výnos zrna pšenice činil 9,9 t/ha, v roce 2009 7,3 t/ha a v roce 2010 pouze 7,0 t/ha. To bylo pravděpodobně způsobeno především rozdílnými povětrnostními podmínkami v daných ročnících.

Požadavky na síru u obilnin jsou mnohem menší než u řepky, ale i zde zaznamenali v pokusech Kauka (1993), Withers et al. (1995) a McGrath et al. (1996) odezvu výnosu na přívod síry. Při výnosu zrna pšenice pod 2 t/ha bylo pozorováno jen malé zvýšení výnosu, ale když výnos překročil tuto hranici, 27% stanovišť vykazovalo pozitivní odezvu na aplikaci síry.

7.0 Závěr

7.1 Obsahy síry v půdě

- Vstupní odběry před hnojením nevykazovaly zpravidla rozdíly mezi budoucími variantami hnojení ani u pšenice ani u řepky ozimé. Pozemky tedy byly homogenní a vhodné k založení pokusu. V podorničí byly naměřené obsahy mobilní síry vždy vyšší než v ornici
- Již po aplikaci první dávky hnojiv v období jarní regenerace došlo u obou sledovaných plodin ke zvýšení obsahů mobilní síry v půdě. Toto zvýšení bylo zpravidla patrné i v dalších sledovaných vegetačních fázích.
- Aplikace hnojiva Lovofert LAS - 27% N, 6% S, kde je síra obsažena ve formě síranu vápenatého, pozitivně ovlivnila obsahy mobilních síranů v půdě. Proto je možné toto hnojivo s hůře přístupnou formou síry pro ozimou řepku i pšenici doporučit. Vzhledem k tomu, že se jedná především o dusíkaté hnojivo, spočívá jeho uplatnění u ozimých plodin především při hnojení během vegetace. U jarních plodin by bylo možné jeho využití rovněž během vegetace nebo těsně před založením porostu.

7.2 Obsahy síry v rostlinách

- Aplikace síry hnojivem Lovofert LAS se pozitivně projevila na výnosech ozimé řepky. Výsledky byly statisticky neprůkazné, avšak byly zaznamenány zřetelné trendy ve zvýšení výnosu s vyšší dávkou síry.
- Nejvyšších výnosů na všech stanovištích bylo dosaženo v roce 2010. V porovnání stanovišť vykazovalo nejvyšší výnosy ve všech ročnících stanoviště Hněvčeves.
- Oproti výnosům se hnojení na obsahu síry v nadzemní hmotě prakticky neprojevilo. Průměrné hodnoty se pohybovaly mezi 0,33 – 0,45 % S, přičemž v pozdějších vegetačních fázích docházelo k jejich snížení v důsledku zředovacího efektu. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo i u nejmladších listů
- Podobně jako u řepky aplikace síry hnojivem Lovofert LAS pozitivně ovlivnila i výnosy ozimé pšenice. Nejvyšších výnosů bylo opět dosahováno na stanovišti Hněvčeves. Jako nejúrodnější se projevil ročník 2008.
- Hnojení se opět neprojevilo na obsahu síry v nadzemní hmotě ani v nejmladších listech. Obsahy S v nejmladších listech byly zpravidla vyšší než v nadzemní hmotě.

Jak je zřejmé, hnojení sírou ve formě CaSO_4 zpravidla pozitivně ovlivnilo obsah mobilní síry v půdě i v rostlinách. Mezi jednotlivými stanovišti se přitom nevyskytovaly výrazné rozdíly. V experimentu nebyly zaznamenány výrazné změny v obsahu mobilní síry v půdě mezi odběry v jednotlivých vegetačních periodách. Pouze v odběrech po sklizni došlo zpravidla k mírnému zvýšení obsahů mobilní S v půdě. To bylo pravděpodobně způsobeno částečným uvolněním síry z rostlinných zbytků.

8.0 Seznam literatury

- Al - Khafaji, A.A., Tabatabai, M.A., 1979. Effects of trace elements on arylsulfatase activity in soils. *Soil Sci.* 127, 129 - 133.
- Armbruster, D.G., Cruz, A.P., 1993. Ammonium sulphate: an economical sulphur source for maximizing crop returns in sandy or sandy - loam soils: a Brazilian case study. *Sulphur Agric.* 17, 24 -28.
- Anderson, A.J., Spencer, D.G., 1950. Sulphur in nitrogen metabolism of legumes and non-legumes. *Austr. J. Sci. Res.* 3 (Sersis B), 414 - 430.
- Anderson, G.C., Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., 1998. Soil - extractable sulfur and pasture response to applied sulfur: 2: seasonal variation in soil sulfur tests and sulfur response by pastures under field conditions. *Austr. J. Exper. Agric.* 38, 575 - 582.
- Baldocchi, D.D., 1993. Deposition of gaseous sulfur compounds to vegetation. In: De Kok, L.J., Stulen, I., Renneberg, H., Brunold, C., Rauser, W.E. (Eds.), *Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants*. SPB Academic Publishing Company, The Hague, pp. 271 - 293.
- Balík, J., Kulhánek, M., Černý, J., Száková, J., Pavlíková D., Čermák, J.: Differences in soil sulfur fractions due to limitation of atmospheric deposition. *Plant Soil Environ.*, 55, 2009 (8): 344 - 352.
- Banerjee, M.R., Chapman, S.J., 1996. The significance of microbial biomass sulphur in soil. *Biol. Fertil. Soils* 22, 116 - 125.
- Banerjee, M.R., Chapman, S.J., Killham, K., 1993. Factors influencing the determination of microbial biomass sulphur in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24, 939 - 950.
- Barber, S.A., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability*. John Wiley & Sons, New York.
- Bardsley, C.E., Lancaster, J.D., 1960. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24, 265 - 268.
- Barrow, N.J., 1960. A comparison of the mineralization of sulfur from soil organic matter. *Austr. J. Agric. Res.* 11, 960 - 969.
- Barrow, N.J., 1961. Studies on mineralization of nitrogen and sulphur from soil organic matter. *Austr. J. Agric. Res.* 12, 306 - 319.
- Barrow, N.J., 1967. Studies on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Sci.* 104, 342 - 349.
- Barton, D., Gammack, S.M., Billett, M.F., Cresser, M.S., 1999. Sulphate adsorption and acidification of *Calluna* heathland and Scot pine forest podzol soils in north - east Scotland. *Forest Ecol. Manag.* 114, 151 - 164.
- Beaton, J.D., Fox, R.L., 1971. Production, marketing and use of sulphur products. In: Olson, R.A (Ed.), *Fertilizer Technology and Use*. Soil Science Society America, Madison, WI, USA, pp. 335 -379.
- Bell, C.I., Clarkson, D.T., Cram, W.J., 1995. Partitioning and redistribution of sulphur during stress in *Macroptilium atropurpureum* cv Sirato. *J. Exp. Bot.* 46, 73 - 78.
- Bergmann, W., 1983. *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Bertelsen, F., Gissel - Nielsen, G., 1987. Toxicity of root - applied sulphite in *Zea mays*. *Env. Geochem. Health* 9, 12 - 16.
- Bettany, J.R., Stewart, J.W.B., 1983. Sulphur cycling in soils. In: More, A. (Ed.), *Sulphur* 82. British Sulphur, London, pp. 767 - 783.
- Bettany, J.R., Stewart, J.W.B., Halstead, E.H., 1973. Sulfur fractions and carbon, nitrogen and sulfur relationships in grassland, forest and associated transitional soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37, 915 - 918.
- Biederbeck, V.O., 1978. Soil organic sulfur and soil fertility. In: Schnitzer, M., Khan, S.U. (Eds.), *Soil Organic Matter*. Elsevier, Amsterdam, pp. 273 - 310.

- Bird, P.R., Hume, I.D., 1971. Sulphur metabolism and excretion studies in ruminants: IV: cystine and sulphate effects upon flow of sulphur from the rumen and upon sulphur excretion by sheep. *Aust. J. Agric. Res.* 22, 443 - 452.
- Birch, H.F., 1960. Soil drying and soil fertility. *Trop. Agric. (Trinidad)* 37, 3 - 10.
- Blagrove, R.J., Gillespie, J.M., Randall, P.J., 1976. Effect of sulphur supply on the seed globulin composition of *Lupinus angustifolius*. *Aust. J. Plant Physiol.* 3, 173 - 184.
- Blake - Kalf, M.M.A., Harrison, K.R., Hawkesford, M.J., Zhao, F.J., McGrath, S.P., 1998. Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiol.* 118, 1337 - 1344.
- Bloem, E.M., 1998. Schwefel-Bilanz von Agrarökosystemen unter besonderer Berücksichtigung hydrologischer und bodenphysikalischer Standorteigenschaften, vol. 192, 156 pp.
- Bohn, H.L., Barrow, N.J., Rajan, S.S.S., Parfitt, R.L., 1986. Reactions of inorganic sulfur in soils. In: Tabatabai, M.A. (Ed.), *Sulfur in Agriculture*, Agron. Monogr, vol. 27. ASA, CSSA, and ISSSA, Madison, WI, pp. 233 - 249.
- Bollons, H.M., Barraclough, P.B., 1997. Inorganic orthophosphate for diagnosing the phosphorus status of wheat plants. *J. Plant Nutr.* 20, 641 - 655.
- Bolton, J., Nowakowski, T., Lazarus, T.Z., 1976. Sulphur - nitrogen interaction effects on the yield and composition of protein - N, non - protein - N, and soluble carbohydrates in perennial ryegrass. *J. Sci. Food Agric.* 27, 553 - 560.
- Boswell, C.C., Friesen, D.K., 1993. Elemental sulphur fertilisers and their use on crops and pastures. *Fertil. Res.* 35, 127 - 149.
- Bowen, G.D., Rovira, A.D., 1971. Relationship between root morphology and nutrient uptake. *Recent Adv. Plant Nutr.* 1, 250 - 260.
- Braithwaite, A.C., Brown, M.W., 1994. Sulphur in New Zealand: a review of processing techniques. *Sulphur Agric.* 18, 19 - 22.
- Brunold, C., 1993. Regulatory interactions between sulfate and nitrate assimilation. In: De Kok, L.J., Stulen, I., Rennenberg, H., Brunold, C., Rauser, W.E. (Eds.), *Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, pp. 62 - 75.
- Byers, M., Franklin, J., Smith, S.J., 1987. The nitrogen and sulphur nutrition of wheat and its effect on the composition and baking quality of the grain. *Aspects Appl. Biol.* 15, 337 - 344.
- Cacco, G., Ferrari, G., Saccomani, M., 1980. Pattern of sulfate uptake during root longation in maize: its correlation to productivity. *Physiol. Plant* 48, 375 - 378.
- Castellano, S.D., Dick, R.P., 1991. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 114 - 121.
- Castle, S.L., Randall, P.J., 1987. Effects of sulfur deficiency on the synthesis and accumulation of proteins in the developing wheat seed. *Aust. J. Plant Physiol.* 14, 503 - 516.
- Ceccotti, S.P., 1994. Sulphur fertilizers: an overview of commercial developments and technological advances. *Sulphur Agric.* 18, 58 - 64.
- Ceccotti, S.P., Messick, D.L., 1994. Increasing plant nutrient sulphur use in the european fertilizer industry. *Agro. Ind. Hi - Tech* 5, 9 - 14.
- Ceccotti, S.P., Morris, R.J., Messick, D.L., 1998. A global overview of the sulphur situation: industry's background, market trends, and commercial aspects of sulphur fertilizers. In: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 175 - 202.
- Černý, J., Kulhánek, M., Vašák, F., Shejbalová, Š.: **Nově o změnách obsahu síry v půdě.** *Zemědělec* 17: 14 - 16

- Český hydrometeorologický ústav, ÚOČO, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4: Hodnoty maximálních denních koncentrací SO₂ v ovzduší pro měřicí stanici Tušimice, okres Chomutov. Vyžádaná imisní data z Informačního systému kvality ovzduší.
- Chandler, P.M., Spencer, D., Randall, P.J., Higgins, T.J.V., 1984. Influence of sulfur nutrition on development of some major pea seed proteins and their mRNAs. *Plant Physiol.* 75, 651 - 657.
- Chapman, S.J., 1997. Barley straw decomposition and S immobilization. *Soil Biol. Biochem.* 29, 109 - 114.
- Chowdhury, M.A.H., Kuono, K., Ando, T., 1999. Correlation among microbial biomass S, soil properties, and other biomass nutrients. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45, 175 - 186.
- Cooper, P.J.M., 1972. Arylsulfatase activity in northern Nigerian soils. *Soil Biol. Biochem.* 4, 333 - 337.
- Clarkson, D.T., Hawkesford, M.J., Davidian, J.C., 1993. Membrane and long-distance transport of sulfate. In: De Kok, L.J., Stulen, L., Rennenberg, H., Brunold, C., Rauser, W.E. (Eds.), *Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants, Regulatory, Agricultural and Environmental Aspects*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, pp. 3 - 19.
- Coleman, R., 1966. The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Sci.* 101, 230 - 239.
- Couto, W., Lathwell, D.J., Bouldin, D.R., 1979. Sulfate sorption by two oxisols and an alfisol of the tropics. *Soil Sci.* 127, 108 - 116.
- Cowling, D.W., Lockyer, D.R., 1976. Growth of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) exposed to a low concentration of sulphur dioxide. *J. Exp. Bot.* 27, 411 - 417.
- Cram, W.J., 1990. Uptake and transport of sulfate. In: Rennenberg, H. (Ed.), *Sulfur Nutrition and Sulfur Assimilation in Higher Plants*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, pp. 3 - 11.
- DeBoer, D.L., Duke, S.H., 1982. Effects of sulphur nutrition on nitrogen and carbon metabolism in lucerne (*Medicago sativa* L.). *Physiol. Plant* 54, 343 - 350.
- Deng, S.P., Tabatabai, M.A., 1997. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III: phosphatases and arylsulfatase. *Biol. Fertil. Soils* 24, 141 - 146.
- Donald, D., Chapman, S.J., 1998. Use of powdered elemental sulphur as a sulphur source for grass and clover. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29, 1315 - 1328.
- Duke, S.H., Reisenauer, H.M., 1986. Roles and requirements of sulfur in plant nutrition. In: Tabatabai, M.A. (Ed.), *Sulfur in Agriculture, Agron. Monogr*, vol. 27. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 123 - 168.
- Edmeades, D.C., Ledgard, S.F., Boswell, C.C., Sinclair, A.G., Ghani, A., Braithwaite, A.C., Watkinson, J.H., Thorrold, B.S., Brown, M.W., 1994. Some recent developments in sulphur research in New Zealand. *Sulphur Agric.* 18, 3 - 8.
- Elkins, D.M., Ensminger, L.E., 1971. Effect of soil pH on the availability of adsorbed sulfate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 931 - 943.
- Ensminger, L.E., 1954. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 18, 328 - 333.
- Ensminger, L.E., Freney, J.R., 1966. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. *Soil Sci.* 101, 283 - 290.
- Eppendorfer, W.H., 1975. Effects of fertilizers on quality and nutritional value of grain protein. *Proc. 11th Colloquium of the Intern. Potash Inst., Fertilizer use and protein production*. Ronne -Bornholm, Denmark, p. 249 - 263.
- Eppendorfer, W.H., Bille, S.W., 1992. Development of S-deficiency of faba bean plants as reflected in total - S, SO₄ - S and aspartic acid concentrations at various stages of growth. *Proc. 2nd ESA Congress, Warwick, England*, 242 - 243.

- Eriksen, J., 1994. Soil organic matter as a source of plantavailable sulphur. *Nor. J. Agric. Sci.* 15, 77 - 81.
- Eriksen, J., 1996. Incorporation of S into soil organic matter in the field as determined by the natural abundance of stable S isotopes. *Biol. Fertil. Soils* 22, 149 - 155.
- Eriksen, J., 1997a. Sulphur cycling in Danish agricultural soils: inorganic sulphate dynamics and plant uptake. *Soil Biol. Biochem.* 29, 1379 - 1385.
- Eriksen, J., 1997b. Animal manure as S fertilizer. *Sulphur Agric.* 20, 27 - 30.
- Eriksen, J., Mortensen, J.V., 1999. Soil sulphur status following long-term annual application of animal manure and mineral fertilizers. *Biol. Fertil. Soils* 28, 412 - 416.
- Eriksen, J., Mortensen, J.V., Kjellerup, V.K., Kristjansen, O., 1995. Forms and plant availability of sulfur in cattle and pig slurry. *Z. Pflanzenernach. Bodenk.* 158, 113 - 116.
- Eriksen, J., Murphy, M.D., Schnug, E., 1998. The soil sulphur cycle. In: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 39 - 73.
- Evans, A., Jr, 1986. Effects of dissolved organic carbon and sulfate on aluminum mobilization in forest soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1576 - 1578.
- Ewart, J.A.D., 1978. Glutamin and dough tenacity. *J. Sci. Food Agric.* 29, 551 - 556.
- Faller, N., 1972. Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, nitrose Gase und Ammoniak als ausschließliche S - bzw. N - Quellen der höheren Pflanzen. *Z. Pflanzenernachr. Bodenk.* 131, 120 - 130.
- Fieldsend, J., Milford, G.F.J., 1994. Changes in glucosinolates during crop development in single- and double-low genotypes of winter oilseed rape (*Brassica napus*): I: production and distribution in vegetative tissues and developing pods during development and potential role in the recycling of sulfur within the crop. *Ann. Appl. Bot.* 124, 531 - 542.
- Finck, A., 1976. *Pflanzenernährung in Stichworten*. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel, BRD, 200 pp.
- Finck, A., 1992. *Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, BRD, 461 pp.
- Fismes, J., Vong, P.C., Guckert, A., Frossard, E., 2000. Influence of sulfur on apparent N - use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *Eur. J. Agron.* 12, 127 - 141.
- Fitzgerald, J.W., 1976. Sulfate ester formation and hydrolysis: a potentially important and often ignored aspect on the sulfur cycle of aerobic soils. *Bacteriol. Rev.* 40, 698 - 721.
- Fitzgerald, J.W., 1978. Naturally occurring organosulfur compounds in soil. In: Nriagu, J.O. (Ed.), *Sulfur in the Environment*, part 2. John Wiley and Sons, New York, pp. 391 - 443.
- Fox, R.L., 1982. Some highly weathered soils of Puerto Rico: 3: chemical properties. *Geoderma* 27, 139 -176.
- Fox, R.L., Olson, R.A., Rhoades, H.F., 1964. Evaluating the sulfur status of soils by plants and soil tests. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 243 - 246.
- Frankhauser, H., Brunold, C., 1978. Localization of adenosine 5%-phosphosulfate sulfotransferase in spinach leaves. *Planta* 143, 285 - 289.
- Freney, J.R., 1961. Some observations on the nature of organic sulfur compounds in soil. *Austr. J. Agric. Res.* 12, 424 - 432.
- Freney, J.R., 1986. Forms and reactions of organic S compounds in soils. In: Tabatabai, M.A. (Ed.), *Sulfur in agriculture*. Agron. Monogr, vol. 27. ASA, CSSA, and SSSA, Madison.
- Freney, J.R., Melville, G.E., Williams, C.H., 1975. Soil organic matter fractions as sources of plant-available S. *Soil Biol. Biochem.* 7, 217 - 221.
- Freney, J.R., Spencer, K., Jones, M.B., 1978. The diagnosis of sulfur deficiency in wheat. *Austr. J. Agric. Res.* 29, 727 - 738.
- Garsed, S.G., 1985. SO₂ uptake and transport. In: Winner, W.E., Mooney, H.A., Goldstein, R.A. (Eds.), *Sulfur Dioxide Dioxide and Vegetation: Physiology, Ecology, and Policy Issues*. Stanford Univ. Press, pp. 75 - 95.

- Garwood, E.A., Tyson, K.C., 1973. Losses of nitrogen and other plant nutrients to drainage from soil under grass. *J. Agric. Sci. Camb.* 80, 303 - 312.
- Gaylor, G.C., Sykes, G.E., 1985. Effects of nutritional stress on the storage proteins of soybeans. *Plant Physiol.* 78, 582 - 585.
- Ghani, A., McLaren, R.G., Swift, R.S., 1990. Seasonal fluctuations of sulphate and soil microbial biomass-S in the surface of a Wakanui soil. *New Zealand J. Agric. Res.* 33, 467 - 472.
- Ghani, A., McLaren, R.G., Swift, R.S., 1991. Sulphur mineralisation in some New Zealand soils. *Biol. Fert. Soils* 11, 68 - 71.
- Ghani, A., Watkinson, J.H., Upsdell, M.P., 1997. Modelling the oxidation of elemental S in New Zealand pastoral soils. *Sulphur Agric.* 20, 3 - 9.
- Gilbert, M.A., Robson, A.D., 1984. The effect of sulfur supply on the root characteristics of subterranean clover and annual ryegrass. *Plant Soil* 77, 377 - 380.
- Goh, K.M., Gregg, P.E.H., 1982. Field studies on the fate of radioactive sulphur fertilizer applied to pastures. *Fert. Res.* 3, 337 - 351.
- Grundon, N.J., Asher, C.J., 1986. Volatile losses of sulfur by intact alfalfa plants. *J. Plant Nutr.* 9, 1519 - 1532.
- Gupta, U.C., 1976. Tissue sulfur levels and additional sulfur needs for various crops. *Can. J. Plant Sci.* 56, 651 - 657.
- Gupta, U.C., McLeod, J.A., 1984. Effect of various sources of sulfur on yield and sulfur concentrations of cereals and forages. *Can. J. Soil Sci.* 64, 403 - 409.
- Gupta, V.V.S.R., Germida, J.J., 1989. Microbial biomass and extractable sulfate sulfite levels in native and cultivated soils as influenced by air - drying and rewetting. *Can. J. Soil Sci.* 69, 889 - 894.
- Gupta, V.V.S.R., Lawrence, J.R., Germida, J.J., 1988. Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils: I: effects on microbial biomass and enzyme activities. *Can. J. Soil Sci.* 68, 463 - 473.
- Hagstrom, G.R., 1986. Fertilizer sources of sulfur and their use. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) *Sulfur in agriculture*. Agron. Monogr. 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 567 - 581.
- Hahtonen, M., Saarela, I., 1995. The effects of sulfur application on yield, sulfur - content and N : S-ratio of grasses for silage at six sites in Finland. *Acta Agric. Scand. Section B, Soil Plant Sci.* 45, 104 - 111.
- Haneklaus, S., Evans, E., Schnug, E., 1992. Baking quality and sulphur content of wheat: I: Influence of sulphur and protein concentration on loaf volume. *Sulphur Agric.* 16, 31 - 34.
- Haneklaus, S., Schnug, E., 1996. Nährstoffversorgung von Zuckerrüben in Schleswig - Holstein und Jütland. *Zuckerrübe* 45, 182 - 184.
- Haneklaus, S.E., Murphy, D.P.L., Nowak, G., Schnug, E., 1995. Effects of the timing of sulfur application on grain yield and yield components of wheat. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158, 83 - 85.
- Haneklaus, S.E., Schnug, E., 1992. Baking quality and sulphur content of wheat: II: evaluation of the relative importance of genetics and environment including sulphur fertilization. *Sulphur Agric.* 16, 35 - 38.
- Haneklaus, S.E., Schnug, E., 1994. Diagnosis of crop sulphur status and application of X-ray fluorescence spectroscopy for the sulphur determination in plant and soil materials. *Sulphur Agric.* 18, 31 - 40.
- Hawkesford, M.J., Schneider, A., Belcher, A.R., Clarkson, D.T., 1995. Regulation of enzymes involved in the sulfur assimilation pathway. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158, 55 - 57.
- Hell, R., Rennenberg, H., 1998. The plant sulphur cycle. In: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 135 - 173.

- Hingston, F.J., Atkinson, R.J., Posner, A.M., Quirk, J.P., 1967. The specific adsorption of anions. *Nature* 215, 1459 - 1461.
- Inskip, W.P., 1989. Adsorption of sulfate by kaolinite and amorphous iron oxide in the presence of organic ligands. *J. Environ. Qual.* 18, 379 - 385.
- Jaggi, A.C., Aulakh, M.S., Sharma, R., 1999. Temperature effects on soil organic sulphur mineralization in subtropical soils of varying pH. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 54, 175 - 182.
- Janssen, K.A., Vitosh, M.L., 1974. Effect of lime, sulfur, and molybdenum on N₂ fixation and yield of dark red kidney beans. *Agron. J.* 56, 736 - 740.
- Janzen, H.H., Bettany, J.R., 1987. Oxidation of elemental sulphur under field conditions in central Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 67, 609 - 618.
- Johnson, D.W., Todd, D.E., 1983. Relationships among iron, aluminum, carbon, and sulfate in a variety of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 792 - 800.
- Jones, M.B., 1974. Fertilization of annual grasslands of California and Oregon. In: Mays, D.A. (Ed.), *Forage fertilization*. American Soc. Agron., Madison, WI, pp. 43 - 468.
- Jones, M.B., 1986. Sulfur availability indexes. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) *Sulfur in agriculture*. Agron. Monogr. 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 549 - 566.
- Jones, M.B., Martin, W.E., 1964. Sulfate sulfur concentration as an indicator of sulfur status in various California dryland pasture species. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 539 - 541.
- Jones, M.B., Ruckman, W.A., Williams, W.A., Koenigs, R.L., 1980. Sulfur diagnostic criteria as affected by age and defoliation of subclover. *Agron. J.* 72, 1043 - 1046.
- Kaiser, W., Dittrich, A., Heber, U., 1993. Sulfate concentrations in Norway spruce needles in correlation to atmospheric SO₂: a comparison of trees from various forests in Germany with trees fumigated with SO₂ in growth chambers. *Tree Physiol.* 12, 1 - 13.
- Karmoker, J.L., Clarkson, D.T., Saker, L.R., Roney, J.M., Purves, J.V., 1991. Sulphate deprivation depresses the transport of nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. *Planta* 185, 269 - 278.
- Kauka, A., 1993. Stickstoff - und Schwefelversorgung bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und ihre Bedeutung für die Backqualität bei Winterweizen in Nordrhein - Westfalen und Rheinland - Pfalz. Ph.D. thesis, University of Bonn, Germany.
- Keller, T., 1981. Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen. HLH Heiz Lüft. Klimatech. Haustechnik. 48, 22 - 24.
- Kilmer, V.J., Neary, D.C., 1960. The determination of available sulfur in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24, 337 - 340.
- Kirchmann, H., Pichlmayer, F., Gerzabek, M.H., 1996. Sulfur balance and sulfur - 34 abundance in a long-term fertilizer experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 174 - 178.
- Klose, S., Tabatabai, M.A., 1999. Arylsulfatase activity of microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 569 - 574.
- Klose, S., Moore, J.M., Tabatabai, M.A., 1999. Arylsulfatase activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biol. Fertil. Soils* 29, 46 - 54.
- Knauff, U., Scherer, H.W., 1998. Arylsulfatase-Aktivität im Kontaktraum Boden:Wurzeln bei verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. In: Merbach, W. (Ed.) *Pflanzenernährung, Wurzeleistung und Exsudation*. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, pp. 196 - 204.
- Knauff, U., Scherer, H.W., 1999. Beziehungen zwischen pH-Wert, Sulfat- und Nitratkonzentrationen und der Arylsulfatase - Aktivität in der Rhizosphäre. In: Merbach, W., Wittenmeyer, L., Augustin, J. (Eds.) *Stoffumsatz im wurzelnahen Raum*. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, pp. 83 - 90.
- Konopka, A.E., Miller, R.H., Sommers, L.E., 1986. Microbiology of the sulfur cycle. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) *Sulfur in agriculture*. Agron. Monogr. 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 23 - 55.

- Kowalenko, C.G., Lowe, L.E., 1975. Mineralization of sulfur from four soils and its relationship to soil carbon, nitrogen and phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 55, 9 - 14.
- Kparmwang, T., Esu, I.E., Chude, V.O., 1997. Sulphate adsorption - desorption characteristics of three ultisols and an alfisol developed on basalts in the Nigerian savanna. *Discov. Innov.* 9, 197 - 204.
- Kulhánek, M., Balík, J., Vaněk V., Černý J., Pavlíková D.: Využití stanovení frakcí minerální síry v půdě k optimalizaci hnojení. Certifikovaná metodika. ČZU 2013.
- Kühn, H., Weller, H., 1977. 6 jährige Untersuchung über Schwefelzufuhr durch Niederschläge und Schwefelverluste durch Auswaschung (Lysimeter). *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 140, 431 - 440.
- Lange, A., 1998. Einfluß der Schwefel - Versorgung auf die biologische Stickstoff-Fixierung von Leguminosen. Ph.D. thesis, University of Bonn, Germany.
- Lange, A., Scherer, H.W., 1996. Effect of sulphur nutrition on the activity of nitrogenase and enzymes of the C - and N - metabolism of *Vicia faba* minor and *Pisum sativum*. Proc. 4th ESA Congress, Veldhoven - Wageningen, The Netherlands, pp. 568 - 659.
- Lawrence, J.R., Germida, J.J., 1988. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am.* 152, 672 - 677.
- Leggett, J.E., Epstein, E., 1956. Kinetics of sulfate adsorption by barley roots. *Plant Physiol.* 31, 222 - 226.
- Leusteck, T., Saito, K., 1999. Sulphate transport and the assimilation in plants. *Plant Physiol.* 120, 637 - 643.
- Link, A., 1997. Bodenuntersuchung Smin und Pflanzenanalyse zur Vorhersage des Schwefeldüngerbedarfs von Winterraps (*Brassica napus* L.). Ph.D. thesis, University of Hannover, Germany.
- Lou, G., Warman, P.R., 1992a. Enzymatic hydrolysis of ester sulphate in soil organic matter extracts. *Biol. Fertil. Soils* 14, 112 - 115.
- Lou, G., Warman, P.R., 1992b. Labile ester sulphate in soil organic matter extracted from podsollic soils. *Biol. Fertil. Soils* 14, 267 - 271.
- Luscombe, P.C., Syers J.K., Gregg, P.E.H., 1979: Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10, 1361 - 1369.
- MacDonald, N.W., Zak, D.R., Pregitzer, K.S., 1995. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am.* 159, 233 - 240.
- Mader, P., Száková, J., Mihalová, D., 1998. Classical dry ashing of biological and agricultural materials. Part II. Losses of analytes due to their retention in an insoluble residue. *Analysis*. 26(3). 121-129.
- Mansfeld, T., 1994. Schwefeldynamik von Böden des Dithmarscher Speicherkoogs und der Bornhöver Seenkette in Schleswig-Holstein. Ph.D. thesis, University of Kiel.
- Marschner, H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press Limited, London. 255 - 265.
- Martinez, C.E., Kleinschmidt, A.W., Tabatabai, M.A., 1998. Sulfate adsorption by variable charge soils: effect of lowmolecular- weight organic acids. *Biol. Fertil. Soils* 26, 157 - 163.
- Martini, J.A., Mutters, R.G., 1984. Effect of liming and fertilization on sulfur availability, mobility, and uptake in cultivated soils of South Carolina. *Soil Sci.* 138, 403 - 410.
- Marzo, F., Aguirre, A., Castiella, M.V., Alonso, R., 1997. Fertilization effects of phosphorus and sulfur on chemical composition of seeds of *Pisum sativum* and relative infestation by *Bruchus pisorum* L. *J. Agric. Food Chem.* 45, 1829 - 1833.
- Matula, J.: Výživa a hnojení sírou: metodika pro praxi, Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha, 2007

- Matula, J., 1999. Use of multinutrient soil tests for sulphur determination. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1733 - 1746.
- Maynard, D.G., 1982. Transformation and dynamics of available sulfur in soils. Ph.D. thesis, Univ. Saskatchewan, Saskatoon.
- Maynard, D.G., Stewart, J.W.B., Bettany, J.R., 1983. Use of plant analysis to predict sulfur deficiency in rapeseed (*Brassica napus* and *B. campestris*). *Can. J. Soil Sci.* 63, 387 - 396.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., 1995. A risk assessment of sulphur deficiency in cereals using soil and atmospheric deposition data. *Soil Use Manag.* 11, 110 - 114.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *J. Agri. Sci.* 126, 53 - 62.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., Withers, P.J.A., 1996. Development of sulphur deficiency in crops and its treatments. *Proc. of the Fertiliser Soc.*, No. 379, The Fertiliser Society, Peterborough.
- McLaren, R.G., Kerr, J.I., Swift, R.S., 1985. Sulphur transformations in soils using sulphur - 5 labelling. *Soil Biochem.* 17, 73 - 79.
- Mehlich, A., 1964. Influence of sorbed hydroxyl and sulfate on liming efficiency, pH and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 496 - 499.
- Mehlich, A. 1984: Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15, s. 1409 - 1416
- Mengel, K., 1996. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant Soil* 181, 83 - 93.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 1987. Principles of Plant Nutrition. International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Mertz, E.T., Matsumoto, H., 1956. Further studies on the amino acids and protein of sulfur deficient alfalfa. *Arch. Biochem. Biophys.* 38, 139 - 145.
- Mortensen, J., Nielsen, J.D., 1995. Use of a sulphite containing desulphurization product as sulphur fertilizer. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158, 117 - 119.
- Moss, H.J., Randall, P.J., Wrigley, C.W., 1983. Alterations to grain, flour and dough quality in three wheat types with variation in soil sulfur supply. *J. Cereal Sci.* 1, 255 - 264.
- Nannipieri, P., Grego, S., Ceccanti, B., 1990. Ecological significance of biological activity in soil. In: Bollag, J. - M., Stotzky, G. (Eds.), *Soil Biochemistry*, vol. 6. Dekker, New York, pp. 293 - 355.
- Nelson, L.E., 1964. Status and transformation of sulfur in Mississippi soils. *Soil Sci.* 97, 300 - 306.
- Nelson, L.E., 1973. The effect of crop residues on the growth of turnips and their recovery of sulfur from soils. *Soil Sci.* 115, 447 - 454.
- Nesheim, L., Gautneb, H., Myhr, K., 1997. Plant uptake of sulphur and trace elements from pyrite applied on grassland. *Acta Agri. Scand. Section B, Soil Plant Sci.* 47, 135 - 141.
- Nicolson, A.J., 1970. Soil sulfur balance studies in the presence and absence of growing plants. *Soil Sci.* 109, 345 - 350.
- Nguyen, M.L., Goh, K.M., 1992. Status and distribution of soil sulphur fractions, total nitrogen and organic carbon in camp and non-camp soils of grazed pastures supplied with long-term superphosphate. *Biol. Fertil. Soils* 14, 181 - 190.
- Olszyk, D.M., Tingey, D.T., 1985. Interspecific variation in SO₂ flux: leaf surface versus internal flux, and components of leaf conductance. *Plant Physiol.* 79, 949 - 956.
- Pasricha, N.S., Fox, R.L., 1993. Plant nutrient sulphur in the tropics and subtropics. *Adv. Agron.* 50, 209 - 269.
- Pedersen, C.A., Knudsen, L., Schnug, E., 1998. Sulphur fertilization. In: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 115 - 134.
- Pfaff, C., 1963. U8 ber die Auswaschung von Calcium, Magnesium, Chlorid und Sulfat aus dem Boden (Lysimeterversuche). *Z. Acker- u. Pflanzenbau* 117, 117 - 128.

- Poulton, J.E., Moller, B.L., 1993. Glucosinolates. In: Lea, P.J. (Ed.), *Methods in Plant Biochemistry*, vol. 9. Academic Press, London, p. 209.
- Preuschhoff, M., 1995. Untersuchungen zur Schwefelversorgung von Weißkohl an zwei Lößstandorten. Ph.D. thesis, University of Hannover, Germany.
- Probert, M.E., 1980. In: Freney, J.R., Nicholson, A.J. (Eds.), *Sulfur in Australia*. Australian Academy of Science, Canberra, pp. 158 - 169.
- Rabe, E., 1990. Stress physiology: the functional significance of the accumulation of nitrogen containing compounds. *J. Hort. Sci.* 65, 231 - 243.
- Randall, P.J., Thomson, J.A., Schroeder, H.E., 1979. Cotyledonary proteins in *Pisum sativum*: IV: Effects of sulfur, phosphorus, potassium and magnesium deficiencies. *Aust. J. Plant Physiol.* 6, 11 - 24.
- Randall, P.J., Wrigley, C.W., 1986. Effects of sulfur supply on the yield, composition, and quality of grain from cereals, oilseeds, and legumes. *Adv. Cereal Sci. Technol.* 8, 171 - 206.
- Randlett, D.L., Zak, D.R., MacDonald, N.W., 1992. Sulfate adsorption and microbial immobilization in northern hardwood forests along an atmospheric deposition gradient. *Can. J. For. Res.* 22, 1843 - 1850.
- Rasmussen, P.E., Ramig, R.E., Ekin, L.G., Rohde, C.R., 1977. Tissue analysis guidelines for diagnosing sulfur deficiency in wheat. *Plant Soil* 46, 153 - 163.
- Rendig, V.V., 1986. Sulfur and crop quality. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) *Sulfur in agriculture*. Agron. Monogr. 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 635 - 652.
- Rendig, V.V., Oputa, C., McComb, E.A., 1976. Effects of sulfur deficiency on non - protein nitrogen, soluble sugars and N : S ratios in young corn (*Zea mays* L.) plants. *Plant Soil* 44, 423 - 437.
- Rennenberg, H., 1983. Role of *O*-acetylserine in hydrogen sulfide emission from pumpkin leaves in response to sulfate. *Plant Physiol.* 73, 560 - 565.
- Rennenberg, H., Schmitz, K., Bergmann, L., 1979. Long distance transport of sulfur in *Nicotiana tabacum*. *Planta* 147, 57 - 62.
- Rhykerd, C.L., Overdahl, C.J., 1972. Nutrition and fertilizer use. In: Hanson, C.H. (Ed.), *Alfalfa science and technology*. American Soc. Agron., Madison, WI, pp. 437 - 468.
- Robson, A.D., Osborne, L.D., Snowball, K., Simmons, W.J., 1995. Assessing sulfur status in lupins and wheat. *Austr. J. Exp. Agric.* 35, 79 - 86.
- Saalbach, E., 1984. Die Bedeutung atmosphärischer Schwefelverbindungen für landwirtschaftliche Kulturpflanzen. *Angew. Bot.* 58, 147 - 156.
- Saalbach, E., Aigner, H., 1987. Zum Diagnosewert der NaCl + CaCl₂ - extrahierbaren Sulfatmengen von Böden. *Landwirtsch. Forsch.* 40, 8 - 12.
- Saggar, S., Bettany, J.R., Stewart, J.W.B., 1981a. Measurement of microbial sulphur in soil. *Soil. Biol. Biochem.* 13, 493 - 498.
- Saggar, S., Bettany, J.R., Stewart, J.W.B., 1981b. Sulfur transformations in relation to carbon and nitrogen in incubated soils. *Soil. Biol. Biochem.* 13, 499 - 511.
- Scherer, H.W.: *Europ. J. Agronomy* 14 (2001) 81 - 111
- Scherer, H.W., Lange, A., 1996. N₂ fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. *Biol. Fertil. Soils* 23, 449 - 453.
- Schiff, J.A., Stem, A.I., Saiha, T., Li, J., 1993. Some molecular aspects of sulfate metabolism in photosynthetic organisms. In: De Kok, L.J., Stulen, I., Rennenberg, H., Brunold, C., Rauser, W.E. (Eds.), *Sulfur nutrition and assimilation in higher plants*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, pp. 21 - 35.
- Schmutz, D., Brunold, C., 1984. Intercellular localization of assimilatory sulfate reduction in leaves of *Zea mays* and *Triticum aestivum*. *Plant Physiol.* 74, 866 - 870.
- Schnitzer, M., 1991. Soil organic matter - the next 75 years. *Soil Sci.* 151, 41 - 58.

- Schnug, E., 1988. Quantitative und qualitative Aspekte der Diagnose und Therapie der Schwefelversorgung von Raps (*Brassica napus* L.) unter besonderer Berücksichtigung glucosinolatarter Sorten. Habilitation thesis, University of Kiel, Germany.
- Schnug, E., 1989. Double low oilseed rape in West Germany: sulphur nutrition and glucosinolate levels. *Aspects Appl. Biol.* 23, 67 - 82.
- Schnug, E., 1991. Sulphur metabolism in oilseed rape plants with particular reference to double low varieties. *Proc. 8th Int. Rapeseed Congress Saskatoon*, pp. 695 - 700.
- Schnug, E., Haneklaus, S., 1994. Sulphur deficiency in *Brassica napus* - biochemistry, symptomatology, morphogenesis. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 144*.
- Schnug, E., Haneklaus, S., 1998. Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 1 - 38.
- Schnug, E., Haneklaus, S., Murphy, S., 1993. Impact of sulphur supply on the baking quality of wheat. *Aspects Appl. Biol.* 36, 337 - 345.
- Schoenau, J., Qian, P., Huang, W.Z., 1993. Assessing sulphur availability in soil using ion exchange membranes. *Sulphur Agric.* 17, 13 - 17.
- Schroeder, H.E., 1984. Major albumins of *Pisum* cotyledons. *J. Sci. Food Agric.* 35, 191 - 198.
- Scott, N.M., 1976. Sulphate contents and sorption in Scottish soils. *J. Sci. Food Agric.* 27, 358 - 366.
- Scott, N.M., Dyson, P.W., Ross, J., Sharp, G.S., 1984. The effect of sulphur on the yield and chemical composition of winter barley. *J. Agric. Sci.* 103, 69 - 702.
- Sekiya, J., Wilson, L., Filner, P., 1982. Resistance to injury by sulfur dioxide: correlations with its reduction to and emission of hydrogen sulfide in *Cucurbitaceae*. *Plant Physiol.* 70, 437 - 441.
- Serrano, R.E., Arias, J.S., Fernandez, P.G., 1999. Soil properties that affect sulphate adsorption by palexerults in western and central Spain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1521 - 1530.
- Sexton, P.J., Batchelor, W.D., Shibles, R., 1997. Sulfur availability, rubisco content, and photosynthetic rate of soybean. *Crop Sci.* 37, 1801 - 1806.
- Sexton, P.J., Paek, N.C., Shibles, R., 1998. Soybean sulfur and nitrogen balance under varying levels of available sulfur. *Crop Sci.* 38, 975 - 982.
- Shan, X.Q., Chen, B., Zhang, T.H., Li, F.L., Wen, B., Qian, J., 1997. Relationship between sulfur specification in soils and plant availability. *Sci. Total Environ.* 199, 237 - 246.
- Shepherd, M.A., Bennett, G., 1998. Nutrient leaching losses from a sandy soil in lysimeters. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29, 931 - 946.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S., 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *J. Cereal Sci.* 25, 207 - 227.
- Shock, C.C., Williams, W.A., Jones, M.B., Center, D.M., Phillips, D.A., 1984. Nitrogen fixation by subclover associations fertilized with sulfur. *Plant Soil* 81, 323 - 332.
- Siman, G., Jansson, S.L., 1976. Sulphur exchange between soil and atmosphere with special attention to sulphur release directly to the atmosphere: 2: The role of vegetation in sulphur exchange between soil and atmosphere. *Swed. J. Agric. Res.* 6, 135 - 144.
- Sinclair, A.G., Saunders, W.M.H., 1981. Quantities and forms of sulfur required for pasture production in New Zealand. *Proc. of the 18th Technical Conference of the New Zealand Fertiliser Manufacturers' Res. Assoc.*, p. 3 - 14
- Smith, I.K., 1976. Characterization of sulfate transport in cultured tobacco cells. *Plant Physiol.* 58, 358 - 362.
- Spencer, K., 1978. Sulphur nutrition of clover: effects of plant age on the composition-yield relationship. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 9, 883 - 895.

- Spencer, K., Freney, J.R., 1980. Assessing the sulfur status of field grown wheat by plant analysis. *Agron. J.* 72, 469 - 472.
- Spencer, K., Freney, J.R., Jones, M.B., 1984. A preliminary testing of plant analysis procedures for the assessment of the sulfur status of oilseed rape. *Aust. J. Agric. Res.* 34, 163 - 175.
- Spencer, K., Jones, M.B., Freney, J.R., 1977. Diagnostic indices for S status of subterranean clover. *Aust. J. Agric. Res.* 28, 410 - 412.
- Stauffer, R.S., Rust, R.E., 1954. Leaching losses, run off and percolate from eight Illinois soils. *Agron. J.* 46, 207 - 211.
- Stewart, B.A., Porter, L.K., Viets, F.G., Jr, 1966. Effect of sulfur content of straws on rates of decomposition and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30, 355 - 358.
- Stevenson, F.J., 1986. Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons, New York.
- Stroehlein, J.L., Pennington, D.A., 1986. Use of sulfur compounds for soil and irrigation water treatments. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) Sulfur in agriculture. *Agron. Monogr.* 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 435 - 454.
- Swift, R.S., 1985. Mineralization and immobilization of sulphur in soils. *Sulphur Agric.* 9, 20 - 25.
- Sýkora, V.: Chemickoanalytické tabulky, SNTL Praha 1976
- Tabatabai, M.A., 1982. Sulfur. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.). Methods of soil analysis. *Agron. Monogr.* 9, ASA, and SSSA, Madison, WI, pp. 501 - 583.
- Tabatabai, M.A., Al - Khafaji, A.A., 1980. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1000 - 1006.
- Tabatabai, M.A., Bremner, J.M., 1970. Arylsulfatase activity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 225 - 229.
- Tabatabai, M.A., Bremner, J.M., 1972a. Distribution of total and available S in selected soils and soil profiles. *Agron. J.* 64, 40 - 44.
- Tabatabai, M.A., Bremner, J.M., 1972b. Forms of sulfur, and carbon, nitrogen and sulfur relationships, in Iowa soils. *Soil Sci.* 114, 380 - 386.
- Tabatabai, M.A., Fu, M.H., 1992. Extraction of enzymes from soil. In: Bollag, J. - M., Stotzky, G. (Eds.), *Soil Biochemistry*, vol. 7. Dekker, New York, pp. 197 - 227.
- Taylor, G.E., Tingey, D.T., 1983. Sulfur dioxide flux into leaves of *Geranium carolinianum* L. *Plant Physiol.* 72, 237 -244.
- Tesař S. et al. (1992): Výživa rostlin a hnojení. VŠZ Praha
- Timmermann, F., Kluge, R., Pflieginger, A., 1995. Schwefel - Düngebedarfsermittlung anhand des N :S_(min) - Verhältnisses im Boden. *VDLUFA - Schriftenreihe* 40, 303 - 306.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., Havlin, U., 1993. Soil fertility and fertilizers. Prentice Hall, New Jersey.
- Tisdale, S.L., Reneau, R.B. Jr, Platou, J.S., 1986. Atlas of sulfur deficiency. In: Tabatabai, M.A. (Ed.) Sulfur in Agriculture. *Agron. Monogr.* 27, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 295 - 322.
- Tsuji, T., Goh, K.M., 1979. Evaluation of soil sulphur fractions as sources of plant available sulphur using radioactive sulphur. *New Zeal. J. Agric. Res.* 22, 595 - 602.
- Vaněk a kol.: Výživa polních a zahradních plodin (2007)
- Vaněk V., Balík J., Černý J., Pavlík M., Pavlíková D., Tlustoš P., Valtera J. (2012): Výživa zahradních rostlin. *Academia*, 568 s. ISBN 978 - 80 - 200 - 2147 - 2
- Wada, S.-I., Kakuto, Y., Itoi, R., Kai, R., 1994. Evaluation of calcium dihydrogen phosphate solution as an extractant for inorganic sulfate applied to soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1425, 1947 - 1955.

- Wainwright, M., Newell, W., Grayston, S.J., 1986. Effects of organic matter on sulphur oxidation in soil and influence of sulphur oxidation on soil nitrification. *Plant Soil* 96, 369 - 376.
- Walker, D.R., Doomenbal, G., 1972. Soil sulfate. II. As an index of the sulfur availability to legumes. *Can. J. Soil Sci.* 52, 261 - 266.
- Walker, K.C., Booth, E.J., 1992. Sulphur research on oilseed rape in Scotland. *Sulphur Agric.* 16, 15 - 19.
- Warman, P.R., Sampson, H.G., 1992. Evaluation of soil sulfate extractants and methods of analysis for plant available sulfur. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23, 793 - 803.
- Watkinson, J.H., 1993. Oxidation rate of elemental sulfur particles with a wide range of sizes. *Austr. J. Soil Res.* 31, 67 - 72.
- Watkinson, J.H., Perrott, 1994. A new soil test for sulphate and mineralized organic sulphur. *Proc. of New Zealand Fertiliser Manufacturers Assoc. Conf.*, pp. 188 - 198.
- Weir, R.G., 1975. The oxidation of elemental sulphur and sulphides in soil. In: McLachlan, K.D. (Ed.), *Sulphur in Australian agriculture*. Sydney University Press, pp. 40 - 49.
- Werner, W., 1999. Nutrient input from industrial waste products. In: *Proc. of the 11th world Fertilizer Congress of CIEC: Fertilization for sustainable plant production and soil fertility*, pp. 7135 - 7152.
- Whalen, J.K., Warman, P.R., 1996. Examination of ester sulfates in podsollic and regosolic soils using an immobilized arylsulfatase reactor. *Biol. Fertil. Soils* 23, 64 - 69.
- White, J.G., 1959. Mineralization of nitrogen and sulphur in sulphur-deficient soils. *New Zeal. J. Agric. Res.* 2, 255 - 258.
- Williams, C.H., 1967. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. *Plant Soil* 26, 205 - 223.
- Williams, J.K., Steinbergs, A., 1959. Soil sulphur fractions as chemical indices of available sulphur in some Eastern Australian soils. *Aust. J. Agric. Res.* 10, 340 - 352.
- Withers, P.J.A., O'Donnell, F.M., 1994. The response of double - low winter oilseed rape to fertiliser sulphur. *J. Sci. Food Agric.* 63, 29 - 37.
- Withers, P.J.A., Tytherleigh, A.R.J., O'Donnell, F.M., 1995. Effect of sulphur fertilisers on the grain yield and sulphur content of cereals. *J. Agric. Sci.* 125, 317 - 324.
- Wrigley, C.V., Du Gros, D.L., Archer, M.J., Downie, P.G., Roxburgh, C.M., 1980. The sulfur content of wheat endosperm proteins and its relevance to grain quality. *Austr. J. Plant Physiol.* 7, 755 - 766.
- Wu, J., O'Donnell, A.G., Syers, J.K., 1993. Microbial growth and sulphur immobilization following the incorporation of plant residues into soil. *Soil Biol. Biochem.* 25, 1567 - 1573.
- Wu, J., O'Donnell, A.G., Syers, J.K., 1995. Influences of glucose, nitrogen and plant residues on the immobilization of sulfate-S in soil. *Soil Biol. Biochem.* 27, 1363 - 1370.
- Yan, F., Mengel, K., 1992. Determination of lime requirement by electro - ultrafiltration (EUF). *Eur. J. Agron.* 1, 71 - 77.
- Zhao, F.J., Almon, S.E., Withers, P.T.A., Monaghan, J.M., Evans, E.J., Shewry, P.R., McGrath, S.P., 1999b. Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions. *J. Cereal Sci.* 30, 19 - 31.
- Zhao, F.J., Evans, E.T., Bilsborrow, P.E., Seyers, J.K., 1994. Influence of nitrogen and sulphur on the glucosinolate profile of rapeseed (*Brassica napus* L.). *J. Sci. Food Agric.* 64, 295 - 304.
- Zhao, F.J., Hawkesford, M.T., McGrath, S.P., 1999a. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *J. Cereal Sci.* 30, 1 - 17.
- Zhao, F.T., Hawkesford, M.T., Warrilow, A.G.S., McGrath, S.P., Clarkson, D.T., 1996. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant Soil* 181, 317 - 327.

Zhao, F.J., Withers, P.T.A., Evans, E.T., Monaghan, J., Salmon, S.E., Shewry, P.R., McGrath, S.P., 1997. Sulphur nutrition: an important factor for the quality of wheat and rapeseed. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43, 1137 - 1142.

Zinder, S.H., Brock, T.D., 1978. Microbial transformations of sulfur in the environment. In: Nriagu, J.O. (Ed.), *Sulfur in the Environment: Part II: Ecological Impacts*. John Wiley, New York, pp. 445 - 466.

Zdroje dostupné online:

Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščíková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MU Brno 2003. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin

Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščíková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MU Brno 2003. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/a_index_agrochem.htm

Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščíková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MU Brno 2003. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/hnojiva/a_index_hnojiva.htm

Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščíková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MU Brno 2003. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/pdf/agrochemie_pudy/s_puda.pdf

Ryant, P., Richter, R., Hlušek, J., Fryščíková, E.: Multimediální učební texty z výživy rostlin. [online]. MU Brno 2003. Dostupné z:

http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/pdf/biogenni_prvky/sira_teorie.pdf

Taylor, R.: Foto: Projev nedostatku síry na pšenici pěstované na velmi lehké půdě s nízkým obsahem organické hmoty v Sussex County, Delaware. [online]. Dostupné z:

<http://agdev.anr.udel.edu/weekllycropupdate/?tag=barley&paged=3>

Použitý software:

StatSoft Inc. (2015): STATISTICA (data analysis software system). ver. 12,

www.statsoft.com

Microsoft Office Excel 2010: Microsoft office Enterprise 2010. USA. release SP2

StatSoft. 2016. Statistica. StatSoft Inc. 1984 - 2015 s.r.o. ver. 12. Praha. Česká republika.