

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Vliv různých systémů hnojení na obsah síry v půdě

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Adéla Kindlová

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulháněk, PhD.

© 2015 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv různých systémů hnojení na obsah síry v půdě" 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 25.3.2015

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Martinu Kulhánkovi Ph.D. za odborné vedení při vypracování diplomové práce a za cenné rady na konzultacích.

Souhrn

Cílem této práce je zhodnotit vliv různých systémů hnojení na obsah minerální síry v půdě. První část literární rešerše popisuje formy síry v půdě a funkce síry v rostlinném organismu, způsoby odběru síry rostlinami a důsledky jejího nedostatku či naopak nadbytku ve výživě rostlin. Uváděny jsou i vizuální symptomy nedostatku síry. Další část literární rešerše se zabývá hnojením sírou. Jsou popisovány druhy minerálních a organických hnojiv obsahujících síru. Práce zkráceně pojednává i o čistírenských kalech a jejich využití pro hnojení sírou.

V další části této diplomové práce je hodnocen vliv různých systémů hnojení na obsah minerální síry v pokusných lokalitách Suchdol, Humpolec a Hněvčevěves v letech 1996 - 2011. V maloparcelkovém přesném polním pokusu byly pěstovány v tříhonném osevním sledu brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. Jednotlivé parcelky byly hnojeny buď čistírenským kalem, hnojem či N,P a K. Kontrolní varianta nebyla hnojena. V archivních vzorcích půdy z let 1996, 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011 byl sledován obsah síry na jednotlivých stanovištích, a to jednak celkový obsah minerální síry a jednak zastoupení jejích jednotlivých frakcí, tedy síra vodorozpustná, síra okludovaná a síra adsorbovaná. I tyto frakce mohou být využity rostlinami, zejména těmi náročnějšími na síru.

Z výsledků je patrná klesající tendence obsahu minerální síry na všech lokalitách, která ovšem může být zpomalena vlivem zvýšené atmosférické depozice oxidů síry na území České republiky. Pozitivní vliv na zásobenost půdy minerální sírou mělo dle výsledků zejména hnojení kalem. Tato varianta hnojení zvyšovala zejména obsah vodorozpustné síry. Varianta hnojení hnojem také vykazovala nárůst obsahu minerální síry v půdě. Tento nárůst byl ale pozorován až v pozdějších letech. V případě hnojení N, P a K došlo ve většině případů ke snížení obsahu minerální síry pod kontrolní variantu, pravděpodobně vlivem zvýšené tvorby biomasy a následného odčerpání síry pro výživu rostlin.

Klíčová slova: čistírenské kaly, půda, síra, dlouhodobé pokusy

Summary

The aim of this diploma thesis is to evaluate the impact of different fertilization systems on the mineral sulfur contents in the soil. The first part of the research describes sulfur forms in the soil and sulfur functions in plants, ways of the plants' sulfur uptake and its deficiency or surfeit in the plants' nutrition. Sulfur deficiency visual symptoms are also presented. The following part of the research is focused on sulfur fertilization describing types of mineral and organic sulfur-containing fertilizers. The dissertation also deals with sewage sludge and its use in sulfur fertilization.

The aim of this work is to evaluate the effect of different fertilization systems on the contents of mineral sulfur in experimental locations in Suchdol, Humpolec and Hněčeves during years 1996 – 2011. In that experiment small plots in the experimental localities had been established with potatoes, winter wheat and spring barley grown in three-fields crop rotation. The small plots were fertilized either with sewage sludge, manure or mineral fertilizers (N, P and K). The control variant was not fertilized. In the individual plots sulfur contents were monitored, both general content of mineral sulfur and the proportion of its individual fractions, in particular water-soluble sulfur, occluded sulfur and adsorbed sulfur. Also these fractions could be utilized by the plants, especially by those more sulfur demanding.

According to the results a tendency of decreasing mineral sulfur contents in all the localities is evident. It may be decelerate by the atmospheric deposition of sulfur oxides in the territory of the Czech Republic though. The results show a positive effect of sewage sludge fertilizing on mineral sulfur contents in the soil. Especially water-soluble sulfur contents were increased by this fertilization option. The manure fertilization also showed increase of mineral contents, this increase was observed in later years though. In the case of NPK fertilizing, the sulfur content was usually lower compared to the control, non-fertilized treatment. It was probably due to the higher yields at NPK treatment and therefore the bigger S uptake by harvested products.

Key words: sewage sludge, soil, sulfur, long-term experiments

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod | 8 |
| 2 Cíl práce | 9 |
| 3 Hypotéza | 9 |
| 4 Literární rešerše | 10 |
| 4.1 Síra - obecné informace | 10 |
| 4.2 Síra v půdě | 11 |
| 4.3 Analýza obsahu síry v půdě | 13 |
| 4.4 Síra a rostliny | 15 |
| 4.4.1 Význam síry pro rostliny | 15 |
| 4.4.2 Příjem síry rostlinami | 16 |
| 4.4.3 Příznaky nedostatku síry | 18 |
| 4.4.4 Nadbytek síry | 20 |
| 4.4.5 Vliv síry na kvalitu produkce vybraných plodin | 20 |
| 4.5 Hnojení sírou | 23 |
| 4.5.1 Aplikace hnojiv se sírou | 25 |
| 4.5.2 Minerální hnojiva obsahující síru | 26 |
| 4.5.3 Organická hnojiva obsahující síru | 27 |
| 4.5.4 Čistírenské kaly | 29 |
| 5 Materiál a metody | 32 |
| 5.1 Analytické stanovení | 33 |
| 6 Výsledky | 35 |
| 6.1 Změny obsahu síry na nehnojených variantách | 35 |
| 6.2 Změny obsahů síry na hnojených variantách | 36 |
| 7 Diskuze | 45 |
| 8 Závěr | 48 |
| 9 Seznam literatury | 49 |
| 10 Přílohy | 53 |

1 Úvod

Tato práce se zabývá vlivem různých způsobů hnojení na obsah minerální síry v půdě. Hnojené varianty jsou porovnávány s nehnojeným kontrolním stanovištěm a jsou pozorovány změny obsahu minerální síry. A to jak frakce adsorbovaná, okludovaná, tak i nejsnáze pro rostliny dostupná, vodorozpustná frakce síry.

Síra je esenciálním prvkem pro všechny organismy. Lze ji nalézt jako součást aminokyselin a následně bílkovin, enzymů, koenzymů, vitamínů apod. Sírné sloučeniny mají velký význam i pro obranné mechanismy rostlin proti biotickým a abiotickým stresům.

Síra se v půdě vyskytuje jak v minerální, tak organické podobě. Poměr mezi těmito formami je značně variabilní. Minerální složka síry je tvořena sírany, sulfidy, siřičitany, polysulfidy a elementární sírou. Nejběžněji se síra vyskytuje ve formě síranů. Organická složka síry se rozděluje na estericky vázanou síru, a na síru přímo vázanou na uhlík.

Rostliny přijímají síru zejména ve formě síranových aniontů SO_4^{2-} . Pouze malé množství mohou rostliny přijímat ve formě nízkomolekulárních organických látek. Příjem síranových aniontů rostliny je citlivý na pH. Rostliny mohou využívat i atmosférický SO_2 .

V minulosti nebyl problém s nedostatkem síry v agroekosystému. Velká část síra tehdy pocházela i z atmosférických depozic SO_2 . Od 80. let ovšem začalo v Evropě docházet k poklesu depozic SO_2 vlivem odsíření uhelných elektráren. Následkem toho byly zaznamenány první příznaky nedostatku tohoto prvku ve výživě rostlin a začalo se s intenzivním výzkumem potřeby hnojení sírou.

2 Cíl práce

Cílem práce je vyhodnocení efektivity dlouhodobé aplikace čistírenských kalů, hnoje a minerálních hnojiv z hlediska různých frakcí síry v půdě v různých půdně-klimatických podmínkách.

3 Hypotéza

V posledních letech dochází k výraznému poklesu obsahu přístupných forem síry v půdě. Proto lze očekávat klesající tendence obsahů minerální síry v půdě a následkem toho vzrůstající význam aplikace hnojiv obsahujících síru. Je rovněž pravděpodobné, že aplikace síry ve formě organických hnojiv nebude dostačující k pokrytí ztrát síry z půdy.

4 Literární rešerše

4.1 Síra - obecné informace

Síra je nekovový prvek, patřící mezi chalkogeny, do VI. A skupiny. Má čtyři stabilní izotopy (^{32}S , ^{33}S , ^{34}S a ^{36}S) a 6 izotopů radioaktivních. Nejčastěji se vyskytuje izotop ^{32}S , a to z 95,1%. Elementární síra je bez chuti, bez zápachu a za normálního tlaku a teploty žlutá pevná látka (Huxtable, 1986).

V přírodě se vyskytuje jak volná tak vázaná, nejčastěji v síranech a sulfidech. Síra se nachází v zemské kůře (0,03-0,09 %) i v mořské vodě. Ve vesmíru připadá 1 atom síry na 60 000 atomů vodíku. V čisté formě ji nalezneme v okolí sopečných činností nebo v okolí minerálních pramenů. Mezi rudy obsahující síru patří pyrit, sfalerit, galenit, cinabarit, chalkopyrit aj., mezi organické zdroje síry patří ropa a uhlí. Nejčastěji se síra v přírodě vyskytuje ve formě sádrovce (oxidovaná forma). V redukované formě ji nalezneme v podobě sulfidů. Do atmosféry se síra dostává zejména ze spalování fosilních paliv a ze sopečné činnosti. V živých organismech je síra součástí některých aminokyselin (cystein, methionin), nachází se také v některých vitamínech (thiamin) a v Fe-S komplexech. Pro sírné bakterie také slouží jako zdroj energie. Síra je také vázána v biomase mikrobů (1-3 %) (Vaněk et al. 2012).

Koloběh síry v přírodě zahrnuje účast mikroorganismů, nižších a vyšších rostlin a živočichů. Nejvíce se na něm ovšem podílejí mikroorganismy a rostliny. Mikroorganismy v sobě mají dobře vyvinuté enzymové systémy dovolující oxidaci i redukci síry. Živočichové, na rozdíl od mikroorganismů a rostlin, nejsou schopni sami redukovat sulfát na sulfid. Mohou tedy pouze přijaté redukované sloučeniny síry oxidovat a zabudovat do vlastních organických sloučenin. Rostliny a většina mikroorganismů přijímají převážně anorganickou formu síry, živočichové formu organickou (Holobradá, 1985).

Síra má velkou reaktivitu, přímo se slučuje se všemi prvky, kromě vzácných plynů, jódu, telluru, iridia, dusíku, platiny a zlata. S vodíkem se slučuje při teplotě 120 °C a s nekovy reaguje za zvýšené teploty. Reaguje též s ozónem. Síra se využívá průmyslově na výrobu léčiv, fungicidů a insekticidů. Dále na výrobu umělého hedvábí, kyseliny siřičité a sírové a při vulkanizaci kaučuku. Síra ve fungicidech se používá zejména proti hnědé hnilobě broskví, padlí jablek, angreštu, chmele. Dále na ochranu okrasných rostlin, hroznů, broskví, jahod, cukrové řepy atd. Má nízké toxikologické účinky, může však způsobovat dýchací potíže (Anonym, 1996).

4.2 Síra v půdě

Z důvodu snížení vstupů síry do půdy, zejména snížení atmosférické depozice a nepoužívání hnojiv obsahujících síru, se tento prvek stává pro rostliny limitujícím. K tomuto stavu přispívá i fakt, že jsou stále více pěstovány plodiny na síru náročné (Kirchmann, 1996). Dle Morche (2008) a Stevenson et al. (2000) se obsah síry v půdě pohybuje kolem 0,1-0,01 %. Dle Zeleného et al. (1996) celkový obsah síry kolísá nejčastěji v rozmezí od 0,01 do 0,05 %. Písčité půdy mohou obsahovat i pod 0,01 %, naopak organické půdy i nad 0,5 %. Dle Matuly (2007) se obsah síry v ornici půd nejčastěji pohybuje mezi 85- 250 mg S/kg.

Poměr k celkovému uhlíku a dusíku (C/N/S) je 78-126/8-13/0,5-1,5. Převážná část celkové síry v půdě je však součástí organické půdní hmoty. Organická část síry v půdě činí 90- 95 % (Tisdale, 1993, Scherer, 2001). V této podobě je nedostupná pro rostliny. Rovněž dle Vaňka et al. (2007) je obsah síry v půdě je značně proměnlivý, pohybuje se od 50 do 500 mg síry na kg půdy. Nejčastěji se síra vyskytuje v organické formě (98 % celkové síry). Rozlišujeme dva typy organických sloučenin síry, a to na:

- Síru vázanou na organické sloučeniny v oxidované formě: estery s lipidy, polysacharidy, glukosinoláty. Tato skupina tvoří převážnou část síry v půdě. Síra je snadno z těchto sloučenin uvolňována při mineralizaci pomocí enzymů (sulfatáza).
- Síru vázanou na organické sloučeniny v redukované formě: do této skupiny patří aminokyseliny (cystein, methionin). Síra je z těchto sloučenin uvolňována hůře. Nejdříve dojde k rozložení sloučeniny na látky jednodušší, dále je odštěpen sulfan, který je dále oxidován na síran.

Poměr mezi organickou a anorganickou formou výskytu síry v půdách je značně variabilní a závisí především na půdním druhu a hloubce odběru vzorku. V humidních a semihumidních oblastech mohou půdy obsahovat i nad 95 % síry v organické formě (Zelený et al., 1996 a Lehmann et al., 2008). Obsah síry v půdě závisí dle Holobradé (1985) na obsahu organické hmoty a na klimatických podmínkách. Až 90 % půdní síry se může nacházet ve formě organických látek. Ve vlhkých podmínkách nastává zvýšená možnost uvolňování sulfátů do půdního roztoku a naopak při suchých podmínkách může docházet k akumulaci sulfátů ve vrchní vrstvě půdy. Akumulací sulfátů se zvyšuje možnost zasolení půdy.

Dle Matuly (2007) můžeme organickou síru v půdě členit na dvě skupiny v závislosti na tom, zda je vázána na uhlíkový skelet organických sloučenin, anebo nepřímo vázána přes

kyslík, dusík, síru. Nepřímo vázána síra je snadněji zapojována do biologických transformací v půdě.

Mezi významné zdroje organické síry patří posklizňové zbytky, kořeny rostlin a statková hnojiva (Vaněk et al., 2012). Organická fáze síry se pro rostliny zpřístupňuje pomocí mikroorganismů. Mineralizací organických sloučenin se tvoří sirovodík, který se v aerobních podmínkách mění (autooxidací) na síran. V anaerobních podmínkách se na oxidaci sulfanu podílejí sírné bakterie *Beggiatoa* a *Thiothrix*. Produktem oxidace je elementární síra, která se za pomoci stejných bakterií může oxidovat na kyselinu sírovou (Holobradá, 1985).

Síra v anorganických sloučeninách se vyskytuje ve formě sulfátů, sulfidů, polysulfidů, thiosulfidů, elementární síry. V dobře provzdušněných půdách se většinou síra vyskytuje v podobě síranů a obsah redukovaných sloučenin síry nestoupá nad 1 %. V aridních oblastech mohou půdy obsahovat velké množství sírných solí (síran vápenatý, síran hořečnatý, síran sodný) (Zelený et al., 1996). Síraný mohou být přítomné v půdním roztoku či v pevném stavu, jako nerozpustná část či nasorbované na částice s kladným nábojem. Síranový aniont je v důsledku odpuzování od povrchu záporných iontů vysoce mobilní v půdě. Při zvýšeném režimu promývání, proto dochází k jeho ztrátám vyplavením z ornice (až 30-80 kg S/ha/rok).

Dle Zeleného et al. (1996) na intenzitu vymývání působí řada faktorů: druh půdy a její vododržnost, klimatické a povětrnostní podmínky, intenzita pěstování plodin a celý systém hospodaření na půdě. Vymývání síry je problémem zejména v písčitých půdách na území s vysokými srážkami. V půdách kyselých (pH pod 4) s vysokým obsahem železa a hliníku může docházet k výměnné sorpci. Horizonty spodních vrstev pak budou vykazovat zvýšenou sorpci síranů, což se projeví zvýšením pH a poklesem půdní kyselosti. Dále mohou síraný tvořit nerozpustné komplexy s aktivní formou hliníku, či může vznikat málo rozpustný síran vápenatý. Ten vzniká na půdách s vysokou koncentrací vápenatých iontů (Matula, 2007 a Balík et al., 2009 a Prietzel et al., 2001).

Dle Holobradé (1985) se síran v podmínkách zavlažování vyskytuje v rozpustné formě v půdním roztoku a v pevné fázi, vázaný na půdní koloidy. Pevná a rozpustná fáze jsou v rovnováze. V přemokřených půdách se anorganická síra nachází ve formě pyritu a sirovodíku. Síraný v našich podmínkách podléhají také biologické sorpci. V půdách dochází i k imobilizačním a mineralizačním procesům. Ty jsou ovlivněny složením substrátu, ale také pH, teplotou a vlhkostí. Imobilizace síranů do organických forem může probíhat velmi rychle. Je řízena mikrobiální aktivitou. Rozsah imobilizace je ovlivněný poměrem C:S. Aplikace organických látek zvyšuje imobilizaci síry a snižuje její dostupnost rostlinám (Zelený et al., 1996). Síra se může také vyskytovat ve formě sulfidů S^{2-} . Vyskytuje se tak v anaerobních

podmínkách, ve kterých dochází k redukčním procesům s produkcí látek toxických pro rostliny

Síra se do půdy dostává i z atmosféry mokrou či suchou depozicí, zejména na území vnitrozemských států s intenzivní průmyslovou činností. Poté je přijímána kořeny rostlin či adsorpcí listy (Eriksen et al., 1998). Mezi antropogenní zdroje oxidů síry patří elektrárny, teplárny, rafinerie a jiné zdroje provádějící spalování paliv, zejména hnědého uhlí, kdy dochází k oxidaci síry vázané zejména jako FeS_2 (pyrit) na oxid siřičitý SO_2 . Při spalování tuhých paliv přechází asi 95 % na SO_2 , u kapalných přechází 100 %. Doba setrvání oxidu siřitého je 2-6 dnů. V atmosféře se síra s oxidačním číslem +4, ve kterém se vyskytuje v oxidu siřičitém, dále oxiduje na oxidační číslo +6 (oxid sírový, kyselina sírová). Oxidující látkou může být například ozon či hydroxylový radikál.

Dle Lehmann et al. (2008) se atmosférické emise SO_2 na celém světě zvýšily 6-20x v období od poloviny roku 1800 do 1960, následkem čehož docházelo ke zvýšenému ukládání síry, kyselým dešťům a okyselování suchozemských a vodních ekosystémů. Ovšem za posledních 30 let došlo k výraznému snížení antropogenního SO_2 v mnoha evropských a severoamerických zemích. Přesto se anorganický podíl síry dále uvolňuje z lesních povodí a dochází k okyselení půd. Na našem území dochází od 80. let k poklesu atmosférické depozice z důvodu odsíření uhelných elektráren. Dle Bartošky (2004) byl v roce 1985 spad na jeden hektar 140 kg S za rok, v roce 2002 poklesl na 16 kg S/ha za rok. V letech 1986-1999 poklesly emise SO_2 o 88 %. Dle CHMÚ (2012) byla celková depozice síry v roce 2012 0,579 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Existují samozřejmě rozdíly v množství depozice síry v různých oblastech republiky. Největší depozici síry nacházíme v Ústeckém kraji. Platí však, že na většině našeho území se obsah síry dostal pod 10 kg/ha/rok a proto je síra dodávána ve formě hnojiv. Proto dle Vaňka et al. (2012) platí, že pokud klesne input S z ovzduší v humidnějších oblastech pod 15 kg S/ha/rok, je nutné dodat síru hnojením.

4.3 Analýza obsahu síry v půdě

Obsah síranů a rozpustných organických forem síry, které mohou být přijímány rostlinami, vykazuje velkou variabilitu v čase a prostoru. Je ovlivňován vodním režimem, mikrobiologickou aktivitou, dávkami síry a následným odběrem rostlinami (Ghani et al., 1990 a Anderson et al., 1992). Dle McGrath et al. (1994) se obsah využitelné síry mění i s hloubkou odběru vzorku. Dle Matuly (2007) je v případě síry komplikovaná situace tím, že jen část síry v půdě je využitelná pro rostliny. Z větší části je síra součástí organické hmoty,

kteřá je pro rostliny nedostupná.

Ke zjištění obsahu síry v půdě se využívá mnoho metod. Obsah síry může být zjišťován pomocí různých extrakčních činidel, nebo pomocí různých metod koncového stanovení, kdy mohou být stanovovány sírany či jiné formy síry. Mezi nejčastěji používané extrakční činidla patří voda, dále CaCl_2 , LiCl . Adsorbovanou síru mohou extrahovat například KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$, $\text{NH}_4\text{OAc}+\text{HOAc}$. Ke stanovení SO_4^{2-}S a síry extrahovatelné z organických sloučenin se začala používat atomová emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP-AES) (Zelený et al., 1996). Rostliny nejnázve přijímají sírany, půdní test by tedy měl být zaměřován na tu část síry, která je na sírany nejlépe převeditelná a tím také dobře využitelná pro rostliny. Při testu s použitím různých extrakčních činidel (Mehlich 3, Mehlich 2, KVK-UF, 0,01 M CaCl_2 , voda (1:5), 0,01 M $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$, simulovaný půdní roztok, sinkový postup sorpce na ionexové kapsle PST-1) se ukázalo, že se vzrůstem extrakční síly činidla klesal soulad s využitelností a dostupností síry. Zvláště Mehlich 3 extrahuje i značný podíl nevyužitelné síry (Matula, 2007).

4.4 Síra a rostliny

4.4.1 Význam síry pro rostliny

Síra je esenciálním prvkem pro výživu rostlin. Nejvíce jí obsahují semena. Síra je složkou některých aminokyselin jako cystein či methionin a tedy i bílkovin a enzymů, prostetických skupin či vitamínů a koenzymů. Síra je také obsažena v biologických membránách ve formě sulfolipidů. Sulfolipidy taktéž ovlivňují transport iontů membránami a mají vliv na toleranci ke koncentraci solí (Vaněk et al., 2012, Pedersen et al., 1998).

Dle Holobradé (1985) a Bergmann et al. (1992) je nejvýznamnější funkcí síry v rostlinách její strukturální funkce v proteinech. Sulfát se přes různé mezistupně redukuje na cystein. Po přenosu –SH skupiny z cysteinu na homoserin vzniká homocystein. Po následné transmetylaci se syntetizuje methionin. Methionin je nezbytnou stavební jednotkou bílkovin a také dárce methylových skupin, zúčastňuje se tvorby cysteinu, cholinu, kreatinu a adrenalinu. Na methioninu závisí biosyntéza ethylenu, který urychluje zrání květů a plodů (Davies et al., 1995). Při nedostatku síry je inhibována syntéza bílkovin, klesá množství chlorofylu a naopak roste množství škrobu.

Dle Zeleného et al. (1996) je 90 % redukované síry součástí cysteinu a methioninu. Cystein se přímo účastní metabolických reakcí pomocí skupiny –SH. Spolu s cystinem na něm závisí tvorba některých biologicky aktivních látek. Cystein je podstatnou částí glutathionu, je předchůdcem taurinu a koenzymu A (Holobradá, 1985 a Bergmann et al., 1992). Síra je také nepostradatelnou součástí thiazolového cyklu, který je složkou thiaminu. Ten je důležitý pro dekarboxylaci pyruvátu, oxidaci ketokyselin aj. Její sloučeniny hrají významnou roli při odolnosti proti biotickým a abiotickým stresům. Například fytochelatiny blokují těžké kovy v kořenech rostlin. Síru můžeme také nalézt v charakteristických silicích a olejích mnoha rostlin (brukvovité, cibule, česnek). Rostliny mají na síru proměnlivé nároky, nejmenší nároky mají obilniny a luskoviny. Naopak největší potřebu síry mají olejniny. Dle Zeleného et al. (1996) její obsah v sušině rostlin kolísá od 0,1 do 0,5 %.

Mnoho sirných sloučenin v rostlinách má vliv na lidský organismus svými antimikrobiálními, antioxidačními a antikarcinogenními účinky. Za zmínku stojí například izothiokyanáty ($R-N=C=S$), které inhibují růst plísní a bakterií a chemicky indukovaného nádorového bujení. V tomto případě se jedná zejména o sulforafan obsažený v brokolici. Jiné izothiokyanáty jsou však strumygenní. Další významnou skupinou sirných látek jsou glukosinoláty. Problémy nastávají při jejich štěpení, kdy vznikají fyziologicky účinné látky. Typickými účinky jsou zejména účinky strumygenní, hepatotoxické, nefrotoxické,

antimikrobiální, insekticidní. Také mohou způsobovat poruchy růstu. Mezi jejich pozitivní účinek však patří antikarcinogenní působení (Vaněk et al., 2012).

Metabolismus síry úzce souvisí s metabolismem dusíku (syntéza bílkovin, enzymové systémy, tvorba specifických látek). Poměr síry k dusíku N/S by měl být charakteristický pro jednotlivé rostliny (viz Tab.1). Na jeden atom síry připadá v bílkovinách 34-36 atomů dusíku. Pokud tento údaj převedeme na hmotnostní vyjádření, dostáváme poměr N/S 15,77-14,87/1. Síra organických sloučenin může být v rostlinách zpátky reoxidována na síran a v rostlinách se také významně uplatňují i organické sloučeniny se sírou v oxidované formě (Vaněk et al., 2012, Matula, 2007).

Tab.1 Hmotnostní poměr N/S (dle Matuly, 2007)

| Druh plodiny | Hmotnostní poměr N/S |
|---------------------|-----------------------------|
| Pšenice | 14,1 |
| Cukrovka | 16,6 |
| Jílek | 16,2 |
| Vojtěška | 16-17 |

4.4.2 Příjem síry rostlinami

Síra je převážně přijímána kořeny rostlin ve formě síranového aniontu SO_4^{2-} z půdy. Příjem je málo ovlivňovaný ostatními ionty v půdním roztoku a půdními vlastnostmi (Vaněk et al., 2007). Síra se tedy postupně uvolňuje z méně rozpustných (i organických) sloučenin přes sloučeniny více rozpustné až na síran, který je využitelný pro rostliny. Ve formě organické (aminokyseliny) mohou rostliny přijímat pouze malý zlomek síry. Na příjem síranových aniontů kořeny nemá za normálních podmínek výrazný vliv pH (Holobradá, 1985, Kulhánek et al., 2011). Ve fyziologickém rozmezí pH jsou síranové ionty přijímány v relativně malém množství a jsou transportovány převážně xylémem (Zelený et al., 1996). Dle Richtera (2008) není hnojení sírou při nižších dávkách dusíku efektivní. Efekt síry je závislý na obsahu. Na příjem sulfátů působí inhibičně anionty chloridové, fosfátové a selenátové. Příjem sulfátu závisí na obsahu iontů v půdním roztoku. Specifická permeáza zajišťuje přenos sulfátu přes membránu kořenné buňky. Využitím sulfátů nebo přenosem na místa aktivního metabolismu jsou sulfáty odčerpávány ze zásobních míst buňky a je indukován jejich další příjem (Richter, 2004). Po příjmu jsou přijaté sírany redukovány a poté jsou zabudovány do organických látek. Dle Vaňka (2012) a Huxtable (1986) dochází u vyšších rostlin nejdříve k aktivaci síranu adenosintrifosfátem (ATP). Při této reakci za účasti

enzymů reaguje sulfát s ATP a vzniká adenosinfosulfát (APS) a dochází k odštěpení pyrofosfátu. APS je výchozí látkou pro zabudování síry do organických sloučenin. V současné době jsou známy dva způsoby včlenění se síry do organických sloučenin:

1. Redukce síranu: z APS se sulfátová skupina přenesne na nosič (glutathion) a váže se na jeho –SH skupinu. Vodík je nahrazen sulfonovou skupinou –SO₃H. Dále je tato skupina za účasti ferredoxinu redukována na skupinu –SH, která reaguje s acetylserinem za vzniku cysteinu. Z cysteinu jsou dále syntetizovány další organické látky. Především v nadzemních částech rostlin vede redukce síranů k tvorbě glutathionu, který je transportní ale také zásobní látkou. Je využíván k mnoha syntézám, včetně bílkovin. Má i antioxidační funkce v buňce aj. Redukce síranů probíhá v chloroplastech a je výrazně aktivována světlem. Vysoká aktivita je v mladých listech, ve starších podstatně klesá. V kořenech je aktivita soustředěna do plastidů.
2. Syntéza síranových esterů: V tomto případě je APS nejprve aktivován ATP. Při tomto procesu se uvolňuje kyselina trihydrogenfosforečná H₃PO₄, která se dále váže na –OH skupinu cukerné složky adeninu a vzniká fosfoadenosinfosulfát (PAPS). Tento aktivovaný sulfát se váže jako –SO₃H na organické sloučeniny (lipidy, polysacharidy) a slouží k tvorbě glukosinolátů (Vaněk et al., 2007, 2012, Huxtable, 1986, Holobradá, 1985).

Dále mohou rostliny přijímat síru i ve formě SO₂ z ovzduší. Při nízkých koncentracích mohou takto nahrazovat síranové ionty (Zelený et al., 1996). Olsen (1957) zjistil, že bavlník může takto přijímat až okolo 30 % své potřeby. SO₂ je přijímán průduchy a dále je schopen tvořit uvnitř rostlinného těla S proteiny a S aminokyseliny a sulfáty. Rostliny také mohou přijímat síru z kapalných hnojiv svými listy. Dle Vaňka (2007) je síra v rostlinách dobře pohyblivá. Je transportována zejména do mladých listů a meristémů. V rostlinném těle je hromaděna ve formě síranu, který může být redukován na sulfan a zabudován do organických sloučenin. O nedostatku síry dobře vypovídá obsah síranových aniontů v rostlinném těle. Pokud jejich obsah klesne pod 100 mg/kg v sušině (0,01 %) většinou se projeví S-nedostatek. Celkový obsah síry v pletivech se pohybuje okolo 0,2-0,5 % v sušině.

4.4.3 Příznaky nedostatku síry

Příznaky nedostatku síry souvisí s její funkcí v rostlinném těle. Pokud klesne obsah síry v půdě pod určitou kritickou hranici, dochází k narušení syntézy aminokyselin obsahující síru a narušení tvorby některých proteinů. Dle Bartošky (2004) nedostatek síry snižuje fotosyntetickou asimilaci, což vede ke snížení produkce cukrů, bílkovin, škrobu a olejů. Dále dochází ke snížení rezistence rostlin proti chorobám a škůdcům. Tím se zvyšují náklady na fungicidy a přípravky na ochranu rostlin.

Dle Bittnera (2013) souvisí úloha síry v rostlinném organismu s metabolismem dusíku. Při aplikaci dusíku většinou dochází k snížení pohyblivosti půdně vázané síry. Nízký obsah síry v půdě snižuje využití dusíku, zvyšuje obsah nitrátů v pletivech, dochází ke snížení rezistence rostlin proti chorobám.

Dle Vaňka et al. (2012) je snížena aktivita některých enzymů např. nitrátoreduktázy. Přijaté nitráty nejsou v dostatečné míře převáděny na amoniak. V rostlinách je tedy omezena tvorba primárních látek obsahujících dusík, což vede k omezení tvorby aminokyselin a dále bílkovin. Nevyužitá nitrátů se hromadí v rostlinných pletivech. Omezená asimilace vede ke snížení obsahu sacharidů v rostlinném těle.

Dle Zeleného et al. (1996) dochází také k vzestupu ostatních nesírných aminokyselin, zvláště amidů a k hromadění nitrátů. Je inhibován růst nadzemní části rostliny. Z důvodu omezené mobility síranových aniontů SO_4^{2-} v rostlinném těle, příznaky deficitu síry se nejdříve objevují na mladších listech, které jsou zeleno-žluté. Starší listy jsou oproti tomu zeleno-modré či zelené. Chloróza začíná od okrajů listů a postupně se dostává k žilnatině, která i přes jakýkoliv hluboký nedostatek síry zůstává zelená (Bergmann, 1992). Vzájemný vztah mezi sírou a zbarvením listů se vysvětlil objevením vysokého obsahu síry v proteinech chloroplastů (Holobradá, 1985). U bobovitých rostlin dochází vlivem nízkého příjmu síry k snížení či zastavení poutání vzdušného dusíku (Bartoš, 1968). Dle Vaňka et al. (2012) je deficit síry viditelný nejprve na vrcholové části rostlin. Dle Kaliny (2005) brukvovité mají specifické příznaky nedostatku síry, dochází u nich k zesvětlení nejmladších listů, které později žloutnou a mají růžový nádech.

Nejlevnějším prostředkem k diagnostice deficitu síry na pozemku jsou vizuální symptomy. Dle Matuly (2007) už bohužel ukazují hluboký stupeň disproportionace, který již nelze podstatně usměrňovat hnojením. Jedná se tedy spíše o informaci, která může být využita pro následně pěstované rostliny na dotčeném území. Symptomy deficitu síry nejsou zcela jednoznačné a mohou být zaměněny s deficitem dusíku (jedná se o chlorózy na mladších

listech). Dle Zeleného et al. (1996) ovšem při nedostatku dusíku dochází k zesvětlování celé listové čepele a v případě nedostatku hořčíku k mezižeberné chloróze u starších listů. Chloróza z nedostatku síry ovšem začíná od okrajů listů a rozšiřuje se k žilnatině, která zůstává zelená. Indikační plodinou S-deficitního stanoviště je řepka. Pokud si symptomů povšimneme do fáze intenzivního dlouhivého růstu, lze provést nápravu hnojením. V tomto případě můžeme zachránit výnos semene. Dle Zeleného et al. (1996) se deficit síry v jednotlivých růstových fázích projevuje odlišně.

V **rané fázi** růstu dochází vlivem nedostatku síry k retardaci růstu, mramorování listů a snížení přirozené odolnosti rostlin ke škůdcům a chorobám. Od okrajů listů se začíná rozšiřovat chloróza směrem k žilnatině.

V **hlavní růstové fázi** jsou listy, které jsou nedostatečně zásobeny sírou, deformované, mramorované a mají typický lžičkovitý tvar. Na rostlinách můžeme pozorovat červené zabarvení, které je způsobeno antokyany. Syntéza antokyanů se zvyšuje s rostoucí koncentrací glukózy.

V **době květu** dochází k deformaci květů (místo kruhových květů jsou květy vejčité) a k jejich bílému zabarvení. Bílá barva je způsobena tvorbou bezbarvých leukoantokyanů. Namísto žlutých flavonů.

V **době dozrávání** dochází k snižování počtu šesulí a dále také ke zmenšování jejich velikosti. Šesule jsou světle zelené, měkké, scvrklé a často kombinované s antokyanovým zabarvením. Obilniny trpící nedostatkem síry mají menší, užší listy, kratší a slabší stébla. Dále tvoří méně klasů s menším počtem zrn. U jiných rostlin jsou příznaky deficitu síry méně specifické než u řepky. Mezi příznaky nedostatku patří:

- ✓ retardace celkového růstu,
- ✓ chloróza od okrajů listů (žilnatina vždy zelená),
- ✓ deformované listy (lžičkovitý tvar listů u dvouděložných rostlin).

Dle Vaňka et al. (2012) je deficit síry dáván také do souvislosti s výskytem některých chorob a škůdců. Rostlina se stává méně odolnou v důsledku omezení tvorby určitých specifických látek a snížení obranného systému rostlin. Je uvažován i zvýšený infekční tlak některých chorob v důsledku snížení vstupů SO₂ z ovzduší.

4.4.4 Nadbytek síry

Stejně jako nedostatek síry i její nadbytek působí negativně na rostliny. Nadbytek síry a jeho působení můžeme rozdělit do dvou skupin, dle toho v jaké formě se síra vyskytuje. První skupinou jsou síranové anionty SO_4^{2-} . Síra v této formě nepůsobí ve svém nadbytku příliš negativně. Vyšší obsah síranových aniontů snášejí rostliny poměrně dobře. Dle Vaňka (2012) působí sírany depresivně až při vysoké koncentraci (nad 4000 mg/L půdního roztoku). Vyšší obsah síranů ovšem může způsobovat, za spolupůsobení s Cl a kationty Na a K, zasolení půd a zvýšenou koncentraci solí v půdním roztoku v aridních oblastech a v krytých objektech (skleníky, ...)

Druhým faktorem je negativní působení SO_2 z ovzduší. Velmi známé je negativní působení oxidu siřičitého ve formě „kyselých dešťů“ zejména na jehličnany. Dle Zeleného et al. (1996) nejsou symptomy poškození rostlin zapříčiněné nadbytkem oxidu siřičitého specifické a mohou být zaměněny s těmi, které působí sucho, zasolení a vysoké teploty. Akutní poškození se projevuje podobně jako poškození kyselinou sírovou H_2SO_4 . Při chronickém působení listy žloutnou. Dochází k vybělení pletiv mezi žilnatinou důsledkem rozkladů chlorofylu a karotenu. Listy opadávají a stromy odumírají (Bergmann, 1992). Nadbytek síry v rostlině také vadí při zkrmování, kdy u zvířat dochází k narušení metabolismu mědi (Zelený et al., 1996). Dle Vaňka et al. (2012) dochází k poškození pletiv rostlin již při koncentraci nad 0,3 mg SO_2/m^3 vzduchu. Citlivé jsou zejména jehličnany. V současnosti díky odsíření uhelných elektráren nedochází k plošnému znečištění oxidem siřičitým. Vysoké koncentrace mohou být dosahovány lokálně v místech s omezenou cirkulací vzduchu při vytápění hnědým uhlím.

4.4.5 Vliv síry na kvalitu produkce vybraných plodin

Vliv síry na kvalitu produkce vychází zejména z jejích funkcí v rostlinném těle. Jak bylo zmíněno výše, síra je součástí sirných aminokyselin, jako jsou methionin a cystein. Taktéž ji můžeme nalézt jako součást rozličných látek plnicích v rostlinném těle specifické funkce, jako například thioly, sulfilipidy a sekundární metabolity. Zejména sekundární metabolity slouží například pro výrobu insekticidů, fytofarmak a v poslední době jsou podrobovány výzkumu kvůli jejich protirakovinným účinkům.

Mezi plodiny náročné na výživu sírou patří **ozimá řepka**. Má ovšem také zvýšenou schopnost uvolňovat síru i z méně mobilních forem, a to díky enzymu arylsulfatáze. I díky vylučování H^+ iontu dokáže rozpouštět i chemicky vázanou síru. S nedostatky se setkáváme

zejména na půdách lehkých až středních, s nízkou hladinou spodní vody, vysokou srážkovou intenzitou v zimě a s nedostatečným organickým hnojením (Baranyk et al., 2007). U ozimé řepky hraje síra zejména roli v její olejnatosti a obsahu glukosinolátů. Přídavkem síry se zvyšuje olejnatost řepkového semene a také se zvyšuje obsah glukosinolátů (Kulhánek et al., 2011). Dle Zukalová et al. (2003) jsou glukosinoláty, které podlehly rozkladu, problematické ve výživě zvířat. Jsou pro zvířata toxické, působí antinutričně.

U **ozimé pšenice** dochází při nedostatku síry na stanovišti k zhoršení pekařské kvality zrna a to ještě před poklesem výnosu. Síra pozitivně ovlivňuje obsah dusíkatých látek v zrně a zvyšuje sedimentační hodnotu (Schnug et al., 1998). Nedostatek síry také způsobuje zvýšenou kumulaci asparaginu, což vede k možnému vzniku akrylamidu během pečení. Akrylamid je potencionálně karcinogenní.

Ve výživě **sladovnického ječmene** hraje významnou roli vyrovnanost obsahu jednotlivých živin v půdě. Je to způsobeno jeho slabě vyvinutým kořenovým systémem a krátkou vegetační dobou. Dle Richtera et al. (2008) má jarní ječmen v prvních 30 dnech značné nároky na síru. Ta je potřebná pro nárůst biomasy, jelikož ovlivňuje využitelnost dusíku právě v procesu její tvorby. Deficit síry se v pozdějších stádiích vývoje těžce napравuje, pro výnos 6-7 t zrna je potřeba mít v půdě kolem 30 kg S/ha (Ivanič, 1984 in Richter et al., 2008). Nedostatek síry také způsobuje zhoršenou sladovnickou kvalitu ječmene.

Ve výživě **máku** má síra taktéž nezastupitelnou úlohu. Při jejím nedostatku dochází k zhoršení zdravotního stavu rostliny, k poklesu olejnatosti a omezení využití dusíku rostlinou. Síra působí pozitivně či stabilizačně na obsah morfinu v makovině (Richter, 2008).

U **travních porostů** ovlivňuje síra využitelnost dusíku a tím ovlivňuje nutriční hodnotu. Zvyšuje obsah bílkovinného dusíku a snižuje koncentraci nežádoucích nitrátů a volného dusíku, který není poutaný v bílkovinách. Přebytek síry nad 0,3 % působí také negativně, jelikož snižuje dostupnost jiných živin, jako jsou molybden a měď (Kulhánek et al., 2011).

Dle Richtera et al. (2013) je **cukrovka** plodinou vyžadující značné množství síry. Pro dobrou sklizeň je potřeba 30 - 50 kg síry na hektar. V listech by se měl obsah síry pohybovat okolo 0,6 - 1 % sušiny, v kořeni by měl dosahovat 0,1 - 0,2 % v sušině. Nedostatek síry je možné řešit také mimokořenovou výživou. Vliv síry při pěstování řepy cukrovky je v syntéze proteinů. Poměr dusíku k síře je 15:1 (Draycott et al., 2005). Dle Thomase et al. (2003) způsobuje nedostatek síry ve výživě cukrovky zhoršení čistoty řepné šťávy kvůli navýšení obsahu α -aminodusíku. Dle Bittnera (2013) nedostatek síry negativně ovlivňuje kvalitu bulev a výnos. Hydroponické pokusy prokázaly, že při nedostatečném zásobení sírou vzrůstá obsah

α -aminodusíku více než dvojnásobně. Tento zvýšený obsah snižuje výtěžnost bílého cukru.

Pro **luskoviny** je dle Kulhánka et al. (2011) síra jakožto součást enzymu nitrogenázy, významná z důvodu poutání vzdušného dusíku. Luskoviny také obsahují velké množství bílkovin, což je významné z dietetického hlediska. Právě nedostatek síry a posléze sirných aminokyselin může mít negativní vliv na kvalitu semen luskovin (Scherer et al., 2006, Evans et al., 1985).

Co se týká **zeleniny**, různé rostliny mají různé nároky na síru. Dle Kaliny (2005) jsou nejnáročnějšími plodinami košťáloviny a řeřichy, ředkve, ředkvičky, křen, cibule, česnek, chřest. Naopak listová a kořenová zelenina nepatří mezi plodiny náročné na síru. Síra ovlivňuje vedle syntézy aminokyselina posléze bílkovin, také obsah sirných látek, pro které je zelenina mnohdy ceněná. Dle Kulhánka et al. (2011) vede nedostatek síry k hromadění dusíku v nebílkovinné formě, včetně nitrátů. Náročné druhy zeleniny by měly mít k dispozici 0,5 až 1 kg na 100 m² síry. Vhodné je kombinovat hnojení sírou současně s hnojením dusíkem (Kalina, 2005).

4.5 Hnojení sírou

Dle Zeleného et al. (1996) se v období od 50. let 20. století dostávalo velké množství „balastní“ síry do půdy s narůstající spotřebou průmyslových NPK hnojiv. Dle Šilara (1973) se v období mezi léty 1966-1968 v bývalé ČSSR dostalo do půdy spolu s NPK hnojivy 263 102 tun síry. Z tohoto množství 53,65 % (141 173 tun) připadlo na fosforečná hnojiva, nejvíce zastoupená superfosfátem, a 34,25 % (90 132 tun) připadlo na dusíkatá hnojiva, reprezentovaná zejména síranem amonným. Organickými hnojivy se do půdy navrátilo 35 214 tun síry, tedy 13,38 % celkového dodaného množství síry. *Na 1 ha půdy se dodávalo 37 kg síry průmyslovými hnojivy, 5 kg organickými hnojivy, méně než 0,1 kg pesticidy, 25 kg v atmosférických srážkách, 30-100 kg přímou sorpcí povrchem půdy a 2 kg v popílcích. Ročně se odebralo cca 10 kg síry na ha a ztráty vyplavením činily asi 50 kg síry* (Zelený et al., 1996). Největší spotřeba průmyslových hnojiv na našem území byla zaznamenána v roce 1983 a dle Cenia (2014) byl velký pokles zaznamenán po roce 1990, v roce 1991 množství aplikovaných průmyslových hnojiv kleslo pod hranici 70 kg/ ha orné půdy. V roce 2008 spotřeba živin v průmyslových hnojiv vzrostla na 110,6 kg/ha a v posledních letech (2011, 2012) se pohybuje okolo 117,5 kg na hektar. Z tohoto největší množství připadá na dusíkatá hnojiva, a to z 84 %. Fosforečná a draselná hnojiva se na tomto množství podílejí z 10 % (fosfor) a z 5 % (draslík).

Dříve (před odsířením uhelných elektráren) se problém dostatku síry pro výživu rostlin nemusel nijak významně řešit, jelikož prostřednictvím emisí SO₂ byla bilance síry pozitivní. Po odsíření elektráren celkové emise síry začaly klesat. Dle Kulhánka et al. (2009) je současná depozice S (suchá i mokrá) 15-30 kg S/ha). Na biologickém nedostatku síry se dále podílí méně intenzivní aplikace minerálních hnojiv s pozmeněným složením, omezení aplikace hnoje, pěstování rostlin s vysokými nároky na síru na velkých plochách. Obsah síry dostupné pro rostliny v půdě klesá a na rostlinách mohou být v některých případech patrné příznaky nedostatku tohoto prvku (Vaněk et al., 2013, Kulhánek et al., 2011). Dle Bartošky (2004) je v současné době dobře zásobeno sírou 15 % půdy, 10 % vykazuje velký nedostatek zásobení sírou, 60 % střední nedostatek a 15 % půd vykazuje malý nedostatek síry. Nejnáročnější naší plodinou na spotřebu síry je ozimá řepka. Dle některých autorů potřebuje řepka pro dobrý výnos odebrat z půdy 70-90 kg S/ha. Dle Matuly (2007) je rozhodujícím obdobím ve výživě řepky sírou období po obnovení jarní vegetace od počátku dlouhivého růstu až do počátku kvetení (od konce března do 2. týdne v květnu). V tomto období, kdy porost je ve fázi intenzivního růstu potřebuje mít k dispozici zásobu minimálně 30-40 kg

S/ha. Tato zásoba musí být ve formě síranů v hloubce půdy okolo 10-30 cm. Odběr síry od počátku vegetace do začátku zimního období se pohybuje okolo 10-15 kg S/ha (maximálně) a poté (v období zimního klidu) klesá. Na množství síry potřebné v zimním období má vliv průběh zimy a stupeň poškození porostu. Dle Vaňka (2013) je optimální koncentrací pro maximální výnos v rostlině poměr N/S v rozpětí 4,5-7,1. Při nižších dávkách dusíku stimuluje zvýšená hladina síry jeho příjem, zatímco při vyšších dávkách dusíku je tato závislost potlačena. Maximální odběr síry je na lokalitách, které se vyznačují síranovou tvrdostí spodních vod, dále v sušších ročnicích (intenzivní transpirace zesiluje vztlínání spodních vod bohatých na sírany). Významné pro správnou výživu sírou má hnojení vodorozpustnou sírou, sírany. Sírany je vhodné hnojit spolu s druhou nebo první dávkou jarního hnojení dusíkem. Jak bylo napsáno výše, krizové období připadá na konec března, jedná se tedy o období po zimě, kdy převládá zasakování srážkové vody. Tato voda má minimální obsah síry oproti vyššímu obsahu síranů v hlubších vrstvách půdy. V druhé polovině dubna v závislosti na počasí dochází k změně směru pohybu vody v profilu půdy. Vztlínající voda má vyšší obsah síranů než voda srážková. Nedostatek síry je markantní na lehkých půdách, které ve zvýšené míře podléhají vymývání a při omezeném hnojení statkovými hnojivy (Matula, 2007, Baranyk et al., 2007).

4.5.1 Aplikace hnojiv se sírou

Jak bylo popsáno výše, síra může být aplikována nejen do půdy, ale i foliárně. Dle Kulhánka et al. (2013) se foliárně aplikovaná síra dostává do listů velmi rychle. Na foliární hnojení je lepší použít elementární síru, která před adsorbací listy musí být oxidována na sírany. Tento proces je pozvolný a dochází tak k postupnému zásobení rostliny sírou. Při použití síranových hnojiv dochází k jejich zadržení ve vakuolách a pouze menší část z nich připadá na zvýšení výnosu.

Kapalná hnojiva: Jsou významná svojí rozpustností a slučitelností s ionty. Dle Valenty (2001) rozlišujeme kapalná hnojiva na bázi elementární síry, thiosíranů a na bázi síranů. Kapalná hnojiva na bázi elementární síry jsou směsi elementární síry ve vodném roztoku o velikosti do 70 μm . Tato velikost umožní oxidaci síry na síranový aniont a přijetí rostlinou. Tato hnojiva obsahují vysoký podíl síry (až 50 %).

Hnojiva na bázi thiosíranů jsou vodné roztoky thiosíranu draselného či amonného. Kombinují výhodu hnojení elementární sírou a výhodu hnojením síranem, protože se po aplikaci rozkládají na dvě části, a to na: elementární síru, která zůstává na povrchu listů a má fungicidní vlastnosti a na síran, který vstupuje do rostliny. Hnojiva na bázi síranů jsou vodné roztoky síranů, doplněné čpavkovým dusíkem, mnohdy v kombinaci s močovinou. Nevýhodou je nižší obsah síry.

Granulovaná hnojiva: Granulovaná hnojiva mohou být na bázi elementární síry. Zde rozhoduje velikost, protože elementární síra je nerozpustná. Obsah síry v těchto hnojivech může dosahovat až 90 % síry. Nevýhodou je jejich pomalá rychlost uvolňování, daná zejména klimatickými podmínkami ČR.

Dále rozlišujeme granulovaná hnojiva na bázi síranů. Využívá se zde převážně síran vápenatý, ale i síran draselný a hořečnatý. Postupně byly vytlačeny hnojivy na bázi síranu amonného. Síran amonný je nejrozšířenější hnojivo. Tato hnojiva mají vysoký obsah síry. Výhodou je i přítomnost dusíku. Mezi jejich nevýhody patří horší mechanicko-fyzikální vlastnosti a jejich fyziologická kyselost (Valenta, 2011, Matula, 2007).

4.5.2 Minerální hnojiva obsahující síru

Průmyslově vyráběná hnojiva mohou vedle síry obsahovat i další sloučeniny. V tabulce 2 jsou dle Zeleného et al. (1996) uvedena nejdůležitější hnojiva obsahující síru.

Tab.2 Nejdůležitější minerální hnojiva obsahující síru (Zelený et al., 1996)

| Hnojivo | N:P ₂ O ₅ :K ₂ O (%) | S (%) | Ostatní živiny (%) |
|------------------------|---|-------|--------------------|
| Síran amonný | 21:0:0 | 24 | |
| Superfosfát | 0:16-18:0 | 11-12 | |
| Síran draselný | 0:0:50 | 18 | |
| Sádra (síran vápenatý) | 0:0:0 | 15-18 | |
| Síran manganatý | 0:0:0 | 14 | 24 (Mn) |
| Síran hořečnatý | 0:0:0 | 13 | 10 (Mg) |
| Kieserit (gran.) | 0:0:0 | 22 | 16 (Mg) |
| Kamex | 0:0:40 | 4 | 4 (Mg) |
| Kainit | 0:0:12-14 | 5-6 | 4 (Mg) |
| Hořká sůl | 0:0:0 | 16 | 9 (Mg) |
| Elementární síra | 0:0:0 | 80-90 | |

Síran amonný: Je u nás nejrozšířenějším hnojivem se sírou. Předností tohoto hnojiva je, že současně při hnojení dusíkem dodá síru, která je významná pro efektivní využití dusíku. Dle Matuly (2007) dodá 100 kg síranu amonného 22-23 kg síry v mobilní formě síranu. Na kyselých půdách je ovšem jeho použití problematické, neboť by ještě více okyseloval půdu a mohlo by docházet k aktivizaci toxických forem hliníku. Na silně alkalických půdách je vyloučena jeho povrchová aplikace, a to z důvodu těkání čpavku. Dle Kulhánka et al. (2013) obsahuje granulovaný síran amonný 1,4 % nitrátového dusíku a 2,5 % vápníku, což má příznivý vliv na počáteční růstová stádia.

Kieserit: Jedná se o síran hořečnatý (Čermák et al., 2007), který obsahuje dle Matuly (2007) 19-21 % síry, Dle Kulhánka (2013) 18 % síra a 14-15 % hořčíku, granulovaný dle Zeleného (1996) 22 % síry a 16 % hořčíku. Jedná se o hnojivo dobře použitelné zejména na půdách deficitních hořčíkem. Dle Matuly (2007) přispívá k harmonizaci půdy a tím i zdravotního stavu rostlin. Dle Kulhánka (2013) se jedná o hnojivo vhodné do půd středních až těžších s vyšším pH, s nízkou zásobou hořčíku a dobrou zásobou draslíku.

Síran draselný: Při současném hnojení sírou doplňuje i draslík, kterého obsahuje 42 % (Kulhánek, 2013). Obsahuje minimum chlóru, hodí se tedy k výživě rostlin citlivých na chlór (Balík, 1993).

Sádra: Jedná se o síran vápenatý. Obsah síry se liší dle stupně hydratace, pohybuje se mezi 14-18 % síry. Je omezeně rozpustný ve vodě (Matula, 2007, Kalina, 2005). Dle Kulhánka et al. (2013) sádra obsahuje síru špatně dostupnou rostlinám. Jedná se tedy spíše o dlouhodobě působící hnojivo.

Superfosfáty: Dříve velmi využívané hnojivo, jednoduché superfosfáty obsahují kolem 8 % síry v síranu vápenatém. Síran vápenatý je hůře využitelný rostlinami. V zahraničí se vyrábí i superfosfát obalovaný sírou obsahující 27-45 % síry (Matula, 2007, Kulhánek, 2013).

Hořká sůl: Jedná se o heptahydrát síranu hořečnatého. Obsahuje 11-12,5 % síry. Je snadno rozpustný. Aplikuje se na listy maximálně 5% roztok. Při dávce 400 l/ha (5 % koncentrace) dodá 2 kg S/ha (Matula, 2007).

Dusíkatá hnojiva se sírou: Základ tvoří dusičnan amonný, případně močovina, a přídavek síranu amonného či vápenatého. Hojně využívaný je roztok síranu amonného s močovinou (24 % N a 6-8 % S) (Kulhánek et al., 2013).

4.5.3 Organická hnojiva obsahující síru

Významným zdrojem síry, využívaným zejména v severozápadní Evropě, jsou statková hnojiva. Výhodou organických hnojiv oproti hnojivům minerálním je jejich kladný vliv na strukturu půdy, na tvorbu humusu, vodní režim půdy apod. V tabulce dle Zeleného et al. (1996) a dle Richtera et al. (2003) je uveden obsah sušiny a některých rostlinných živin obsah síry nejvýznamnějších statkových hnojiv.

Tab. 3 Obsah sušiny a některých rostlinných živin nejvýznamnějších statkových hnojiv (Zelený et al., 1996 a Richter et al., 2003)

| Hnojivo | Sušina | S | N _(celk.) | P | K | Ca | Mg | Org.látky |
|---------------|--------|---------------|----------------------|------|------|-----------|---------------|-----------|
| Jednotka | % | % v sušině | % čerstvé hmoty | | | | | |
| Hněj dobytčí | 25 | 0,3 | 0,48 | 0,11 | 0,51 | 0,37 | 0,08 | 17,0 |
| Hněj drůbeží | 60 | 0,5 | 2,80 | 1,25 | 1,23 | 0,25-1,00 | 0,06- 0,08 | 25,0 |
| Kejda dobytčí | 5-12 | 0,6 | 0,4 | 0,10 | 0,40 | 1,0 | 0,04 | 5,5 |
| Kejda prasečí | 5-10 | 0,6 | 0,6 | 0,13 | 0,27 | 0,2 | 0,05 | 6,0 |

Dle Černého et al. (2013) je obsah síry zejména v tekutých statkových hnojivech nízký a nepokryje tedy potřeby pěstovaných rostlin. Vyšší obsah síry nacházíme ve hnoji. Jedná se ovšem o síru slabě mineralizovatelnou. Dle poměru C:S můžeme počítat s uvolněním síry z 5-30 % z celkového obsahu S v hnoji. Organická síra je v půdě částečně hromaděna. V období intenzivní mineralizace dochází k jejímu uvolňování (40-60 kg S/ha za rok). Pokud se jedná o půdy s nízkým obsahem organické hmoty či pouze s minerálním hnojením uvolní se pouze 5-30 kg S/ha za rok. K větší mineralizaci síry dochází při použití posklizňových zbytků s vyšším obsahem S, jako je například sláma ozimé řepky, zbytky zelí apod. Ovšem použitím dusíku k urychlení mineralizace může dojít k vyplavení síry v podobě síranů. Abychom tomuto zabránili, můžeme použít zelené hnojení, které dodá snadno mineralizovatelnou organickou hmotu, zvýší mikrobiální aktivitu půdy a její fyzikální vlastnosti.

Další možností je nutriční obohacení statkových hnojiv vhodnými druhy odpadů ve zpracování rostlinných surovin, jako například lihovarnické výpalky a popel z energetického využívání biomasy. Živiny z těchto materiálů končily v minulosti na skládkách, dnes kvůli omezení produkce skleníkového plynu metanu je skládkování zakázáno a hledají se nové možnosti využití těchto látek. Platí zde, že pokud chceme společně zpracovávat biologicky rozložitelné odpady s kejdou, nesmí tyto odpady obsahovat cizorodé látky a prvky v nadlimitním množství a současně musejí obsahovat živiny a případně organickou hmotu a pozitivně tak ovlivňují výživu rostlin a půdní úrodnost. Při aplikaci rostlinných popelů je třeba kontrolovat obsah rizikových prvků, neboť při spalování dřeva z emisních oblastí, mohou vykazovat zvýšenou hladinu Zn, Cr, Cd, a Cu (Váňa, 2008). V tabulce (viz přílohy příl. 1.) jsou uvedeny obsahy významných chemických prvků ve vybraných odpadních materiálech z potravinářského průmyslu.

4.5.4 Čistírenské kaly

Jedná se o odpad z mechanicko-biologické technologie čištění odpadních vod. Obsahuje také biomasu z biologického čištění. Nakládání s čistírenskými kaly komplikuje zejména vysoký obsah vody v kalu, dále zápach, přítomnost toxických látek a patogenních organismů. Primárně tedy musí dojít k zahuštění a odvodnění surového či stabilizovaného kalu, dále k stabilizaci a obvykle hygienizaci kalu. Poté může být aplikován na zemědělské půdy či použit v lesnictví, uložen na skládku či tepelně zpracován.

Vysušený kal obsahuje zejména dusík, fosfor, draslík, hořčík, vápník. Obsah těchto hnojivých prvků představuje slibný potenciál k použití na zemědělských půdách jako hnojivo/kypřidlo či v lesnictví. Problémem zůstávají rizikové prvky, které kal obsahuje, např.: Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, Co, As, Hg, Mo, Cd (Hartman et al., 2006).

Dle Růžka et al. (2000) kaly z ČOV zpravidla obsahují v sušině: 40-60 % organických látek, 2,0-6,0 % N, 1,0-5,0 % P₂O₅, 0,3-1,0 % K₂O, 2-8 % CaO, 0,4-2,0 % MgO. Kaly jsou dle Kulhánka (2013) také významným zdrojem síry. Jejich použitím dochází ke zvýšení mobilní formy síry, především vodorozpustné frakce.

Dále mohou obsahovat toxické kovy, rizikové prvky a patogeny. Dříve byl největším problémem při aplikaci kalů na zemědělské půdy obsah rizikových prvků, teď se pozornost přesouvá k patogenům a organickým polutantům.

Dle Nerudové (1984) se liší chemické a fyzikální vlastnosti kalů dle formy, ve které se vyskytují. Rozeznáváme kaly:

1. tekuté,
2. kaly odvodněné přirozeným způsobem a mechanicky

Tekuté kaly

Dle Koukolíka et al.(1988) a Nerudové (1984) obsahují tekuté kaly významné množství dusíku, částečně i fosforu a malé množství draslíku. Mají vysoký podíl minerálního dusíku (cca 30 % obsahu celkového dusíku v sušině). Takovýto dusík je ihned přijatelný pro rostliny. Tekuté kaly jsou tedy vydatným zdrojem dusíku, který rostliny dokáží plně využít již v prvním roce působení spolu s částí organického dusíku, který je uvolněn biodegradací organických látek z kalu. Jsou zejména používány na trvalé travní porosty i ornou půdu, k hnojení plodin náročných na dusík, s vysokou produkcí biomasy.

Odvodněné kaly

Tato forma kalů se používá zejména pro ornou půdu a pro vinice. Používají se v systému organického hnojení, kde slouží jako zdroj humifikovaných organických látek. Takto mohou zastoupit organická hnojiva. Odvodněné kaly obsahují dusík ve formě organické, který je dále uvolňován do půdního prostředí biologickou cestou. Potřebu dusíku nelze krýt pouze odvodněným kalem, ale je nutné ho doplnit minerálním hnojivem (Koukolík et al, 1988). Mají nižší podíl dusíku oproti kalům tekutým, to je způsobeno pokračující mineralizací při odvodňování kalů v lagunách (Nerudová, 1984).

Dle Kuklíka (1997) se současná produkce kalů pohybuje okolo 200 tisíce tun a toto množství by se mělo zvýšit na více než 300 tisíc tun sušiny za rok. V zemědělství v zemích EU je využíváno asi 40 % celkové produkce kalů (McGrath et al., 1994). Jak bylo zmíněno výše, mezi pozitiva použití kalů v zemědělství patří obsah hnojivých prvků. Kaly obsahují oproti klasickým organickým hnojivům vyšší obsah dusíku a fosforu při nižším obsahu draslíku. Na základě praktických zkušeností je minimální dávka kalu 5 t sušiny kalu na hektar. Při minimálním obsahu dusíku lze dávkou 5 t sušiny/ha dodat 94,5 kg N/ha, pokud by obsah dusíku byl maximální lze dodat při stejné dávce až 328 kg N/ha.

Mezi negativa používání kalů patří možný obsah patogenů, organických polutantů a přítomnost rizikových prvků. Rizikové prvky mohou vykazovat účinky toxické, karcinogenní, teratogenní, či mutagenní dle příslušného rizikového prvku. Dle Trebichavský et al. (1997) jsou mezi rizikové prvky řazeny tyto prvky: As, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Te, Tl, V, W, Zn. Mezi potenciálně nebezpečné patří As, Cd, Cr, Hg a Pb. Limity pro obsah těchto prvků jsou obsaženy v příslušných normách. V případě aplikace kalů na zemědělskou půdu jde o vyhlášku 328/2001 Sb., která je v souladu se směrnici Rady EU č. 86/278/EEC. Dle Hauptmana et al. (2000) jsou nejčastěji překračovány limity v oblasti Zn, Hg a As. Za období 1994-1999 procento nadlimitně zjištěných prvků nepřesáhlo 5,5 %, a počet ČOV, které nevyhověly normě pro komposty, se pohybuje okolo 11-20 % ročně. Celkový vstup rizikových prvků je možno regulovat také omezením maximálních dávek sušiny kalu a minimálním intervalem aplikace. Toto opatření je nutné synchronizovat s maximálními dávkami živin. Při použití kalů na zemědělské půdy je nutno také sledovat přísun rizikových prvků do půdy a celkovou bilanci. Dále je nutné sledovat reakce pěstovaných rostlin (výnos, akumulaci aj.) (Kuklík et al., 1997).

Co se organických rizikových látek týká, sledují se převážně perzistentní látky a látky obtížně odbouratelné. Řadíme sem PAH, PCB, PCDD/F. Dále je možno sledovat součet

halogenorganických látek (AOX) a nepolární extrahovatelné látky (NEL). U těchto posledních dvou skupin látek nejsou jejich limity zařazeny do legislativy (Hauptman et al., 2000).

Dle Růžka et al. (2000) lze na základě získaných poznatků a výsledků experimentů konstatovat že:

- ✓ Z různých způsobů zpracování kalů za účelem jejich hygienizace lze v podmínkách ČR doporučit: klasické kompostování s teplotou vyšší než 55 °C po déle než 21 dnů, dále termofilní fermentaci v aerobních bioreaktorech (vyšší teplota než 65 °C déle než 24 hod.), alkalizace kalů vápnem při dosažení hodnoty pH 12 či vyšší a teploty nad 55 °C po minimálně 2 hodin.
- ✓ Při kompostování je důležité získat vysoce stabilizovaný kal, v opačném případě hrozí k intenzivnějšímu přesunu toxických kovů do rostlin.
- ✓ Nepeletizovaný kal s CaO není vhodné aplikovat ve vyšších dávkách na promyvných půdách v době, kdy uvolněné živiny nemohou být využity rostlinami.
- ✓ K pozvolnějšímu uvolňování Ca, N a dalších živin dochází u peletizovaného kalu s CaO. To má příznivější účinek na půdu, výživný stav rostlin a omezení ztrát rostlinných živin.
- ✓ Kal s přídavkem vápna má více sušiny a drobtovitou strukturu, což umožňuje snadnější a přesnější aplikaci na půdu.

5 Materiál a metody

Experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Jedná se o stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Humpolec, Hněvčeves a Suchdol). Půdně-klimatické charakteristiky jsou patrné z tabulky č. 4. Na parcelkách byly pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory (odrůda Karin), ozimá pšenice (odrůda Samanta) a jarní ječmen (odrůda Akcent).

Tab.4 Základní charakteristika pokusných stanovišť

| Stanoviště | Humpolec | Suchdol | Hněvčeves |
|---------------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| Severní šířka | 49°33'15" | 50°07'40" | 50°18'46" |
| Východní délka | 15°21'02" | 14°22'33" | 15°43'01" |
| Nadmořská výška (m n. m.) | 525 | 286 | 265 |
| Průměrná roční teplota (°C) | 7,0 | 9,1 | 8,2 |
| Průměrný roční úhrn srážek (mm) | 665 | 495 | 573 |
| Půdní typ | kambizem | černozem | hnědozem |
| Půdní druh | hlinitopísčitá | hlinitá | jílovitohlinitá |
| pH ¹⁾ | 5,1 | 7,5 | 5,9 |
| P (mg/kg) ²⁾ | 77 (±10) | 74 (±9) | 87 (±11) |
| K (mg/kg) ²⁾ | 238 (±47) | 209 (±18) | 214 (±29) |
| Ca (mg/kg) ²⁾ | 1625 (±187) | 7803 (±1760) | 2156 (±251) |
| Mg (mg/kg) ²⁾ | 112 (±14) | 209 (±16) | 240 (±24) |
| S _{H2O} | 12 (±2) | 10 (±2) | 11 (±2) |
| S _{ads} | 9 (±1) | 8 (±1) | 6 (±1) |
| S _{okl} | 16 (±2) | 23 (±9) | 5 (±1) |

¹⁾ Stanoveno 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 w/v

²⁾ Průměrné základní hodnoty stanovené metodou Mehlich 3 (rok 1996)

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky síry a ostatních vybraných živin v hnojivech u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce č. 5. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z minerálních hnojiv jsou dodávány v LAV (27,5 % N), trojitým superfosfátu (21 % P) a 60 % draselné soli (50 % K).

Celý systém byl založen na jednotné dávce dusíku tak, aby celková dávka N za 3 roky (brambory + pšenice ozimá + ječmen jarní) činila 330 kg N.ha⁻¹. To platí pro organická i minerální hnojiva, popřípadě jejich kombinaci.

Tab. 5 Systém hnojení polního pokusu ČZU a VÚRV (dávky živin na ha)

| Varianta | Brambory | Ozimá pšenice | Jarní ječmen |
|----------|---------------------|---------------|--------------|
| kontrola | 0 | 0 | 0 |
| kal | 330 kg N (93 kg S) | 0 | 0 |
| hnůj | 330 kg N (140 kg S) | 0 | 0 |
| NPK* | 120 kg N | 140 kg N | 70 kg N |
| | 30 kg P | 30 kg P | 30 kg P |
| | 100 kg K | 100 kg K | 100 kg K |
| | 0 kg S | 0 kg S | 0 kg S |

* označené živiny (prvky) byly dodány v minerální formě

Odběr vzorků je prováděn každoročně. Na podzim po sklizni obilnin a brambor byl vždy proveden odběr ornice (0-30 cm). Ta byla usušena a přeseta přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a z každého ukončení cyklu osevního postupu, tj. z let 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011.

5.1 Analytické stanovení

Síra extrahovatelná demineralizovanou vodou

Extrakty byly zhotoveny dle Luscombe et al. (1979). K 2 g vzorku bylo doplněno 20 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 2 hodiny a následně filtrovány. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

Další frakce síry

V práci budou rovněž hodnoceny výsledky již dříve provedené frakcionační analýzy, založené na stanovení minerálních forem S.

Stanovení adsorbované síry (S_{ads})

K 1 g jemnozemě extrahované již dříve demineralizovanou vodou bylo přilito 10 ml 0,032 M NaH₂PO₄ a vzorky byly následně třepány 30 minut na třepačce. Po odstředění (10 min při 10000 U/min) byl supernatant odlit do kyvet.

Síra okludovaná s karbonáty (S_{okl})

K sedimentu z předchozí extrakce bylo přilito 20 ml 1 M HCl. Vzorky byly krátce silně protřepány pro rozrušení sedimentu a následně 60 minut třepány na třepáče. Po odstředění (10 min při 10000 U/min) byl supernatant odlit do kyvet.

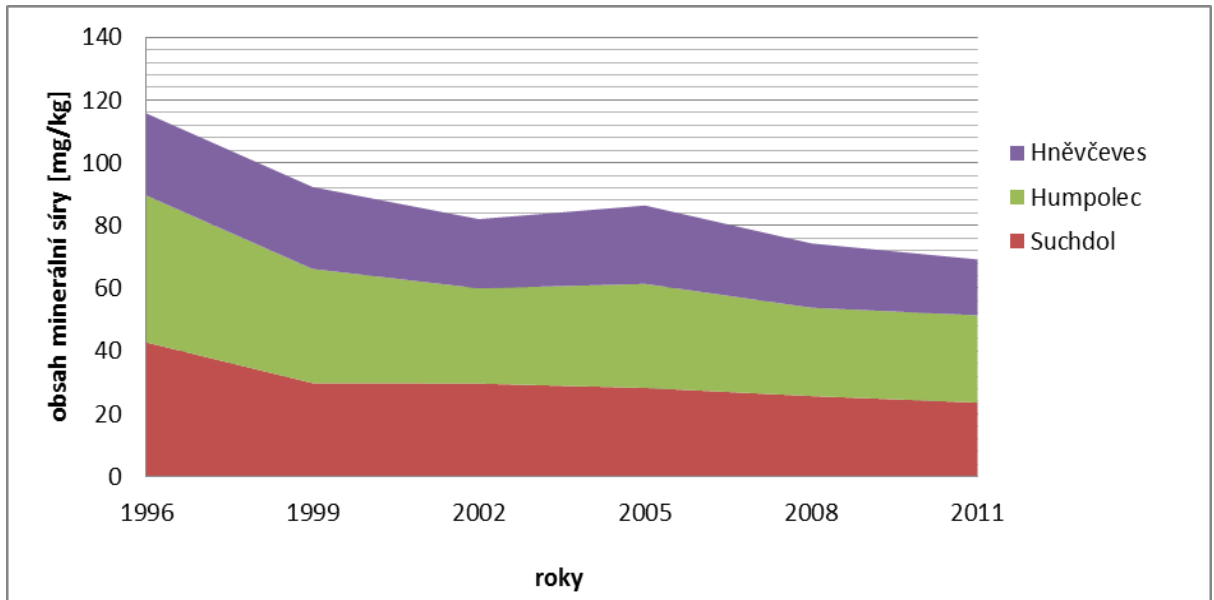
Měření obsahu síry ve výluhu

Všechna měření obsahu síry v získaných výluhách byla realizována na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES)

6 Výsledky

6.1 Změny obsahu síry na nehnojených variantách

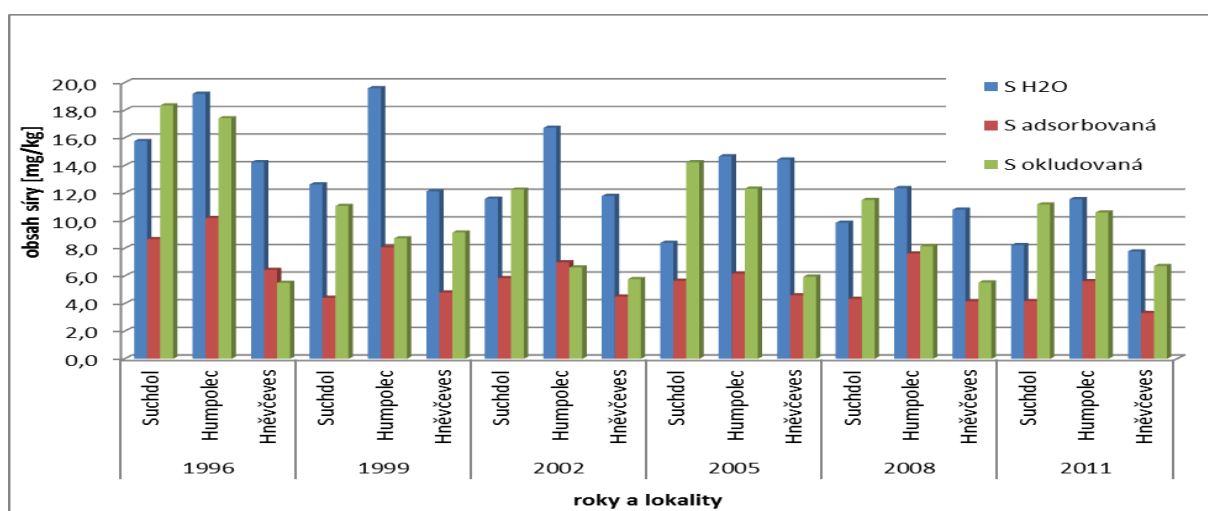
V grafu 1 jsou zobrazeny změny obsahu síry v čase (1996-2011) na lokalitách Suchdol, Humpolec a Hněvčeves.



Graf 1: Změny obsahu síry u nehnojených variant (nezávisle na plodině) v pokusných lokalitách

Na všech lokalitách došlo k poklesu obsahu minerální síry do roku 1999. Od roku 2001 do roku 2006 byla celková depozice síry na území ČR průběžně zvyšována, což je patrné i z grafu 1. Nejvýrazněji došlo ke zvýšení minerální síry v lokalitách Hněvčeves a Humpolec v roce 2002. To se shoduje i s prudkým nárůstem obsahu depozice síranů v těchto oblastech (ČHMÚ, 2012). Poté je zaznamenán pokles až do roku 2008, kdy je patrné další zvýšení obsahu minerální v půdě v dotčených lokalitách. Toto zvýšení opět koresponduje se zvýšením depozice síry na území ČR. (viz ČHMÚ).

Obsah jednotlivých frakcí síry na různých lokalitách zobrazuje graf 2.

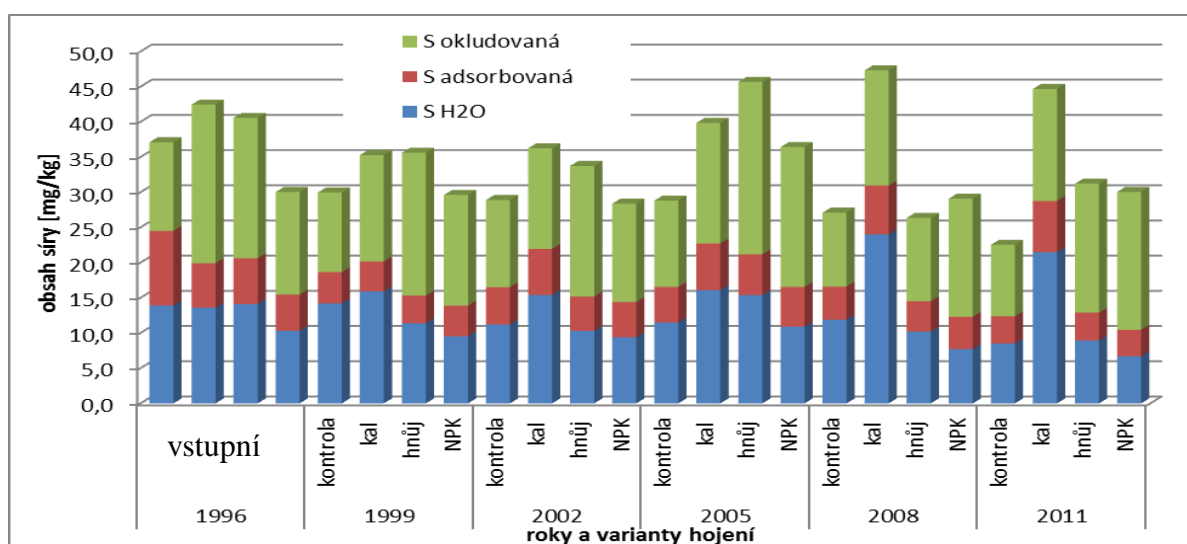


Graf 2: Porovnání lokalit dle frakcí minerální síry v období 1996-2011.

Největší obsah vodorozpustné síry je pozorován na lokalitě Humpolec. Maximální obsah této frakce síry byl pozorován v roce 1999, kdy dosáhl téměř 20 mg/kg. Na všech lokalitách tvořila adsorbovaná síra nejmenší podíl minerální síry. Její podíl na minerální frakci síry se pohyboval okolo 20 %. Největší podíl adsorbované síry se vyskytoval na lokalitě Humpolec (průměrně 22 %).

6.2 Změny obsahů síry na hnojených variantách

Graf 3 zobrazuje změny obsahu minerální síry v závislosti na hnojení v lokalitě Suchdol (brambory).



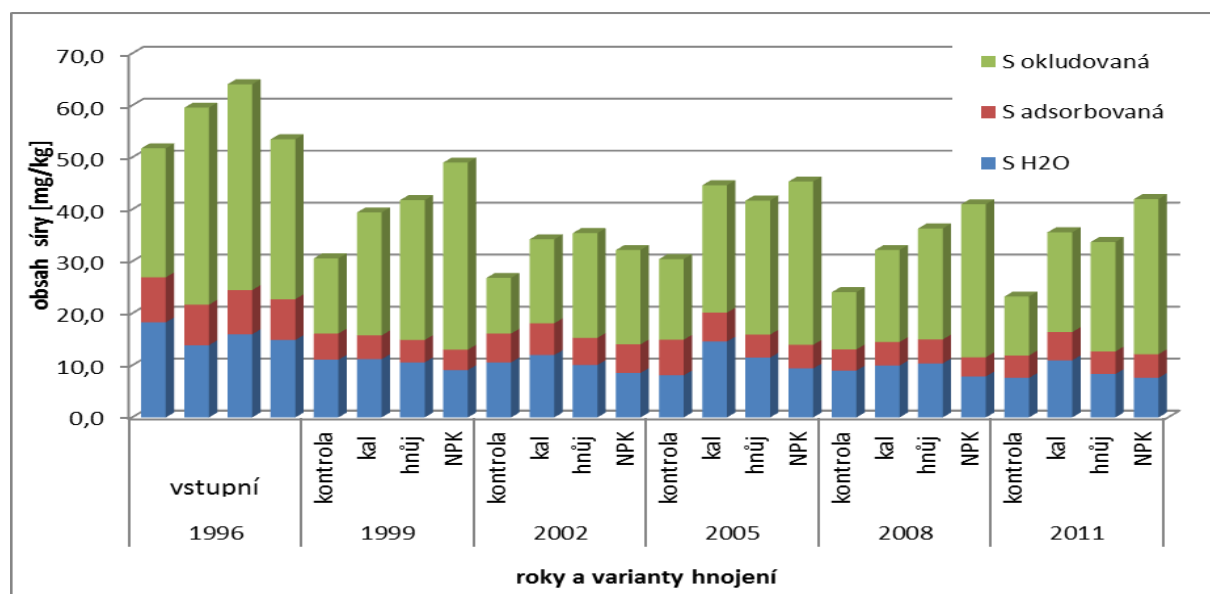
Graf 3: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (brambory) v lokalitě Suchdol

Na nehnojeném kontrolním pozemku lze pozorovat každoroční pokles všech frakcí síry. Minimum obsahu **minerální** síry bylo zaznamenáno v roce 2011 na kontrolním pozemku (obsah minerální síry 22,5 mg/kg). Minerální síra je tvořena snadno dostupnou sírou ve

vodném roztoku, dále hůře dostupnými frakcemi síry, a to sírou adsorbovanou na půdní koloidy a sírou okludovanou. I tyto frakce ale mohou sloužit jako potenciální zdroje síry, a to zejména náročnějším plodinám. Maximum zásobenosti půdy sírou bylo zaznamenáno v roce 2008 na pozemku hnojeném kalem (obsah minerální síry 47,3 mg/kg), kdy největší podíl tvořila vodorozpustná síra (24,0 mg/kg) a následovala ji frakce okludované síry (16,4 mg/kg). Všechny hnojené varianty (kal, hnůj, NPK) vykazují zvýšení obsahu minerální síry oproti variantě kontrolní, která je nehnojena. Zejména varianta hnojení kal a hnůj dosahují podobných výsledků, s tím rozdílem, že varianta kal zvyšuje obsah vodorozpustné, snadno dostupné síry pro rostliny. Varianta hnůj zvyšuje zejména síru okludovanou a tedy hůře dostupnou.

Obsah **vodorozpustné** síry byl nejvíce zvýšen hnojením kalem, a poté hnojením hnojem. Při hnojení N, P a K sice docházelo ke zvyšování obsahu minerální síry v půdě, ale nejvíce její okludované fáze. Vliv hnojení N, P a K na obsah vodorozpustné síry byl malý.

Na grafu 4 je možno pozorovat změny obsahu minerální síry v závislosti na hnojení v lokalitě Suchdol (pšenice).



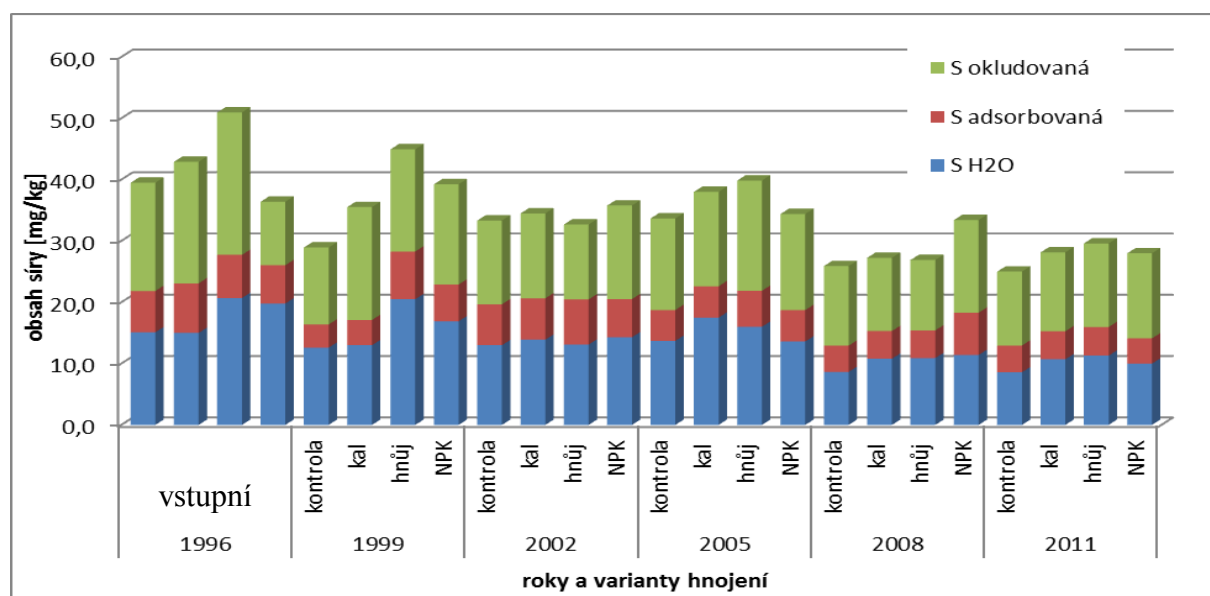
Graf 4: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (pšenice) v lokalitě Suchdol

Je patrné významné každoroční snížení obsahu **minerální** síry na kontrolním stanovišti. V roce 1996 činil obsah minerální síry na kontrolním stanovišti 51,8 mg/kg. V roce 2011 činil podíl minerální síry pouze 23,3 mg/kg. Od roku 1996 do roku 2011 byl tedy zaznamenán pokles o 55,1 %. Takovéto snížení obsahu síry v půdě mohlo být způsobeno mimo jiné i odběrem rostlin v osevním postupu. Minimum síry bylo zaznamenáno v roce 2011, kdy obsah minerální síry dosáhl hodnoty 23,3 mg/kg. Maximální obsah minerální síry

byl zaznamenán vždy v roce 1996. Největší podíl na obsahu minerální síry v tomto roce měla okludovaná forma síry, a to 61,8 mg/kg.

Minimální obsah **vodorozpustné** síry byl zaznamenán v roce 2011. Zvýšení obsahu vodorozpustné síry oproti kontrolnímu pozemku bylo dosaženo zejména hnojením kalem a hnojem. Největšího podílu vodorozpustné síry bylo dosaženo hnojením kalem v roce 2005 (14,6 mg/kg vodorozpustné síry, tj. 32,7 % minerální síry).

Graf 5 znázorňuje změny obsahu síry v závislosti na hnojení v lokalitě Suchdol (ječmen).

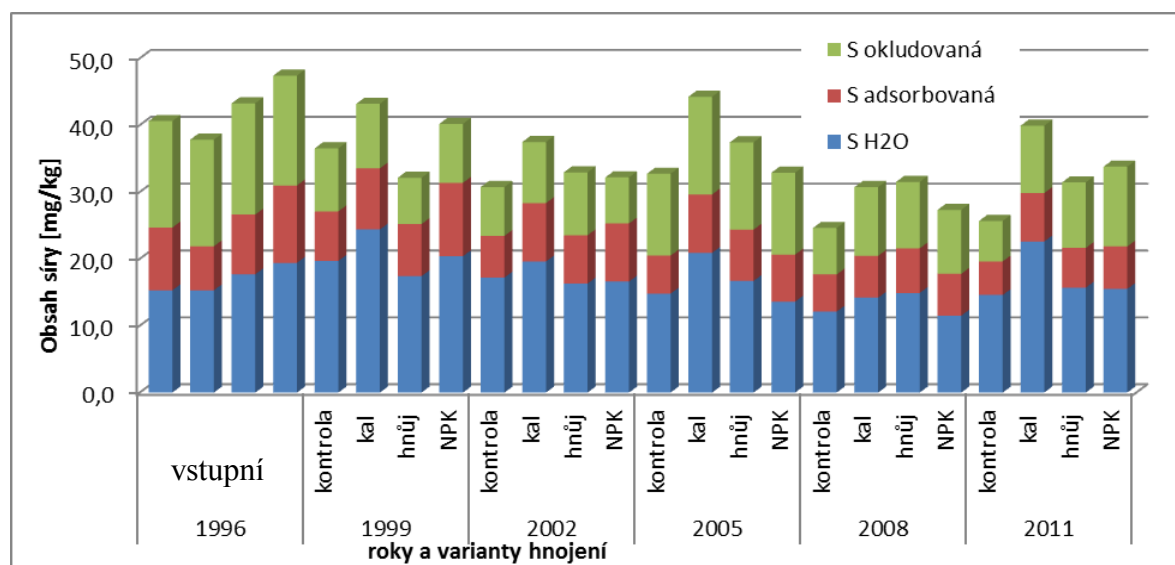


Graf 5: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (plodina ječmen) v lokalitě Suchdol

Lze zde pozorovat pokles obsahu **minerální** síry na kontrolním pozemku od roku 1996 do roku 2002. V období 2002-2005 byl zaznamenán vzrůst obsahu minerální síry. Tento trend mohl být způsoben zvýšením emisí SO₂ na území Prahy mezi léty 2002-2006. Tato zvýšená depozice SO₂ na území Prahy byla pozorovatelná i u ostatních plodin. Minimální obsah minerální síry byl zaznamenán na kontrolním pozemku v roce 2011 (25 mg/kg). Snížení obsahu minerální síry mohlo být způsobeno zvýšeným odběrem síry při pěstování plodin. Maximálních hodnot obsahu minerální síry po sklizni ječmene bylo dosaženo v roce 1999 u varianty hnůj 1 (44,9 mg/kg minerální síry) s největším podílem vodorozpustné síry (45,7 % minerální síry, tj. 20,5 mg/kg). Pokles obsahu minerální síry od roku 1996 do roku 1999 ve variantě hnojené hnojem dosáhl 6,1 mg/kg, ve variantě kal pokles dosáhl hodnoty 7,4 mg/kg a v případě hnojení N, P a K byl zaznamenán nárůst obsahu minerální síry a to o 2,8 mg/kg. Pokles na kontrolním nehnojeném pozemku činil mezi roky 1996-1999 10 mg/kg minerální síry.

V případě obsahu **vodorozpustné** síry je vidět klesající trend ve všech variantách hnojení, který je narušen pouze mezi léty 2002-2005 patrně vlivem zvýšené depozice oxidů síry na území Prahy. Zejména při hnojení N, P a K byl pozorován pozvolný pokles obsahu vodorozpustné síry až na 10 mg/kg v roce 2011, což je i minimum obsahu vodorozpustné síry při hnojení variantami NPK, hnůj a kal. Nižší obsah vodorozpustné síry v půdě byl zaznamenán pouze na kontrolním nehnojeném pozemku (8,6 mg/kg v roce 2011). K nárůstu obsahu vodorozpustné síry oproti kontrolnímu stanovišti došlo u všech variant hnojení, zejména pak u hnojení hnojem. Při tomto hnojení ale došlo k velkému poklesu vodorozpustné síry v roce 1999 (o 7,4 mg/kg, tedy o 36,1 %). V dalších letech se obsah vodorozpustné síry pohyboval okolo hodnoty 10 mg/kg.

Na grafu 6 potom lze pozorovat změny obsahu síry v závosllosti na hnojení v lokalitě Humpolec (plodina brambory).



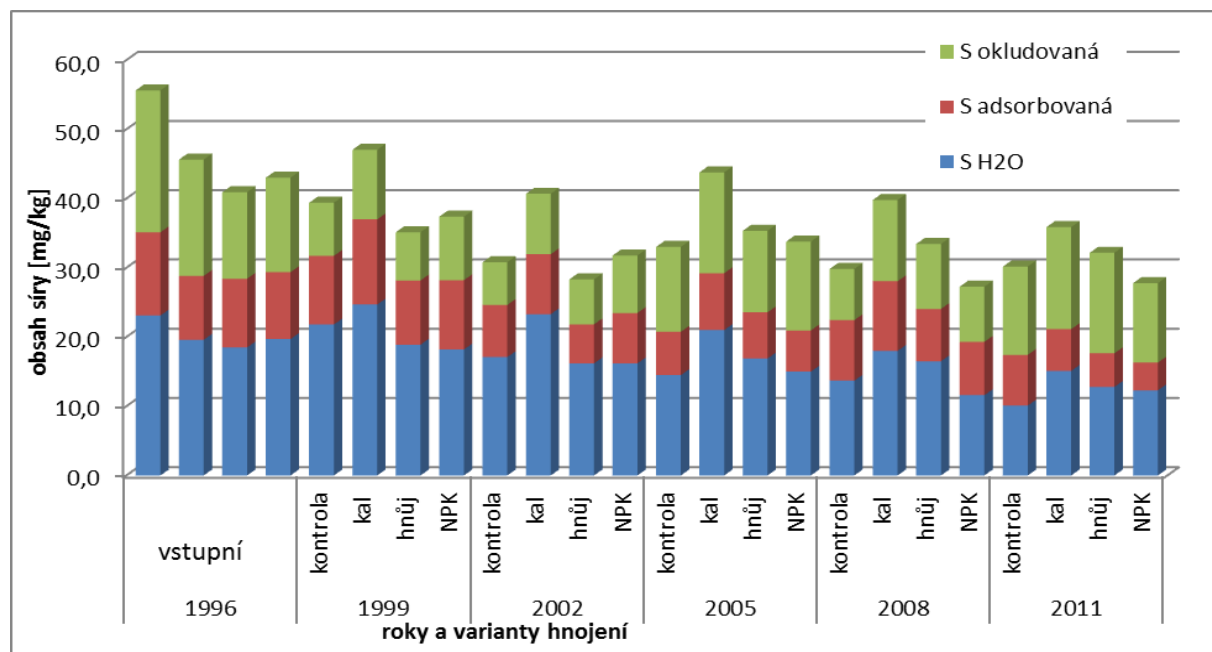
Graf 6: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (brambory) v lokalitě Humpolec

Na kontrolním stanovišti klesal obsah **minerální** síry až do roku 2005, kdy byl zaznamenán nárůst oproti minulému měření o 1,9 mg/kg. Zároveň došlo k poklesu obsahu vodorozpustné síry. Vzrostl tedy zejména podíl síry okludované. Toto zvýšení mohlo být zapříčiněno navázáním části atmosférických depozic na půdní koloidy. V dalších třech letech došlo opět k poklesu minerální síry a od roku 2008 byl zaznamenán mírný nárůst obsahu minerální síry na kontrolním pozemku. Pokud porovnáme obsah minerální síry s různým typem hnojení, ve většině případů byl nejvíce zvýšen obsah této frakce síry v případě hnojení kalem a následně hnojem. Vyšší obsahy síry byly zaznamenány také v prvních letech v případě hnojení variantou NPK.

V případě **vodorozpustné** síry je u všech typů hnojení patrná vzestupná tendence do

roku 1999 a poté mírný pokles (s mírným zvýšením v období 2002-2005) do roku 2008. Od roku 2008 dochází k vzestupu obsahu vodorozpustné síry. Nejvyšších hodnot obsahu této frakce síry bylo dosaženo hnojením kalem.

Na grafu 7 jsou znázorněny změny jednotlivých frakcí síry v závislosti na hnojení v porovnání s nehnojeným pozemkem v lokalitě Humpolec (pšenice).

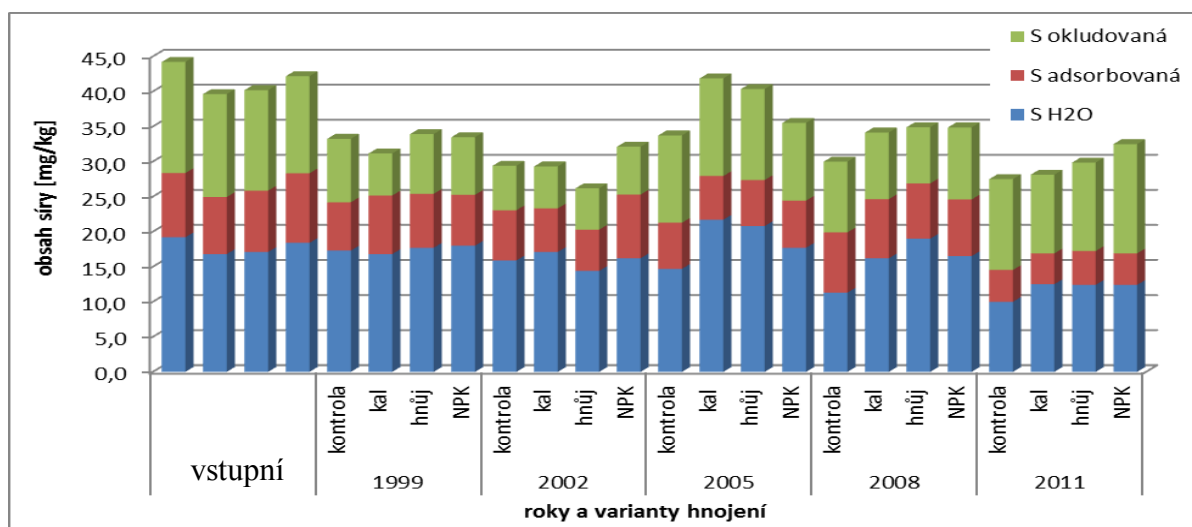


Graf 7: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (pšenice) v lokalitě Humpolec

Je možno si povšimnout značného poklesu obsahu **minerální** síry oproti roku 1996. To může být způsobeno mj. zvýšením odběrem síry plodinami a poklesem atmosférických depozic oproti době založení pokusu. V období 2002-2005 a 2008-2011 došlo i na kontrolním pozemku k mírnému nárůstu podílu minerální síry. Nejlepších výsledků ohledně zvýšení zásobenosti půdy minerální frakcí síry bylo dosaženo hnojením kalem. Při hnojení hnojem docházelo ke zvýšení obsahu minerální síry až od roku 2005. Při hnojení N, P a K obsah minerální síry s výjimkou roku 2005 postupně klesal.

Sestupný trend obsahu **vodorozpustné** frakce síry na lokalitě Humpolec (pšenice) je patrný od roku 1999 i pro hnojené varianty. Na nehnojeném pozemku docházelo k postupnému poklesu již od roku 1996. Oproti kontrolnímu pozemku se zvýšil obsah vodorozpustné frakce síry zejména hnojením kalem. Použitím hnoje se obsah této frakce (až na pokles v období 1999-2002 a 2008-2011) rovněž zvyšoval. Při hnojení N, P a K docházelo k pozvolnému poklesu obsahu vodorozpustné frakce síry.

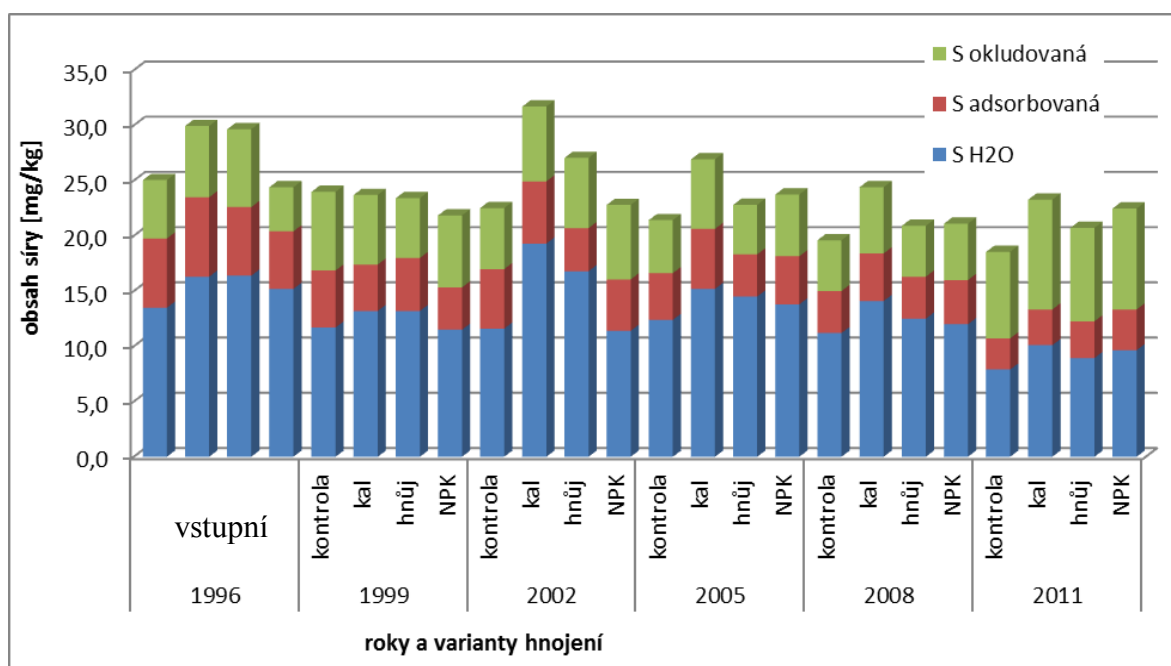
V grafu 8 je možno pozorovat změny obsahu minerální síry v lokalitě Humpolec po sklizni ječmene.



Graf 8: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (ječmen) v lokalitě Humpolec

Je zde patrná sestupná tendence obsahu **minerální** síry v lokalitě Humpolec (varianta ječmen) až na období 2002-2005. Ve všech variantách hnojení tvořila největší podíl na minerální síře její vodorozpustná frakce. Tato frakce na nehnojeném pozemku postupně klesala až na 10 mg/kg. V případě všech variant hnojení docházelo k poklesu od roku 1996 do roku 2002, kdy nastal výrazný nárůst obsahu této frakce. Po roce 2005 docházelo znovu k poklesu obsahu **vodorozpustné** síry. Nejvyšších hodnot vodorozpustné síry bylo dosaženo hnojením kalem a hnojem.

Na grafu 9 jsou znázorněny změny jednotlivých frakcí síry v závislosti na hnojení v porovnání s nehnojeným pozemkem pro lokalitu Hněvčeves s plodinou brambory.

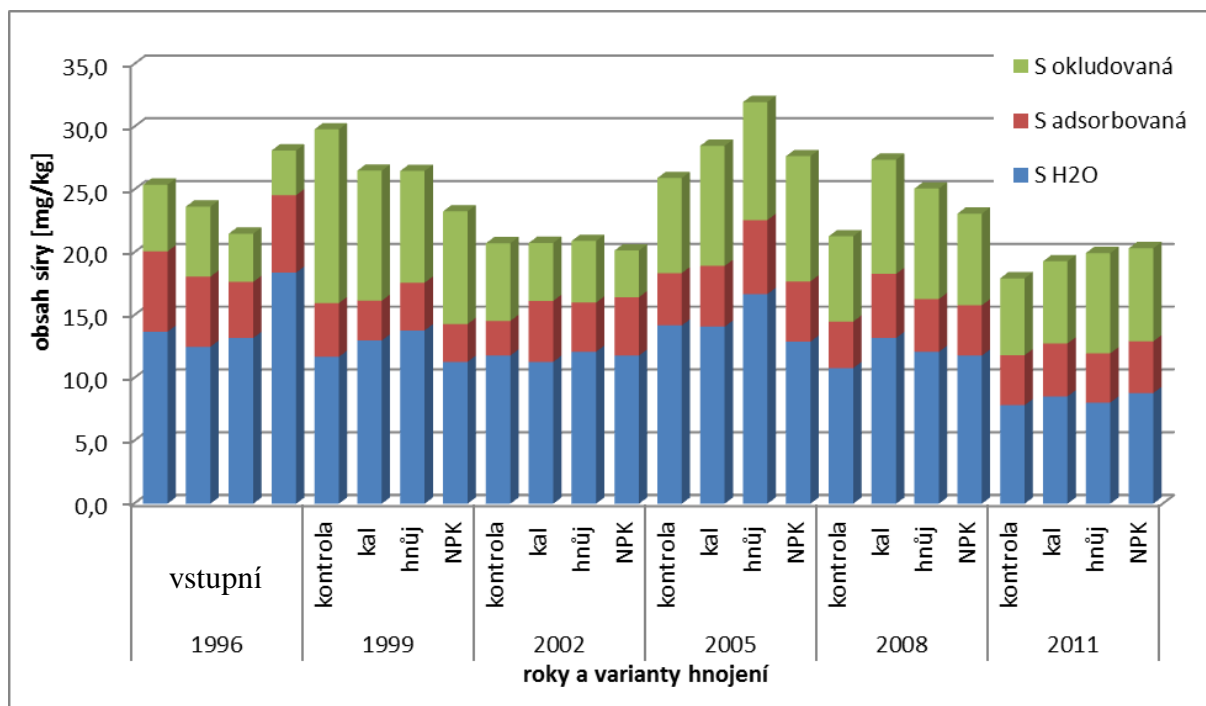


Graf 9: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant Hněvčeves (brambory)

Na kontrolní variantě lze pozorovat postupný pokles obsahu minerální síry. Není to

ovšem pokles tak výrazný jako u pšenice. V roce 2002 je patrný zvýšený obsah minerální síry zejména u varianty hnojené čistírenským kalem.

Na grafu 10 potom můžeme pozorovat změny obsahu síry v závoslosti na hnojení v téže lokalitě s plodinou pšenice.

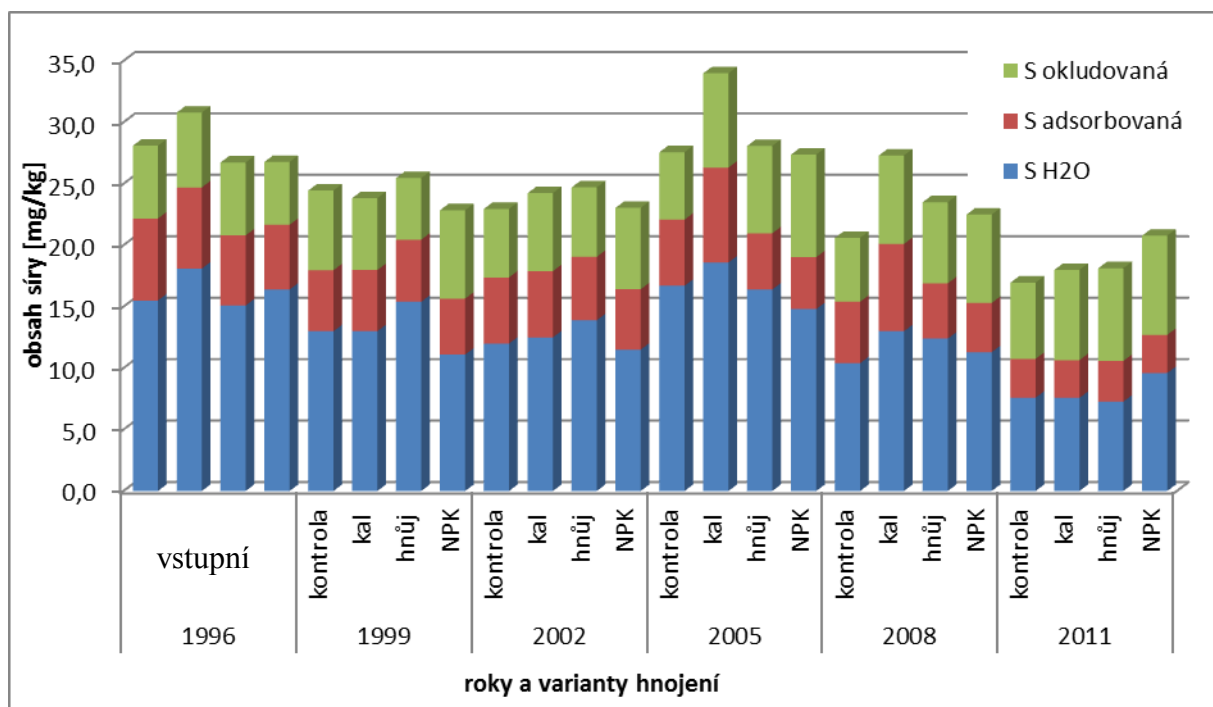


Graf 10: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (pšenice) v lokalitě Hněvčeves

V lokalitě Hněvčeves (plodina pšenice) lze pozorovat zvýšení obsahu **minerální** síry v období 1996-1999 a následně také 2002-2005 (graf 10). Poté docházelo k postupnému poklesu až do roku 2011. Tohoto zvyšování si lze povšimnout i v případě všech variant hnojení kromě varianty NPK, kdy v období 1996-1999 došlo k poklesu zejména obsahu vodorozpustné síry. Zvýšení v případě varianty NPK nastalo pouze v období 2002-2005.

V případě kontrolní varianty je zaznamenán pozvolný pokles obsahu **vodorozpustné** síry s výjimkou období 2002-2005. Obsah vodorozpustné síry se na nehnojeném pozemku začal mírně zvyšovat již v roce 1999. V případě ostatních variant docházelo v období 2002-2005 také ke zvýšení obsahu vodorozpustné síry, ale výrazněji než na nehnojeném pozemku. Výrazný vzestup byl zaznamenán u hnojení hnojem. V případě hnojení kalem je pozorován pozvolnější trend zvyšování i poklesu vodorozpustné síry oproti variantě hnojení hnojem.

Na grafu 11 můžeme pozorovat změny obsahu minerální síry v závosllosti na hnojení v lokalitě Hněvčeves (plodina ječmen).



Graf 11: Změny obsahu síry u nehnojené i hnojených variant (ječmen) v lokalitě Hněvčeves

V případě lokality Hněvčeves lze po sklizni ječmene taktéž pozorovat zvýšení obsahu **minerální** síry v období 2002-2005 jako v případě ostatních variant. Tento trend je pozorován na hnojených i nehnojených variantách. Výrazně se toto zvýšení projevilo u varianty hnojené kalem, méně již u variant hnojených minerálními hnojivy a hnojem. Po dosažení maximálních hodnot v roce 2005, docházelo ve všech variantách k poklesu obsahu minerální síry.

Rovněž u **vodorozpustné** frakce síry lze pozorovat zvýšení obsahu v období 2002-2005. Nejsilněji se tento trend projevil u všech hnojených variant. V období 1996-2002 dochází na všech variantách, s výjimkou hnoje, k poklesu obsahu vodorozpustné síry. V případě hnoje dochází naopak k mírnému zvýšení (o 0,3 mg/kg) v období 1996-1999 a teprve poté k pozvolnému poklesu této frakce síry v letech 1999-2002. Od roku 2002 dochází na všech variantách k poklesu vodorozpustné síry.

Ve všech lokalitách docházelo na nehnojených variantách k postupnému snižování obsahu minerální síry v období 1996-2011. V tomto období, nejspíše vlivem zvýšené atmosférické depozice na našem území, docházelo k výkyvům v tomto klesajícím trendu a v těchto případech se na kontrolním stanovišti obsah minerální síry dále nesnižoval nebo se dokonce zvýšil. Podobný trend jako kontrolní varianta vykazovaly i hnojené varianty. Obsah síry v půdě byl tedy zřejmě ovlivněn atmosférickými depozicemi oxidů síry.

V případě hnojených variant se obsah minerální síry v půdě nejvýrazněji zvýšil v případě hnojení kalem a hnojem. Účinek kalu se projevil v prvních letech po aplikaci tohoto hnojiva a nejvíce jím byla zvýšena vodorozpustná frakce síry, tedy frakce nejlépe dostupná rostlinám. Zvýšení obsahu minerální síry v případě hnojení hnojem bylo pozorováno až v pozdějších letech po aplikaci. Hnůj obsahuje zejména síru organickou. Nejdříve tedy musí proběhnout mineralizace organické formy síry na síru anorganickou a poté se toto projeví zvýšením obsahu minerální formy síry. To ovšem nelze brát jako nedostatek hnoje, neboť pozvolné uvolňování síry do přístupných forem je žádoucí. Další variantou hnojení bylo hnojení minerálními hnojivy. Těmito hnojivy nebyla síra dodána. Lze tedy očekávat pokles obsahu minerální síry v případě této varianty pod kontrolní mez. Tento předpoklad se nenaplnil, naopak ve čtyřech případech byl obsah minerální síry shodný či vyšší oproti hnojeným variantám. Je nutno tedy uvažovat o podpoření půdních mikroorganismů dodáním biogenních prvků v podobě NPK a následné zvýšení mineralizace a tím i obsahu minerální síry.

6 Diskuze

Obsah síry v půdě dle Holobradé (1985) závisí na obsahu organické hmoty a na klimatických podmínkách. Proto byly pro experiment vybrány lokality s různými klimatickými i půdními podmínky. Byla zde zastoupena půda hlinitopísčítá, tak hlinitá a jílovitohlinitá. Na těchto parcelkách byly pěstovány plodiny (brambory, ozimá pšenice, jarní ječmen) v tříhonném osevním sledu. Odběr vzorků je prováděn každoročně. Na podzim po sklizni obilnin a brambor byl vždy proveden odběr ornice (0-30 cm). Po přípravě vzorku byla stanovena síra vodorozpustná, která je nejlépe dostupná pro rostliny. Dále byla stanovena síra adsorbovaná na povrchu půdních částic a síra okludovaná na v síranech vápenatých a hořečnatých. Dle Morche (2008) jsou i tyto fáze potenciální zdroje pro výživu rostlin.

Ve všech lokalitách (Suchdol, Humpolec, Hněvčeves) tohoto experimentu došlo od roku 1996 do roku 2011 k poklesu minerální frakce síry. Zejména v lokalitách Suchdol a Hněvčeves se obsah vodorozpustné síry dostal pod 8 mg/kg, což je dle Kulhánka et al. (2013) množství, které lze považovat za nízké. V případě lokalit Suchdol a Hněvčeves (specifická hmotnost: 2,565 g/cm³, hloubka odběru 30 cm) by tedy zásoba vodorozpustné síry nepřevýšila hodnotu 62 kg/ha. Dle Matuly (2007) ale například porost řepky potřebuje během vegetace odebrat 70-90 kg/ha. Řepka patří mezi plodiny nejnáročnější na síru.

Celkový obsah minerální síry se na lokalitě Suchdol snížil od roku 1996 do roku 2011 o 45 %, na lokalitě Humpolec o 41 % a na lokalitě Hněvčeves o 35 %. Dle Kulhánka et al. (2013) došlo od roku 1981 do roku 2007 k poklesu všech frakcí minerální síry v půdě o více než 50 %. Dle Kirchmanna (1996) nastal tento pokles z důvodu snížení vstupů síry do půdy, zejména snížení atmosférické depozice a nepoužívání hnojiv obsahujících síru. K tomuto stavu přispívá i fakt, že jsou stále více pěstovány plodiny na síru náročné.

K postupnému snižování obsahu minerální síry nedocházelo každý rok, ale naopak lze pozorovat zvýšení v období 2002-2005 (v případě lokality Suchdol již od roku 1999). To může být způsobeno zvýšenou atmosférickou depozicí oxidů síry v tomto období. Dle Eriksen et al. (1998) se síra může do půdy dostávat suchou i mokrou depozicí. Poté je přijímána kořeny rostlin či adsorpcí listy. Dle Zeleného et al. (1996) mohou rostliny využívat i atmosférický SO₂, při deficitu síry v půdě až 90 % síry mohou rostliny přijímat tímto způsobem. Dle ČHMÚ (2012) došlo v období 2001-2005, s poklesem v roce 2003, ke zvýšení atmosférických depozic SO₂ na celém území ČR. V ostatních letech se atmosférické depozice síry lišily dle jednotlivých krajů. Dle Tlustoš et al. (2011) se emise oxidů síry liší zejména v jednotlivých oblastech. Naopak mokrá depozice je na našem území rozložena rovnoměrněji.

Výrazně se to projevilo zejména v lokalitě Hněvčeves, což také koresponduje se zvýšenou atmosférickou depozicí síry v této oblasti.

Ve všech lokalitách tvořila adsorbovaná frakce síry nejmenší část obsahu minerální síry, její obsah se pohyboval okolo 20 %. Největšího podílu (22 %) dosáhla v lokalitě Humpolec. To může být způsobeno přírodními podmínkami na lokalitě, zejména k tomu mohlo přispět i nižší pH (5,1). Na kyselých půdách jsou adsorbované sírany významnou složkou minerální síry (Zelený et al., 1996). Zároveň byl na lokalitě Humpolec pozorován největší obsah vodorozpustné síry. Dle Kulhánka et al. (2013) je příjem síranů a jejich obsah v půdním roztoku ovlivněn hodnotou pH půdy, chováním půdních koloidů, množstvím oxidů Fe a Al a organickými ligandy.

Brambory byly první plodinou v tříhonném osevním cyklu a tedy pouze k nim byla aplikována organická hnojiva. V případě této varianty lze tedy sledovat přímé působení organických hnojiv na zásobenost půdy minerální sírou a jejich jednotlivých frakcí, a také lze pozorovat změny jejího obsahu u následujících plodin v osevním postupu.

Na lokalitě Suchdol (brambory) lze pozorovat nárůst obsahu minerální síry v případě organických hnojiv zejména v období 2002-2005, v případě lokality Hněvčeves při stejné plodině se nárůst projevil od roku 1999-2002. V případě varianty Humpolec (brambory) došlo při hnojení kalem k nárůstu již od roku 1999 a při hnojení hnojem se nárůst projevil od roku 2005. Stoupající obsah minerální síry již od roku 1999 lze ve zmíněných oblastech vysvětlit zvýšenou atmosférickou depozicí oxidů síry. Dle ČHMÚ (2008) v kraji Vysočina, kde se nachází lokalita Humpolec, došlo k nárůstu emisí oxidu siřičitého již od roku 1999. Nárůst obsahu minerální síry v pozdějších letech (od roku 2005) ve variantě hnojení hnojem, může být zapříčiněn mineralizací organických forem síry pocházejících z hnoje. Organická hnojiva dle Černého et al. (2013) obsahují slabě mineralizovatelnou síru. Organická síra je v půdě hromaděna a k jejímu uvolňování dochází v období intenzivní mineralizace. Na průběh a intenzitu mineralizace má vliv obsah organické hmoty v půdě. Intenzita mineralizace také závisí na obsahu organické hmoty v půdě, pH, vlhkost apod. Dle Černého et al. (2013) a Zeleného et al. (1996) organická hnojiva obsahují malé množství síry, z čehož nejvíce jí obsahuje hnůj. Svůj podíl na zvýšení obsahu minerální síry v našich pokusech pravděpodobně sehrály i depozice síry na území ČR v uvedených obdobích.

V případě variant pšenice a ječmen bylo na všech lokalitách sledováno nepřímé působení organických hnojiv na obsah minerální síry v půdě. Při hnojení kalem došlo na lokalitě Suchdol (pšenice) k nárůstu obsahu minerální síry již v období po roce 1996 a byly také zaznamenány nejvyšší obsahy minerální síry oproti kontrolnímu stanovišti. V Humpolci

(pšenice) a Hněvčevsi (pšenice) došlo ke zvýšení obsahu minerální síry v případě hojení kalem již v období 1996-1999 a poté po roce 2002. V případě lokality Suchdol (ječmen) se obsah minerální síry při hnojení kalem pozvolna snižoval až do roku 2005. Další vzestup byl již ve shodě s kontrolní variantou. Stejný trend vykazoval obsah síry i v případě hnojení hnojem. V lokalitách Humpolec a Hněvčeves (ječmen) docházelo k pozvolnému poklesu obsahu minerální síry až na období 2002-2005, kdy vlivem zvýšených depozic došlo k vzestupu obsahu minerální síry u všech variant. Lze tedy konstatovat, že u hnojení kalem jsou významné zejména jeho přímé účinky, které byly pozorované na plodině brambory. Kaly tedy mohou být také významným zdrojem síry. Jejich aplikací došlo ke zvýšení obsahu minerální síry, zejména její vodorozpustné frakce. Dle Kulhánka et al. (2013) se soustavné používání chlévského hnoje a čistírenských kalů projeví zejména ve zvýšení mobilních frakcí síry v půdě, a to především vodorozpustné síry. Vodorozpustná frakce je dobře využitelná pro rostliny.

Dalším typem hnojení v tomto experimentu bylo hnojení N,P a K. Dle Kulhánka et al. (2013) způsobuje dlouhodobá aplikace N,P a K snížení obsahu minerální síry, zejména její vodorozpustné frakce. V případě varianty NPK Suchdol/brambory došlo k postupnému poklesu obsahu minerální síry, až na období 2005-2008. Snižování v ostatních letech mohlo být způsobeno zvýšenou produkcí biomasy následkem hnojení N,P a K, která poté způsobila zvýšený odběr minerální síry pro potřeby své výživy. V případě varianty Hněvčeves/brambory byl při hnojení minerálními hnojivy pozorován také pokles obsahu minerální síry. Nárůst byl zaznamenán pouze v období 2002-2005, což bylo pravděpodobně zapříčiněno zvýšenou atmosférickou depozicí. Dle ČHMÚ (2012) docházelo v období 2001-2005, s poklesem v roce 2003, ke zvýšené depozici síry. Po roce 2005 docházelo opět k poklesu. V případě varianty Humpolec (ječmen) a Hněvčeves (ječmen) byl v roce 2011 zaznamenán při hnojení N, P a K vyšší obsah minerální síry oproti nehnojené variantě a variantě hnojené hnojem. Hnojení N, P a K mohlo způsobit podpoření biomasy půdních mikroorganismů, což poté mohlo vést ke zvýšené mineralizaci organické formy síry prostřednictvím těchto mikroorganismů.

Závěrem lze tedy konstatovat, že vliv použitých variant hnojení převýšilo z hlediska minerální síry v půdě působení atmosférických depozic. Do budoucna je tedy třeba zaměřit se i na organické frakce síry a provést sledování vlivu hnojení na jejich obsahy v půdě.

7 Závěr

Síra je nezbytná pro výživu rostlin z mnoha důvodů. V minulosti se na území Evropy, Českou republiku nevyjímaje, nemusel řešit nedostatek tohoto prvku v půdě. Velké množství síry se do půdy dostávalo atmosférickými depozicemi oxidu siřičitého. Od 80. let minulého století došlo na území Evropy ke snížení těchto depozic, zejména díky odsíření hnědouhelných elektráren. Spolu s pěstováním plodin náročných na síru a s používáním hnojiv neobsahujících síru začalo docházet ke snížení jejího obsahu v půdě a tím i k nedostatku S ve výživě rostlin.

V experimentu v lokalitách Suchdol, Humpolec a Hněvčeves byl studován vliv různých systémů hnojení na obsah minerální síry v půdě. V maloparcelkovém přesném polním pokusu byly pěstovány brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen v tříhonném osevním sledu. Varianty hnojení byly: čistírenský kal, hnůj, minerální hnojiva (N, P a K) a kontrolní nehnojená varianta. Organická hnojiva byla aplikována pouze k první plodině (brambory) osevního sledu. V archivních vzorcích půdy z let 1996, 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011 byly sledovány obsahy vodorozpustné, adsorbované a okludované síry.

Z výsledků vyplývá, že:

- Ve všech lokalitách dochází na nehnojené variantě k postupnému snížení obsahu minerální síry v půdě.
- Síra může být doplňována také atmosférickými depozicemi SO_2 . Výkyvy v klesající tendenci obsahu minerální síry na kontrolní variantě lze vysvětlit vlivem zvýšené depozice SO_2 v jednotlivých lokalitách.
- Nejvýrazněji došlo ke zvýšení obsahu minerální síry v případě hnojení kalem a hnojem, přičemž nejvýrazněji byla zvýšena vodorozpustná frakce minerální síry.
- Předpoklad, že u varianty NPK dojde ke snížení obsahu vodorozpustné síry pod kontrolní variantu, se potvrdil jen v 1 z 36 případů. V ostatních případech se zde obsah vodorozpustné síry pohyboval mírně nad kontrolní variantou.
- Pouze ve 4 případech (z 36) byl obsah vodorozpustné síry při hnojení N, P a K srovnatelný či vyšší než obsah síry u ostatních hnojených variant.

8 Seznam literatury

Anderson, G., Lefroy, R., Chinoim, N., Blair, G. 1992. Soil sulfur testing. Sulphur in Agriculture. 16. 6-14.

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

Balík, J. 1993. Základy výživy rostlin. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství České republiky. Praha. 36 s. ISBN 80-7105-056-3.

Baranyk, P., Fábry A. 2007. Řepka: pěstování, využití, ekonomika. Profi Press. Praha. 208 s. ISBN: 9788086726267.

Bartoš, P. 1968. Ochrana rostlin: Odolnost zemědělských rostlin k chorobám. SPN. Praha. 122 s.

Bartoška, J. 2004. Aktuální potřeba minerálních hnojiv s obsahem síry. Úroda. 52 (9). 42-43.

Bergmann, W. 1992. Nutritional disorders of plants: Development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fischer Verlag. Jena. 741 p. ISBN: 3334604225.

Bittner, V. 2013. Poruchy ve výživě cukrovky. Farmář. 19 (1). 23-25.

Čermák, P. 2007. Bilance živin v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka. ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura. Náměšť nad Oslavou. 43 s. ISBN: 9788090354845

Černý, J., Shejbalová, Š., Kulhánek, M. Vašák, F. 2013. Využití živin ze statkových hnojiv. Zemědělec 21 (38). 10-13.

Davies P. J. 1995. Plant hormones. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London. 833 p. ISBN: 0792329856

Draycott, P. A. 2005. Sugar Beet, Formerly of Broom's Barn Research Station. Blackwell publishing. Oxford. 474 p. ISBN-10:140511911X

Eriksen J., Murphy M.D., Schnug E. 1998. The soil sulfur cycle. In: Schnug E. (ed.): Sulfur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 39–73.

Evans , I. M., Gatehouse , J.A., Boulter , D. 1985. Regulation of storage-protein synthesis in pea (*Pisum sativum* L.) cotyledons under conditions of sulphur deficiency. Biochemical journal. 232 (1). 261-265.

Ghani, A., McLaren, R. G., Swift, R. S. 1990. Seasonal fluctuations of sulfur and soil microbial biomass-S in the surface in Wakanui soil. New Zealand J. Agric. Res. 33. 467-472.

Hartman, M., Pohořelý, M. 2006. Chemické a palivové charakteristiky anaerobně stabilizovaného čistírenského kalu a jeho popela. Chem. Listy. 100. 813-820.

- Hauptman, I., Sářka, M., Kňákal, P. 2000. Hodnocení čistírenských kalů z hlediska obsahu živin a rizikových látek. In: Kusá, H., Růžek, P. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. VÚRV. Praha. ISBN: 80-238-5333-3.
- Holobradá, M. 1985. Príjem a asimilácia síry v rastlinách. Biologické práce. 31 (4). Veda. Bratislava. 107 s.
- Huxtable, R. J., Lafranchi, W. M. 1986. Biochemistry of Sulfur. Plenum Pr. New York. 13. 445 p. ISBN 0-306-42348-0
- Ivanič, J., Havelka, B., Knop, K. 1984. Výživa a hnojenie rastlín. Príroda. Bratislava. 488 s.
- Kalina, M. 2005. Síra zvyšuje hodnotu čtených zelenin. Zahrádkář. 37(4). s.15.
- Kirchmann H., Pichlmayer F., Gerzabek M. H. 1996. Sulfur balance and sulfur abundance in a long term fertiliser experiment. Soil Science Society of America Journal. 60. 174-178.
- Klír, J., Kunzová, E., Čermák, P. 2007. Bilancování rostlinných živin. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby. Praha. 16 s. ISBN: 9788087011171.
- Koukolík, O., Nerudová, M., Pardus, I. 1988. Hnojení zemědělských pozemků kaly z čistíren odpadních vod. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství a dřevozpracovatelského průmyslu. ČSR. Praha. 32 s.
- Kuklík, M. 1997. Úloha organických hnojiv současném zemědělství. Sborník konference. ČZU, Praha.
- Kulhánek M., Černý J., Balík J., Vaněk V., Sedlář O. 2011. Influence of the nitrogen-sulfur fertilizing on the content of different sulfur fractions in soil. Plant Soil Environment. 57. 553-558.
- Kulhánek, M., Balík, J., Vaněk, V., Pavlíková D., Černý, J. 2013. Využití analýz frakcí minerální síry v půdě k optimalizaci hnojení: certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. 26 s. ISBN: 9788021323766.
- Lehmann J., Solomon D., Zhao F.J., McGrath S. 2008. Atmospheric SO₂ emissions since the late 1800s change organic sulfur forms in humic substance extracts of soils. Environmental Science & Technology. 42. 3550-3555.
- Matula, J. 2007. Výživa a hnojení sírou. Výzkumný ústav rostlinné výroby. Praha. 39 s. ISBN: 9788087011157.
- Mcgrath, S. P., Chang, A. C., Page, A. L., Witter, E. 1994: Land application of sewage sludge: scientific perspective of heavy metal holding limits in Europe and in the United states. Environmental Reviewers, 2: 108-118.
- McGrath, S., Zhao, F. J., Barraclough, P., Chambers, B., Withers, P., Sinclair, A. 1994. Sulphur, phosphorus, potassium and copper - measuring crop needs, impacts on quality and options for management. Proceedings of the Cereals R and D Conference. Robinson College. Cambridge.

Morche L. 2008: S-Flüsse und räumliche Veränderungen anorganischer und organischer Schwefelfraktion im Boden sowie deren An- und Abreicherung in der Rhizosphäre landwirtschaftlicher Kulturpflanzen unter partiellem Einsatz des Radioisotops ³⁵S. Dissertační práce, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 322 s.

Nerudová, M. 1984. Komplexní systém hnojení kaly z čistíren odpadních vod veřejných kanalizací. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. Praha. 49 s.

Olsen, R. A. 1957. Absorption of sulphur dioxide from the atmosphere by cotton plants. Soil science, 84. 197-111.

Pedersen, C. A., Knutsen, L., Schnug, E. 1998. Sulphur fertilisation In: Schnug et al. Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 115-134 p.

Prietz J., Weick C., Korintenberg J., Seybold G., Thumerer T., Treml B. 2001. Effects of repeated (NH₄)₂SO₄ application on sulfur pool in soil, soil microbial biomass, and ground vegetation of two watersheds in the Black Forest/Germany. Plant and Soil. 230. 287–305.

Richter, R. Škarpa, P., Zelený, V. 2008. Vliv síry a vybraných mikrobiogenních prvků na výnos a kvalitu semene máku a makoviny. Agromanuál 3(5). ISSN:18017673.

Richter, R., Ryant P., Babiánek, P., Hřivna, L. 2008. Síra ve výživě sladovnického ječmene. Sborník z konference „Český Ječmen Pro Světový Trh - Slad Je Duší Piva“, Mendelova Zemědělská a Lesnická Univerzita v Brně. 28-30.

Richter, R., Kubát, J. 2003. *Organická hnojiva, jejich výroba a použití*. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha. 56 s. ISBN 80-7271-133-4.

Richter, Škarpa. 2013. Úprava živinného režimu půd pro cukrovku – předpoklad stabilní a kvalitní produkce. Listy cukrovarnické a řepařské 129 (7–8). 219–222.

Růžek, P., Kusá, H., Mühlbachová, G. 2000. Používání různě zpracovaných kalů z ČOV v zemědělství. In: Kusá, H., Růžek, P. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. VÚRV. Praha. ISBN: 80-238-5333-3.

Scherer, H. W. 2006. Sulphur supply to peas (*Pisum sativum* L.) influences symbiotic N₂ fixation. Plant, Soil and Environment. 52(2). 72-77.

Scherer, H.W. 2001. Sulphur in crop production invited paper. European Journal Agronomy. 14. 81-111.

Schnug, E. 1998. Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 833 p. ISBN: 0792329856

Stevenson, F. J., Cole, M. 2000. Cycles of Soil - Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulphur Micronutrients. J. Wiley & Sons, New York. 429 p. ISBN:0471320714.

Šilar, J. 1973. Bilance síry v rostlinné výrobě Československa. Rostlinná Výroba, 19 (4). 409-416.

Thomas, S. G., Hocking, T.J., Bilsborrow, P.E. 2003. Effect of sulphur fertilisation Effect of sulphur fertilisation on the growth and metabolism of sugar beet grown on soils of differing sulphur status. *Field Crops Research*. 83(3). 223-235. ISSN: 18726852

Tisdale S. L., Nelson, W.L., Beaton J. D., Havlin, U. 1993. *Soil fertility and Fertilizers*. Prentice Hall. New Jersey. 634 p.

Trebichavský, J., Blohberger, M., Havrdová, D. 1997. *Toxické kovy NSO - F. Nekvasil*. Kutná Hora. 483. ISBN 80-238-2774-X.

Váňa, J., Ust'ak, S. 2008. *Nutriční obohacení statkových hnojiv vhodnými druhy odpadů ze zpracování rostlinných surovin. Výzkumný ústav rostlinné výroby*. Praha. 20 s. ISBN 978-80-87011-72-0.

Vaněk V., Balík J., Černý J., Pavlík M., Pavlíková D., Tlustoš P., Valtera J. 2012. *Výživa zahradních rostlin*. Academia. Praha. 568 s. ISBN: 9788020021472.

Vaněk, V., Balík, J., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2007. *Výživa a hnojení polních a zahradních plodin*. Profi Press. Praha. 167 s. ISBN: 978-80-86726-25-0.

Vaněk, V., Kolář, L., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valenta, J. 2011. *Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku síry v rostlinné výrobě: sborník ze 7. mezinárodní konference. ČZU v Praze. Katedra agrochemie a výživy rostlin*. Praha. 170 s. ISBN: 978802132224

Vaněk, V. 2013. *Dynamika transformací síry v půdě různých S frakcí a jejich význam z hlediska prognózy hnojení plodin sírou: redakčně upravená závěrečná zpráva*. ČZU. Praha. 43 s.

Zelený, F., Zelená, E. 1996. *Síra a její potřeba pro výživu rostlin*. 5. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha. 42 s. ISBN 80-86153-62-2.

Zukalová, H., Výmola, J. 2003. *Glukosinoláty a krmivářství. Sborník „Řepka, mák hořčice“*. ČZU v Praze. Katedra Rostlinné výroby. 17-26.

Internet

Anonym. *Spotřeba hnojiv* [online]. Aktualizace ze 17.10. 2014 [citováno 23.12.2014]. ISSaR. MŽP ČR. Dostupné z <<http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1608>>

Anonym. *Sulphur*. [online]. Aktualizace z roku 1996. [citováno 23.11.2014]. Exttoxnet. NPIC. Dostupné z <<http://exttoxnet.orst.edu/pips/sulfur.htm>>

9 Přílohy

Příloha č. 1 Obsahy významných chemických prvků ve vybraných odpadních materiálech z potravinářského průmyslu (Váňa et al., 2008)

| Parametr | Jednotka | Lihovarnické výpalky | Rostlinný popílek (z filtru) | Rostlinný popel podrošťový |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|---|--|
| Sušina | % | 2,35-16,1 | 88,0-93,2 | 90,1-96,4 |
| Dusík | % suš. | 1,79-3,06 | 0,13-0,23 | 0,01-0,06 |
| Fosfor | % suš. | 0,28-0,68 | 0,17-0,28 | 0,21-0,31 |
| Draslík | % suš. | 1,01-1,87 | 16,3-19,1 | 12,8-15,1 |
| Hořčík | % suš. | 0,15-0,23 | 0,11-0,23 | 0,01-0,06 |
| Spalitelné látky | % suš. | 82,1-90,3 | 5,12-7,69 | 4,93-6,69 |
| pH (H ₂ O) | jedn. pH | 3,04-3,86 | Není stanoveno | Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva |
| Síra | % suš. | 0,37-0,67 | 0,63-0,79 | 0,19-0,39 |
| Arsen | mg.kg ⁻¹ suš. | 6,15-8,89 | <5,0 | 1,15-5,12 |
| Kadmium | mg.kg ⁻¹ suš. | 0,12-0,16 | 0,35-0,75 | 0,92-1,79 |
| Chrom | mg.kg ⁻¹ suš. | 31,5-39,4 | 21,8-62,2 | 34-108 (Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva) |
| Měď | mg.kg ⁻¹ suš. | 15,3-28,3 | 46,8-72,1 | 54,1-81,7 |
| Rtuť | mg.kg ⁻¹ suš. | 0,04-0,09 | 0,03-0,06 | 0,02-0,8 |
| Molybden | mg.kg ⁻¹ suš. | 3,12-4,48 | Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva | Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva |
| Nikl | mg.kg ⁻¹ suš. | 2,80-4,20 | 32,1-50,0 | 28,1-54,5 |
| Olovo | mg.kg ⁻¹ suš. | 6,98-11,8 | 8,60-13,7 | 4,20-14,2 |
| Zinek | mg.kg ⁻¹ suš. | 98-148 | 203-318 Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva | 119-399 Horní hranice přesahuje hodnotu pro org.hnojiva |