

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Zhodnocení aktuální zásobenosti půd v ČR sírou a prognóza
vývoje**

Bakalářská práce

Autor práce: Jaroslav Vojtěch

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

© 2016 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Zhodnocení aktuální zásobenosti půd v ČR sítou a prognóza vývoje" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 1.4.2016

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za příkladné vedení práce, zaměstnancům ÚKZUZ Ing. Michaele Smatanové, Ph.D. a Ing. Vladimíru Mitasovi za poskytnuté informace a své rodině za bezmeznou trpělivost.

Zhodnocení aktuální zásobenosti půd v ČR sírou a prognóza vývoje.

Souhrm

Obsahem této práce jsou souhrnné informace o významu síry jako důležitého makrobiogenního prvku ve výživě rostlin, dále pak o koloběhu síry v půdě, vývoji obsahu síry v posledních letech a možnosti přísunu síry k pěstovaným plodinám.

Síra je důležitým makroelementem ve výživě rostlin, je součástí důležitých aminokyselin, vitamínů a bílkovin. Obsah síry v rostlinách předurčuje kvantitu a kvalitu sklízených zemědělských produktů.

Síra se v našich zeměpisných šířkách dostávala do půdy zejména pomocí atmosférického spadu. Z důvodů odsíření elektráren došlo v posledních desetiletích k významnému poklesu vstupu síry do půdy, a to z přibližné hodnoty 120 kg čisté síry na hektar v roce 1990, až na hodnotu 6 – 8 kg síry na hektar v roce 2013. Vzhledem k malému přísunu síry do půdy, pěstování plodin odčerpávajících značné množství síry a poměrně rychlému vyplavování síry z ornice do hlubších vrstev půdy, kde se stává síra pro rostliny nedostupnou, se velmi často setkáváme s nedostatkem síry ve výživě pěstovaných plodin, a to jak plodin velmi náročných na síru, jako jsou olejniny, tak i plodin u kterých se nedostatek síry až dosud neprojevoval, například obilniny.

V půdě je obsažena síra ve formě anorganické a organické. Anorganická síra je v zemědělských půdách zastoupena méně než organická, ale je hlavním přístupným zdrojem síry pro rostliny a je vysoce dynamickou složkou půdy. V půdách je přítomna zpravidla ve formě síranů. Příjem síranů a jejich koncentrace v půdním roztoku ovlivňuje pH, množství oxidů Fe a Al a chování půdních koloidů. Obsah anorganické síry jsme schopni ovlivnit přísunem minerálních hnojiv, ale nezvýšíme tím celkovou dlouhodobou zásobu síry v půdě. Dlouhodobou a hlavní zásobou síry v půdě představuje síra organická, vázaná v sirných aminokyselinách, sulfolipidech, sulfonových kyselinách a sulfátovaných polysacharidech. Tuto složku celkového obsahu síry můžeme ovlivnit organickým hnojením a to jak hnojem, tak zeleným hnojením, posklizňovými zbytky a čistírenskými kaly.

Klíčová slova: síra, půda, hnojení S, nedostatek S

Evaluation of actual sulphur sulphur supply in soil and forecast of its development in the Czech Republic

Abstract

This thesis contains summary information about the importance of sulphur as an important macro-biogenic element in plant nutrition, as well as about sulphur cycle in soil, development of sulphur content in recent years and possibilities of sulphur supply to crops being grown.

Sulphur is an important macro-element in plant nutrition and it is part of important amino acids, vitamins and proteins. Sulphur content in crops predetermines the quantity and quality of harvested products.

Sulphur in our latitudes entered in soil particularly due to atmospheric depositions. With desulphurization of power plants, there has been a significant decline in sulphur entering soil in recent decades, from an approximate figure of 120 kg of pure sulphur per hectare in 1990 to mere 6 – 8 kg of sulphur per hectare in 2013. Due to small intake of sulphur in soil, plants that draw off large amounts of sulphur and due to the fact that sulphur is swiftly washed off from the topsoil to deeper soil layers where it is inaccessible to the crops, there is often lack of sulphur in the nourishment of crops being grown, which regards both sulphur-demanding crops, such as oil crops, and crops such as cereals where lack of sulphur has not manifested itself as much so far.

Soil contains sulphur in an inorganic and organic form. Inorganic sulphur in agricultural land is represented to a lesser extent than organic sulphur, but it is the main source of plant available sulphur and it is a highly-dynamic soil component. In soil, it is usually contained in the form of sulphates. Intake of sulphates and their concentration in the soil solution impacts pH, amount of Fe and Al oxides and behaviour of soil colloids. We can influence the content of inorganic sulphur by supplying mineral fertilizers, but we cannot increase the overall long-term supply of sulphur in soil in this way. Long-term and main supply of sulphur in soil is represented by organic sulphur bound in sulphur amino acids, sulfolipids, sulphonic acids and sulphated polysaccharides. We can influence this component of the overall sulphur content by organic fertilization, green manuring, after-harvest residues and sewage sludge application.

Key words: sulphur, soil, S fertilization, lack of S

Obsah

Úvod	7
Literární přehled	8
2.1. Síra v rostlině	8
2.1.1. Význam a funkce síry v rostlině.....	8
2.1.2. Příjem síry rostlinou.....	9
2.1.3. Pohyb síry v rostlině.....	10
2.1.4. Využití síry v rostlině	11
2.1.4.1. Redukce síranu.....	11
2.1.4.2. Syntéza síranových esterů.....	12
2.1.5. Nedostatek síry.....	13
2.2. Síra v půdě	14
2.2.1. Anorganická síra	16
2.2.2. Organická síra	17
2.2.2.1. Oxidovaná forma	17
2.2.2.2. Redukovaná forma.....	18
2.3. Vývoj obsahů síry v posledních desetiletích	19
2.3.1. Příčiny poklesu obsahů minerální síry v půdě	19
2.3.1.1. Atmosféra.....	19
2.3.1.2. Půda	21
2.4. Zásobenost půd	23
2.5. Možná opatření zabraňující poklesu obsahu síry v půdě	25
2.5.1. Agrotechnik.....	23
2.5.2. Hnojení.....	25
2.5.1.1. Organická hnojiva.....	25
2.5.1.2. Minerální hnojiva.....	26
2.6. Aktuální zásobenost půd ČR	29
2.6.1. Technika odběru vzorků	30
2.6.2. Výsledky.....	30
2.7. Prognóza vývoje obsahu síry v půdě v nejbližších letech	32
3. Závěr	33
4. Seznam literatury	34

Úvod

Půda je nenahraditelným a neobnovitelným zdrojem rostlinné produkce. Neustálý růst lidské populace a s tím spojená zvyšující se spotřeba potravin, ve směs pocházejících z půdy, nás nutí ke zvyšování výnosů, šlechtění odrůd a v neposlední řadě k dokonalému studiu půdních vlastností a výživových potřeb rostlin. Mezi již velmi dobře známé a vědecky zpracované makroprvky výživy rostlin, jako je dusík, fosfor a draslík, můžeme a musíme zařadit síru. Síra je významný makrobiogenní prvek a je nepostradatelným základním stavebním prvkem všech esenciálních aminokyselin jako je cystein a metionin. Tyto aminokyseliny společně s mnoha dalšími jsou nedílnou součástí vitamínů a bílkovin.

Síra zároveň velmi výrazně ovlivňuje využití dusíku v rostlině a to jak dusíku dodávaného minerálními hnojivy tak dusíku vytvořeného pomocí hlízkových bakterií na kořenech některých druhů rostlin. Dokonalá výživa rostlin sírou nám zajišťuje nejen požadovanou vysokou sklizeň, ale také má vliv na konečnou kvalitu produktu.

V posledních 25 letech dochází k deficitu síry v půdách a následně i ve výživě rostlin. Hlavní příčinou poklesu obsahu síry v půdách je výrazné snížení emisí SO_2 do ovzduší a s tím spojený malý spad síry ve srážkách. Po roce 1990, kdy vstup SO_2 do půdy činil 1870 tis. t/rok, došlo během osmi let k výraznému poklesu vstupů na úroveň 230 tis.t/rok. Pokles hodnot vstupů pokračuje i v dalších letech, ale ne již tak rychlým tempem. V roce 2013 zaznamenáváme hodnotu vstupů SO_2 na úrovni 138 tis.t/rok. Hlavním důvodem poklesu hodnot SO_2 je větší zájem společnosti o kvalitu a stav ovzduší a životního prostředí a s tím spojené nemalé investice do odsíření tepelných elektráren a útlum průmyslové výroby.

Dalším důležitým aspektem snížení obsahu síry v půdě je podstatné snížení živočišné výroby v ČR, a s tím spojený pokles množství organických hnojiv aplikovaných do půdy. V návaznosti na snížení živočišné produkce došlo během posledních let k výraznému nárůstu ploch rostlin náročných na obsah síry v půdě a to hlavně řepky ozimé. Mezi méně významné důvody můžeme zařadit používání průmyslových hnojiv obsahujících malé nebo žádné množství síry a snížení používání fungicidů obsahujících síru.

Soubor zmíněných faktorů nás nutí k dokonalejšímu studiu koloběhu síry v půdě a ovzduší a získané poznatky je možno využít k předcházení deficitu a zajištění vyrovnané výživy nejen zemědělských plodin.

Literární přehled

2.1. Síra v rostlině

2.1.1. Význam a funkce síry v rostlině

Síra je důležitým makroprvkem ve výživě rostlin, je součástí bílkovin a nachází se v některých aminokyselinách, například methionin a cystein, je složkou rostlinných olejů (hořčičný, česnekový) a vyskytuje se ve vitamínech (Fecenko, 2002).

Funkce síry v rostlině je úzce spojena s metabolismem dusíku a proto vysoké nároky na síru mají rostliny produkující větší množství bílkovin, pryskyřic a silic (*Brassicaceae*). Celkový cyklus přeměny síry v půdě i v rostlině je velmi podobný jako u dusíku (Vaněk et al., 2007).

Marschner (1995) zařazuje síru, z hlediska potřeby ve výživě rostlin a její funkce, ihned za dusík.

Důležitým faktorem výživy rostliny sírou není jen její obsah v pletivech, ale také hmotnostní poměr k ostatním prvkům. Haneklaus et al.(1995) udávají poměr N:S ve fotosynteticky aktivních pletivech obilovin a jiných rostlin 1-1,5:2-3. Neméně důležitý je poměr N:S i pro jednotlivé proteiny. Obsah síry v proteinech je rozdílný jak u jednotlivých rostlinných druhů, tak u jednotlivých orgánů rostlin (Dijkshoorn et Wijk, 1967).

Síra hraje důležitou úlohu v rostlinných metabolitech, které jsou ve vztahu s parametry nutriční hodnoty zelenin. Zhoršení výživy sírou má vliv na zemědělskou produkci a zároveň ovlivňuje kvalitu vyráběných potravinářských produktů (Hlušek et al., 2001).

Využití síry pěstovanými plodinami je různorodé. Například u pšenice se síra podílí na zvýšení vlastnosti lepkové bílkoviny a zároveň se podílí na zvýšení výnosu o 5 – 6 %. U řepky síra ovlivňuje nasazování šesulí, počet šesulí, větvení rostlin, velikost a olejnatost semen. Na zvýšení olejnatosti semen má síra vliv též u slunečnice. U máku se síra projevuje zvýšením výnosu a navýšením obsahu morfinu v makovině. Nedostatek síry u cukrovky negativně ovlivňuje výnos a hlavně kvalitu bulev a to větším obsahem alfa - aminodusíku, který způsobuje snížení výtěžnosti bílého cukru. Ječmen využívá síru v počátečních vývojových fázích k rychlejšímu růstu a lepší skladbě výnosotvorných prvků. Hrách využívá síru při symbiotické fixaci dusíku (Matula, 2007 Zelený et Zelená, 1997,1999).

Zelený, Zelená (1999) uvádějí, že odběr síry plodinami (tabulka 1) závisí na jejich schopnosti přijímat tuto živinu a na celkové produkci biomasy. Údaje o odběru síry

zemědělskými plodinami se proto značně liší, většinou se však pohybují v rozmezí od 20 do 50 kg S/ha.

U náročných rostlin na síru, jako je třeba řepka a zelí, činí odběr 40 až 70 kg S/ha, u krmných leguminóz 15 až 25 kg S/ha. K těmto požadavkům je nutné přihlížet, a pokud stanoviště neposkytuje dostatek síry, je žádoucí dodat chybějící S v minerálních hnojivech (Vaněk et al., 2012).

Tabulka č. 1. Odběr síry plodinami (autor)

Plodina	S / kg / 1 t produkce	prům. výnos t/ha	potřeba S /kg/ ha
Pšenice potrav.	3,3	9	30
Žito ozimé	4,2	6	25
Ječmen ozimý	3,1	8	25
Tritikale	3,6	7	25
Ječmen jarní	3,8	6,5	25
Oves	3,8	6,5	25
Kukuřice zrno	3,3	9	30
Řepka ozimá	20	4	80
Slunečnice	13	3	39
Mák	17	1,5	25
Cukrovka	0,75	55	40
Brambory	0,75	40	30
Krmná řepa	0,5	80	40
Hrách	6,25	4	25
Kukuřice siláž	0,55	55	30
Pícniny	3	10	30

2.1.2. Příjem síry rostlinou

Příjem síry rostlinou probíhá především prostřednictvím síranového aniontu a je poměrně málo ovlivněn ostatními ionty v půdním roztoku a půdními vlastnostmi (Balík et Tlustoš, 2000).

Síra se v půdě postupně uvolňuje z méně rozpustných sloučenin, včetně organických sloučenin a je oxidována až na sírany, které jsou zdrojem síry pro rostliny. Rostliny jsou schopny využívat i SO_2 z ovzduší, ovšem jen určitou část potřeby (asi do 30% celkové potřeby). Při malé koncentraci SO_2 v ovzduší a nedostatku SO_4^{2-} v půdě je využití vyšší a působí příznivě, ale od koncentrací 1 – 1,5 mg SO_2 v 1 m³ působí již poškození rostlin.

Vzhledem k tomu, že k poškození rostlin přispívají i další složky emisí, které se do ovzduší dostávají s SO₂, může k poškození dojít i při podstatně nižší koncentraci (Vaněk et al., 2007).

Rostliny mohou přijímat síru kořenovým systémem nebo listy. Až 65 % síry přijímají rostliny ve formě síranů, ale v menší míře není vyloučen ani příjem síry v elementární formě (Ivanič, et al. 1979).

2.1.3. Pohyb síry v rostlině

Síra je v rostlinách poměrně dobře pohyblivá, je transportována hlavně do mladých listů a meristémů. V rostlinách se hromadí ve formě síranu, který slouží jako zásobní látka. Rostliny redukují síran dle potřeby a zabudovávají ho do organických sloučenin. Obsah SO₄ v rostlinách je dobrým ukazatelem zásobenosti rostlin sírou. Nedostatek se většinou projeví, když obsah síranu klesne pod 100 mg/kg v sušině. Celkový obsah síry v pletivech rostlin se pohybuje kolem hodnot 0,2-0,5 % v sušině, ale u plodin náročných na síru, jako je řepka, signalizuje již hodnota obsahu 0,4 % v sušině v době květu počínající nedostatek síry (Vaněk et al., 2012).

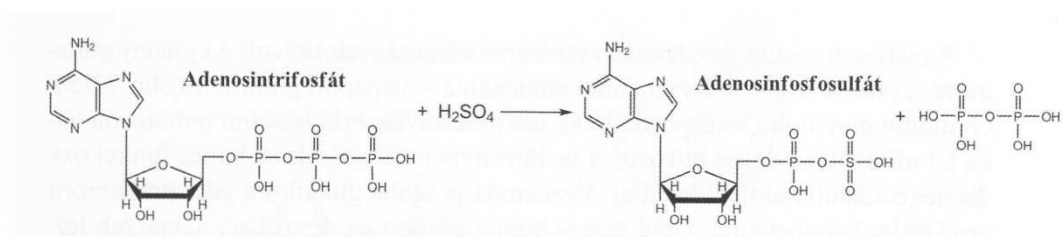
Sírany v rostlině jsou v podstatě zásobní zdroj síry v minerální formě a ani poměrně velká koncentrace nepůsobí na rostliny negativně. Proto teprve velmi vysoké obsahy síranů v půdním roztoku a pěstebním prostředí (4000 mg SO₄²⁻/l) působí nepříznivě na rostliny (Vaněk et al., 2001).

Rostliny příjem síranu i asimilaci síry efektivně řídí podle dostupnosti síranu z prostředí i podle potřeb rostliny. Síra je transportována hlavně do mladých listů a meristémů. Může být asimilována přímým vestavěním síranu do organických sloučenin za vzniku sulfurylové skupiny. V této formě se síra nejčastěji vyskytuje v sulfolipidech a v membránách thylakoidů, v sekundárních metabolitech a v některých látkách signální povahy. Významnou sloučeninou obsahující síru je acetylkoenzym A, který se podílí na syntéze lipofilních sloučenin, jako jsou mastné kyseliny, a tvorbě terpenů (např. fytosteroly, karotenoidy, růstové hormony). Naprostá většina síry se však v rostlině vyskytuje v redukované formě, především v cysteinu a metabolitech z něj odvozených (Marschner, 1995).

2.1.4. Využití síry v rostlině

U vyšších rostlin je prvním krokem k využití síry rostlinami a k jejímu zabudování do organických sloučenin aktivace síranu adenosintrifosfátem (ATP). Při této reakci za účasti enzymu ATP-sulfátadenyltransferázy reaguje sulfát s ATP za vzniku adenosinfosfosulfátu (APS) a odštěpení pyrofosfátu (obr. 1). Vzniklý adenosinfosfosulfát je výchozí látkou pro zabudování síry do organických sloučenin v rostlině (Vaněk et al., 2012).

Obr. č. 1. Schéma vzniku adenosinfosfosulfátu z ATP (Vaněk et al., 2012)

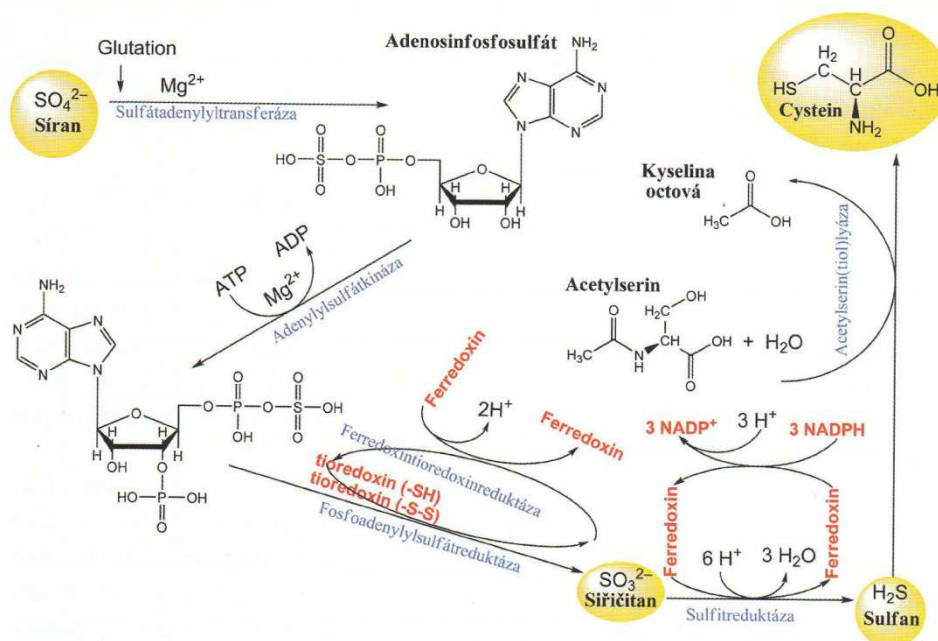


V současné době jsou známy dvě cesty inkorporace síry do organických sloučenin.

2.1.4.1. Redukce síranu

Z adenosinfosfosulfátu se sulfátová skupina přenesse na nosič (glutation) a váže se na skupinu SH nosiče tak, že je vodík nahrazen sulfonovou skupinou SO₃H. Za účasti ferredoxinu je tato skupina dále redukována na skupinu SH (obr. 2), která reaguje s acetylserinem za vzniku cysteinu. Vznikající cystein je v rostlinných pletivech první organickou stabilní sloučeninou se sírou. Z cysteinu jsou syntetizovány další organické sloučeniny, především aminokyselina metionin, která s cysteinem slouží k tvorbě peptidů, včetně enzymů a koenzymů, tedy velmi aktivních složek v rostlinných pletivech. Redukce síranů probíhá v chloroplastech a je výrazně aktivována světlem. Vysoká aktivita je v mladých listech, ve starších listech výrazně klesá. V kořenech je podstatně nižší aktivita soustředěna v plastidech (Vaněk et al., 2012).

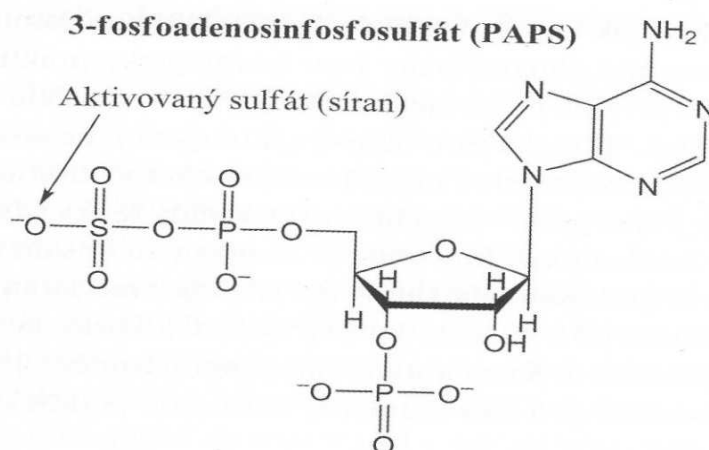
Obr. č. 2. Redukce sulfátu na skupinu SH vázanou v aminokyselinách (Vaněk et al., 2012)



2.1.4.2. Syntéza síranových esterů

V této syntéze je rovněž výchozí sloučeninou adenosinofosfosulfát (APS), který je nejprve aktivován ATP (při štěpení ATP na ADP se uvolňuje H_3PO_4), uvolněná H_3PO_4 se váže na skupinu OH cukerné složky adeninu a vzniká fosfoadenosinofosfosulfát (obr. 3). Tento tzv. aktivovaný síran se váže (jako SO_3H) na organické sloučeniny, hlavně lipidy a polysacharidy, případně slouží k tvorbě glukosinulátů. Síra, především v sulfolipidech, je součástí všech biologických membrán. Většinou je vázána na lipidy přes cukernou složku. Sulfolipidy působí na strukturální uspořádání membrán, ovlivňují transport iontů membránami a jejich hladina má vliv i na toleranci ke koncentraci solí (Vaněk et al., 2012).

Obr. č. 3. Vzorec fosfoadenosinfosfosulfátu (Vaněk et al., 2012)



2.1.5. Nedostatek síry

Nedostatek síry se projevuje nejprve omezením syntézy bílkovin, včetně enzymů, a tím i snížením aktivity významových dějů, jako je např. redukce nitrátů. Tím, že je snížena syntéza bílkovin, hromadí se v rostlinách nízkomolekulární organické sloučeniny dusíku a nitráty. Značně je omezena tvorba chlorofylu, a tím produkce hlavních složek (škrobu, cukru, oleje a bílkovin). Zvláště u rostlin náročných na síru se tak výrazně snižuje kvalita produkce. Známé je omezení fixace vzdušného dusíku při nedostatku síry (je výrazně snížena aktivita nitrogenázy). Typickým vizuálním příznakem nedostatku síry na rostlinách je žloutnutí listů, které začíná od nejmladších listů a při trvalejším nedostatku přechází i na spodní listy. Projev nedostatku síry je podobný jako při nedostatku dusíku, ovšem počáteční příznaky jsou vždy soustředěny na vrcholové části. Zvláště charakteristické příznaky nedostatku síry jsou u brukvovitých rostlin. Nejmladší listy jsou nejprve světle zelené, později žloutnou a mnohdy mají růžový nádech. Mají omezený růst do šířky, a proto se jeví jako úzké a dlouhé. Celkově špatně rostou, jsou slabé a nízké a svým habitem připomínají strádající rostliny (Vaněk et al., 2001). Na nedostatku síry se projevuje celá řada dalších faktorů, z nichž nejvýznamnější jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka č. 2. Faktory ovlivňující nedostatek síry ve výživě rostlin (Baranyk et Fábry, 2007)

Parametr	Pravděpodobnost deficitu síry				
	malá			vysoká	
Plodina	trávy	cukrovka	brambory	obilniny	řepka olejná
Celkový příjem S (kg/ha)	~ 10	10 – 20	20 – 30	15 – 40	40 – 100
Hraniční koncentrace pro výskyt symptomů deficitu (% sušiny)	0,10 – 0,12	0,17 – 0,21	0,17 – 0,21	0,12	<0,30 (0) <0,35 (00)
Kritická hodnota pro max. výnos (% sušiny)	~ 0,30	0,35 – 0,40	~ 0,40	0,40	0,65
Půdní textura	jíl			písečná půda	
Klimatické podmínky	nízký srážkový úhrn za zimní období			vysoký srážkový úhrn za zimní období	
	<200 mm – 300 mm – 400 mm – 500 mm – >500 mm				
	nízký srážkový úhrn za letní období ETP >> s *)			vysoký srážkový úhrn za letní období s >> ETP *)	
Hladina podzemní vody	vysoká hladina podzemní vody (~1,5 m pod povrchem)			podzemní voda >2,5 – 3 m pod povrchem	

2.2. Síra v půdě

Největší množství síry se nachází v litosféře, ($24,3 \cdot 10^{18}$ kg) a v hydrosféře ($1,3 \cdot 10^{18}$ kg). V půdě se nachází síry mnohem méně ($2,6 \cdot 10^{14}$ kg) a z toho je přibližně 5 % vázáno v půdní organické hmotě. Množství síry v rostlinách je mnohem nižší a je odhadováno na $7,6 \cdot 10^{11}$ kg. Nejméně síry se nachází v atmosféře ($4,8 \cdot 10^9$ kg) (Stevenson et Cole, 1999).

Síra je v půdě obsažena v minerálních a organických sloučeninách. Z minerálních sloučenin jsou to především sírany a siřičitany. Aniont SO_4^{2-} může vázat jednomocné, dvojmocné, trojmocné a vícemocné kationty. Rozpustnost těchto sloučenin ovlivňuje přístupnost síry v nich obsažené. Hlavní podíl síry v půdě je obsažen v organických sloučeninách (Ivanič et al., 1979).

Přeměnu síry v půdě charakterizují čtyři základní fáze: oxidace, redukce, zabudování síry do organických sloučenin a mineralizace organických sloučenin síry (obr. č. 4). Podmínky prostředí, zejména dostatek či nedostatek kyslíku v půdě a pH, rozhodují o průběhu těchto procesů. Sirovodík, který je uvolňován při rozkladu siřných aminokyselin, se v anaerobních

% byly stanoveny ve vysušených poldrech v Holandsku. V běžných půdách mírného pásma se pohybují celkové obsahy S v intervalu 50 – 500 mg.kg⁻¹. Síra se v půdě nachází jak ve formě anorganických, tak i organických sloučenin. S výjimkou aridních oblastí jednoznačně převládají v půdách organické sloučeniny síry (Tlustoš et al., 2001).

2.2.1. Anorganická síra

Síra v anorganických sloučeninách je představována sírany, které jsou přítomny v půdním roztoku, ale část se jich nachází v pevné fázi půdy. Je to hlavně nerozpustná část síranů, ale také část sorbovaná na koloidy s kladným nábojem, která je významnější v kyselých půdách (Vaněk et al., 2007).

Anorganické sloučeniny síry se podílejí na celkovém obsahu síry v půdě asi 10-60%. Anorganická síra se zde vyskytuje ve formě síranů, sulfidů a sulfanu. Sulfidy vznikají při zvětrávání mateřských hornin, ale i při mineralizaci organických látek a redukcí síranů. Sulfan a sulfidy vzniklé při mineralizaci organických látek poměrně rychle oxidují na síru elementární a poté na síru síranovou. Sulfidy se ale v půdě nehromadí. Celkový obsah síranů (draslíku, vápníku, hořčíku a sodíku) v půdě v průběhu roku značně kolísá. Jejich dynamický obsah úzce souvisí s dynamickým obsahem dusičnanů (Fecenko et Ložek, 2000).

Sírany v půdním roztoku jsou v rovnováze se sírany v pevné fázi a podobně jako fosforečnany jsou sorbovány na oxidy železa a hliníku dvěma základními mechanismy. V prvním případě dochází k výměně síranových iontů za hydroxylové na povrchu minerálů a v druhém případě dochází k tvorbě hydroxo-síranových komplexů na oxidech uhlíku. K výměnné aniontové sorpci dochází i na povrchu jílových minerálů, zejména kaolinitu a kladně nabitých organických radikálů. Výměnná sorpce je závislá na pH prostředí a je významná především v kyselých půdách. Vápnění kyselých půd vede následně k uvolňování síranů do půdního roztoku. Sírany jsou též vytěsňovány z vazebných míst fosforečnany, proto jak úprava pH, tak i aplikace fosforečných hnojiv mohou vést k růstu koncentrace síranů v půdním roztoku (Tlustoš et al., 2001).

2.2.2. Organická síra

Až 98% z celkového množství síry se nachází v organických sloučeninách nejrůznějšího původu. Organické sloučeniny síry v půdě se dělí do dvou základních skupin: do první patří sloučeniny, ve kterých je síra v oxidované formě jako donor šesti elektronů a je vázána ve formě síranových esterů. V druhé skupině sloučenin je naopak atom síry v redukovaném stavu a je akceptorem dvou elektronů od svých vazebných partnerů (Tlustoš et al., 2001).

Eriksen et al. (1997) uvádí, že organická síra v půdě heterogenní směs půdních organismů, částečně rozložených rostlin, živočichů, mikroorganismů a stabilních organických látek. Hlavním zdrojem organické síry v půdě jsou kořeny rostlin, posklizňové zbytky, organická a statková hnojiva.

Malý podíl S je vázán v biomase mikrobů (1 -3 %). Je to však nejdynamičtější část organických sloučenin v půdě, které se mohou po mineralizaci významně podílet na výživě rostlin (Vaněk et al., 2007).

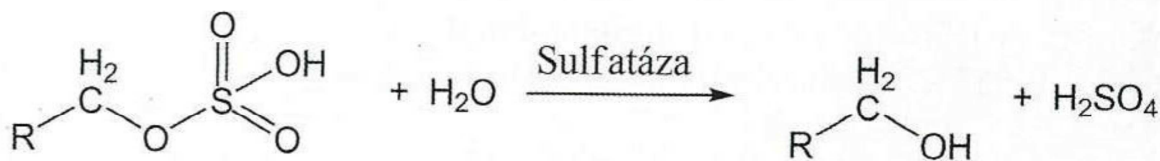
Organická frakce síry je úzce spojena s obsahem organických látek v půdě, výjimkou mohou být například půdy vápenité zasolené nebo zamokřené, kde se spíše vyskytují anorganické formy síry. Právě z tohoto důvodu se může podíl organické síry pohybovat v rozpětí 40 – 90% (Fecenko, 2002).

Eriksen et al. (1998) uvádějí, že mineralizací organických sloučenin vstupuje do zásoby minerálních forem síry pouze 7 – 10 kg S/ha/rok.

2.2.2.1. Oxidovaná forma

Síra je vázána na organické sloučeniny jako estery, lipidy, polysacharidy i glukosinoláty. Tato forma organické síry tvoří větší část organicky vázané síry v půdě. Síra je z těchto sloučenin poměrně snadno uvolňována při jejich mineralizaci, a proto je považována za hlavní potencionální zdroj pro rostliny (obr. 5). Uvolnění SO_4^{2-} z esterů způsobují enzymy (sulfatázy) různých typů s vysokou specifikou k organickému zbytku molekuly (Vaněk et al., 2007).

Obr. č. 5. Schéma mineralizace sírných organických sloučenin sulfatázou (síra vázána v esterické formě C-O-S) (Vaněk et al., 2012)



2.2.2.2. Redukovaná forma

Síra v redukované formě je vázána především přímo na uhlík a hlavními představiteli těchto sloučenin jsou aminokyseliny obsahující S, jako je methionin a cystein. Množství těchto sloučenin je méně závislé na změnách koncentrace síranů v půdním roztoku a těsněji závisí na změnách půdní mikrobiální biomasy (Tlustoš et al., 2001).

Síra v aminokyselinách vázána přes uhlík a jejich mineralizace je složitější. Probíhá v několika krocích - rozložení složitých látek na jednodušší, až na aminokyseliny, následné odštěpení sulfanu a jeho postupná oxidace na síran. Tato část mineralizace je obdobná jako u dusíku - uvolňování NH_3 při rozkladu organických látek a dále jeho oxidace na nitráty (Vaněk et al., 2007).

Při mineralizaci je nutná mikrobiální činnost specializovaných mikroorganismů. Ta je ovlivněna oxidačně redukčními podmínkami v půdě, půdní vlhkostí a teplotou. Mineralizace probíhá postupně při teplotě půdy od 4°C , přičemž nejintenzivnější mineralizace, zvláště sulfurikace uvolněného H_2S probíhá při teplotách okolo 40°C (Weir, 1975).

Při mikrobiálním rozkladu bílkovin a jiných látek obsahujících síru vznikají kromě H_2S také merkaptany, ale jen v malém množství. V aerobních podmínkách je H_2S okamžitě oxidován fotosyntetizujícími a chemolitotrofními sírnými bakteriemi na elementární síru a ta je dalšími sírnými bakteriemi oxidována na sírany. Při tomto procesu se uvolňuje energie, která slouží bakteriím k redukci CO_2 (Tlustoš et al., 2001).

2.3. Vývoj obsahů síry v posledních desetiletích

Síra se uvolňuje do atmosféry v rámci tří přirozených biochemických procesů. Při vytváření vodních aerosolů (asi 44.106 tun síry ročně), relativně malé množství při vulkanické činnosti a při aerobní respiraci bakterií redukcujících sírany (asi 33 až 230 tun síry ročně)(Vološčuk, 2003).

Dlouhodobé vysoké vstupy síry ve formě atmosférických spadů a úvahy o vysokých bilančních přebytcích této živiny způsobily, že se významu síry ve výživě rostlin věnovala malá pozornost. Přispěli k tomu i údaje o množství vyplavované síry z půdy, protože síran představoval ve většině půd dominantní aniont v půdním roztoku, který nepůsobil ani při vyšším obsahu negativně (Vaněk et al., 2012).

Celkový pohled na hnojení sírou se během posledních deseti let výrazně změnil. I přesto, že obsah síry v rostlinách se pohybuje na úrovni fosforu, nebyla v minulosti tomuto prvku při hnojení věnována pozornost (Tlustoš et al., 2001).

Mokrý deponice S je na ploše naší republiky rozložena v celku rovnoměrně. V roce 1991 činila mokrá deponice v západních Čechách 15 kg S.ha⁻¹, v jižních Čechách ve stejném období 7,5 kg S.ha⁻¹. V ostatních oblastech se v tomto roce hodnoty mokré deponice pohybovaly v rozmezí 9 až 10,4 kg S.ha⁻¹. V roce 1999 byly tyto hodnoty mnohem vyrovnanější na stanicích v Praze, v jižních a východních Čechách se pohybovaly na úrovni 3 kg S na ha. Na úrovni necelých tří kg se pohybovaly tyto deponice i v roce 2009 a můžeme je považovat za velmi stabilní. V nejvíce emisemi exponované oblasti v severních Čechách byla stanovena hodnota deponice S v roce 1999 na 5,6 kg S na ha a o deset let později se téměř nezměnila. I přesto, že někteří autoři udávají, že nejméně stejné množství síry, které je obsaženo ve srážkách, má rostlina možnost přijmout přímo ve formě vzdušného SO₂, ani toto množství síry v současnosti negarantuje její dostatečný přísun k potřebě běžných rostlin (Tlustoš et al., 2011).

2.3.1. Příčiny poklesu obsahů minerální síry v půdě.

2.3.1.1. Atmosféra

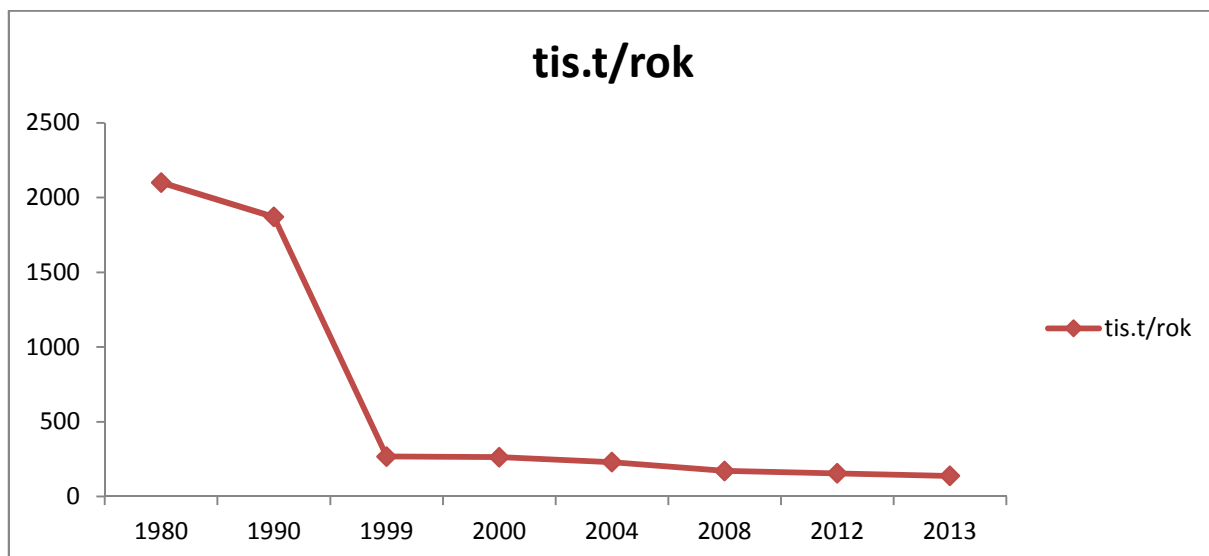
Hlavní příčinou poklesu obsahu síry v půdě je neustálé snižování obsahu síry v atmosférických spadech. Rozhodujícím zdrojem síry v ovzduší ve vnitrozemských státech je

intenzivní průmyslová činnost a s ní spojená produkce energie, zejména pokud se jedná o spalování hnědého uhlí, které je zdrojem značných emisí. Právě dřívější závislost naší republiky na produkci energie z této suroviny vedla k extrémní produkci oxidu siřičitého. Dle Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO), činily v roce 1980 emise SO_2 v české republice 2,1 mil.tun a to především v důsledku produkce tohoto plynu u velkých zdrojů. Díky zvýšenému úsilí o kvalitu životního prostředí došlo v ČR v posledních letech k výraznému poklesu produkce SO_2 , či přesněji k omezení jeho úniku do atmosféry (Tlustoš et al., 2001).

Vstup SO_2 do půdy v roce 1990 činil 1 870 tis.t/rok. To odpovídá po přepočtu přibližně 120 kg čisté síry na hektar půdy bez ohledu na její využití. V následujících letech docházelo především v důsledku odsíření elektráren k postupnému poklesu vstupů až do roku 1998, kdy se hodnoty zastavily na zhruba 230 tis. t SO_2 za rok, tj. cca 15 kg S/ha z rok. V letech 2008 a 2009 klesly celkové depozice v ČR pod hodnotu 200 tis. t za rok (Kulháněk et al., 2011).

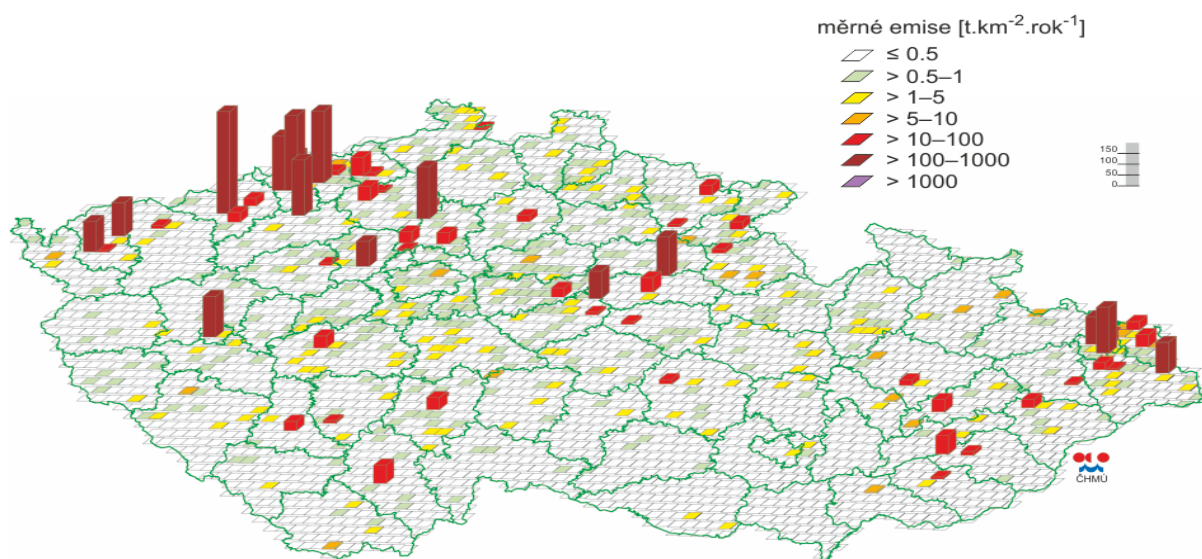
Pozvolný pokles hodnot emisí SO_2 pokračuje i v následujících letech, v roce 2012 činila hodnota emisí SO_2 155 tis. tun, v následujícím roce 2013 138 tis. tun (graf 1.).

Graf č. 1. Množství emisí SO_2 v tis. t v letech 1980 – 2013(REZZO1-REZZO4)



Měrné emise a následně atmosférický spad síry na půdu nemůžeme posuzovat jen v globálním měřítku, ale i zde je třeba brát na zřetel rozdíly v hodnotách měřených v různých regionech a to hlavně v závislosti na průmyslové výrobě dané oblasti, což je patrné z obrázku 6.

Obrázek č. 6. Emisní hustoty oxidu siřičitého ze čtverců 5x5 km, 2012 (ČHMÚ)



2.3.1.2. Půda

Společně se snižováním atmosférického spadu má na snižování obsahu síry v půdě vliv současná situace našeho zemědělství. Omezení produkce organických hnojiv, snížení dávek minerálních hnojiv se současnou změnou jejich sortimentu a vyšší podíl plodin náročných na síru v ČR jsou důvodem zjištění vizuálních deficitů síry u rostlin v řadě oblastí (Tlustoš et al., 2001).

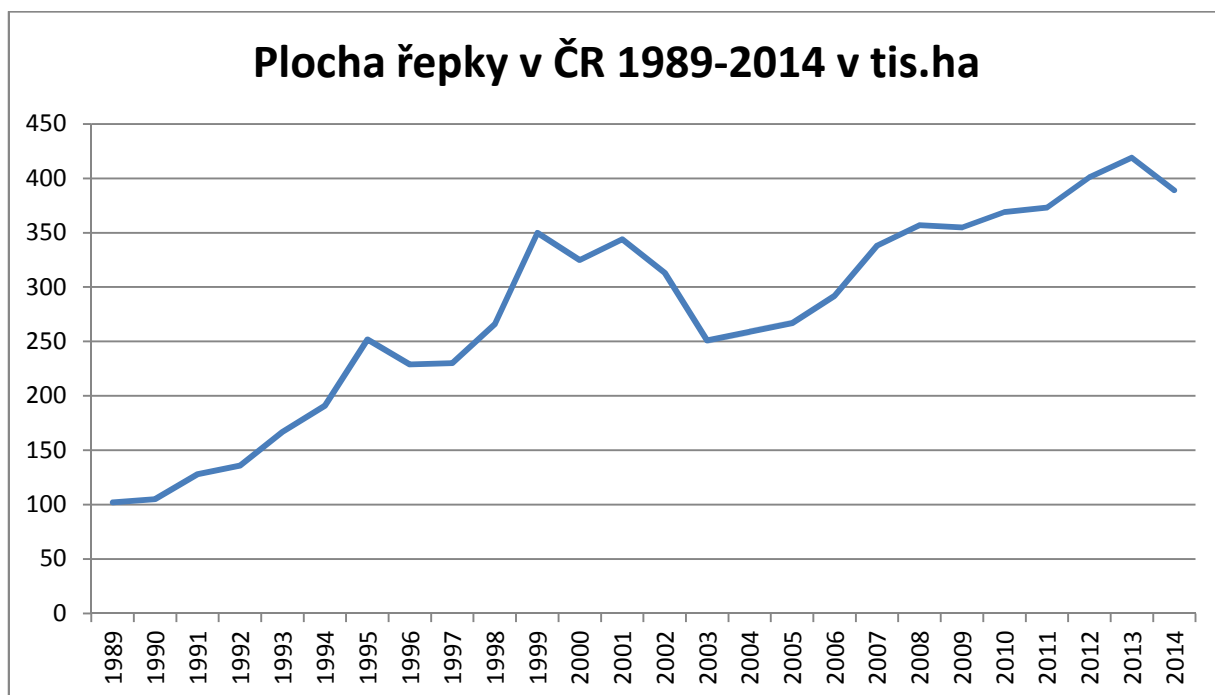
Hlavní příčinou ztrát síry z ornice je vyplavování síranů. Na intenzitu vymývání působí řada faktorů, jako například klimatické a povětrnostní podmínky, intenzita pěstování plodin, druhy půd, vododržnost půd a celkově systém hospodaření na půdách. S nedostatkem síry u rostlin se potýkají většinou půdy lehké písčité, v místech kde je dostatek srážek a mobilní síranové ionty se rychle vymývají (Zelený et Zelená, 1997). Kirchmann et al. (1996) na

základě 35 let trvajících pokusu zjistil, že v půdě nehnojené sírou, klesá její celkový obsah o 2-6 kg/ha za rok.

Podstatný podíl na poklesu obsahu síry v půdě mají rostliny a jejich odběr síry z půdního roztoku, potřebné pro tvorbu své biomasy. Pokles hodnot obsahu síry v ČR je také způsoben typem plodin na půdách pěstovaných. Jedna z nejnáročnějších plodin na síru, řepka, je neustále pěstována na větších plochách. Nárůst osevních ploch řepky v ČR je patrný z grafu č.3.

Řepka patří mezi plodiny náročné na výživu sírou. Na druhé straně má zvýšenou schopnost uvolňovat síru i z méně mobilních forem v půdě. Díky zvýšené enzymatické aktivitě arylsulfatázy mobilizuje i síru z organických sloučenin. Také vzhledem k vylučování vodíkového iontu je schopna rozpouštět i chemicky sorbovanou síru. Hnojení řepky sírou by mělo být téměř samozřejmou součástí pěstební technologie (Baranyk et Fábry, 2007).

Graf č. 3. Osevní plochy řepky v ČR 1989-2014 v tis. ha



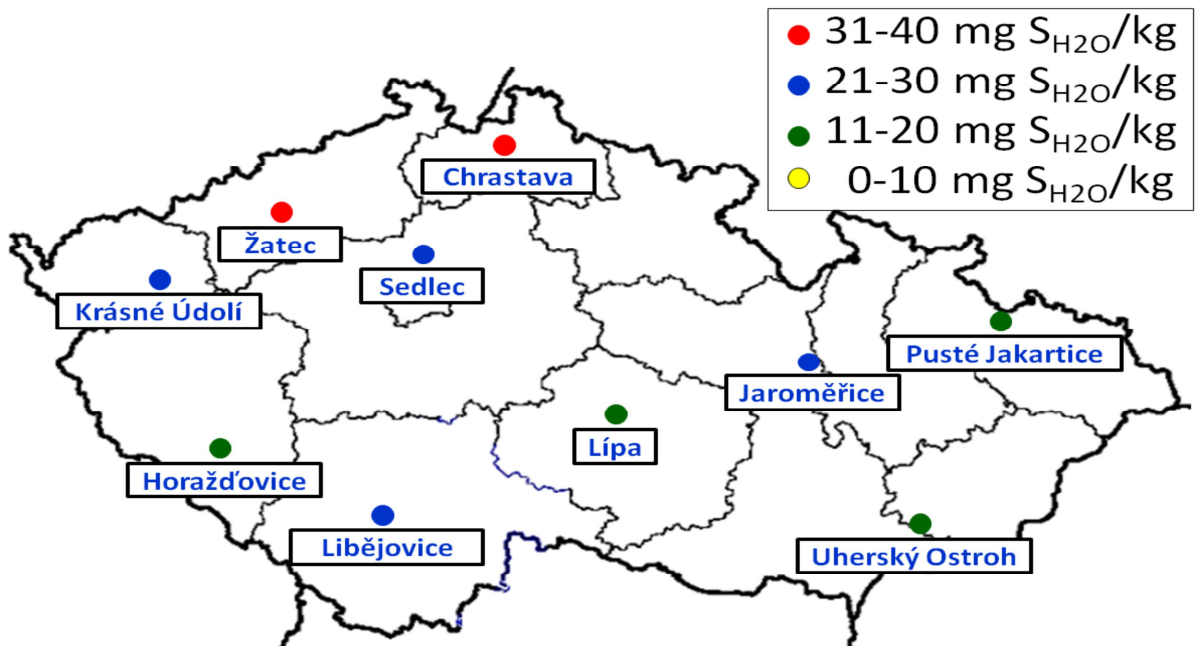
2.4. Zásobenost půd

Podmínky v půdním prostředí významně ovlivňují zpřístupňování síry nebo její akumulaci. Na základě výsledků dlouhodobých pokusů můžeme říci, že pokles vstupů síry atmosférickými depozicemi výrazně ovlivňuje bilanci přístupných nebo potenciálně přístupných forem síry v půdě, kterými je síra vodorozpustná, absorbovaná a okludovaná (Knauff et al., 1998).

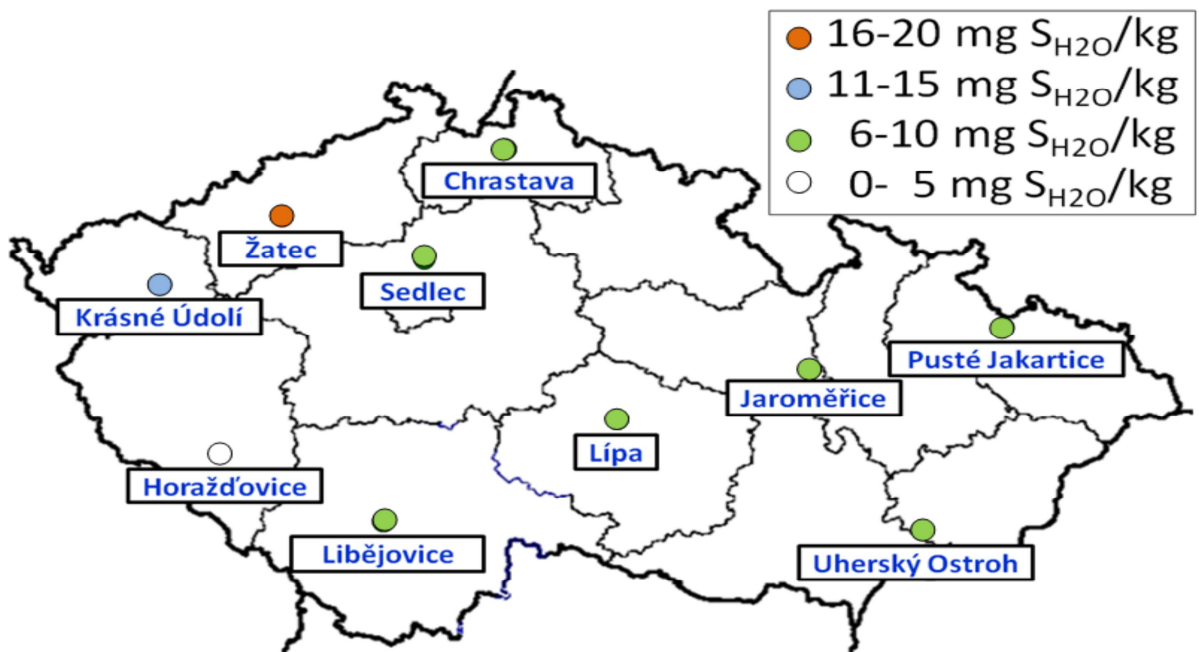
Stanovení zásobenosti půdy sírou bývá poměrně problematické a využívají se k tomu půdní testy. Ty mohou poskytovat informace pro preventivní korekci výživného stavu půdy před vegetací plodiny na určitém pozemku. Je ale také pravdou, že v možnostech využití půdních testů ke stanovení množství síry panuje určitá skepse. Ta spočívá v tom, že je hlavní podíl síry v půdě součástí organické půdní hmoty. Její přeměny by tedy mohly v krátkém čase měnit stav zásob dostupné síry v půdě pro rostliny, podobně jako v případě dusíku. Dále, hlavní formou síry, kterou rostliny přijímají je forma síranů. Ty jsou v půdách o potřebné hodnotě pH poměrně bez významné možnosti sorpce v půdě. Z této skutečnosti pak vyplývají potíže s kapacitními charakteristikami zásob dostupné síry v půdě, které v konečném stavu komplikují agronomickou interpretaci půdních testů (Matula, 2007).

Z hlediska výživy rostlin sírou v praxi je důležité mít přehled o její rostlinám přístupné frakci v půdě, tj. o síranech stanovitelných ve vodném výluhu. Na obrázcích 7 a 8 jsou znázorněny obsahy síry v půdě stanovené ve vodném výluhu v letech 1981 a 2007 na nehněných variantách dlouhodobých přesných pokusů ÚKZÚZ. Zatímco v roce 1981 hodnoty běžně dosahovaly 20mg S/kg, v roce 2007 byly stanoveny 2x nižší obsahy. Je tedy zřejmé, že v uplynulém období došlo k výraznému poklesu obsahu rostlinám přístupné síry v půdě. Je zde rovněž patrné ovlivnění zásobenosti sírou atmosférickými depozicemi. V oblasti severních Čech, kde dříve docházelo ke zvýšeným emisím především z důvodu neodsířených tepelných elektráren, jsou stále patrné zvýšené obsahy rostlinám přístupné síry v půdě (Balík et al., 2009 Kulhánek et al., 2013).

Obr. č. 7. Obsah síry extrahované vodným výluhem – rok 1981 (Kulhánek et al. 2013)



Obr. č. 8. Obsah síry extrahované vodným výluhem – rok 2007 (Kulhánek et al. 2013)



2.5. Možná opatření zabráňující poklesu obsahu síry v půdě

2.5.1. Agrotechnika

Pokles obsahu síry v půdě můžeme v malé míře ovlivnit promyšlenou a důslednou agrotechnikou. Není možné nepěstovat již zmiňovanou řepku jen z důvodu zamezení poklesu obsahu síry. Ekonomický ukazatel výroby hovoří jasně, a proto je třeba přistupovat k pěstování náročných plodin na síru zodpovědným způsobem. Těmto rostlinám musíme zajistit dostatečný přísun síry v minerálních hnojivech před a hlavně během vegetace tak, aby bilance příjmu síry rostlinou a ztráty síry odvozem produkce z polí byla vyrovnaná. Dnes běžná praxe sklizně řepky a odvozu i řepkové slámy z pozemku bez jakéhokoliv dodání síry na pozemek je naprosto krátkozraká a alarmující.

2.5.2. Hnojení

V horizontu posledních třiceti let došlo k výraznému poklesu obsahu minerálních forem síry v půdě, a to o více než 50 %. To se týká především síry v půdním roztoku, která je rozhodující formou pro příjem rostlinami. Proto se v porostech plodin náročných na síru stále častěji projevují nedostatky tohoto prvku a hnojení sírou se stává stále aktuálnějším problémem (Kulhánek et al., 2013).

Síra je stejně jako dusík součástí aminokyselin a bílkovin. Jelikož existuje spojitost mezi sírou a dusíkem je zřejmé, že rostliny s vysokými nároky na dusík, mají i vysoké nároky na síru. Spolupůsobení dusíku a síry vede zejména k efektivnímu využití dusíku při biosyntéze bílkovin. Síra a dusík by měly být v poměru 1 : 10-17, stejně tak poměr síry a fosforu by měl být 1 : 1,5-2. Těmto požadavkům rostlin je žádoucí přizpůsobovat hnojení a hlavně dávky síry (Janzen et Bettany, 1984).

2.5.1.1 Organická hnojiva

Stabilnější formy síry, tedy celková a organická, jsou výrazně ovlivněny hnojením organickými hnojivy. Největší navýšení obsahu těchto forem v půdě bylo zaznamenáno při

dlouhodobé aplikaci chlévského hnoje a rostlinného materiálu. Dlouhodobá aplikace minerálních hnojiv nemá vliv na obsah a zvýšení celkové a anorganické síry v půdě a to i v případě, kdy dávka hnojiv překračuje odběr rostlin a to z důvodu vyplavení přebytku síry z půdy (Knauff et al., 1998).

K odstranění nedostatku síry je v současné době k dispozici celá škála hnojiv. Částečně je možné ztráty síry eliminovat i použitím organických hnojiv, jako jsou hnůj, čistírenské kaly, rostlinné zbytky a jiné. Kulhánek et al., (2013) zjistili, že z hlediska obsahů minerálních forem síry v půdě je lepší aplikovat chlévský hnůj, popřípadě i čistírenské kaly. Na dlouhodobé pokusné variantě hnojené NPK nebo samotným dusíkem bez přídavku síry, byl zjištěn pokles obsahu minerální, zejména vodorozpustné síry, pod úroveň hodnot z kontrolní nehnojené varianty. Aplikace samotných organických hnojiv nestačí k eliminaci ztrát S z půdy, a proto je nutné přikročit k aplikaci síry v minerálních hnojivech.

V organických hnojivech závisí obsah S na formě organického hnojiva i na použité technologii a pohybuje se od 0,015 do 0,07 % S (tabulka 3). Ve hnoji je síra vázána ze 40 % v organických vazbách na uhlík, 20 % ve formě sulfidů a zbylých 40 % ve formě dalších organických síranů. Při průměrném obsahu 0,035 % S dodáváme dávkou 40 t hnojiva na ha 14 kg S. Využití S rostlinami po aplikaci kejdy prasat a skotu v modelových podmínkách, se pohybuje v rozmezí 5 – 7% z dodané síry, v polních podmínkách je využití ještě nižší (Tlustoš et al., 2001).

Tabulka č. 3. Obsah síry v organických hnojivech a zbytcích

Statková hnojiva	obsah S/kg/t	Posklizňové zbytky	obsah S/kg/t
Hnůj	1	Sláma obilovin	1,5
Močůvka	0,1	Sláma luskovin	3
Kejda skotu a prasat	0,4	Sláma olejnin	2
Kejda drůbeže	0,8	Řepný chrást	0,3
Suchý drůb. trus	4	Bramb. nať	0,5

2.5.1.2. Minerální hnojiva

V současné době je na trhu nabízeno dostačující portfolio hnojiv obsahujících síru (tabulka 4). Síra se v těchto hnojivech vyskytuje ve formě síranu, sulfidů nebo elementární síry. Mezi celosvětově nejpoužívanější hnojiva obsahující síru patří síran amonný, síran draselný, síran

hořečnatý sádrovec a elementární síra. Kulhánek et al., (2013) uvádějí, že efektivita využití síry ze síranových hnojiv je zhruba na stejné úrovni, bez ohledu na rozpustnost daného hnojiva ve vodě. Síra je zpravidla aplikována do půdy v předseťové přípravě, případně na povrch půdy v časných růstových fázích plodin a to jak na podzim tak, a to hlavně u řepky, na jaře.

Síra může být aplikována i foliárně. Foliárně aplikovaná síranová forma síry se do listů dostává velmi rychle. Síraný jsou však následně z velké části zachycovány ve vakuolách a z menší části využívány na tvorbu výnosu. K listové aplikaci je možné využít například hořkou sůl. Lepších výsledků je však dosahováno s listově aplikovanou elementární sírou. To lze nejpravděpodobněji vysvětlit tím, že před samotnou adsorpcí listy musí být tato forma nejdříve oxidována na sírany. Postupná přeměna elementární síry na sírany je pozvolný proces, a proto tak dochází k plynulejšímu zásobení listů sírany. Nedochází tedy k přílišné akumulaci síranů v cytosolu a jejich následné kumulaci ve vakuolách. V praxi hojně používaným hnojivem je roztok síranu amonného s močovinou (SAM), s obsahem síry mezi 5 – 8 % (Kulhánek et al., 2013).

V daleko větší míře jsou používána hnojiva pevná. Z praktického hlediska je pro zemědělce důležité u používaných hnojiv kvalita zboží. Z pohledu výrobců je vždy při výrobě hnojiva obsahujícího síru problém s obsahem prachových částic a stálosti hnojiva při skladování. Při současném systému hospodaření, dbajícím na kvalitu aplikace, a záběru techniky 36 m, je důležitá výborná granulace hnojiva a velikost částic.

Elementární síra je v současné době intenzivně testována jako perspektivní vysoce koncentrované minerální hnojivo, doporučované především pro hnojení sírou na alkalických půdách. Udává se, že při aplikaci tohoto hnojiva dochází ke snížení pH půdy, a tím uvolnění vápníku vázaného ve fosforečnanech, a tedy i zpřístupnění P pro rostliny. Další výhodou používání elementární síry je její pozvolná oxidace, a tím i minimalizace rizik spojených s vyplavováním SO_4^{2-} iontů do spodních vrstev půdy. Čím je částice elementární síry v půdě menší, tím rychleji dochází k její oxidaci. Rychlost oxidace však záleží i na dalších faktorech, jako je například mikrobiální aktivita sírných bakterií, úroveň kontaktu hnojiva s půdou, pH a stupeň aerace půdy. Nezanedbatelnou výhodou elementární síry jsou menší náklady na manipulaci a transport vycházející z vysoké koncentrace síry v tomto hnojivu. **Síran amonný** (SA) je N-S hnojivo, které obsahuje kromě 21 % dusíku také 24 % síry. Význam přímé aplikace SA vzrostl s jeho granulací a možností současné aplikace s dalšími jednosložkovými hnojivy. Granulačním pojivem je přídavek ledku vápenatého, Granulovaný SA pak obsahuje

1,4-nitrátového dusíku a kolem 2,5 % vápníku, což má příznivý vliv na počáteční růstové fáze, popřípadě na výměnnou půdní reakci (Kulhánek et al., 2013).

Mezi další dusíkaté hnojivo s obsahem síry patří **DASA**, jeho základ tvoří dusičnan amonný a obsahují 13 % S z přidavku síranu amonného. S přidavkem síranu vápenatého a obsahem 6 % S je používáno hnojivo **LAS**.

Mezi hnojiva obsahující síru a hojně využívaná v našem zemědělství můžeme zařadit **síran draselný**, obsahující 42 % draslíku a 17 % síry. Síran draselný je hojně využíván pro hnojení rostlin nesnášejících chlór z draselných solí, kainitu a kamexu. Výborným hnojivem obsahujícím 18 % síry a 15 % hořčíku je **kieserit**. Jedná se o hnojivo vhodné do středních až těžších půd s vyšším pH a nízkou zásobou hořčíku a dobrou zásobou draslíku. Složením podobné hnojivo je **hořká sůl**, obsahující 10 % hořčíku a 12 % síry. Jeho obrovskou výhodou je snadná rozpustnost a použitelnost formou postřiku. Hnojiva jako **jednoduchý superfosfát** a **síran vápenatý** (sádra) jsou hnojivy v současné době málo využívanými (Kulhánek et al., 2013; Matula, 2007; Valenta, 2011).

Tabulka č. 4. Nejpoužívanější hnojiva s obsahem síry a jejich chemické složení (Matula, 2007; Valenta, 2011)

Hnojivo		Obsah síry (%)
Název (zkratka)	Chemické složení	
Síran amonný (SA)	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	22 - 24
Kieserit (síran hořečnatý) (KIE)	$\text{MgSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	19 - 21
Síran draselný (SD)	K_2SO_4	16 - 18
Síran vápenatý (sádra) (SV)	CaSO_4	14 - 18
Superfosfát jednoduchý (JSP)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4$	8 - 10
DASA	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	13
ENZIN [®]	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +dikyandiamid DCD a 1,2,4 triazol	13
SAM 19 N - 5 (SAM)	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{CO} - (\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5
Ledek amonný se sírou (LAS)	$(\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaSO}_4)$	6
Hořká sůl (HS)	$(\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O})$	11 - 13
WIGOR S	Element. S + bentonit (10 %)	85

Snaha omezit negativní dopady klasických, zejména dusíkatých hnojiv, na životní prostředí a zároveň eliminovat ekonomické ztráty vedla k vývoji hnojiv s takzvaným dlouhodobým účinkem. První skupinu tvoří hnojiva s pomalým uvolňováním (SRF – Slow Release Fertilizers). Do této kategorie hnojiv patří i elementární síra a pomalu rozpustná hnojiva obsahující síru jako jednu ze svých složek (např. granulát směsi močoviny a síry). Druhou skupinu hnojiv s pozvolným působením představují typická granulovaná hnojiva obalená vrstvou materiálu, která brání přístupu vody k vlastnímu hnojivu a zpomaluje tak jeho rozpouštění a transport uvolněných živin do okolního prostředí. Volbou obalového materiálu a jeho tloušťky lze tento proces do určité míry řídit, proto jsou tyto produkty označovány jako hnojiva s řízeným uvolňováním živin (CRF - Controlled Release Fertilizers). K nejstarším a dosud nejrozšířenějším průmyslově využívaným obalovým materiálům patří právě elementární síra (Kulhánek et al., 2013).

V nejbližší době lze očekávat i využití odpadního síranu vápenatého jako hnojiva, které může být nejen dobrým zdrojem S a Ca, ale dokáže příznivě ovlivňovat též složení půdního roztoku a v alkalických půdách eliminovat nepříznivé působení uhličitanu sodného. Jeho použití může nalézt uplatnění hlavně u jetelovin, brukvovitých rostlin a na stanovištích vykazujících alkalickou reakci (Vaněk et al., 2012).

2.6. Aktuální zásobenost půd ČR

V České republice probíhá agrochemické zkoušení půd (AZPP) periodicky od roku 1961, v šestiletých cyklech na základě zákona č. 156/ 1998Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích, substrátech a agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech) a vyhlášky č. 275/1998 Sb., o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních vlastností lesních pozemků, vše ve znění pozdějších předpisů. AZPP je pravidelné zjišťování vybraných parametrů půdní úrodnosti v důsledku používání hnojiv, s cílem usměrňovat jejich používání. V případě, kdy hrozí nebezpečí poškození půdní úrodnosti, zahrnuje rovněž mikrobiologické a fyzikální rozborů. Současná podoba AZPP představuje moderní systém sledování parametrů půdní úrodnosti. AZPP provádí Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský.

2.6.1. Technika odběru vzorků

Vzorky půd se odebírají sondovacími tyčemi na hloubku orničního profilu (max. do 30 cm). Jeden průměrný vzorek se v bramborářské a horské výrobní oblasti odebírá z výměry 7 ha, v řepářské a kukuřičné z 10 ha (u orné půdy a TTP), u sadů a chmelnic z plochy 3 ha. U vinic se průměrný půdní vzorek odebírá ze 2 ha, přičemž se přihlíží k půdní vyrovnanosti a terénní členitosti. Odběr průměrného vzorku se vždy provádí z plochy jednotně obhospodařované (stejná plodina, stejné hnojení). Průměrný půdní vzorek se skládá minimálně z 30 dílčích vpichů sondovací tyčí. Vzorky se odebírají v jarním nebo podzimním období. Jarní odběr začíná, jakmile to dovolí půdní a klimatické podmínky a končí podle stavu vegetace nejpozději na konci května. Podzimní odběr začíná po sklizni obilovin a ukončuje se 30. listopadu (ÚKZUZ).

Pro stanovení obsahu přístupných živin se používá metoda Mehlich III. Při stanovení touto metodou, se díky lepšímu vytěsnění jednotlivých prvků z půdního sorpčního komplexu zvyšují hodnoty obsahů živin v půdě u fosforu o 20%, u draslíku a hořčíku o 3 – 4% v porovnání s dříve používanou metodou Mehlich II. K tomu je třeba přihlížet při případném porovnávání výsledků rozborů.

Musíme ale také upozornit, že podle Matuly (2007) extrakce Mehlich III stanovuje i určitý podíl z celkové síry v půdě a je tedy nejméně vhodná pro diagnostiku aktuálního výživného stavu síry v půdě.

2.6.2. Výsledky

V roce 2014 začal ÚKZUZ v rámci AZPP sledovat kromě tradičních živin i obsah síry v půdách České republiky. Z důvodu šestiletého cyklu AZPP jsou počty vzorků v jednotlivých krajích značně rozdílné, a budou dále doplňovány, přesto již tyto dílčí výsledky potvrzují nízký obsah síry v půdách České republiky. Celkem bylo zkoušeno 6695 vzorků. Nejlépe odzorkovaným krajem je v současné době Pardubický kraj, s počtem vzorků 1935. Nejméně vzorků bylo odebráno v Kraji Vysočina a ve Středočeském kraji. Ze vzorků v Ústeckém kraji je patrný rozdíl v oblastech lokálních emisních zdrojů, které převyšují průměrné obsahy, ale i v tomto kraji, kde by se dal očekávat uspokojivý stav, je na základě

hodnocení dle kritérií (tabulka 5), patrný nedostatek síry v půdě. Z celkového hodnocení vzorků vyplývá, že 89% půd v České republice má nízký obsah síry (tabulka 6).

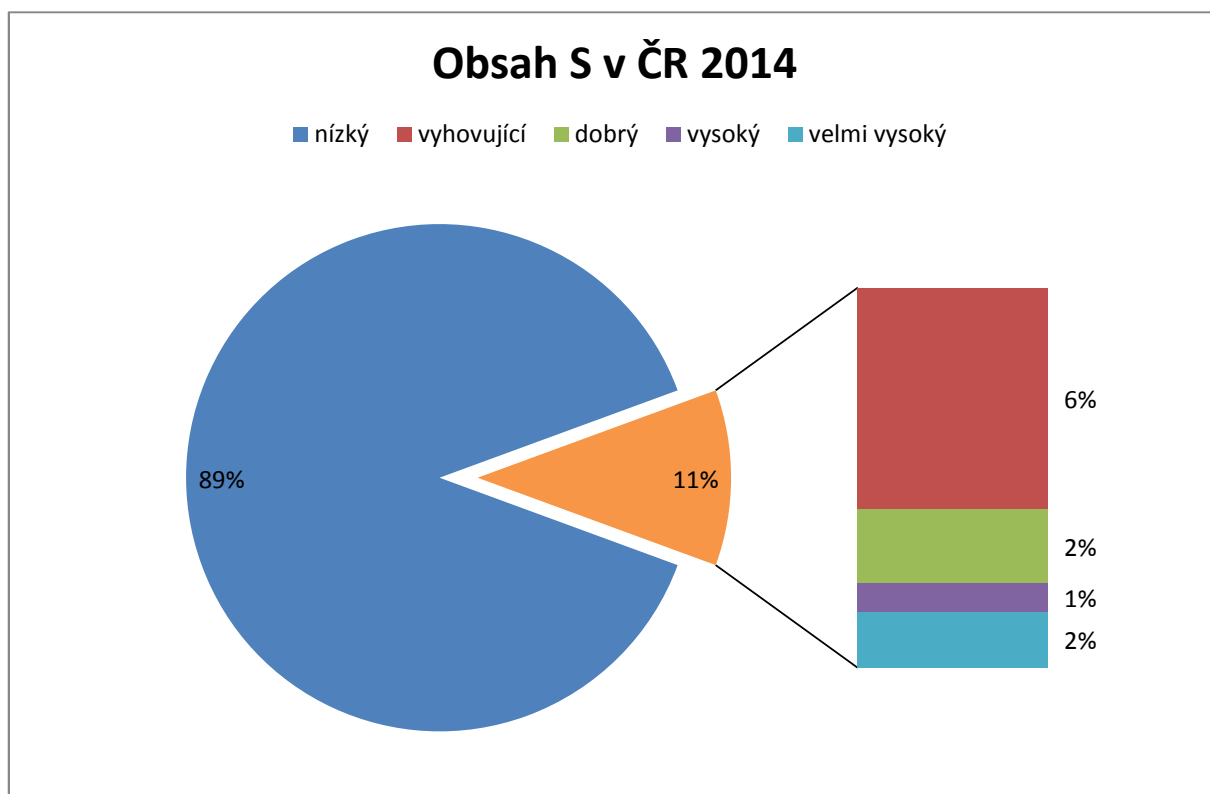
Tabulka č. 5. Kritéria hodnocení výsledků rozborů (ÚKZUZ)

Obsah	SÍRA (g/m ³)
Nízký	do 26 g/m ³
Vyhovující	26 – 38 g/m ³
Dobrý	39 – 50 g/m ³
Vysoký	51 – 62 g/m ³
velmi vysoký	nad 63 g/m ³

Tab. č. 6. Počty vzorků, hodnoty a hodnocení AZZP

S mg/kg	PA	JČ	JM	KH	LB	MS	OL	PZ	SČ	ÚS	VY	ZL	ČR celkem
Počet vzorků	1935	327	1105	842	227	319	308	693	144	424	108	263	6695
hodnota minim.	5,199	4,69	3,01	5,335	6,31	5,506	6,248	6,175	8,182	5,285	5,816	4,83	3,01
hodnota maxim.	101,8	39,84	292,7	64,65	21,91	44,88	101,5	42,7	59,89	420,4	18,25	103	420,4
průměr	9,797	14,342	22,793	13,286	10,888	11,212	13,012	13,325	16,925	25,843	10,579	12,7	14,559
nízký do 20 mg	1914	291	797	780	225	309	284	646	123	222	108	241	5940
vyhovující 21-30 mg	15	28	142	44	2	5	18	38	17	110	0	18	437
dobrý 31-40 mg	5	8	61	10	0	4	2	6	3	44	0	2	145
vysoký 41-50 mg	0	0	26	7	0	1	1	3	0	18	0	1	57
velmi vysoký nad 50mg	1	0	73	1	0	0	3	0	1	30	0	1	110

Graf č. 5. Stav zásobenosti půd ČR v %



2.7. Prognóza vývoje obsahu síry v půdě v nejbližších letech

Prognóza vývoje obsahu síry v půdách ČR nedává důvod k optimismu. Jak je patrné ze získaných poznatků, největším přínosem pro obsah síry v půdě jsou atmosférické depozice. Není důvod se domnívat, že snižování emisí nebude pokračovat. Na druhou stranu si můžeme být jistí každoročním přísunem síry ve formě spadů a tím, že nenastane nulová varianta zásobení sírou z ovzduší. Ani druhý důležitý zdroj síry, organická hnojiva, nebudou mít patrně v budoucnu vzrůstající tendenci, ale můžeme snad předpokládat, že současný stav živočišné výroby, a tím i produkce organických hnojiv, bude v nastávajícím období zachován pouze s menšími výkyvy. Mezi pravděpodobné zdroje v budoucnu více využívané budou patřit čistírenské kaly, jako vhodné zdroje síry pro půdu. Možným přínosem mírného zlepšení stavu by mohl být zavedený „greening“, a tedy zvýšený přísun zelené organické hmoty do půdy.

V rámci pěstovaných plodin nemůžeme čekat změnu ani v silné pozici řepky na našich polích. Při současné zemědělské politice ČR a EU se pokles ploch nedá očekávat, ale patrně ani zvyšování osevních ploch již nehrozí ve velké míře.

3. Závěr

Aktuální zásobenost půd České republiky je nízká. Předpoklady pro snižování hodnot obsahu síry v půdě, jako je snižování emisí, omezení organického hnojení a pěstování plodin náročných na síru, se projevují při výsledcích AZZP z roku 2014. S velkou jistotou můžeme říct, že hlavní a zásadní vliv na pokles obsahu síry v půdě mají atmosférické spady, tedy snižování emisí. Tato pro naše životní prostředí pozitivní zpráva, je jasným signálem pro zemědělský sektor, aby síru začal vnímat jako další důležitý faktor pro dokonalé výsledky pěstitelského snažení. Zařazení hnojiv obsahujících síru a stálý přísun organické hmoty do půdy musí být součástí agrotechniky správného hospodáře. Hodnoty obsahu síry je třeba sledovat pravidelně a kontinuálně. Nedostatek síry ve výživě rostlin je potřeba předcházet, jelikož zjevné nedostatky síry na rostlinách za vegetace je již velmi obtížné eliminovat. Zabezpečit vyrovnanou výživu rostlin, s ohledem na dostatek průmyslových hnojiv obsahujících síru na trhu, by neměl být zásadní problém. Výrobci minerálních hnojiv již reagují na problém s obsahem síry v půdách, potažmo s nedostatečnou výživou rostlin. Jejich reakce je patrná v nabídce hnojiv obsahujících síru, která se každoročně zvyšuje, ale i v obsahu síry v hnojivech, který také narůstá. I přes tyto pozitivní informace o možnosti doplnění výživy z minerálních hnojiv, bude při současném stavu našeho zemědělství a pokračujícím trendu zlepšování kvality ovzduší celkový obsah síry v půdách celé České republiky aktuálním problémem hodným studia a diskuse.

4. Seznam literatury

- Balík, J., Kulhánek, M., Černý, J., Száková, J., Pavlíková, D., Čermák, P. 2009. Differences in soil sulfur fractions due to limitation of atmospheric deposition. *Plant Soil and Environment*. 55. 344-352.
- Balík, J., Tlustoš, P. 2000. Hnojení ozimé řepky sírou. *Květy olejnin*. 4. 2-3.
- Baranyk, P., Fábry, A. 2007. Řepka-pěstování, využití, ekonomika. Profipress, s.r.o., Praha, 208 s. ISBN: 978-80-86726-26-7
- Dijkshoorn, W., Van Wijk, A. L. 1967. The sulphur requirement of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter. *Plant soil*. 26. 129-157.
- Eriksen, J., Murphy, M.D., Schnug, E. 1997. Mineral nutrition in ecosystems. Kluwer Academic Publishers Dordrecht. 15-32.
- Eriksen, J., Murphy, M. D., Schnug, E. 1998. The soil sulphur cycle. Sulphur in agroecosystems. Kluwer Academic Publishers. London. 39-73.
- Fecenko, J. 2002. Význam síry pro výživu rostlin a její potřeba na hnojení plodín pěstovaných v SR. *Agrochémia*. 4 (42). 13-15.
- Fecenko, J., Ložek, O. 2000. Výživa a hnojení polných plodín. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. 442 s.
- Haneklaus, S. E., Murphy, D.P.L., Nowak, G., Schnug, E. 1995. Effects of the timing of sulfur application on grain yield and yield components of wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 158. 83 – 85.
- Hlušek, J., Richter, R., Smatanová, M. 2001. Výživa a hnojení zelenin sírou. Sborník ze 7. Mezinárodní konference, Racionální použití hnojiv. AF ČZU v Praze, str. 56-61

Ivanič, J., Havelka, B., Knop, K. 1979. Výživa rastlín a hnojenie. Príroda, vydavateľstvo kníh a časopisov, n.p., Bratislava. 360 s.

Janzen, H. H., Bettany, J.R. 1984. Sulfur nutrition of rapeseed. Influence of fertilizer nitrogen and sulfur rates. Soil Science Society of America Journal. 48. 100-107.

Knauff, U., Scherer, H. W. 1998. Arylsulfatase-Aktivität im Kontraktraum Boden/Wurzeln bei verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. Pflanzenern'ahrung, Wurzeleistung und Exudation. str. 196 – 204

Kirchman, H., Pichlmayer, F., Gerzabek, M. 1996. Sulfur balance and sulfur abundance in a long term fertilizer experiment. Soil Science Society of America Journal. str. 174 - 178

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J. 2011. Změny obsahu a forem síry v půdách. Sborník ze 17. mezinárodní konference, Racionální použití hnojiv. AF ČZU v Praze, str. 27 - 31

Kulhánek, M., Balík, J., Vaněk, V., Pavlíková, D., Černý, J. 2013. Využití analýz frakcí minerální síry v půdě k optimalizaci hnojení (certifikovaná metodika). ČZU v Praze. Powerprint, Praha. 26 s. ISBN: 978-80-213-2376-6

Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London. 672 s. ISBN: 9780123849052 i

Matula, J. 2007. Výživa a hnojení sírou: metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha. 38 s.

Richter, R., Hlušek, J. 2003. Půdní úrodnost. ÚZPI Praha. 44 str. ISBN 80-7271-130-X

Stevenson, F. J., Cole, M.A. 1999. Cycles of Soil. J. Wiley & Sons, Inc., Canada. 448 s.

Tandon, H. L. S., 1991. Sulphur research and agriculture production in India. TSI Washington,DC. 148 s.

Tlustoš, P., Pavlíková, D., Balík, J., Száková, J. 2001. Koloběh síry v půdě a v prostředí. Sborník ze 7. Mezinárodní konference, Racionální použití hnojiv. AF ČZU v Praze, str. 20-26

Tlustoš, P., Švehla, P., Pavlík, M., Hanč, A. 2012. Agrochemie. ČZU Praha. Powerprint s.r.o., Praha . 228s. ISBN 978-80-213-1713-0

Valenta, J. 2011. Sortiment hnojiv se sírou a její zdroje. Sborník ze 17. mezinárodní konference, Racionální použití hnojiv. AF ČZU v Praze, str. 48-57.

Vaněk, V. a kolektiv. 2012. Výživa zahradních rostlin. Academia Praha. 570 s. ISBN: 978-80-200-2147-2

Vaněk, V. a kolektiv. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, s.r.o., 167 s. ISBN: 976-80-86726-25-0

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

Vološčuk, I. 2003. Ochrana přírody a krajiny. TU ve Zvolene. 235 s.

Weir, R. G. 1975. The oxidation of elemental sulfur and sulphides in soil. Sulfur in Australian Agriculture. Sydney University Press. str. 40-49.

Zelený, F., Zelená, E. 1997. Síra a její potřeba pro výživu rostlin. Praha, 42 s.

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