

Abbildung 1: Schwefelkreislauf im System Boden-Pflanze

Schwefel als Nährstoff  
 Dr. Friedhelm Fritsch, DLR R-N-H, Bad Kreuznach

1

Nährelemente und ihre chemischen Verbindungen						
Element	N	P	K	Mg	Ca	S
	Stickstoff	Phosphor	Kalium	Magnesium	Calcium	Schwefel
Oxid (sofern bei Düngern angegeben)	-	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	(SO <sub>3</sub> )
		„Phosphat“	„Kali“	Mg-Oxid	„Kalk“	
Multiplikation		P * 2,29 = P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K * 1,2 = K <sub>2</sub> O	Mg * 1,66 = MgO		S * 2,5 = SO <sub>3</sub>
Säure Basen Salze	HNO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> OH Nitrate	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> Phosphate	KOH Kalisalze	Mg(OH) <sub>2</sub> Mg-Salze	Ca(OH) <sub>2</sub> Ca-Salze	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Sulfate
von Pflanzen aufgenommen als Ion	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>HPO<sub>4</sub><sup>-</sup></b> <b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Mg<sup>++</sup></b>	<b>Ca<sup>++</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>
Verbindungen in Düngemitteln (Beispiele)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CaCN <sub>2</sub> NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH	KCl K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub> MgO Mg(OH) <sub>2</sub> MgCO <sub>3</sub>	CaO Ca(OH) <sub>2</sub> CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Ammoniumsulfat mit 21 % N und 24 % S bzw. 60 % SO<sub>3</sub>

2

## Schwefel im Boden

Schwefel kommt in den Böden der humid gemäßigten Klimazonen mit ca. 0,1-1,5 % vor. Nur ein sehr kleiner Teil (< 5 %) ist wasserlöslich. Der unlösliche Teil ist **vor allem organisch gebunden**.

- in primären Mineralien: als metallisches **Sulfid** (z.B. FeS)
- unter ariden Bedingungen angereichert:
  - Gips** ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ )
  - Bittersalz: ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ )
  - FeS, ZnS ...
- durch Verwitterung → **Sulfatbildung**  
marine Sedimente (Schlick, Salzmarschen) meist sehr S-reich
- Sulfat-Ionen in der Bodenlösung
  - Sulfat (pflanzenaufnehmbare Fraktion) im Boden sehr mobil → **auswaschungsgefährdet**
- adsorbiertes Sulfat
  - nur unspezifische Sorption → **unbedeutend**
- **organisch gebundener Schwefel**
  - Erntereste (S-haltige Aminosäuren (Methionin, Cystein) und sekundäre Pflanzenstoffe)
  - in organischen Böden hohe S-Reserven
  - Mineralisation zu Sulfat

3

3

## Früher: Schwefelzufuhr aus der Luft

### S-Bedarf:

Getreide	10 bis 20 kg S/ha
Raps	20 bis 40 kg S/ha

Der **Eintrag von Schwefel aus der Atmosphäre** (mit saurem Regen) ist stark zurückgegangen (< 10 kg S/ha und Jahr)

bis in die 1980er Jahre: 50 und mehr  $\text{kg S ha}^{-1} \text{a}^{-1}$

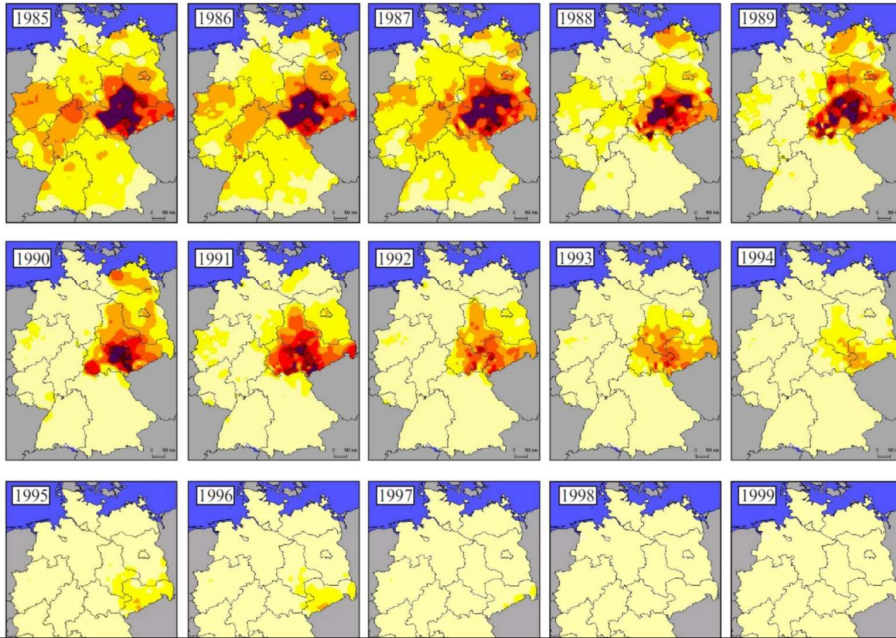
(bes. in Ballungsräumen, Industriegebieten)

**Schwefelmangel war früher selten und ist heute verbreitet.**

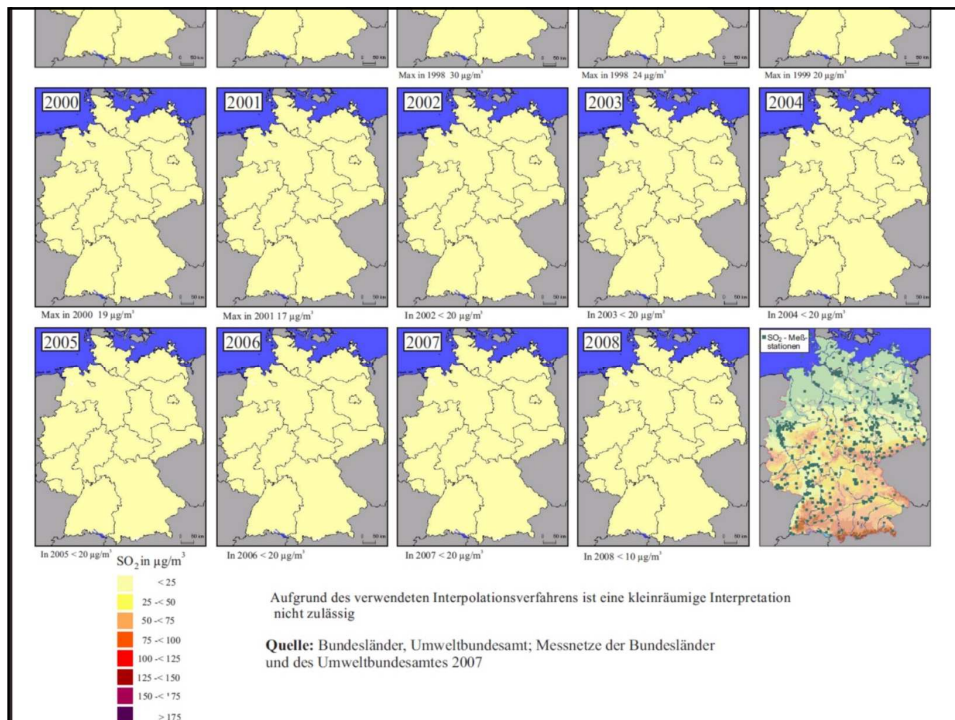
4

4

## SO<sub>2</sub> - Jahresmittelwerte



5



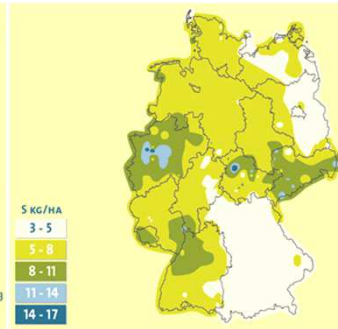
6

## Schwefeleinträge (kg S/ha) in Deutschland

Entwicklung



Aktueller Status



Der Schwefeleintrag der wichtigen landwirtschaftlichen Kulturen übersteigt heute bei weitem den Eintrag aus der Atmosphäre

Durchschnittlich kommen nur noch ca. 6 kg S/ha aus der Luft

Daten der Landesumweltämter, 2000

7

Quelle: fertiva

7

## Aufnahme und Funktionen des Schwefels

- $\text{SO}_4^{--}$ -Aufnahme über die Wurzeln
- $\text{SO}_2$  (gasförmig über die Stomata) wirkt ab ca.  $1,5 \text{ mg/m}^3$  toxisch

Die **Assimilation** des Schwefels erfolgt durch Reduktion und Einbau in S-haltige Aminosäuren (nur Pflanzen und Prokaryonten sind dazu in der Lage).

### Baustein in:

- S-haltigen **Aminosäuren** (Methionin und Cystein)
- Enzymen (Nitrogenase, Nitratreduktase) und Co-Enzymen
- Lauchöle und Senföle (Glukosinolate)

Als SH-Gruppe kann S in Form einer reaktiven Gruppe direkt in enzymatische Reaktionen eingreifen und **Disulfidbrücken** bilden:  
 $\text{R-SH} + \text{R-SH} \rightarrow \text{R-S-S-R} + 2\text{H}$

8

8

## Stabilisierung der Proteinstruktur

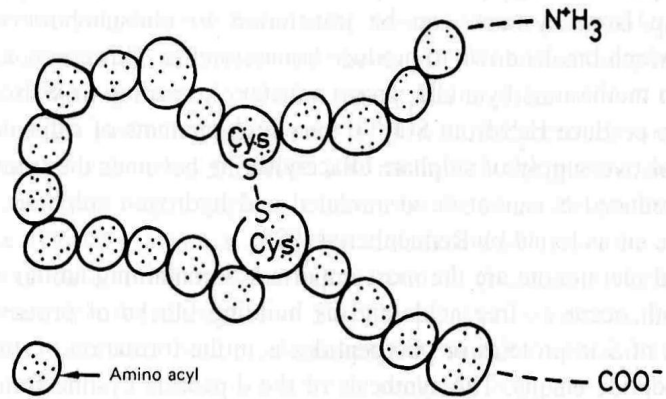


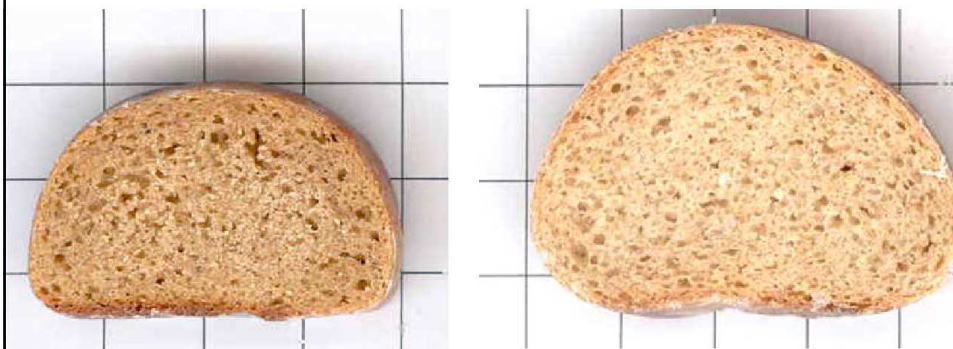
Figure 8.4 S-S bridge of a polypeptide chain.

9

Mengel und Kirkby 2001

9

## DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten

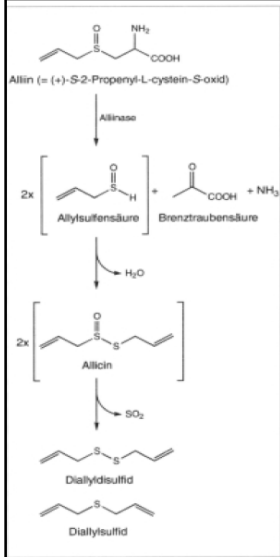


**Abbildung 2:** Einfluss der S-Versorgung auf die Backqualität bei Weizen. Links ohne, rechts mit S-Düngung (Bildquelle: C. Zörb, Universität Kiel)

10

10

## Geschmack und Geruch durch schwefelhaltige sekundäre Inhaltsstoffe



**Brassicaceae (Kohlgewächse)**  
z.B. Weiß-, Rot-, Grünkohl, Kresse, Rettich, Radischen, Meerrettich, Steckrübe, Senf, Raps  
**Glucosinolate + Enzym (Myrosinase) → Isothiocyanate (Senföl)**

**Alliaceae (Zwiebelgewächse)**  
z.B. Küchenzwiebel, Knoblauch, Porree, Schnittlauch  
**Alliine + Enzym (Allinase) → Allicin (Lauchöl)**

**Spargel**  
**Dimethylsulfid** ist Hauptgeschmacksträger (Hoberg et al., 1998)

Der Geschmack ist standortabhängig und wird von der Schwefelversorgung beeinflusst.

Dr. Hans Marten Paulsen, Institut für ökologischen Landbau, FAL, Trenthorst; <http://oel.fal.de>

11

## Schwefelmangelsymptome



STICKSTOFF-SCHWEFEL-STARK



**Raps:** Blütenfarbe fahl, Schotenansatz schlecht, Blätter marmoriert und löffelartig verformt



**Zuckerrübe:** zunehmende Aufhellung, Blätter löffelartig verformt

### Getreide:

#### Schwefelmangel



Bei Schwefelmangel bilden sich die jüngsten Blätter gelb aus. Ältere Blätter bleiben grün.

#### Stickstoffmangel



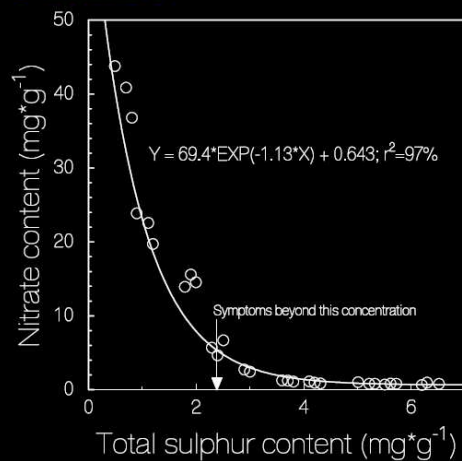
Bei Stickstoffmangel vergilbt die gesamte Pflanze von unten. Jüngere Blätter zeigen Grünfärbung, während die älteren vergilben.



12



## Nitratgehalt von Gemüse



**Nitratgehalt und Gesamtschwefelgehalt von Salatblättern (Schnug, 1990)**

Dr. Hans Marten Paulsen, Institut für ökologischen Landbau, FAL, Trenthorst; <http://oel.fal.de>

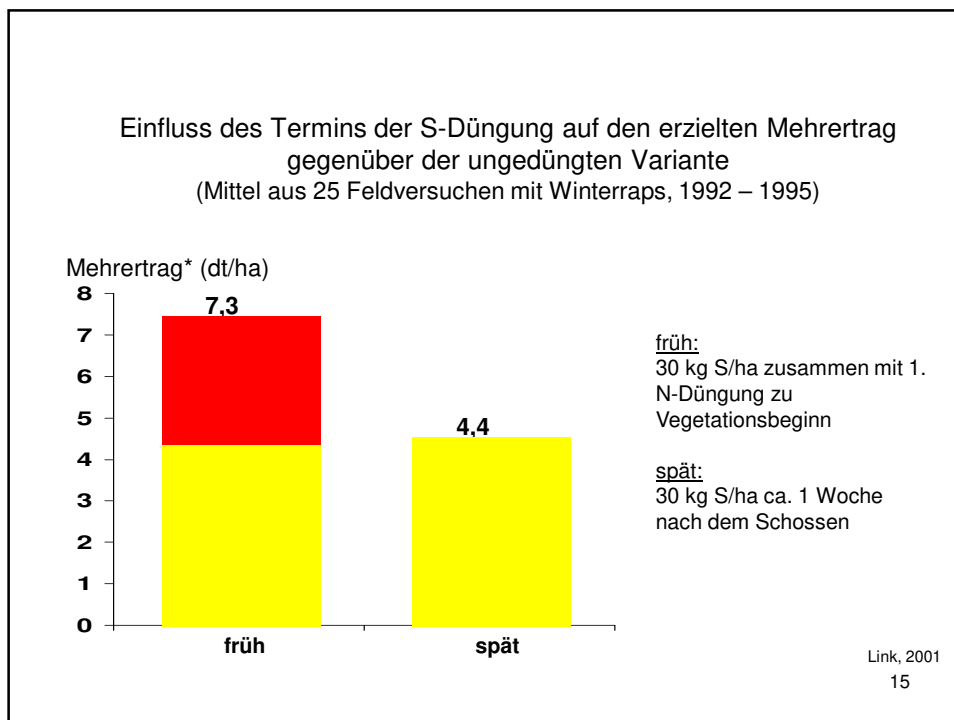
13

### Knappe S-Versorgung im Frühjahr: Die Mineralisation des Schwefels setzt temperaturbedingt später ein als die des Stickstoffs

- leichte, humusarme, flachgründige Böden
- strukturgeschädigte Böden
- hohe Niederschlagsmengen während der Wintermonate
- Frühjahrstrockenheit
- niedrige Temperaturen
- Düngungssysteme ohne Zufuhr organischer Düngemittel
- industriieferne Standorte (weniger SO<sub>2</sub> aus der Luft)

14

14



15

**VDLUFA** Standpunkt

Tabelle 2: Empfohlene S-Düngemenge und Düngzeitpunkt (Bodendüngung)

Fruchtart	Düngemenge in kg S/ha	Düngzeitpunkt
Getreide	10-20	Vegetationsbeginn bis 1-Knotenstadium
Winterraps	20-40	Vegetationsbeginn <sup>1)</sup>
Zuckerrübe	10-20	Zur Saat bis 8-Blatt-Stadium
Kartoffel	10-20	Zur Pflanzung bis vor dem letzten Häufeln
Mais	10-20	Zur Saat bis 6-Blatt-Stadium
Grünland	20-40	Vegetationsbeginn
Kohl	30-50	Zur Pflanzung
sonstiges Gemüse	20-40	Zur Saat bzw. zur Pflanzung

<sup>1)</sup> evtl. Teilgabe im Herbst

VDLUFA, 2000 16

16



**Tabelle 4:** Vergleichende Bewertung von Methoden zur Ermittlung des Schwefel-Düngebedarfs

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Schwefel-Schätzrahmen	sehr einfaches Verfahren keine Kosten jederzeit einsetzbar	objektive Beurteilung und Punktevergabe nicht immer gewährleistet
S <sub>min</sub> -Bodenuntersuchung	Erfassung der tatsächlich verfügbaren Vorräte an Sulfat im Boden gemeinsame Probenahme mit N <sub>min</sub>	rel. aufwendige Probenahme Analysekosten keine Informationen über S-Nachlieferungsvermögen aus Bodenpools sichere Bedarfsprognose nur bei Winterraps
Pflanzenanalyse	exakte Erfassung des S-Versorgungszustandes der Pflanzen	nicht für alle Pflanzenarten und Wachstumsstadien verlässliche Vergleichswerte aufwendige Probenahme Beratungsergebnis kommt oft zu spät für zeitgerechte S-Düngung Analysekosten

DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten

17

Merkmal	Bewertung mit Punktzahlen	Punktzahl	
<b>Standorteingenschaften</b>			
Bodenart <small>1) z. B. Sand, lehmiger oder schluffiger Sand 2) z. B. sandiges sandig-toniger oder schluffiger Lehm 3) z. B. Ton, sandiger oder lehmiger Ton</small>	sandiger Boden, Schotterboden <sup>1)</sup>	1	
	lehmiger Boden <sup>2)</sup>	3	
	toniger Boden <sup>3)</sup>	5	
Humusgehalt	arm, < 2% Humus	2	
	mittel, > 2-4% Humus	3	
Verfügbare Wurzelraum (Krume + durchwurzelter Raum)	flachgründig	2	
	tiefgründig	4	
Strukturschäden (Verschlämmung, Bodenverdichtung, Pflugsohle)	vorhanden	1	
	stellenweise vorhanden	3	
	nicht vorhanden	4	
N <sub>min</sub> -Gehalt zu Vegetationsbeginn im Vergleich zum langjährigen Mittelwert	unterdurchschnittlich	1	
	durchschnittlich	3	
<b>Bewirtschaftung</b>			
Witterung Niederschläge (Oktober-März) im Vergleich zum langjährigen Mittelwert	überdurchschnittlich	Schwefelzehrende Kulturen in der Fruchtfolge (Raps, Kohllarten, Leguminosen)	Anbau jedes 3. Jahr 2 Anbau jedes 4. Jahr 3 Anbau jedes 5. Jahr 4
	durchschnittlich	In diesem Jahr angebaute Kultur	Raps, Kohl, Leguminosen 1 Andere Kulturen 3
	unterdurchschnittlich	Schwefelmangel bereits aufgetreten (Ertragsinbussen, Blattanalyse, Mangelsymptome)	Ja 1 Nein oder Unbekannt 3
		Ertragsniveau (dt/ha)	hoch mittel niedrig hoch 2 Raps > 40 30-40 < 30 mittel 3 Getreide > 75 50-75 < 50 niedrig 4
	<b>Düngung</b>		
	Einsatz organischer Dünger aus Tierhaltung (keine Gründüngung)	0 GV/ha	1
		≤ 1,5 GV/ha	2
		> 1,5 GV/ha	3
	In den letzten 3 Jahren Einsatz nennenswerter Schwefelmengen aus Mineraldüngern (z. B. ass. Nitrophoska <sup>®</sup> 13+9+16(+4-7), 20+8+8(+3+4), Kaliumsulfat)	Nein	1
		Ja	3
16-29 Punkte: Wahrscheinlichkeit von Schwefelmangel hoch, Düngung mit ass notwendig 30-37 Punkte: Bestände (besonders Raps) genau beobachten, Düngung mit ass empfehlenswert 38-47 Punkte: Schwefelmangel zur Zeit nicht zu erwarten			
		Summe	



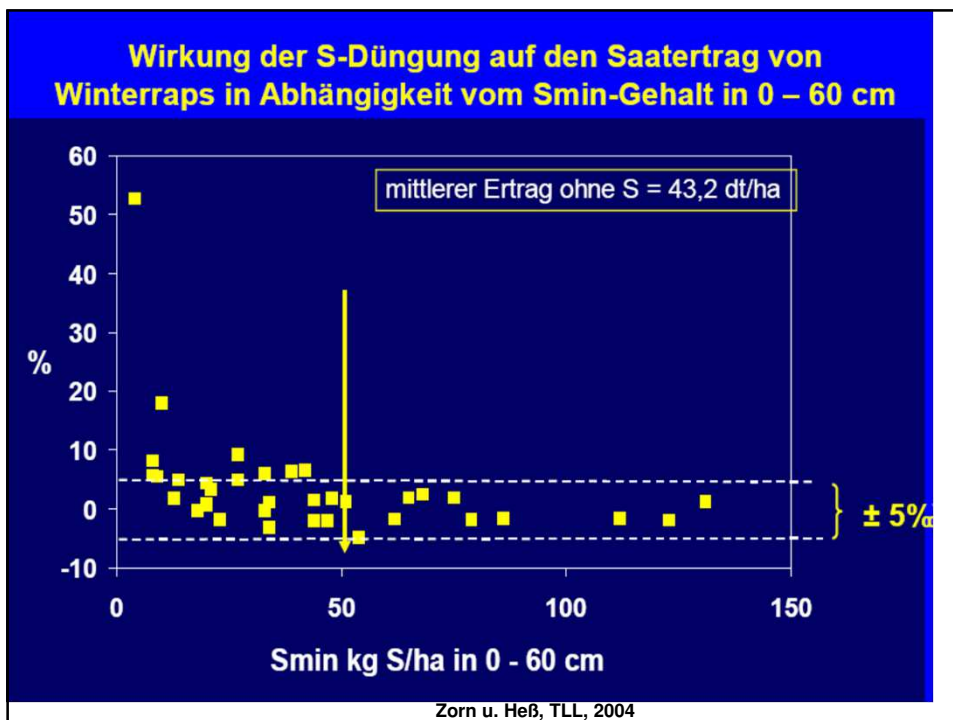
18

### SCHWEFEL-SCHÄTZRAHMEN GRÜNLAND

Merkmal	Bewertung mit Punktzahlen	
<b>Standortigenschaften</b>		
Bodenart	Sand <sup>1)</sup> , Schotter	1
	2) z. B. Sand, lehmiger oder schluffiger Sand	4
	3) z. B. sandiges Schluff, toniger oder schluffiger Lehm	7
	4) z. B. Ton, Schluff oder lehmiger Ton	
Narbenalter	unter 5 Jahre	1
	über 5 Jahre	3
N <sub>20</sub> -Situation auf Ackerflächen laut Mitteilung der amtlichen Beratung	unterdurchschnittlich	1
	normal	3
	überdurchschnittlich	5
S-Mangel bereits erkannt/in landwirtschaftlichen Kulturen der Region bereits aufgetreten	Ja	1
	Nein	3
<b>Witterung</b>		
Jahresniederschläge im Vergleich zum langjährigen Mittelwert	hoch	1
	normal	3
	niedrig	5
<b>Bewirtschaftung</b>		
Bestandzusammensetzung	Gräserreich	2
	Kräuterreich	3
Nutzung	Portionsweide, intensive Umtriebsweide, Schnittnutzung, 3-4 Schnitte	1
	Umtriebsweide, Schnittnutzung, 1-2 Schnitte	3
	Standweide	5
Ertragsniveau Grünland	hoch	1
	mittel	3
	niedrig	5
<b>Düngung</b>		
Höhe der Organischen Düngung	< 1 GV/ha	1
	1-2 GV/ha	2
	> 2 GV/ha	3
In den letzten 3 Jahren Einsatz nennenswerter Schwefelmengen aus Mineraldüngern (z. B. ass, Nitrophoska* 13+9+1,6(+4+7), 20+8+8(+3+4), Kainit)	Nein	1
	Ja	3
11-18 Punkte: Wahrscheinlichkeit von Schwefelmangel hoch, Düngung mit ass notwendig 19-28 Punkte: Bestände (besonders Rap) genau beobachten, Düngung mit ass empfehlenswert 29-42 Punkte: Schwefelmangel zur Zeit nicht zu erwarten		

19

19



20

## Tiefenabhängige Richtwerte für $S_{\min}$ -Gehalte in Thüringer Böden (Berücksichtigung des Steingehaltes)

Kultur	$S_{\min}$ -Gehalt (kg S/ha)	
	0 – 60 cm	0 – 90 cm
Winterraps	50	60
Winterweizen u. -gerste	40	50

Zorn u. Heß, TLL, 2004

21

Mit der Pflanzenanalyse kann der aktuelle Schwefel-Ernährungszustand sicher erfasst werden. Die Angabe der S-Konzentrationen erfolgt normalerweise in % der Trockenmasse und umfasst alle in der Pflanze vorliegenden S-Bindungsformen (s. Kapitel 1.2). Angaben zu den notwendigen Konzentrationen an Schwefel in der Pflanzentrockenmasse liegen zurzeit nur für Getreide (> 0,30 % S in der TS), Raps (> 0,45 % S in der TS) und Gras (> 0,30 % S in der TS) vor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch für die meisten anderen Ackerkulturen eine Mindestkonzentration von 0,30 % S in der TS angestrebt werden sollte. Zur Einschätzung des S-Versorgungszustandes sollte neben der Untersuchung der S-Konzentration im Pflanzenmaterial möglichst auch die N-Konzentration untersucht werden, da das ermittelte N:S-Verhältnis genauere Rückschlüsse zulässt. Typische N:S-Verhältnisse zeigt Tabelle 2.

**Tabelle 2:** N:S-Verhältnisse für verschiedene Kulturen

Kultur	Typische N:S-Verhältnisse
Raps/Rüben/Senf/Kohlarten/Zwiebelgewächse	5 : 1
Getreide/Mais/Zuckerrüben/Kartoffeln	10 : 1
Leguminosen	5 – 8 : 1
Gras	8 – 12 : 1

22

DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten

22

Dünger	S-Gehalt (%)	S-Bindungsform	Weitere Nährstoffe	Beispiele Handelsware
Ammoniumsulfat	24	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21 % N	SsA, AS, Domogran
Ammonsulfatsalpeter	13	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	26 % N	ASS 26, ENTEC 26
Ammoniumsulfat-Harnstoff	5 – 12	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30 – 38 % N	PIAMON 33-S, Urea-S
Ammoniumnitrat mit S	6	(Ca)SO <sub>4</sub>	24 % N	YaraBela Sulfan
N-Düngerlösung mit S	3 – 6	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + (ATS)	15 – 27 % N	PIASAN-S 25/6, ALZON flüssig-S 25/6, Domamon, NTS
Ammonsulfat-Lösung	6 – 9	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5 – 8 % N	ASL
Kaliumsulfat	18	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 % K <sub>2</sub> O	KALISOP
Patentkali	17	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , MgSO <sub>4</sub>	30 % K <sub>2</sub> O 10 % MgO	Patentkali
Korn-Kali	4	MgSO <sub>4</sub>	40 % K <sub>2</sub> O 6 % MgO 3 % Na	Korn-Kali
Magnesia-Kainit	4	MgSO <sub>4</sub>	11 % K <sub>2</sub> O 5 % MgO 20 % Na	
Kieserit (granuliert)	20	MgSO <sub>4</sub>	25 % MgO	ESTA Kieserit gran
Bittersalz	13	MgSO <sub>4</sub>	16 % MgO	EPSO Top
Elementarer Schwefel	60 – 98	S		Schwefellinsen/-suspensionen
Superphosphat	12	CaSO <sub>4</sub>	18 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
div. NPK mit S	2 – 12	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
Kalkdünger mit S	≥ 2	CaSO <sub>4</sub>	≥ 80 % CaO	Kohlensaurer Kalk mit S Magnesiumkalk mit S

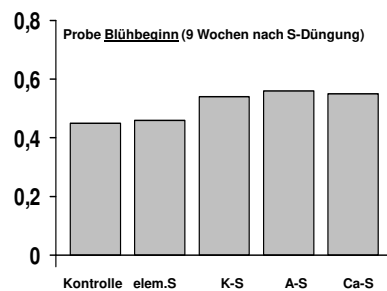
DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten

23

23

### Wirkung verschiedener Sulfatformen auf den S-Gehalt von Winterraps (Blattproben Schossen und Blühbeginn, Mittel aus 5 Feldversuchen)

S-Gehalt Blatt %



K-S = Kaliumsulfat, A-S = Ammoniumsulfat, Ca-S = Calciumsulfat

Link, 2001

24

24

**Tabelle 6:** Schwefelgehalte in organischen Düngern

Dünger	S-Gehalt [kg/t bzw. kg/m <sup>3</sup> ]	Sulfat-Anteil [%]	C:S-Verhältnis
Stallmist	0,3 – 0,8	< 10	80 – 90
Gülle	0,2 – 0,7	10 – 20	30 – 50
Jauche	0,2 – 0,3	60 – 80	10 – 15
Biokompost	0,3 – 0,5	< 10	60 – 80
Klärschlamm	0,8 – 1,0	< 30	10 – 30

25

DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten

25

**PFLANZEN ERNÄHRUNG** Schwefelwirkung verschiedener organischer Dünger im Anwendungsjahr (kurzfristige Wirkung) **TUM**

**Düngung: 60 mg S/Gef.**

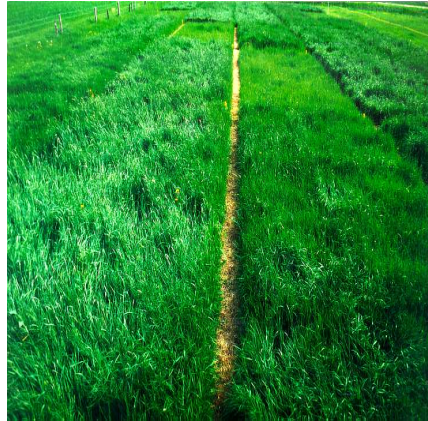
ohne S	mineral. SO <sub>4</sub> -S	Jauche	Rindergülle	Stallmist	Bioabfallkomposte
		60% SO <sub>4</sub> -S C/S = 11	16% SO <sub>4</sub> -S C/S = 81	3% SO <sub>4</sub> -S C/S = 84	4% SO <sub>4</sub> -S C/S = 70

Gutser, LK Niedersachsen, 25.01.2008

26

## Vergleich der Grünlanddüngung mit ASS und KAS

ASS-  
gedüngt



KAS-  
gedüngt

Quelle: fertiva

27

27

## Wirkung einer Schwefeldüngung auf die Silagequalität

	1995		1996		1997		1998		1999	
	KAS	ASS	KAS	ASS	KAS	ASS	KAS	ASS	KAS	ASS
<b>Rohprotein %</b>	16,4	17,3	18,7	20,0	16,1	18,5	16,0	17,3	15,0	18,8
<b>Rohfaser %</b>	29,4	28,3	24,9	24,7	24,8	23,0	26,2	27,5	23,3	29,8
<b>Energie NEL</b>	5,6	6,2	5,9	6,2	5,8	6,5	5,8	6,4	5,4	6,6

Qualität von Silage wird durch die Düngung mit ASS angehoben:

- Rohprotein + 0,9 bis 3,8 %
- Rohfaser - 0,2 bis 6,5 %
- Energie + 0,3 bis 1,2 MJ/kg NEL

3 Standorte in Oldenburg LWK, 1995 bis 1999

Quelle: fertiva

28

28



**beispielhafte Fragen zum Teil 4:**

- **Mit welchen Methoden kann man einen S-Düngebedarf ermitteln?**
- **Welches Düngemittel enthält am meisten und welches am wenigsten Schwefel (Bsp. KAS, Kornkali, Ammoniumsulfat)?**
- **Das Ergebnis einer Analyse von Maissilage lautet:  
8 % RP, 0,08 % S, jeweils in TM. Worauf deutet das hin?**
- **Warum wirkt elementarer S als Dünger langsamer als Sulfat?**
- **Wie unterschieden sich S- und N-Mangel bei jungen Getreidepflanzen?**