

# Umwelt

## Dem Sulfat auf der Spur

Jakob Nievergelt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholz (FAL), CH-8046 Zürich  
Auskünfte: Jakob Nievergelt, e-mail: jakob.nievergelt@fal.admin.ch, Fax +41 (0)1 377 72 01, Tel. +41 (0)1 377 73 39

### Zusammenfassung

Seit 1991 werden im Fruchtfolgeversuch auf der Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz die Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser bestimmt. Die angebauten Kulturen waren Winterweizen, Sommerweizen, Wintergerste, Körnerriaps, Kartoffeln, Körnermais, Zuckerrüben und Kunstwiese; vor Kartoffeln, Mais und Zuckerrüben wurde jeweils eine Gründüngung eingeschoben. Aus über 250 Probenahmen ergaben sich neue Kenntnisse der Schwefeldynamik im Boden. Im Vergleich zum Nitrat war die Sulfatkonzentration weniger stark saisonal bestimmt. Im Mittel der Jahre 1992 bis 2000 wurden 50 bis 90 kg S/ha ausgewaschen; Sulfat- und Nitratauswaschung waren damit von der gleichen Grössenordnung. Der Einfluss der Schwefelzufuhr auf die Auswaschung war gross. Die Schwefelbilanz wies im Mittel ein Defizit von 70 kg S pro Hektar und Jahr auf. Folgende Folgerungen werden gezogen: Erstens bei ausschliesslich mineralischer Düngung Dünger mit genügendem Schwefelgehalt wählen zur Kompensation des Schwefelbilanzdefizites. Zweitens mineralische Dünger mit bedeutendem Sulfatgehalt möglichst spät ausbringen, um der grossen Mobilität des Sulfates entgegen zu wirken.

1980 waren Buchner und Sturm veranlasst, die Frage «Warum gibt es in Mitteleuropa keinen Schwefelmangel?» zu behandeln (Buchner und Sturm 1980). Im Jahr 2001 treffen wir auf den Titel «Schwefelmangel - zunehmend ein Problem im Getreide» (Gämperle 2001). Dieser Wan-

del war uns Anlass, aus der Sicht unserer Lysimeter-Ergebnisse den Schwefel-Haushalt des Bodens zu beleuchten.

### Luftetrug und Mineralisation

In den siebziger Jahren war «Saurer Regen» in Mitteleuropa

ein Hauptthema der Umweltdiskussion. Die schwefeligen Rauchgase, die beim Verbrennen von Kohle und flüssigen Energieträgern wie Benzin und Heizöl entstanden, verursachten die versauernde Wirkung der Niederschläge auf Vegetation und Boden zu einem bedeutenden Teil. Es gab in der Nähe von Ballungsräumen Lufteträge bis über 100 kg S/ha und Jahr. Seit Anfang der Achtzigerjahre hat sich der Luftetrug auf einen Bruchteil verringert, dank geringerem Schwefelgehalt der Brennstoffe und der Entschwefelung von Rauchgasen. Für das Gebiet der Schweiz wird der Luftetrug für das Jahr 1998 noch auf 5 bis 10 kg S pro Hektar Boden geschätzt (EMEP 2000).

Schwefel ist im Oberboden des humiden Klimabereiches vornehmlich in der organischen Substanz gebunden; seine Mineralisierung zu Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) läuft parallel zu derjenigen des Stickstoffes (Claassen 2000). Wie Nitrat, ist Sulfat gut wasserlöslich (ca. 2g/l) und unterliegt deshalb der Gefahr ausgewaschen zu werden.

### Schwefelbedarf und -düngung der Kulturpflanzen

Schwefel ist für Pflanzen ein Hauptnährstoff, den sie in Sulfatform aufnehmen. Getreide und Kartoffeln entziehen dem Boden mit ihren Ernteprodukten 20 bis 25 kg S/ha, Kohlarten und Raps 70 bis 80 kg S/ha; Mais, Rüben und Gräser liegen dazwischen mit etwa 30 kg S/ha. Die Düngung richtet sich

Abb. 1. Kulturart und Düngung beeinflussen die Konzentration von Sulfat im Sickerwasser. Die Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz dient unter anderem zur Prüfung von Fragen des Stofftransportes ins Grundwasser.



**Tab. 1. Kulturen 1991 bis 2000 und Schwefelzufuhr durch Dünger**

Braunerde aus Schotter				Braunerde aus Moränelehm				
Fruchtfolge 1	kg S /ha	Fruchtfolge 2	kg S /ha	Fruchtfolge 3	kg S /ha	Fruchtfolge 4	kg S /ha	
1991	Winterweizen	0	Körnermais	108	Winterweizen	0	Körnermais	111
1992	Zuckerrüben	42	Sommerweizen	20	Zuckerrüben	70	Sommerweizen	29
1993	Sommerweizen	8	Winterraps	6	Sommerweizen	8	Winterraps	11
1994	Körnermais	12	Winterweizen	9	Körnermais	12	Winterweizen	9
1995	Sommerweizen	0	Zuckerrüben	65	Sommerweizen	0	Zuckerrüben	65
1996	Winterraps	10	Sommerweizen	7	Sommerhafer	10	Sommerhafer	8
1997	Winterweizen	11	Wintergerste	7	Kartoffeln	48	Kartoffeln	48
1998	Kunstwiese	11	Körnermais	11	Winterweizen	35	Winterweizen	33
1999	Kunstwiese	11	Kunstwiese	11	Wintergerste	35	Wintergerste	35
2000	Kunstwiese	11	Kunstwiese	11	Kunstwiese	18	Kunstwiese	18
1991								
-2000		115		255		236		365

teilweise nach dem Entzug der Kulturen und berücksichtigt gemäss den neuen Empfehlungen auch Bodeneigenschaften wie Humus-, Tongehalt und Gründigkeit, die die Versorgung und das Auswaschungsrisiko beeinflussen (z.B. Forschungsanstalten 2001). Schwefelmangel kann bei Winterweizen im Feldversuch Ertragsverminderungen bis 50 % zur Folge haben (Gämperle 2001).

Die Grunddüngung im **Lysimeterversuch der FAL** wurde nach den «Grundlagen für Düngung im Acker- und Futterbau» (Forschungsanstalten 1994) zur Saatzeit ausgeführt und war auf die Entzüge von Phosphor und Kali ausgerichtet. Die Höhe der Schwefelzufuhr über die Düngung in einem bestimmten Jahr (Tab. 1) ergab sich aus der kultur- und bodenspezifischen Wahl der P- und K-Dünger. Als Dünger mit bedeutendem Schwefelgehalt wurden Superphosphat (12 % S), Kalisulfat (18 % S) und Granumag (9 % S) eingesetzt.

**Erstaunliche Mengen an Schwefel werden ausgewaschen**

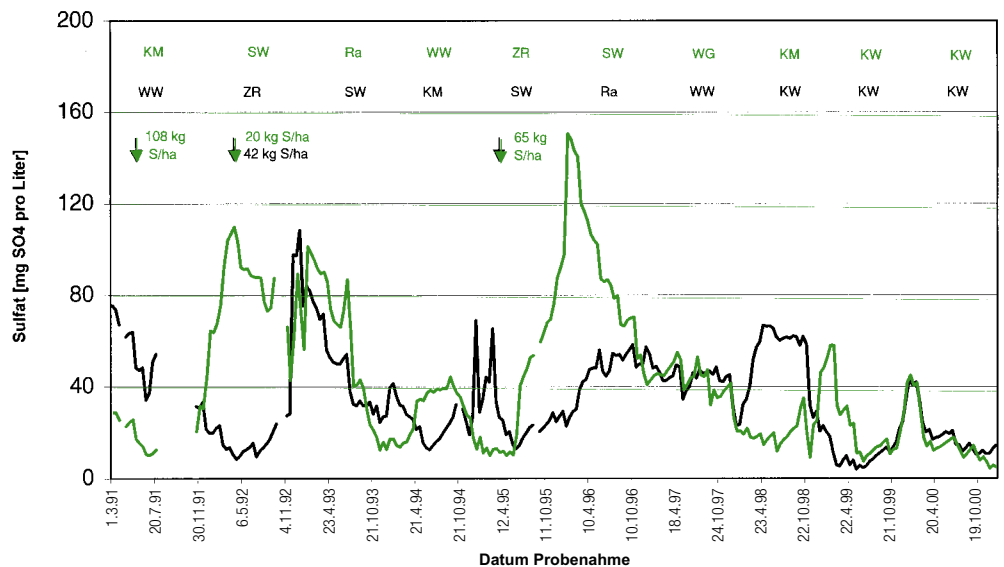
Der Sulfatgehalt wird in den Sickerwasserproben der Lysime-

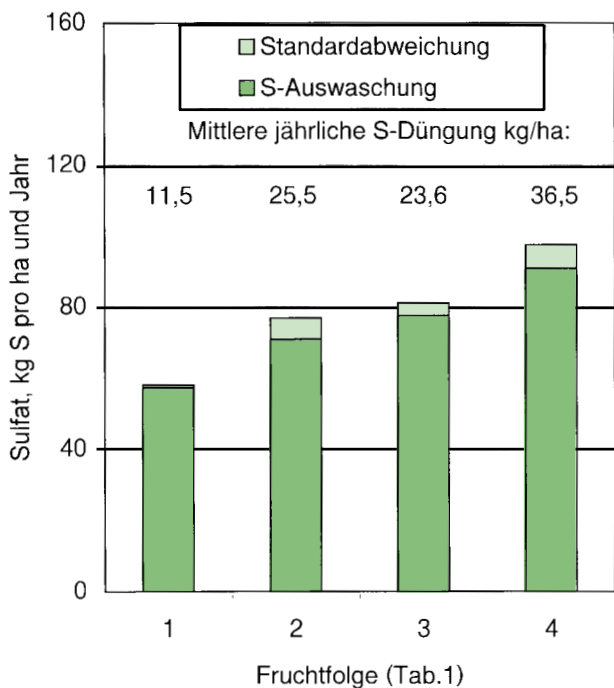
teranlage der FAL seit 1991 bestimmt.

Wir geben hier eine erste Übersicht der Ergebnisse bezüglich Konzentration im Sickerwasser und Auswaschung (Abb. 2, 3 und 4). Die Sulfatkonzentration im Sickerwasser hängt stärker von der Düngung ab als von der Bodenform. Die Spitzen der Sulfatkonzentration (Abb. 2) zeichnen sich als deutlich verzögerte Folgeerscheinung der Düngung mit sulfathaltigen Phosphor- und Kalidüngern ab. Dabei spielen

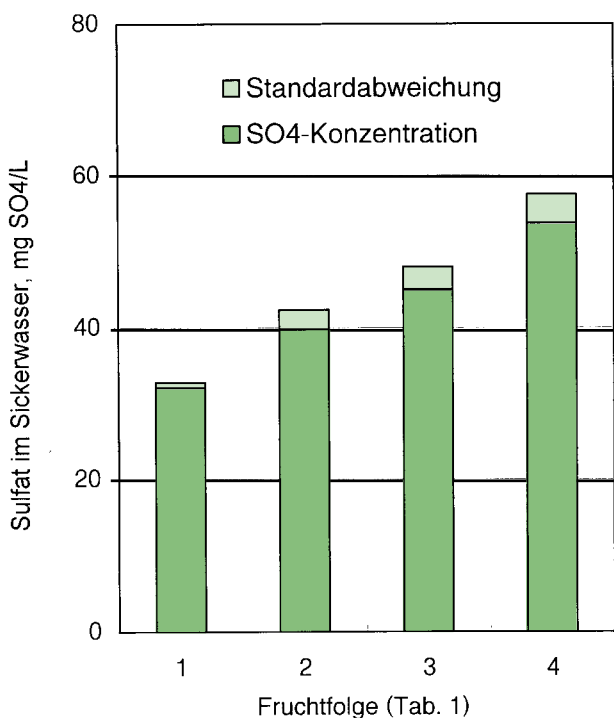
auch starke Frühlingsniederschläge eine bedeutende Rolle. Die mittlere jährliche Schwefel- auswaschung lag zwischen 57 und 91 kg S/ha (Abb. 3). Bei einem französischen Lysimeterversuch konnten zum Teil noch höhere Schwefel- Auswaschraten auf die Zufuhr schwefelhaltiger Dünger zurückgeführt werden (Triboi und Loiseau 1996), wobei sich, bei nur 780 mm mittlerem Jahresniederschlag, Nachwirkungen grosser Schwefelzufuhr noch fünf Jahre später im Sickerwasser feststellen liessen.

**Abb. 2. Sulfatkonzentration im Sickerwasser und Schwefelzufuhr (nur Gaben > 12 kg S/ha): Grosse Unterschiede zwischen Fruchtfolge 1 und 2 (Tab. 1). Braunerde aus Schotter, 1991 bis 2000.**





**Abb. 3. Schwefelauswaschung unter den vier Fruchtfolgen 1992 bis 2000 in kg Sulfat-S pro Hektar und Jahr.**



**Abb. 4. Sulfat-Konzentration im Sickerwasser der vier Fruchtfolgen in mg Sulfat pro Liter. Mittel der Jahre 1992 bis 2000.**

### Einfluss von Düngung, Kulturen und Sickerwassermenge

Für die folgenden Auswertungen wurden Werte der vier Fruchtfolgen gemittelt. Die jährlichen Schwefel-Auswaschungsraten 1992 bis 2000 korrelieren mit der Schwefelzufuhr durch die Düngung mit einem Koeffizienten von 0,46. Abbildungen 3 und 4 zeigen, dass die ausgewaschene Menge Schwefel und die Sulfatkonzentration im Sickerwasser mit der S-Düngung tendenziell zunimmt, was mit dem hohen Auswaschrisiko von Sulfat zu erklären ist. Wie in einem deutschen Lysimeterversuch (Meissner *et al.* 2000), war die Zunahme unterproportional zur Zunahme an Schwefel aus der Düngung.

Der Einfluss der Jahreswitterung ist wie beim Nitrat (Nievergelt 1997) gering: Die Korrelation zwischen jährlicher Schwefelfracht im Sickerwasser und Sickerwassermenge beträgt nur 0,25; auch im Falle des Sulfates kann dies dadurch erklärt werden, dass sich im Schweizer Mittelland sogar in trockenen Jahren genügend Sickerwasser für die Sulfatauswaschung bildet.

### Vergleich Sulfat-Nitrat

Wegen der grossen Ähnlichkeit von Sulfat- und Nitrationen bezüglich Mineralisierung aus der organischen Substanz und Löslichkeit könnte man erwarten, dass die Sulfatkonzentration im Sickerwasser (Abb. 2) wie die Nitratkonzentration ein ausgeprägtes saisonales Maximum zwischen November und Mai aufweist; bei letzterer wahrscheinlich eine Folge von Mineralisierungsspitzen in der Nacherntezeit. Aufgrund der Versuchsergebnisse können wir nicht schlüssig erklären, warum dies mit Sulfat nicht zutrifft. Neben den vielen Ähnlichkeiten scheinen auch qualitative Unterschiede im Stoffhaushalt der beiden Anionen zu bestehen. Eine

davon könnte eine saisonal wenig abhängige Schwefelnachlieferung durch Verwitterung von mineralischen Bodenbestandteilen sein. Ein quantitativer Unterschied besteht darin, dass die Umsatzraten des Stickstoffes im Boden mit Ausnahme der Auswaschung grösser sind als diejenigen des Schwefels.

### Ein Blick auf die Schwefelbilanz im Lysimeterversuch

Am Standort Reckenholz kommen durch Lufteintrag gemäss EMEP pro Jahr 8 kg S/ha auf den Boden. Die durchschnittliche S-Düngung für den Lysimeterversuch betrug im vergangenen Jahrzehnt 23 kg S/ha. Den mittleren Entzug (im Versuch nicht bestimmt) schätzten wir auf 25 kg S/ha pro Kultur (Forschungsanstalten 2001). Die Auswaschung betrug im Mittel der vier Fruchtfolgen 75 kg S/ha. Somit kann die mittlere jährliche Nachlieferung des Bodens, durch Netto-Mineralisation der organischen Substanz im Oberboden und durch Verwitterung schwefelhaltiger mineralischer Bestandteile (z.B. Gips), auf rund 70 kg S/ha veranschlagt werden. Falls ein Teil dieses Schwefels aus der organischen Substanz stammt, kommt es langfristig zur Verarmung von Schwefel im Oberboden.

### Keine Schwefeldüngung auf Vorrat

Es ist zu vermuten, dass zumindest bei rein mineralischer Düngung - wie in unserem Versuch - Schwefel zum Faktor werden kann, der den Ertrag limitiert: Wie zu Beginn erwähnt, kommt dies in der Praxis auch vermehrt vor. Eine Angabe über das nötige Mass der Schwefelzufuhr bis zum Bilanzausgleich gestaltet sich schwierig: Einerseits weil, wie gezeigt, Schwefelzufuhr tendenziell die Auswaschung vergrössert, andererseits keine Zahlen über die Freisetzung von Sul-

fat durch Verwitterung zur Verfügung stehen und drittens auch Standorteigenschaften (Boden, Klima) den Schwefelhaushalt beeinflussen.

Wegen der Gefahr der Sulfatauswaschung sollten Schwefelgaben mit der Grunddüngung möglichst spät, zum Beispiel bei Vegetationsbeginn im Frühjahr, erfolgen. Eine andere Möglichkeit besteht in gezielten Schwefeldüngungen mit schwefelhaltigen Stickstoffdüngern zu empfindlichen Kulturen (Forschungsanstalten 2001).

## Literatur

- Buchner A. und Sturm H., 1980. Gezielter düngen. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt (Main), 319 S.
- Claassen N., 2000. Schwefel im System Boden - Pflanze. In: Schwefelernährung von Kulturpflanzen - Grundlagen, Düngebedarfsermittlung, Beratungsempfehlungen. VD-LUFA-Schriftenreihe Nr.53, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt, S. 3-6.
- EMEP 2000. Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long range transmission of air pollutants in Europe. <http://www.emep.int>
- Forschungsanstalten, 1994. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* 1(7, Beilage), 40 S.
- Forschungsanstalten, 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2001. *Agrarforschung* 8(6), 80 S.
- Gämperle R., 2001. Schwefelmangel - zunehmend ein Problem im Getreide. *Die Grüne* 2/2001, S. 34-37.
- Meissner R., Richter G. und Seeger J., 2000. Langjährige Lysimeterversuchsergebnisse über den Einfluss unterschiedlicher Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen auf den Sulfataustrag aus der ungesättigten Bodenzone. In: GSF-Bericht 18/00 Methoden der Sickerwassermodellierung, GSF, München, S. 162-167.
- Nievergelt J., 1997. Lysimeterversuch 1981 bis 1996: N-Auswaschung in Fruchtfolgen. *Agrarforschung* 4(5), 209-212.
- Triboi E. et Loiseau P., 1996. Site de Theix (Puy de Dôme) II - Influence du système de culture sur le bilan hydrique et minéral. In: Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990), INRA, Paris, S.275-298.

## RÉSUMÉ

### Dix années d'analyse des sulfates dans les eaux de drainage sous grandes cultures dans douze lysimètres

Les cultures mises en place étaient le blé d'automne, le blé de printemps, l'orge d'automne, le colza, le maïs, la pomme de terre, la betterave et la prairie temporaire. Un engrais vert fut systématiquement mis en place avant les cultures de maïs, de pommes de terre et de betteraves. Les résultats de plus de 250 prélèvements d'eau ont permis d'approfondir les connaissances sur la dynamique des sulfates dans le sol.

La concentration en sulfates ne fut pas autant influencée par la saison que ce ne fut le cas pour les nitrates. Les pertes en sulfates par lixiviation furent du même ordre de grandeur que celles en nitrates (entre 50 et 90 kg S/ha par année, moyenne de 1992 à 2000) et furent influencées fortement par les apports. Le bilan de soufre a présenté un déficit de l'ordre de grandeur de 70 kg S/ha par année. Les conclusions suivantes sont tirées: 1. Choisir des engrais minéraux d'une teneur suffisante en soufre pour compenser le déficit dans le bilan pour les exploitations sans apport de soufre sous forme d'engrais organiques et 2. Tenir compte d'une mobilité élevée des sulfates dans les sols en épandant l'engrais le plus tard possible.

## SUMMARY

### Sulfate leaching in a crop rotation - lysimeter results from 1991 to 2000

Sulfate leaching was determined with following crops: winter wheat, spring wheat, winter oak, rape, corn, potato, sugar beet and grass-clover mixture. Under the conditions of the lysimeter experiment at Zurich-Reckenholz (1000 mm annual precipitation, 400 mm from October to March), green manure before potato, corn and sugar beet - mineral sulphur fertilization and the crop sequence was the most important factor for sulfate concentration in the leaching water at 2.5 m depth. Concentration of sulfate was not as much seasonally determined as the one of nitrate.

Sulphur leaching was 50 to 90 kg S/ha\*year depending on crop and fertilization. Yearly sulfur-balance showed a mean loss of 70 kg S/ha which in farming-systems without organic manure should partially be compensated by adequate choice of fertilizer.

**Key words:** lysimeter, leaching, sulfate, crop rotation