

# Schwefel – vom Überschuss zum Mangel

Aufgrund erfolgreicher Maßnahmen zur Luftreinhaltung seit den 1980er-Jahren wurden die  $\text{SO}_2$ -Emissionen insbesondere durch die Abschaltung oder Modernisierung von Braunkohlekraftwerken in den letzten Jahrzehnten so stark reduziert, dass Schwefel heute, in einer vom Klimawandel geprägten Zeit, statt als toxisch wirkendes Überschusselement als essenzielles Makronährelement betrachtet werden muss.

TEXT: AXEL GÖTTLEIN, JULIAN FÄTH, MARGARETHA RAU, KARL HEINZ MELLERT

**Z**u Zeiten des „Waldsterbens“ in den 1980er-Jahren beschäftigte man sich aufgrund industriell bedingter Luftverunreinigungen wie Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und dem „sauren Regen“ mit den daraus resultierenden Schäden in Waldökosystemen (Abb. 1). Hierbei wurden zum Beispiel Nadelspiegelwerte als Indikatoren für zu hohe S-Einträge verwendet [14].

## Zeitliche Entwicklung der Schwefelverfügbarkeit

Die Atmosphärenchemische Emissionssituation hat sich in Deutschland in den letzten Jahrzehnten erheblich verändert (Abb. 2). Während dieser Entwicklung

ist die anthropogene atmosphärische N-Düngung auf hohem Niveau geblieben [5]. War in den 1970er- und 1980er-Jahren die atmogene Deposition unmittelbar bestimmend für die S-Versorgung eines Standorts [11], so zeichnete sich mit Reduktion der anthropogenen S-Einträge zunächst eine Nachlieferung des  $\text{SO}_4^{2-}$  aus dem mit Schwefel gesättigten Boden ab. Zahlreiche Autoren haben v. a. das Resorptionsverhalten von anorganischen S-Fraktionen bei abnehmenden atmosphärischen Einträgen [1, 8, 12], aber auch die Mineralisierung von in Zeiten der S-Übersättigung aufgebauten organischen S-Verbindungen untersucht [6]. Heute ist wieder zunehmend das Ausgangsgestein und dessen Ausstattung mit Schwefel für die Nachlieferung dieses Makronährelements von Bedeutung: Magmatite, Metamorphite und auch Kalke sind i. d. R. sehr S-arme Gesteine [13]. Gebiete dieser Geologie erweisen sich daher als natürlicherweise besonders kritisch in Bezug auf eine langfristig ausreichende S-Versorgung der Waldstandorte (z. B. Ostbayerisches Grenzgebirge, Bayerische Kalkalpen, Südschwarzwald, Erzgebirge). Wie ein Vergleich der Daten aus der ersten Bodenzustandserhebung (BZE 1, 1987 bis 1993) und der BZE 2 (2006 bis 2008) zeigt, gibt es gerade in diesen Gebieten an bemerkenswert vielen Standorten mittlerweile ein Defizit in der Schwefelernährung (Abb. 3) – und das, obwohl vielerorts 15 bis 20 Jahre zuvor eine normale oder sogar eine Überschussversorgung mit Schwefel festgestellt wurde. Seit den 1990er-Jahren mehren sich Stimmen von Wald-

ernährungsexperten, dass die auf niedrige Werte gesunkene atmogene S-Deposition auf bestimmten Standorten zur S-Unterversorgung der Bestände führen könnte [7, 8, 9].

Durch den massiven Rückgang der Schwefeldioxid-Emissionen in den vergangenen 25 Jahren wandelte sich die Rolle des Schwefels in den Wäldern Mitteleuropas innerhalb eines für ökosystemare Betrachtungen sehr kurzen Zeitraumes von der eines (toxisch wirkenden) Überschusselements zu der eines potenziell wachstumslimitierenden Nährelements. Mittlerweile großflächig auftretende (latente) S-Defizite im System „Boden – Waldbestand“

## Schneller ÜBERBLICK

- » **Schwefel ist** als Nährelement relativ gesehen genauso wichtig wie Magnesium und Phosphor
- » **Der S-Eintrag** über die Atmosphäre ist in den letzten Jahrzehnten erheblich zurückgegangen
- » **Durch den S-Entzug** mit der Biomasseernte sind auf Standorten mit geringen S-Gehalten im Ausgangsgestein negative S-Bilanzen mit Auswirkungen auf die Baumernährung zu erwarten
- » **Schwefel sollte daher** unbedingt in das forstliche Nährstoffmanagement aufgenommen werden



Foto: A. Göttlein

**Abb. 1:** Großflächige, vom „sauren Regen“ verursachte Fichtenausfälle im tschechischen Teil des Osterzgebirges im Jahr 1988

erweisen sich im Bemühen um eine nachhaltige Forstwirtschaft als sehr relevant.

### Schwefel als Makronährelement

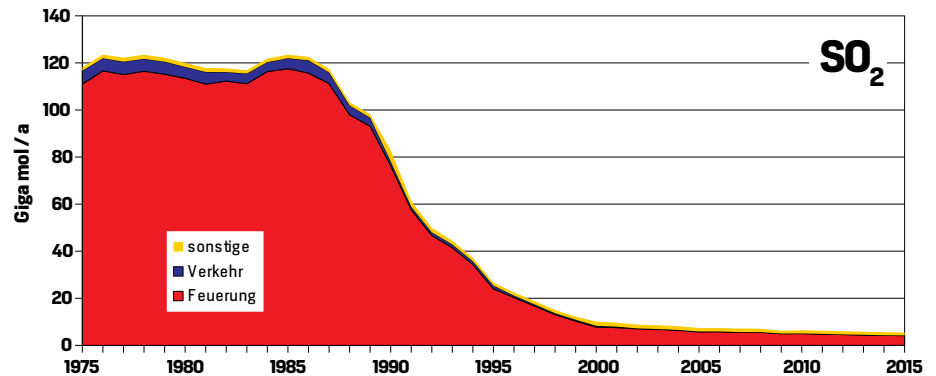
Schwefel ist als Makronährelement ein wichtiger Nährstoff und wird von der Pflanze, bezogen auf 100 Stickstoffatome, in derselben Größenordnung wie Phosphor und Magnesium benötigt (Abb. 4). Marschner (2011) stuft eine Schwefel-Mangelernährung als erheblich vitalitätsmindernd ein, weil Schwefel eine Schlüsselrolle bei physiologischen Wurzel- und Stomataprozessen sowie dem strukturellen Aufbau der Assimilationsorgane, und damit der Nettofotosynthese einer Pflanze, einnimmt. Wirkungen von einer S-Limitierung auf die N-Aufnahme bzw. positive Zusammenhänge zwischen der Schwefel- und der Stickstoffaufnahme von Waldbeständen wurden von einigen Autoren beobachtet [7, 8].

### Bedeutung von S für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung

Über Schwefel als limitierend wirkendes Nährelement ist nur sehr wenig bekannt, insbes. bei der Betrachtung von Waldökosystemen [8]. Schwefel wird in mitteleuropäische Waldökosysteme seit etwa 20 Jahren nicht mehr in nennenswertem Umfang über die Deposition eingetragen, zugleich aber verlässt er mit dem Sickerwasser oft in nennenswertem Umfang das Ökosystem. Dies geschieht durch sukzessive Desorption von im Mineralboden ehemals festgelegtem Sulfat aufgrund eines zunehmenden Konzentra-

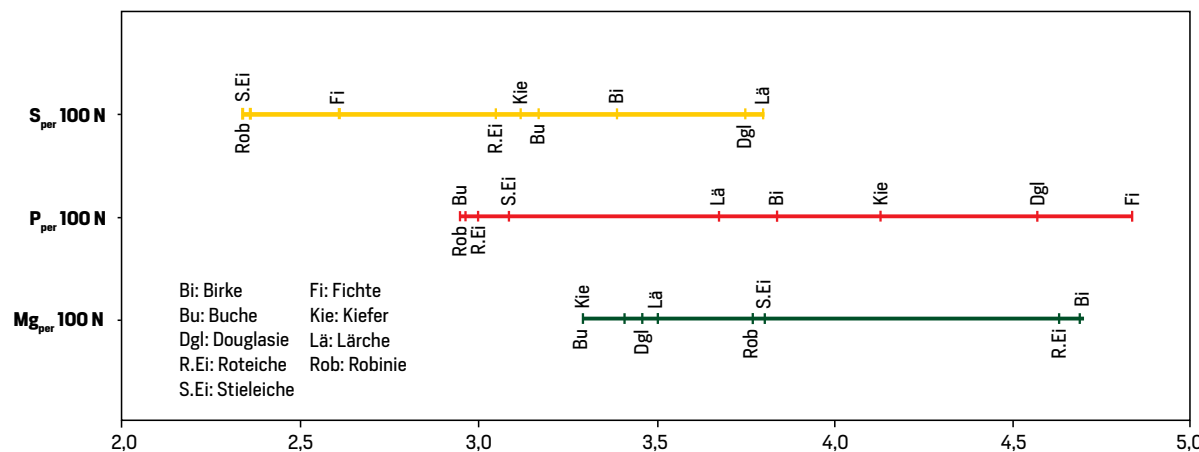
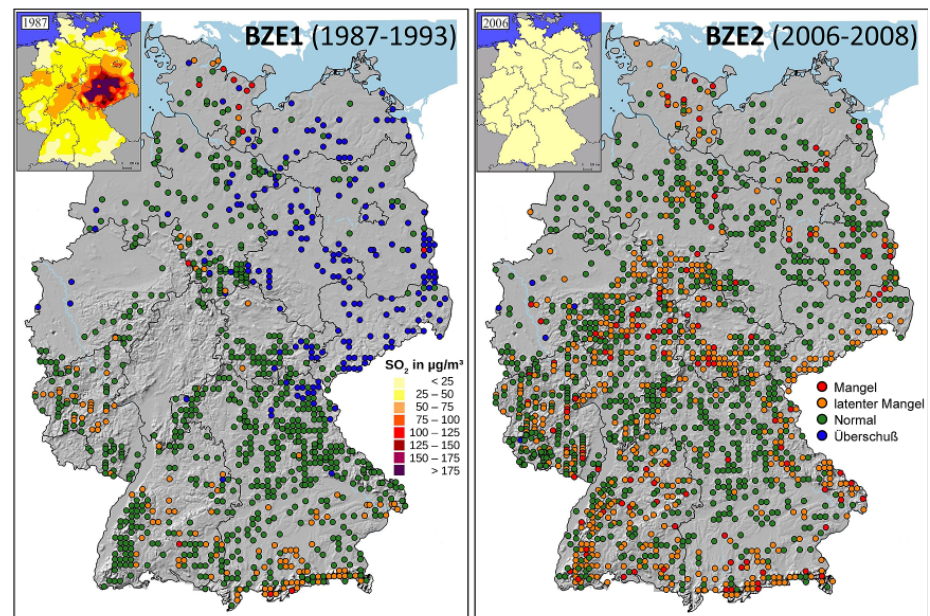
### Schwefelemissionen

**Abb. 2:** Entwicklung der Schwefelemissionen der Bundesrepublik Deutschland  
Quelle: Datenquelle bis 1989 alte Bundesländer und DDR aus Umweltbundesamt (1993), ab 1990 zusammengestellt aus www.umweltbundesamt.de/daten



### Schwefelernährung

**Abb. 3:** Vergleich der Schwefelernährung der Bodenzustandserhebungen BZE 1 und BZE 2 auf Basis der Grenzwerte für die vier Hauptbaumarten nach Göttlein (2015); kleine Karte: Entwicklung der Schwefelemissionen im gleichen Zeitraum ([https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/370/bilder/so2\\_jahresmittelwerte\\_1985-2008.jpg](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/370/bilder/so2_jahresmittelwerte_1985-2008.jpg)); BZE-Daten: Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde; Hintergrundbild: DGM1000, DLM1000 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, GeoBasis-DE/BKG 2015

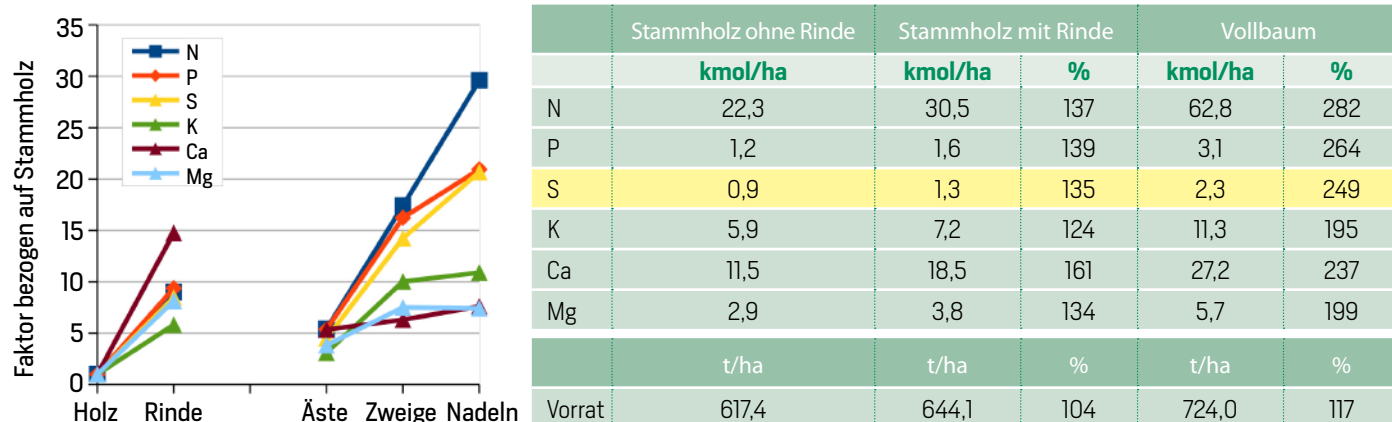


### Nährelementrelationen

**Abb. 4:** Untergrenze der optimalen molaren Nährelementrelationen, bezogen auf 100 Stickstoffatome nach Göttlein und Mellert [2]

## Nährelementgehalte und Baumkompartimente

**Abb. 5:** Nährelementgehalte verschiedener Baumkompartimente des Fichtenbestandes der Waldklimastation Höglwald, bezogen auf den jeweiligen Gehalt im Stammholz (100 %), sowie potenzielle Nährelemententzüge bei der Endnutzung



tionsgefälles von der Festphase hin zur Bodenlösung [12]. Der unter dem Aspekt der nachhaltigen Waldbewirtschaftung wichtigste Exportpfad für Schwefel ist die Holzernte [4]. Diese beeinflusst den ökosysteminternen S-Kreislauf umso deutlicher, je geringer der Anteil von pflanzenverfügbarem Schwefel ist und je höher die Schwefelexporte mit der Biomasseernte sind. Letztere hängen stark von der Ernteintensität ab, d. h., je mehr nährstoffreiche Baumkompartimente (Nadeln, Feinreisig) dem Ökosystem entnommen werden, desto größer fallen die Schwefelentzüge aus. So sind am Standort Flossenbürg gegenüber der Ernte von Derbholz ohne Rinde die Schwefelentzüge bei der Vollbaumernte um etwa den Faktor 2,5 erhöht (Abb. 5).

### Ausblick

Gerade in Zeiten geringerer Schwefelverfügbarkeit bei unverändert hoher atmosphärischer Stickstoffdüngung ist es von größter Wichtigkeit, Schwefel nicht wie zur Zeit des Waldsterbens als toxisch wirkendes Überschusselement, sondern auch als potenziell wachstums- und vitalitätslimitierendes Nährelement zu betrachten. Um den in vom Klimawandel getriebenen Zeiten immer wichtiger werdenden Baumartenansprüchen (Wasserhaushalt und Nährstoffverfügbarkeit) gerecht zu werden, müssen folglich Grundlagen geschaffen werden, um auch dieses Element ins forstliche Nährstoffmanagement mitaufzunehmen zu können. Hierfür muss Schwefel zum einen bei der Erstellung von holzernte-

**„Schwefel ist heute als ein potenziell vitalitätslimitierendes Nährelement zu betrachten.“**

### DIE AUTOREN

abhängigen Nährstoffbilanzen Berücksichtigung finden. Zum anderen existiert bislang kein geeigneter Extrakt zur Bestimmung der pflanzenverfügbaren Schwefelfraktion im Boden.

### Literaturhinweise:

[1] ALEWELL C. (1995): Sulfat-Dynamik in sauren Waldböden: Sorptionsverhalten und Prognose bei nachlassenden Depositionen. BITÖK, Wiss. Sekretariat, Univ. Bayreuth. [2] GÖTTLEIN A.; MELLERT, K. H. (2018): Ableitung von Schwefel-Stickstoff-Relationen für wichtige mitteleuropäische Baumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung und deren Veränderung von BZE 1 nach BZE 2. Allg. Forst- u. Jagdzeitung, 189, 221–229. [3] GÖTTLEIN, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. Allg. Forst- u. Jagdzeitung 186, 110–116. [4] GÖTTLEIN, A.; ETTL, R.; WEIS, W. (2007): Energieholznutzung und nachhaltige Waldbewirtschaftung – ein Zielkonflikt? Rundgespräche der Kommission für Ökologie. Band 33 „Energie aus Biomasse“, 87–95. [5] GÖTTLEIN, A.; RADMAN, A.; MELLERT, K. H. (2016): Ernährungszustand bayerischer Wälder auf Wuchsgebietebene. AFZ-DerWald, H. 19, 42–45. [6] HOULE, D.; CARIGNAN, R.

(1992): Sulfur speciation and distribution in soils and aboveground biomass of a boreal coniferous forest. Biogeochemistry, 16, 63–82. [7] HÜTTL, R. F. (1992): Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Wald-ökosystemen. Freiburger Bodenkdl. Abh. 30, 31–60. [8] JOHNSON, D. W.; MITCHELL M. J. (1998): Responses of forest ecosystems to changing sulfur inputs. Sulfur in the Environment, 219–262. [9] JONARD, M. et al. (2015): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. Global Change Biology, 21, 418–430. [10] MAR-SCHNER, H. (2011): Mineral nutrition of higher plants. Academic press, London. [11] PRIETZEL, J. (1992): Auswirkungen definierter Schwefel-Belastung auf die chemischen Eigenschaften von Waldböden. Dissertation, Univ. München. [12] PRIETZEL, J.; KÖLLING, C. (1999): Ein einfaches Routineverfahren zur Beurteilung des Remobilisierungspotentials von Waldböden für Sulfat-Schwefel aus atmosphärischen Einträgen. Forstwiss. Centralblatt/Tharandter forstliches Jahrbuch, 118, 329–344. [13] RICKE, W. (1960): Ein Beitrag zur Geochemie des Schwefels. Geochim. Cosmochim. Acta, 21, 35–80. [14] StMELF Bayern (1987): Grundsätze für die Düngung im Wald. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München. [15] UBA (1993): Emissionen nach Sektoren in Deutschland 1975 bis 1991. Umweltbundesamt, Abteilung II3.1-Strogies.

**Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein**  
goettlein@forst.tu-muenchen.de,

leitet das Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt der TU München. **Julian Fäth** und **Karl Heinz Mellert** sind dort wissenschaftliche Mitarbeiter, **Margaretha Rau** wissenschaftliche Hilfskraft. Die ernährungskundlichen Daten der BZE 1 und BZE 2 wurden vom Thünen-Institut für Waldökosysteme Eberswalde zur Verfügung gestellt.