

A green tractor with a fertilizer spreader is shown in a field. The tractor is moving from right to left, and the spreader is dispensing fertilizer. The background is a cloudy sky.

Schwefel –

Baustein für eine nachhaltige Ertragsbildung





Einleitung	4
Schwefel in der Pflanze	6
Schwefel für das Pflanzenwachstum	11
Schwefel im Boden	14
Schwefelversorgung der Pflanzen	16
Schwefeldüngung in der Praxis	20
Schwefelquellen und ihre Bedeutung	24
Rahmenbedingungen für die Schwefeldüngung	32



Einleitung

Bedeutung von Schwefel in der Ernährung von Mensch, Tier und Pflanze

Zum Leben und Wachsen benötigen Pflanzen neben Licht, Wasser und Kohlendioxid auch mineralische Nährstoffe. Pflanzen sind in der Lage aus diesen Ausgangsstoffen organische Substanz zu bilden. Diese Fähigkeit der Pflanzen ist die Basis für die Sicherung der menschlichen und tierischen Ernährung.

Der Anbau unserer Kulturpflanzen ist facettenreich und viele wissenschaftliche Erkenntnisse fließen dabei ein. Ein wichtiger Bereich ist die Ernährung der Pflanzen. Die nachhaltige pflanzenbauliche Wirtschaftsweise muss darauf ausgerichtet sein, die mit Pflanzen oder Pflanzenteilen durch Ernte- oder Weidenutzung entzogenen Nährstoffe dem Boden wieder zuzuführen. Damit bleibt die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten oder wird sogar erhöht.

Eine wesentliche Voraussetzung für das nachhaltige Wirtschaften ist die Kenntnis der dynamischen Prozesse, denen die Nährstoffe in Böden und Pflanzen unterliegen. Nur damit wird es möglich, sachgerechte Empfehlungen für eine effiziente und ressourcenschonende Düngung zu geben.

Richtig zu düngen bedeutet, dass die Pflanzen eine optimale Nährstoffversorgung für ihr Wachstum erhalten. Eine ausbalancierte Ernährung ist eine Herausforderung, die für jede angebaute Kultur gleichermaßen zu erfüllen ist, denn jede hat unterschiedliche Bedarfe an den verschiedenen Nährstoffen während der Wachstumsperiode. Eine ausgewogene Düngung sichert einen optimalen Ertrag mit hoher Qualität.

In der vorliegenden Broschüre sind, ausgehend vom Boden als Wachstumssubstrat, die Nährstoffdynamik des Mineralstoffs Schwefel (S), dessen Bedeutung für die Pflanze sowie die Konsequenzen für die praktische Düngung dargestellt. Die Versorgung mit Schwefel sichert nicht nur den Ertrag, sondern erhöht auch die Qualität des Erntegutes.

Schwefel – Funktionen im Körper von Menschen und Tieren

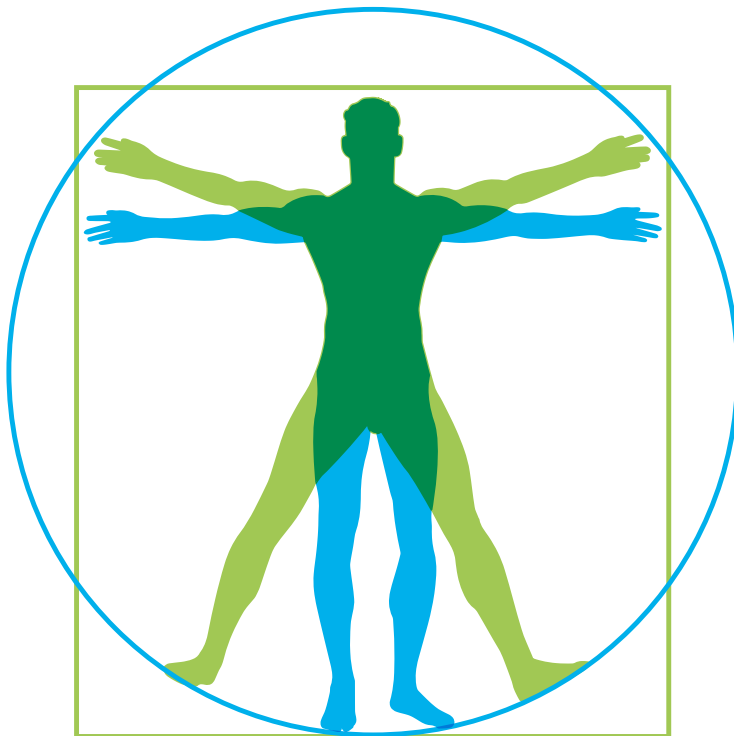
Schwefel ist Bestandteil von Eiweiß, vielen Enzymen, Vitaminen und sekundären Inhaltsstoffen, die für eine normale, gesunde Entwicklung fast aller Lebewesen in ausreichender Menge vorhanden sein müssen. Im Eiweiß ist Schwefel in den Aminosäuren Cystein und Methionin enthalten. Bei Menschen und Tieren ist Schwefel beispielsweise Baustein der Enzyme, die für die Sauerstoffbindung im Blut verantwortlich sind. Schwefel ist auch für den Aufbau von Kollagenen notwendig und somit essenzieller Bestandteil von Haut, Haaren, Knochen, Sehnen, Knorpel, Blutgefäßen und Zähnen.

Rund 0,2 Prozent des Körpers bestehen aus Schwefel. Das sind etwa fünfmal mehr als Magnesium und 40 mal mehr als Eisen.

Menschen und Tiere können den lebensnotwendigen Schwefel nur über die Nahrung aufnehmen. Schwefellieferanten für den Menschen sind tierisches Eiweiß und schwefelreiche Nahrungsmittel wie Knoblauch, Zwiebel, Senf und Kohlrarten.

Um Tiere, insbesondere Geflügel und Schweine, ausreichend mit Schwefel zu versorgen, wird bei der Zusammenstellung der Futtermittel darauf geachtet, dass genügend essenzielle (schwefelhaltige) Aminosäuren enthalten sind. Fehlt Schwefel in den natürlichen Futterkomponenten muss mit synthetisch hergestellten Aminosäuren ergänzt werden. Sollte die Zusammensetzung der Aminosäuren im Futter nicht im richtigen Verhältnis vorliegen, kommt es zu Leistungsdepressionen wegen nicht bedarfsgerechter Versorgung.

Funktionen von Schwefel im menschlichen Körper



Schwefel wirkt

- Stärkt das Immunsystem
- Aufbau von Eiweißstoffen aus Aminosäuren
- Bestandteil von Enzymen, Hormonen (zum Beispiel Insulin), Aminosäuren (zum Beispiel Cystein, Methionin, Taurin) und Glutathion (einem körpereigenen Antioxidans)
- Stoffwechselfördernd
- wichtiger Bestandteil des körpereigenen Entgiftungssystems in den Muskeln

Symptome bei Mangel

- Ohne Schwefel können Eiweiße und Enzyme ihre ursprünglichen Funktionen nicht mehr erfüllen.
- Niedergeschlagenheit
- Ängste
- Gelenkbeschwerden
- erhöhtes Risiko für sportbedingte Muskelschäden
- Durchblutungsstörungen
- Leberstörungen
- Grauer Star = Katarakt (Linsentrübung)

Schwefel in der Pflanze

Funktionen in der Pflanze

Schwefel wird in der Pflanze für vielfältige Funktionen besonders im Eiweiß-, Fett und Kohlenhydratstoffwechsel benötigt. So ist Schwefel für die Verwertung des aufgenommenen Stickstoffs und damit für die Eiweißsynthese von Bedeutung. Circa 90 Prozent des Schwefels sind an Eiweißbausteine gebunden. Bei Schwefelmangel werden Eiweiße und Enzyme unzureichend gebildet. Die Stickstoffverwertung ist deutlich schlechter und die Pflanzenentwicklung gehemmt.

- Zusammen mit Stickstoff dient Schwefel als essenzieller Baustein beim Aufbau der Aminosäuren und damit von Eiweiß
- Schwefel ist am Aufbau von Kohlehydraten beteiligt, beeinflusst damit die Synthese von Stärke, Zucker und Geschmacksstoffen
- Schwefel ist bei der Bildung von wichtigen Vitaminen unersetzlich (Biotin, Thiamin, Vitamin B)
- Bei Kreuzblütlern (Raps, Senf) und Liliengewächsen (Zwiebeln, Lauch, Knoblauch) wird Schwefel zur Bildung sekundärer Inhaltsstoffe, wie zum Beispiel Senföl, Lauchöl benötigt

Mit diesen wichtigen Funktionen trägt Schwefel maßgeblich zur Sicherung der Erträge und der Qualität des Ernteguts bei.

Schwefel ist wichtig für ...

- ... Proteinsynthese
- ... Enzyme (Nitrogenase, Nitratreduktase, Nitritreduktase)
- ... Co-Faktoren: Ferredoxin, Acetyl-CoA (Glycolyse, Fettsäuresynthese)
- ... Membranaufbau in Chloroplasten (Sulpholipide)
- ... Glutathion (wichtiges Redoxsystem) und Phytochelatine (Bindung von Schwermetallen)
- ... Glucosinolate (Vorstufen der Senföle), Lauchöle und andere sekundäre Pflanzenstoffe

Schwefelaufnahme

Die Aufnahme von Schwefel geschieht über die Wurzel in Form von Sulfationen (SO_4^{2-}). Diese werden mit der Bodenlösung aufgenommen. Sulfatischer Schwefel steht den Pflanzen nach der Ausbringung unmittelbar zur Verfügung und wird direkt über die Wurzel aufgenommen.

Schwefel in elementarer Form (Schwefelblüte, Netzschwefel, Schwefellinsen) kann erst von den Pflanzen verwertet werden, wenn er zu Sulfat umgesetzt ist. Dieser biologische Vorgang ist im Frühjahr bei Bodentemperaturen $< 10\text{ }^\circ\text{C}$ stark verlangsamt und verlängert sich um viele Wochen. Elementarschwefel wirkt deutlich verzögernd im Vergleich zum Schwefel in sulfatischer Form. Die gewünschte, zeitlich optimale Schwefelversorgung kann mit diesen Produkten nicht sichergestellt werden. Darüber hinaus wird durch Umsetzung des elementaren Schwefels in die Sulfat-Form der pH-Wert des Bodens deutlich abgesenkt, da bei der bakteriellen Umsetzung durch die beteiligten Thiobakterien Wasserstoffionen (H^+) freigesetzt werden.

Umsetzung in der Pflanze

Über verschiedene Bindungsstufen des Schwefels werden die essenziellen und wichtigen Schwefelhaltigen Aminosäuren (Cystein und Methionin), schwefelhaltige Co-Enzyme und Vitamine (zum Beispiel Thiamin und Biotin) gebildet.

Anders ist die Eiweißqualität von Getreide zu bewerten. Hier ist der Anteil dieser Aminosäuren deutlich höher und damit positiv für die Zusammenstellung von Futtermitteln und die Backqualität von Getreide. Deshalb ist zur Bewertung der Getreidequalität nicht der Rohproteingehalt allein, sondern auch die Qualität des Eiweißes ausschlaggebend.

Die Backeigenschaften werden zudem insbesondere durch die Zusammensetzung des Eiweißes im Brotgetreide bestimmt. Dabei hat der Anteil von Methionin und Cystein entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Mehls. Hier spricht man vom „Klebereiweiß“. Das Klebereiweiß ist maßgebend für die Zähigkeit

des Teiges und beeinflusst die Qualität der Backwaren. Auf Grund der Doppelbindung über die Schwefelatome (Disulfidbildung) entstehen Makromoleküle oder Polymere, die für die Zähigkeit oder Klebrigkeit des Teiges verantwortlich sind. Im Weizen zum Beispiel beeinflusst Gliadin maßgeblich die Viskosität und Extensibilität des Teiges, wohingegen Glutenin die Elastizität des Teiges beeinflusst. Die Abbildung „Einfluss der Schwefel-Düngung auf die Backqualität“ von Seite 10 zeigt diesen Zusammenhang eindrucksvoll.

Der Anteil der schwefelhaltigen Aminosäuren im Rohprotein ist in verschiedenen Ernteprodukten unterschiedlich. So haben die Eiweißpflanzen – beispielsweise Erbse und Sojabohne – einen hohen Rohproteingehalt, aber einen relativ geringen Anteil an Cystein und Methionin.

Weitere schwefelhaltige Pflanzenstoffe sind die Glucosinolate und deren Umsetzungsprodukte, die Senföle. Sie sind besonders in Kreuzifern wie zum Beispiel Raps, Senf und Kohl enthalten und werden als „sekundäre Inhaltsstoffe“ bezeichnet. Ähnlich sind auch Lauchöle zu bewerten, die in Lauchgewächsen (Allioideae), wie zum Beispiel Knoblauch, Porree und Zwiebeln zu finden sind. Deshalb besteht ein besonders hoher Schwefelbedarf für die Kulturen dieser Pflanzenfamilien.

Versorgung der Pflanze

Neben der Geschmacks- und Aromabeeinflussung werden den sekundären Inhaltsstoffen auch eine Bedeutung bei der Abwehr von Schadorganismen zugesprochen. Das bedeutet, dass die Pflanzen bereits zu Beginn des Wachstums und in jeder Wachstumsphase ausreichend mit Schwefel versorgt sein müssen, da diese Verbindungen nur mit ausreichend Schwefel gebildet werden können.

Des Weiteren kann Schwefel auch über das Blatt gasförmig als Schwefeldioxid (SO_2) oder Schwefeltrioxid (SO_3^{-2}) absorbiert werden. Pflanzen können theoretisch ca. 50 bis 70 Prozent ihres Bedarfes aus der Luft abdecken. Bei sehr hohen Schwefelgehalten in der Luft ($> 1\text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Luft) können hingegen Schäden an den Pflanzen entstehen.

Schwefelmangel und seine Folgen

Schwefelmangel führt unter anderem zur schlechteren ernährungsphysiologischen und technologischen Qualität des Rohproteins. Die Proteinsynthese ist gehemmt. Als Folge erhöht sich die Menge der löslichen Stickstoffverbindungen, zu denen auch Nitrat zählt. Auch Amide und die weniger wertvollen Aminosäuren wie Alanin, Asparaginsäure und Glutaminsäure reichern sich an. Schwefel ist bei der Reduktion und Umwandlung des Nitrats entscheidend, wofür die Enzyme Nitrat- und Nitritreduktase benötigt werden. Fehlt die Nitrat-Umwandlung in der Pflanze, kommt es zum sogenannten Nitratstau, der bereits bei latentem Schwefelmangel auftritt. Dieser kann über einen Nitratschnelltest (Presssaft und Teststäbchen) leicht nachgewiesen werden. Der Nitratgehalt im Zellsaft ist erhöht. Hier kommt die enge Wechselwirkung von Stickstoff und Schwefel im pflanzlichen Metabolismus zum Ausdruck. Außerdem fehlt Schwefel zur Ausbildung der wertvollen Pflanzeninhaltsstoffe wie Glucosinolaten und Lauchölvorstufen.

Bei Schwefelmangel sinkt der Chlorophyllgehalt als Folge einer verminderten Chloroplastenbildung. Die Pflanzen bleiben klein und zeigen eine hell-gelblich-grüne Färbung an jüngeren Blättern, da Schwefel in einer Mangelsituation nicht aus alten Blättern in jüngere Pflanzenteile verlagert wird.

Schwefelmangel tritt auf dem Feld häufig nicht flächendeckend auf. Zunächst sind nur einzelne „Nester“ mit Mangelpflanzen zu erkennen.

Wann besonders mit Schwefelmangel zu rechnen ist

Unabhängig von den Analysebewertungen ist nach bisherigen Erfahrungen mit Schwefelmangel in folgenden Situationen zu rechnen:

- Auf leichten, flachgründigen, umsetzungsträgen oder humusarmen sorptionsschwachen Böden
- Bei relativ warmer und niederschlagsreicher Witterung im Herbst/Winter. Dies führt zur Mineralisation von Schwefel aus der organischen Bodensubstanz und nachfolgender Auswaschung
- Generell ist bei unzureichend ausgebildetem Wurzelwerk im Frühjahr mit einer unbefriedigenden Nährstoffaufnahme zu rechnen. Dies tritt ein bei:
 - Schlechter Bestandesentwicklung im Herbst
 - Hohen Feuchtigkeitsgehalten im Winterhalbjahr im Oberboden; Ursache für ein flach streichendes wenig ausgeprägtes Wurzelsystem
 - Bodenverdichtungen, auch verursacht durch Nässe im Winterhalbjahr
- Nasse Frühjahrswitterung mit vermindertem kapillarem Aufstieg von Bodenwasser in den Wurzelraum
- Niedrige N_{\min} -Gehalte im Frühjahr (lassen auch starke Sulfatauswaschung vermuten)
- Langjährige viehlose Flächenbewirtschaftung (geringe organische Bodensubstanz)
- Bereiche mit Strukturschäden beziehungsweise schlechter Strohverteilung
- Großer Anteil von Fruchtarten mit hohem Schwefelbedarf in der Fruchtfolge, zum Beispiel Raps
- Vernachlässigung der sulfatischen Schwefeldüngung in der Vergangenheit

Wie kann in der Praxis Schwefelmangel festgestellt werden?

Sofern ein Verdacht auf Schwefelmangel besteht, kann durch Anlage eines Düngefensters oder durch eine Blattanalyse die visuelle Diagnose überprüft werden.

Praxisnah kann das Vorliegen von Schwefelmangel durch die Behandlung von Teilflächen mit schwefelhaltigem Dünger ohne Stickstoff festgestellt werden. Auf schnellwirkendes Sulfat durch mineralische Dünger (zum Beispiel Magnesiumsulfat, Kaliumsulfat) ist zu achten. Bei Schwefelmangel ergrünen die behandelten Flächen meist schnell.

Da eine Verwechslung mit N-Mangel unter Praxisbedingungen wegen ähnlicher Symptome vor allem bei Getreide leicht möglich ist, wäre es in dieser Situation falsch reinen Stickstoff zu düngen, weil auf Grund des Missverhältnisses von N:S der Ertragsrückgang größer werden könnte. Die genaue Ursache kann nur durch eine Pflanzenanalyse gefunden werden.

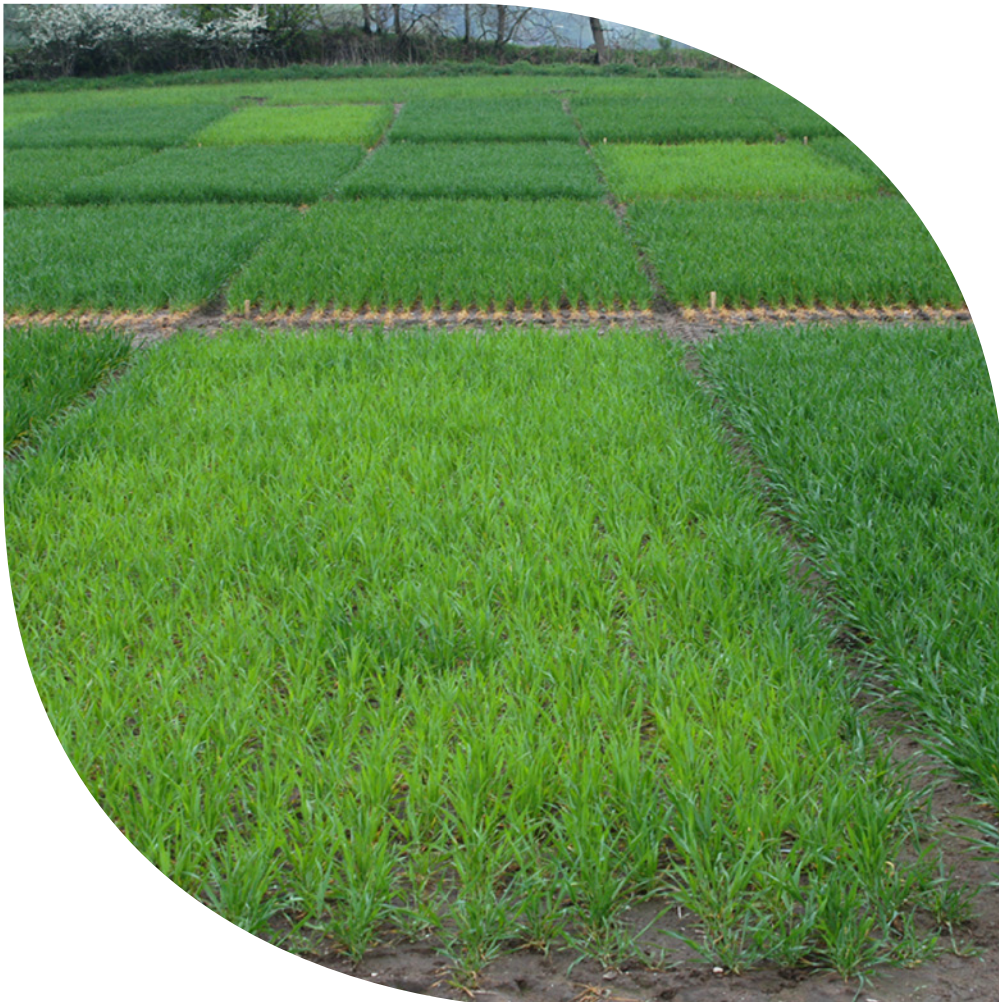
Schwefelmangel ist unter bestimmten Bedingungen auf Teilflächen bei Raps und Getreide zu erkennen. Dies liegt vor allem daran, dass Sulfatschwefel im Boden leicht verlagert wird. Daher ist in Jahren mit hohen Winterniederschlägen und daher niedrigen N_{\min} -Gehalt auch vermehrt mit Schwefelmangel zu rechnen.

Wechselt zudem die Bodengüte auf einem Schlag häufig, ergeben sich so die Nester und Teilflächen mit Schwefelmangelsymptomen. Bei Zuckerrüben und Mais zeigt sich Schwefelmangel oftmals zu Beginn nur latent. Der frühe Beginn der Vegetationsperiode bei Raps und Wintergetreide kann zu einem Mangel führen. Dies ist insbesondere im zeitigen Frühjahr der Fall, wenn die Böden noch kühl sind und der im

Boden gebundene organische Schwefel noch nicht freigesetzt wird. In dieser Phase steigt der Nährstoffbedarf der Pflanzen deutlich an, was zu einer unzureichenden Versorgung führen kann. Zuckerrüben und Mais können dagegen durch ihre lange Vegetationszeit in den wärmeren Monaten den Schwefel aus der Mineralisation und dem kapillaren Wasseraufstieg besser nutzen (Siehe Grafik „Mineralisation von Stickstoff und Freisetzung von Sulfat-Schwefel“ auf Seite 21).

Sobald Schwefelmangel eintritt, sind Ertrags- und Qualitätsverluste die Folge. Dies geschieht nicht nur bei sichtbarem, sondern auch bereits bei äußerlich nicht erkennbarem – latentem – Schwefelmangel.

Wegen der ungenügenden Ausbildung der schwefelhaltigen wertvollen Pflanzeninhaltsstoffe ist auch ein Qualitätsverlust im Erntegut festzustellen. Beispielsweise sind bei Schwefelmangel die Proteingehalte geringer, die Backqualität bei Brotgetreide ist schlechter und die Wertigkeit der Proteine in Futterpflanzen geringer. Oft leidet auch der Geschmack, besonders bei Rettich und Radieschen – als Kreuzifere – sowie Lauchgewächsen.



Schwefelmangel in Getreide
Quelle: EuroChem



Raps



Getreide



Rapsblüte

Quellen: YARA

Schwefelmangel kann auf den ersten Blick leicht mit Stickstoffmangel verwechselt werden. Es gibt jedoch deutliche Unterscheidungsmerkmale. Bei Schwefelmangel sind die jüngeren Blätter hell und die älteren Grün, weil Schwefel in der Pflanze unter Mangelbedingungen nur schwer rückverlagert werden kann. Bei Stickstoffmangel sind umgekehrt die jüngeren Blätter dunkel und die älteren Hell. Die Pflanze vergilbt von unten.

Raps

Die Pflanzen bleiben klein. Der Mangel beginnt an den jüngeren bis mittleren Blättern. Es vergilben Blattrand und Blattspreite, die Blattadern bleiben noch grün. Auch tritt eine anthocyane Verfärbung (rötlich-violett) der Blätter auf. Die Blätter sind verformt, wölben sich löffelförmig auf und formen sich schmal und länglich aus. Die Blütenbildung ist verzögert, die Blüten bleiben kleiner, sie werden hell, fahlgelb bis weiß und zeigen nicht die gewünschte goldgelbe Farbe. Die Einkörnigkeit in die Schoten ist geringer.

Getreide

An der Einzelpflanze sind Schwefelmangelsymptome häufig zuerst an den jungen Trieben sichtbar. Die Blätter sind hell und vergilben. Ältere Blätter bleiben eher grün. Pflanzen mit Schwefelmangel sind im Wachstum gehemmt. Meist weisen sie eine starre nach oben gerichtete Blattstellung auf. Die Ähren- und Blütenbildung wird verzögert. Bei frühem Schwefelmangel ist auch die Bestockung reduziert. Beim Weizen sinkt die Kornzahl in der Ähre. Zudem kommt es zu einer geringeren Proteinbildung im Korn, was die Backqualität negativ beeinflusst.

Einfluss der Schwefel-Düngung auf Backqualität



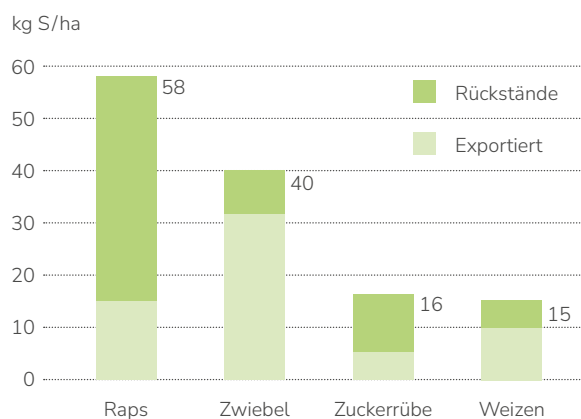
Quelle: Seling et al. (2006)

Schwefel für das Pflanzenwachstum

Schwefel – Baustein nachhaltiger Ertragsbildung

Der Schwefelbedarf unterscheidet sich zwischen den einzelnen Kulturen. Je höher der Schwefelbedarf ist, desto größer ist auch die Gefahr eines Schwefelmangels. Die Abfuhr des Schwefels mit dem Erntegut vom Feld unterscheidet sich zwischen den Kulturen maßgeblich. Raps beispielsweise weist eine sehr hohe Aufnahme auf, doch verbleibt der meiste Schwefel in den Rückständen der Pflanze.

S-Aufnahme der Kultur und Anteil von geerntetem (exportiertem) Produkt und Rückständen



Quelle: YARA

Schwefelbedarf verschiedener Kulturen (nach DLG)

Schwefelbedarf	Reaktion auf Schwefel-Düngung	Kultur
Hoch	Ausgeprägt	Raps, Rüben, Senf, Grünland, Leguminosen, Kohlarten, Zwiebelgewächse
Mittel	Gering	Zuckerrüben
Gering	Mittel	Getreide, Mais
Gering	Gering	Kartoffeln

(nach DLG Merkblatt)

Zeitlicher Verlauf und Höhe der Schwefelaufnahme

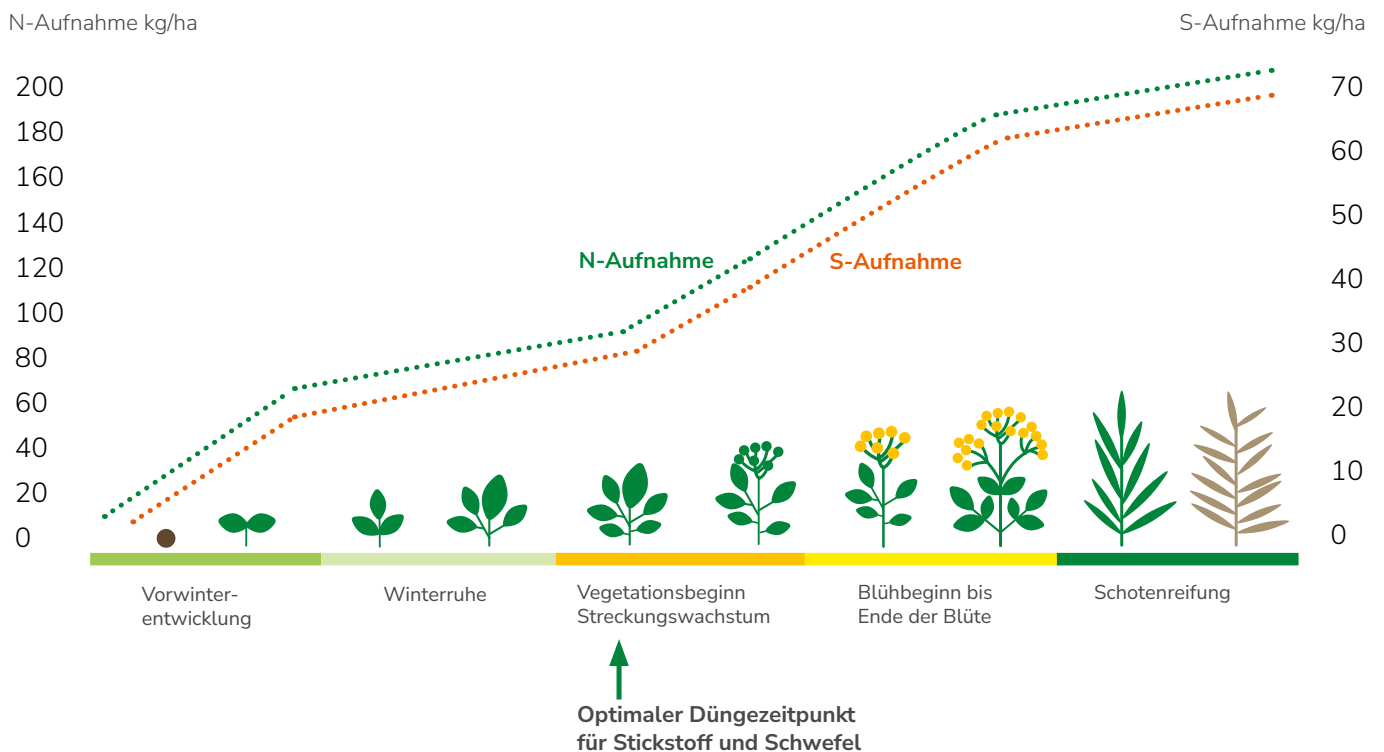
Neben der Dynamik ist die kumulierte Aufnahme ein wichtiger Aspekt der Schwefelaufnahme. Denn Schwefel wird in allen Wachstumsphasen von den Pflanzen benötigt. Dabei spielt auch die Vegetationszeit eine bedeutende Rolle. Denn Pflanzen mit einer kurzen Vegetationsperiode benötigen in kurzer Zeit hohe Schwefelmengen. Dieser Bedarf kann meist nicht aus dem Bodenvorrat gedeckt werden.

Pflanzen mit einer längeren Vegetationsperiode hingegen haben mehr Zeit, Schwefel aus dem Boden aufzunehmen und sind weniger auf eine externe Versorgung angewiesen.

Raps verlangt wegen seines kurzen Vegetationszyklus und der hohen Aufnahme besonders viel Schwefel. Dies gilt insbesondere für die frühe Wachstumsphase, um dem hohen Anteil an S-haltigen Inhaltsstoffen gerecht zu werden. Starker Schwefelmangel kann daher zu Ertragsverlusten von bis zu 1 oder 2 t/ha führen.

Entwicklung, N- und S-Aufnahme von Raps

Winterraps



Quelle: YARA

Nährstoffinteraktionen

Die von den Pflanzen benötigten mineralischen Nährstoffe stehen in vielfältigen Wechselbeziehungen zueinander, sowohl im Boden als auch bei der Aufnahme und im Stoffwechsel der Pflanze. Diese Wechselbeziehungen, gekennzeichnet durch gegenseitige Förderung (der sogenannte Synergismus) oder gegenseitige Hemmung (der sogenannte Antagonismus), sind ein entscheidender Grund für die Zufuhr der verschiedenen Nährstoffe in einem für die Pflanze optimalen Verhältnis.

Interaktion bei der Nährstofffunktion

Die Funktion des Schwefels in der Pflanze ist eng mit der Nutzung von Stickstoff verbunden. Besteht ein S-Mangel, kann verfügbarer Stickstoff durch die Pflanze nicht genutzt werden. Es kommt zu negativen Folgeeffekten wie beispielsweise einer überproportionalen Ertragsreduktion. Zudem ist die unzureichende Ausnutzung von Stickstoff gleichbedeutend mit einer geringeren N-Nutzungseffizienz (NUE). Insbesondere vor dem Hintergrund wachsender gesellschaftlicher und politischer Erwartungen an eine angepasste Düngung sowie ökologische und ökonomische Herausforderungen für den Landwirt ist eine ausreichende Schwefelversorgung der Pflanze essenziell.

Interaktion bei der Nährstoffaufnahme

Sehr gut dokumentiert sind Aufnahmeantagonismen zwischen S (Sulfat) und Selen (Selenat) beziehungsweise S (Sulfat) und Molybdän (Molybdat). Hierbei handelt es sich um spezifische Aufnahmeantagonismen, da Selenat beziehungsweise Molybdat, zumindest teilweise, um die gleichen Aufnahmesysteme konkurrieren.

Die Selenverfügbarkeit ist bei hohen Boden-pH-Werten (nach einer Kalkung) und hohem Redoxpotential (gute Durchlüftung) erhöht. Durch den beschriebenen Aufnahmeantagonismus kommt es bei steigendem S-Angebot zu einer reduzierten Se-Aufnahme. Unsere landwirtschaftlichen Kulturpflanzen unterscheiden im Stoffwechsel nicht zwischen S und Se. Selen wird daher unspezifisch in Aminosäuren, andere Metabolite und Proteine (Enzyme) eingebaut. Bei überhöhtem Se-Angebot, welches in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland nicht auftritt, kommt es daher zu Toxizitätserscheinung. Selen wird für Kulturpflanzen als nicht essenziell eingestuft, wohl aber für Tier und Mensch und ist daher für deren Ernährung wichtig.

Die Verfügbarkeit von Mo ist bei niedrigen pH-Werten aufgrund der erhöhten Mo-Bindung im Boden grundsätzlich vermindert. Zusätzlich reduziert ein hohes Sulfatangebot die Mo-Aufnahme, da beide Anionen teilweise um dieselben Transporter konkurrieren (Aufnahmeantagonismus). Auf leichten, sauren Böden ist bei hoher S-Zufuhr daher am ehesten mit Mo-Mangel zu rechnen. Aktuell liegen allerdings keine Hinweise auf eine unzureichende Mo-Versorgung landwirtschaftlich genutzter Böden in Deutschland vor.



Schwefel im Boden

Verfügbarkeit von Schwefel im Boden

Der Gesamtschwefelgehalt in den Böden Mitteleuropas beträgt meist 0,02 bis 2 Prozent. Er schwankt in Abhängigkeit von der Bodenherkunft, dem Ausgangsgestein und dem Humusgehalt. Somit können mehrere Tonnen Schwefel pro Hektar im Boden gebunden sein. Im Mittel wird von 4.500 kg berichtet, die pro Hektar im Boden gebunden sind.

Durch Verwitterung und Mineralisation wird anorganischer beziehungsweise organisch gebundener Schwefel zu Sulfat (SO_4^{2-}) umgesetzt und somit pflanzenverfügbar. Im Laufe der Vegetationszeit können so 1,5 bis 15 kg/ha S, je nach Niederschlagsmenge und -verteilung im Jahresverlauf, den Pflanzen zur Verfügung stehen. Wegen der großen Schwefelmenge, die im Humus gebunden ist, hat die organische Bodenfraktion eine besondere Bedeutung. Der Verlust an organischer Substanz ist proportional zum Verlust an organischem Schwefel.

Schwefeldynamik im Boden

Anorganische Bindungsformen

Der anorganische Teil ist klein, er macht in landwirtschaftlich genutzten Böden meist weniger als 25 Prozent aus.

Die Bindungsformen im Boden sind vielfältig, sie beruhen auf den verschiedenen Oxidationsstufen des Schwefels. Man findet Schwefel als: elementaren Schwefel (S), Sulfid (S^{2-}), Sulfit (SO_3^{2-}), Thiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) Tetrathionat ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$) und Sulfat (SO_4^{2-}).

Böden, die sich auf vulkanischem Gestein (Basalt, Schlacken) oder schwefelreichen Sedimenten (Gips) entwickelt haben, besitzen von Haus aus einen höheren Schwefel-Gehalt als solche, deren Ursprung Sandstein oder glaziale Sand- und Schotterablagerungen sind.

Organische Bindungsformen

Der Anteil des organisch gebundenen Schwefels beträgt je nach Gehalt an organischer Substanz (Humus) im Boden zwischen 60 und 90 Prozent des Gesamt S. Organische Bindungsformen im Boden sind Aminosäuren, Proteine, Polypeptide oder heterozyklische Verbindungen (zum Beispiel: Biotin, Thiamin).

Das Verhalten von Sulfat im Boden

Das pflanzenverfügbare Sulfat verhält sich im Boden ähnlich wie Stickstoff in der Nitratform. Es wird nicht an Tonminerale gebunden und kann daher in Zeiten geringer Durchwurzelung oder bei fehlendem Pflanzenbewuchs in tiefere Bodenschichten verlagert oder ausgewaschen werden.

Die Beweglichkeit von Sulfat-Schwefel wird durch das Vorhandensein freien Calciums und die Niederschlagsverteilung beziehungsweise Regenverdaulichkeit der Böden beeinflusst. Anionen werden immer mit Kationen verlagert. Von der Pflanze nicht aufgenommenes Sulfat bindet zweiwertigen Kationen wie Magnesium und Calcium. Die Löslichkeit von Calciumnitrat ist um das ~700-fache, das von Calciumchlorid um das 370-fache höher als das von Calciumsulfat (Gips).

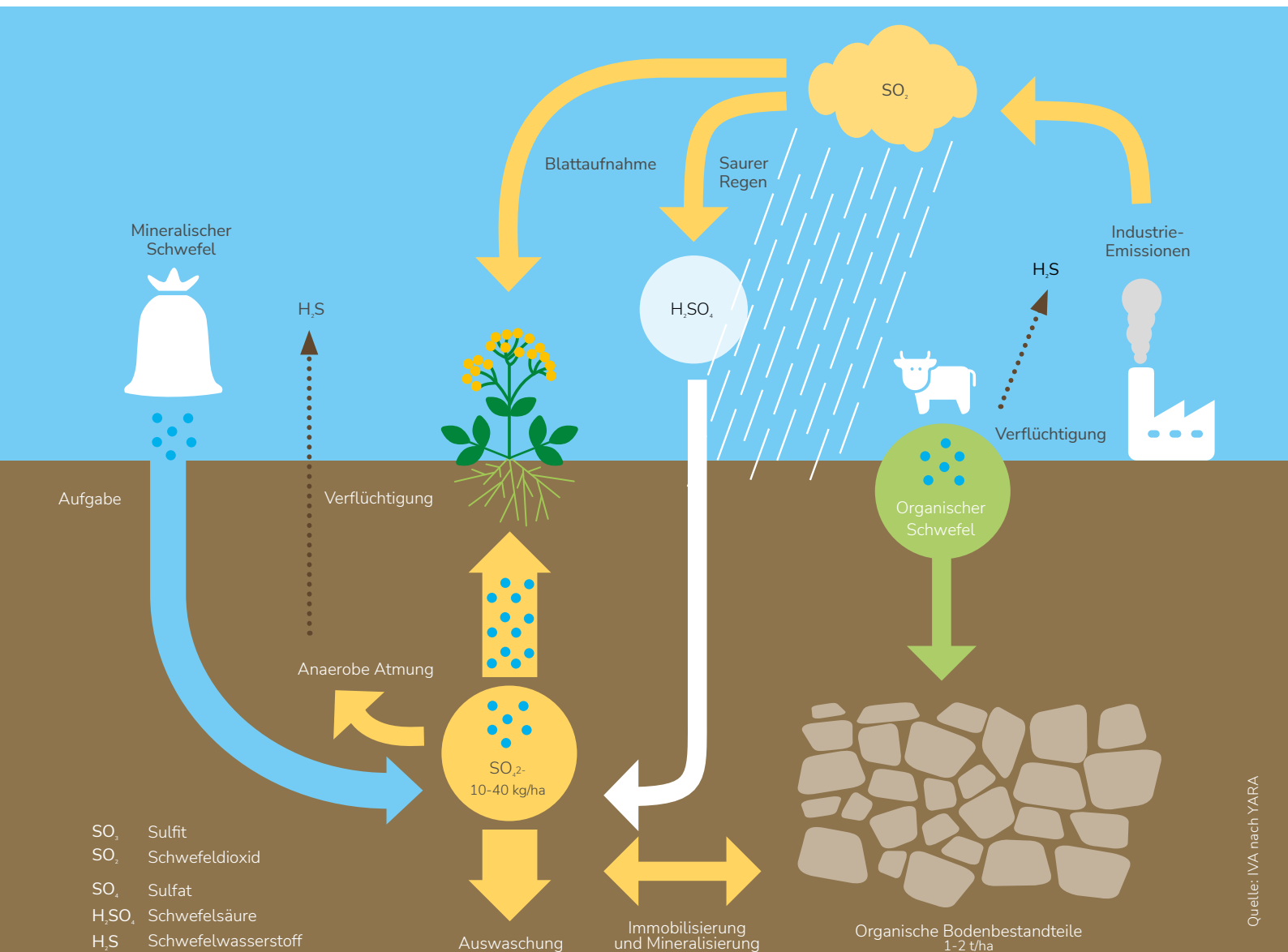
Je nach jahreszeitlichem Verlauf und Intensität der Niederschläge läuft dieser Prozess der Verlagerung ab. Bei einer abwärts gerichteten Wasserbewegung im Winterhalbjahr kann es zur Verlagerung beziehungsweise Auswaschung von Schwefel (Sulfat) kommen. In Trockenphasen innerhalb der Vegetation kann es auf Grund der geringen Löslichkeit von Gips im Oberboden zu einem temporären Schwefelmangel kommen. Extreme Trockenheit im Unterboden von Karbonatböden, wie in den Jahren 2018 und 2019 erstmals zu beobachten, kann zu gleichzeitigem Mangel an Schwefel und Calcium führen. Schwefel-einträge über den Niederschlag erfolgen in nicht nennenswerten Mengen.

Der Umfang der Auswaschung ist weitgehend abhängig von der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens begründet in der Bodenstruktur. Hier spielt die Bodenart eine wesentliche Rolle. Besonders auf sandigen, leichten und humusarmen und damit auswaschungsgefährdeten Böden ist diese Aus-

waschung von Bedeutung. Hinzu kommt die zeitliche Verteilung und Höhe der Niederschläge sowie die Aufnahme durch Pflanzenbewuchs (Zwischenfrüchte, Winterraps) die es zu beachten gilt. Während der Vegetationszeit spielt der Schwefelaustrag hingegen keine Rolle, da durch den Wasserverbrauch der Kulturen kaum Wasser und Schwefel in tiefere Bodenschichten versickert. Die verzögerte Auswaschung gilt insbesondere bei schweren, calciumreichen Böden, insbesondere in niederschlagsarmen Gebieten. Grundsätzlich ist die pH-Wert Absenkung auf Böden mit pH-Werten > 7,0 kein Nachteil. Je höher der pH-Wert desto geringer die Phosphat- und Spurenelementverfügbarkeit.

Wegen der fehlenden Sorption von Sulfat im Boden wird es kaum gespeichert und ist auswaschungsgefährdet. Daher ist keine Vorratsdüngung für beispielsweise eine Fruchtfolge möglich. Mittels Zwischenfruchtanbau kann Schwefel temporär organisch gebunden werden.

Die Grafik zeigt die wechselseitigen Vorgänge im Boden.





Schwefel- versorgung der Pflanzen

Einschätzung des pflanzenverfügbaren Schwefels im Boden

Nur ein geringer Teil des Gesamtvorrates an Nährstoffen im Boden steht den Pflanzen während der Vegetation tatsächlich zur Verfügung. Man bezeichnet diesen Teil als „pflanzenverfügbar“. Die Pflanzenverfügbarkeit ist bedingt durch das chemische und physikalische Verhalten der einzelnen Nährstoffe im Boden und die Fähigkeit der einzelnen Pflanzenarten zur Nährstoffaneignung.

Bei der Mineralisation wird Schwefel unter optimalen aeroben Verhältnissen von Mikroorganismen zu Sulfat oxidiert (Sulfurifikation). Hier zeigt sich die große Bedeutung der Mikroorganismen-Tätigkeit für die Schwefelumsetzung, denn kohlenstoffheterotrophen Mikroben benötigen die Oxidation von elementarem Schwefel zu Sulfat als Energiequelle.

Unter anaeroben Bedingungen (das heißt wasserführende, schwere Böden) bewirken ebenfalls Mikroorganismen die Reduktion des Schwefels zu Sulfid – Schwefel (Desulfurifikation). Es entsteht Schwefelwasserstoff (H_2S), der als Gas in die Atmosphäre entweicht. In diesem Fall nutzen die Bakterien den Sauerstoff des Sulfates für ihren Stoffwechsel. Wird Sulfat bei diesen Vorgängen in Sulfid reduziert, so kann dieser bei besseren bodenklimatischen Bedingungen wieder in Sulfat zurück umgesetzt und pflanzenverfügbar werden.

Bestimmungsmethoden

Zahlreiche Feldversuche verschiedener Beratungs- und Forschungseinrichtungen sowie der Düngemittelindustrie zeigen die Wirkung der Schwefeldüngung in allen Anbauregionen zu unterschiedlichen Kulturen. Vor allem die Bedeutung des Nährstoffs Schwefel in den hoch bedürftigen Kulturen ist erforscht. Beispielsweise ist die Schwefeldüngung im Winterrapsanbau Standard.

Aus dieser Versuchstätigkeit wurden Beratungsempfehlungen für die Kulturen abgeleitet. Dies sind pauschale Empfehlungen, bei denen die aktuellen Anbaubedingungen hinsichtlich des Standortes, der Fruchtfolge und der Düngepraxis des Betriebes nicht berücksichtigt sind. Daher ist es wichtig, den Bedarf regelmäßig festzustellen und zu überprüfen.

Bodenuntersuchung zur Ermittlung des pflanzenverfügbaren Schwefels (S_{min})

Analog zur Bestimmung des mineralisierten Stickstoffs im Boden – die N_{min} Methode – wurde auch eine S_{min} Methode entwickelt. Mit dieser Methode kann der lösliche Sulfat-Schwefel zu Vegetationsbeginn festgestellt werden. Es empfiehlt sich diese Untersuchung parallel mit der N_{min} Untersuchung durchzuführen, da beide Analysen aus einer Probe erstellt werden können. Geeignet sind die Methoden nach VDLUFA zur Bestimmung des mineralischen Schwefels ($CaCl_2$ -Extraktion) oder auch nach EUF (Elektro-Ultra-Filtration).

Die Aussagekraft der Bodenuntersuchung für Schwefel ist verglichen mit dem Kenntnisstand zu anderen Nährstoffen unsicher. Es wird aktuell nur der gegenwärtige Versorgungszustand zum Zeitpunkt zur Probenahme festgestellt. Es gibt keine Information über die weitere Versorgung aus beispielsweise kapillarem Wasseraufstieg aus dem Unterboden in die Wurzelzone oder über die Nachlieferung durch die Schwefel-Mineralisierung aus der organischen Masse des Bodens während der Vegetation. Auch kann der Einfluss von Starkniederschlägen nicht beurteilt werden.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass auf leichten Böden und dort wo ein Schwefelbedarf bereits nachgewiesen oder beobachtet wurde keine S_{min} Untersuchung erforderlich ist. Hier muss eine Schwefeldüngung erfolgen.

Dagegen kann auf schwereren Böden und trockenen Standorten, wo der Wasserstrom aufsteigend ist, (bei negativer Wasserbilanz) die S_{min} Analyse hilfreiche Informationen liefern.

Schwefel Schätzrahmen

Schon in den ersten Versuchen, die die Notwendigkeit der Schwefeldüngung belegten, entwickelte das BASF Agrarzentrum Limburgerhof bereits Mitte der 90er Jahre den sogenannten Schwefel-Schätzrahmen. Er gibt Hinweise auf die Notwendigkeit einer Schwefeldüngung – ohne analytischen Aufwand. Das Prinzip beruht darauf, dass alle wichtigen Parameter, welche die Schwefelverfügbarkeit beeinflussen (zum Beispiel Standorteigenschaften, Witterung, Düngung), vom Landwirt selbst eingeschätzt und bewertet werden.

Über ein Auswertungssystem kann beurteilt werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Schwefel-Unterversorgung auf dem einzelnen Schlag ist.

Mit dieser Methode ist es möglich, bereits vor Beginn der Düngesaison im Frühjahr schnell und kostenlos die Notwendigkeit für eine Schwefeldüngung abzuschätzen. In Praxisversuchen wurde die Erfahrung gemacht, dass die Treffsicherheit dieses Verfahrens hoch ist. Sehr präzise können mit dieser Methode mit Schwefel unterversorgte Standorte identifiziert werden. Der Schwefel-Schätzrahmen wurde im Laufe der Zeit verfeinert und angepasst. Er ist für Ackerland und auch für Grünland verfügbar.

Die Pflanzenanalyse zur Bestimmung des Ernährungszustandes der Pflanzen

Mit Pflanzenanalysen wird der Gesamt-Schwefelgehalt in der oberirdischen Pflanzenmasse beziehungsweise Pflanzenteilen bestimmt. Die Analyse umfasst alle Schwefel-Bindungsformen in der Pflanze. Als Ergebnis wird in der Regel der Schwefelgehalt in Prozent der Trockenmasse angegeben. Dieses Ergebnis wird mit bekannten, als ausreichend bewerteten Schwefelgehalten verglichen. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, muss die Probenahme zu fest definierten Wachstumsstadien erfolgen.

Nachfolgende Tabelle gibt Hinweise zu ausgewählten Kulturpflanzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die meisten Ackerkulturen eine Mindestkonzentration von 0,30 Prozent Schwefel in der Trockensubstanz angestrebt werden sollte.

Richtwerte für ausreichende Schwefel-Gehalte, Probenahmeterminen und zu beprobender Pflanzenteil

Pflanzenart	Probenahmetermin	Pflanzenteil	Richtwert für ausreichende Schwefel-Gehalte in der Trockensubstanz (%)
Winterraps	Kurz vor Knospens stadium	Gerade voll entwickelte Blätter	> 0,55
Wintergetreide	Schossbeginn/ 1-Knotenstadium	Gesamte oberirdische Pflanze	> 0,30 (vorläufig)
Zuckerrübe	Bestandesschluss	Blattspreiten aus mittlerem Blattkranz	> 0,30 (vorläufig)
Grünland	Vor dem ersten Schnitt	Gesamter Aufwuchs	> 0,30 (vorläufig)

(nach VDLUFA – Standpunkt)

N:S-Verhältnisse für verschiedene Kulturen

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

(Nach DLG- Merkblatt)

Vorteil der Pflanzenanalyse ist, dass der Ernährungszustand genau beurteilt werden kann. Interessant ist diese Methode, um generell den Versorgungszustand eines Standortes für die weitere Bewirtschaftung besser einschätzen zu können. Trotzdem ist bei festgestelltem Schwefelmangel unverzüglich eine Korrekturdüngung anzuraten. Wirkungsvoll sind Blattdüngungsmaßnahmen mit unverzüglich wirkendem sulfatischem Schwefel zum Beispiel als Magnesiumsulfat.

Bewertung der Untersuchungsmethoden

Bei der Bewertung dieser Untersuchungsmethoden ist festzustellen, dass alle Methoden gewisse Vor- und Nachteile haben. Diese sind in der Tabelle „Vergleich der Analysemethoden“ zusammengefasst.

Die auf Analysen basierenden Methoden der Boden- und Blattanalyse sind hilfreich und zur Bewertung des Standortes geeignet. Zusätzlich sollten die Beobachtungen und Erfahrungen des Landwirts mit in die Entscheidung zur Schwefeldüngung einfließen.

Neben der Standortbetrachtung spielt die Schwefelbedürftigkeit der Kultur eine ausschlaggebende Rolle. Hilfreich und einfach zu handhaben ist der Schwefelschätzrahmen. Es ist zu empfehlen ihn ergänzend zu den Analysemethoden zu nutzen.

Mit den vorgestellten Bewertungsmethoden kann ermittelt werden, ob eine Schwefeldüngung durchgeführt werden muss. Sie lassen kaum einen Rückschluss auf die Schwefel-Nachlieferung aus dem Boden zu. Deshalb hat sich die Höhe der Düngung am Bedarf der Pflanzen zu orientieren.

Vergleich der Analysemethoden (angelehnt an: Knittel/Albert, Praxishandbuch Dünger und Düngung)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
S_{\min} Bodenuntersuchung	<ul style="list-style-type: none"> • Kombinierbar mit N_{\min} • Erfasst pflanzenverfügbaren Schwefel-Vorräte im Frühjahr • Entscheidung vor der Düngung im Frühjahr möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige Probenahme • Keine Information über Schwefel-Nachlieferung • Nur bei Raps sicher • Analysekosten
Pflanzenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Exakte Information über den aktuellen Ernährungszustand 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige Probenahme • Untersuchungsergebnis kommt oft zu spät bei akutem Mangel • Vergleichswerte nicht für alle Pflanzenarten verlässlich • Analysekosten
Schwefel-Schätzrahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Einfaches Verfahren • Information vor der Düngung • Keine Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Einschätzung erfolgt auf Basis eines vereinfachten Modells

Schwefel- düngung in der Praxis



Bemessung der Schwefeldüngung

Aufteilung der Schwefeldüngung

Auf normalen durchschnittlichen Ackerbaustandorten ist es ausreichend, wenn zu Vegetationsbeginn mit der ersten Stickstoffgabe die Schwefelversorgung sichergestellt wird. Dies ist mit Stickstoff-Düngemitteln möglich, die einen hohen Schwefelgehalt haben (zum Beispiel Ammoniumsulfat oder Ammoniumsulfatsalpeter). Wenn schwefelfreie Stickstoff-Düngemittel verwendet werden, sollte die Schwefelversorgung über schwefelhaltige Düngemittel zur Verfügung gestellt werden (zum Beispiel Magnesiumsulfat, Kaliumsulfat oder Kalium-Magnesium-Sulfat). Bei den folgenden Stickstoff-Düngergaben entfällt in dieser Situation eine weitere Schwefelgabe.

Bei Produkten mit einem etwas geringeren Schwefelgehalt (zum Beispiel: Ammoniumnitrat mit Schwefel oder Ammoniumsulfat-Harnstoff) kann es je nach Höhe der Startgabe sinnvoll sein bei den weiteren Stickstoffgaben Schwefel mitzudüngen. Grund: Die Schwefelbedarfsmenge muss erreicht werden. So wird sichergestellt, dass die Pflanze in jeder Wachstumsphase ausreichend mit Schwefel versorgt ist.

Grundsätzlich kann es auf leichten auswaschungsgefährdeten Standorten vorteilhaft sein, den Schwefel auf mehrere Gaben (zum Beispiel 1. und 3. Gabe) zu verteilen, da Schwefel in der Pflanze nur eingeschränkt verlagert werden kann. Erfolgt keine Nachlieferung aus dem Boden, wird trotz mengenmäßig ausreichend hoher Schwefeldüngung zur ersten Gabe die Wahrscheinlichkeit für einen späten Schwefelmangel erhöht.

Speziell Getreide:

Der Zeitpunkt des Ährenschiebens hat sich für eine Schwefelgabe als sinnvoll erwiesen. Durch diese Maßnahme wird die Bildung qualitätsbestimmender Proteine unterstützt. Vor allem auf Standorten mit Schwefelmangel fördert diese Maßnahme die Qualität. Dabei bildet die Blattdüngung (zum Beispiel mit Magnesiumsulfat oder Kaliumsulfat) eine Möglichkeit den Schwefel der Pflanze schnell zur Verfügung zu stellen und so gute Qualitäten zu erreichen.

Speziell Raps:

Auf leichten Standorten kann eine Schwefeldüngung im Herbst mit circa 20 – 30 kg S/ha sinnvoll sein. Dieser kann zum Beispiel mit der Kaliumdüngung oder PK-Düngung kombiniert ausgebracht werden. Die Hauptmenge sollte mit der ersten Stickstoffgabe im zeitigen Frühjahr gedüngt werden. Eine Aufteilung der Schwefeldüngung kann ohne Nachteile für den Ertrag erfolgen, wenn N-Dünger mit einem weiteren N:S Verhältnis verwendet werden.

Speziell Grünland:

Bei intensiv genutztem Grünland empfiehlt sich eine Aufteilung der Schwefeldüngung zu den ertragreichen ersten beiden Schnitten. Die Schwefelgabe sollte dabei zu Vegetationsbeginn in Form von Sulfat erfolgen, denn den Pflanzen steht zu dieser Zeit kein Sulfatschwefel zur Aufnahme zur Verfügung. Eine bedarfsgerechte Aufteilung der Schwefeldüngung zu den einzelnen Schnitten ist auch zur Vermeidung zu hoher Sulfatgehalte im Grundfutter sinnvoll. Zu den späteren Schnitten reicht die Nachlieferung des Schwefels aus organischer Düngung und Boden, da auch der Entzug der Folgeschnitte aufgrund niedriger Erträge geringer ist.

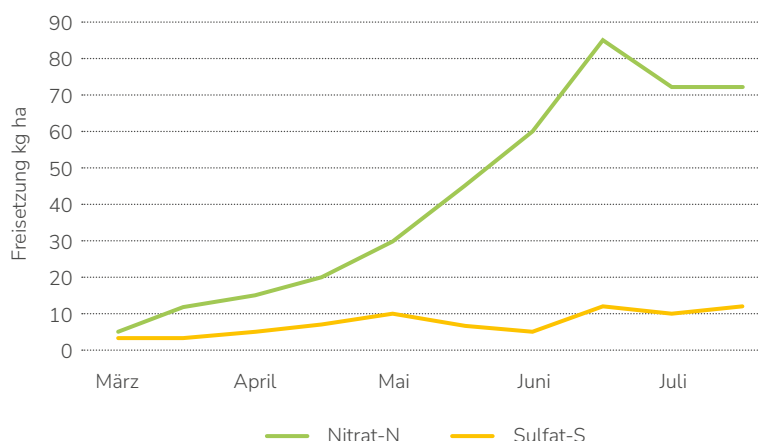
Termine der Schwefeldüngung

Die Schwefelversorgung der Kulturen muss über die gesamte Wachstumsperiode – auch bereits zu Beginn der Vegetation – sichergestellt sein. Die Schwefelaufnahme verläuft mit der Stickstoffaufnahme parallel.

Verfügbarer Schwefel aus dem Boden wird erst bei Erwärmung der Böden ab etwa Mitte bis Ende Mai freigesetzt, siehe Abbildung: Mineralisation von Stickstoff und Freisetzung von Sulfat-Schwefel. Deshalb können Kulturen mit frühem Wachstumsbeginn diesen Schwefel kaum nutzen. Hier muss die Schwefeldüngung bereits zu Vegetationsbeginn durchgeführt werden. Bei Raps kann bei Bedarf eine Gabe von 10 – 20 kg/ha im Herbst sinnvoll sein, insbesondere auf leichteren Standorten und nach Starkniederschlägen im Sommer/Frühherbst. Der optimale Düngezeitpunkt von Schwefel gleicht in etwa dem von Stickstoff, weshalb eine gemeinsame oder zeitgleiche Applikation häufig zu Vegetationsbeginn empfohlen wird.

Anders verhält es sich bei den Kulturen deren Hauptwachstum erst Ende Mai beginnt (zum Beispiel Zucker-/Futtermülsen, Kartoffeln und Mais). Abhängig von der Witterung können diese Pflanzen die Schwefel-Freisetzung aus dem Boden besser nutzen, so dass bereits geringere Düngermengen von 10 bis 15 kg/ha ausreichen. Bei einem kühlen Frühjahr kann auch im Mai nicht ausreichend mineralisierter Schwefel zur Verfügung stehen. Die ausschließliche Nutzung von mineralisiertem Schwefel kann zum Verlust organischer Substanz führen, wenn deren natürliche Mineralisation nicht ergänzt wird.

Mineralisation von Stickstoff und Freisetzung von Sulfat-Schwefel



Quelle: Darstellung nach Gutser u. v. Tucher 1999

Durchschnittlicher Nährstoffbedarf von Haupt- und Nebenprodukt landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Fruchtart	Ertrag (t/ha)	Nährstoffbedarf (kg/ha)				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S
Roggen	6,0	126	64	144	23	10
Qual.-Weizen	9,0	260	94	155	32	20
Wintergerste	8,0	160	81	143	24	12
Braugerste	6,5	113	66	96	20	9
Hafer	6,5	134	74	161	24	11
Körnermais	9,0	217	91	230	61	17
Triticale	7,0	148	75	149	27	11
Raps	4,0	182	98	205	39	40
Sonnenblumen	3,0	147	102	357	38	12
Spätkartoffel	40,0	156	59	269	22	10
Zuckerrübe	55,0	253	97	390	83	17
Futtermülsen	80,0	192	75	485	74	13
Silomais (28 % TS)	55,0	209	88	248	55	14
Grünland	10,0	276	95	324	43	40
Ackerbohne*	4,0	224	60	160	22	18
Erbse*	4,0	204	56	160	24	16

* N-fixierende Leguminose
Quelle: K+S KALI Taschenbuch 2019

Düngebedarf/Düngesysteme

Die Höhe der Schwefeldüngung

Die in der Tabelle angegebenen Werte dienen der Orientierung. Sie wurden auf Grundlage von Feldversuchen, Pflanzenuntersuchungen und Erfahrungen erstellt.

Diese Mengen entsprechen nicht immer dem Gesamtbedarf der Pflanzen. Bei Betrachtung der Tabellenwerte ist davon auszugehen, dass auch die bodenbürtigen Schwefelquellen zur Versorgung der Pflanzen mit beitragen. Auch ist zu prüfen, ob diese Werte bei Höchstserträgen ausreichend sind. Besonders bei den stark schwefelbedürftigen Kulturen Raps und Kohl. (siehe Kapitel: langfristige Schwefelversorgung prüfen)

Schließlich sollte man beachten, dass S ein preisgünstiger Nährstoff ist. Es lohnt nicht Ertragspotential aufgrund von Schwefel-Mangel nicht zu realisieren.

Höhe der Schwefelmengen variabel anpassen

Die Schwefelmengen in der Tabelle auf dieser Seite wurden in Spannen angegeben, in denen sich die Höhe der Schwefeldüngung bewegen sollte.

Die niederen Werte sind dann zu verwenden, wenn beste Wachstumsvoraussetzungen gegeben sind, noch kein Schwefelmangel beobachtet wurde, oder wenn regelmäßig mit organischer Düngung gearbeitet wird.

Die hohen Werte dann, wenn bereits Schwefelmangel festgestellt wurde, auf leichten Böden, wenn Auswaschungsverluste über Winter eingetreten sind die Bodenstruktur unzureichend ist und die Wachstumsbedingungen im Frühjahr schwierig zu beurteilen sind oder bei hohen Ertragserwartungen.

Langfristige Schwefelversorgung prüfen

Bei häufig auftretenden Mangelsymptomen und insbesondere bei stark schwefelbedürftigen Kulturen, kann eine Pflanzenanalyse Aufschluss über den tatsächlichen S-Bedarf geben. So kann bspw. bei Raps eine ergänzende S-Düngung während der Schossphase hohe Erträge absichern.

Schwefel-Vorratsdüngung

Da Sulfat im Boden ähnlich verlagert werden kann wie Nitratstickstoff, ist eine Vorratsdüngung nicht möglich. Die Schwefeldüngung sollte bereits zu Wachstumsbeginn, spätestens zur Hauptwachstumszeit gegeben werden.

Eine Vorratsdüngung mit elementarem Schwefel ist denkbar. Vor dem Hintergrund der nicht kontrollierbaren Mineralisation und der starken pH-Wertabsenkung aber nicht anzuraten.

Empfohlene Schwefelmengen und Düngezeitpunkt (nach VDLUFA- Standpunkt)

Fruchtart	Dünger- menge kg/ha S	Düngezeitpunkt
Getreide	10 – 20	Vegetationsbeginn, spätestens Schossen bei Weizen auch Spätgabe
Winterraps	20 – 40	Vegetationsbeginn
Zuckerrüben	10 – 20	Zur Saat
Kartoffeln	10 – 20	Zur Pflanzung
Mais	10 – 20	Zur Saat
Grünland	20 – 40	Vegetationsbeginn, oder zu jeder Gabe
Kohl	20 – 40	Vegetationsbeginn
Sonst. Gemüse	20 – 40	Vegetationsbeginn
Leguminosen	30 – 50	Vegetationsbeginn

Quellen: AULAKH et AL. 1985; HOBT & KEMMLER 1986; MURSON 1982; SCHNUG & HANEKLAUS 2001; VDLUFA 2012

Boden- / Blattdüngung

Bodendüngung

Bei hohen Schwefelmengen ist der Schwefel über den Boden auszubringen. Viele Dünger enthalten den Schwefel als Begleitnährstoff. Deshalb kann der Schwefel mit ohnehin durchzuführenden Düngemaßnahme ausgebracht werden. Zu empfehlen ist beispielsweise die kombinierte Ausbringung im Herbst mit Kalium- oder PK-Düngern, wenn eine Versorgung vor Winter beabsichtigt ist.

Ziel sollte es sein, die gewünschte, an den Pflanzenbedarf angepasste Schwefelmenge auszubringen, ohne Schwefelüberschuss zu produzieren. Beim Einsatz von Stickstoffdüngern mit hohem Schwefelgehalt sollte der Schwefel mit der ersten Gabe ausgebracht werden. Für die Nachdüngungsmaßnahmen sind schwefelfreie Dünger einzusetzen. Stickstoff-Schwefeldünger mit geringeren Schwefelgehalten können dagegen zu jeder Gabe eingesetzt werden.

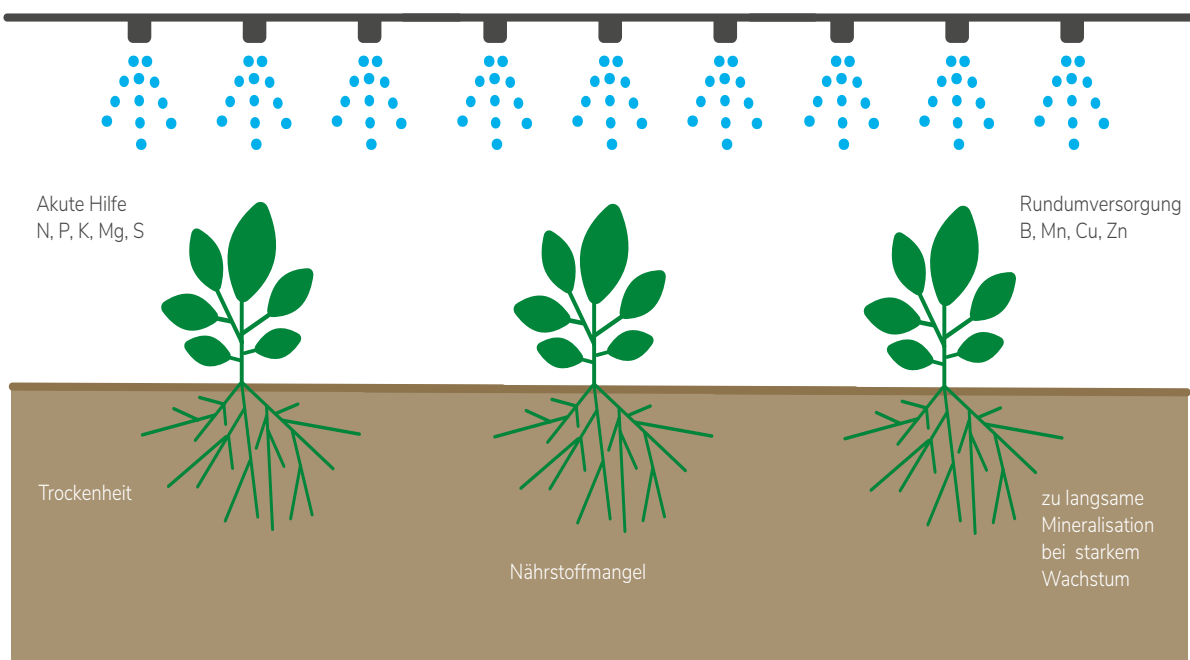
Blattdüngung

Blattdüngungsmaßnahmen haben den Vorteil der schnellen Wirkung bei akutem Schwefel-Mangel. Dies gilt allerdings nur für Düngemittel, die sulfatischen Schwefel enthalten. Auch über das Blatt wirkt elementarer Schwefel nur langsam, da er vor der Aufnahme erst zu Sulfat umgesetzt werden muss. (Siehe Abbildung in Kapitel Schwefel in der Pflanze.)

Blattdüngungsmaßnahmen sind geeignet, wenn Bedarfsspitzen abgedeckt werden sollen oder (latentem) Schwefelmangel vorgebeugt werden soll. Diese Maßnahmen können oft mit Pflanzenschutzmaßnahmen kombiniert werden. Dabei können aber nur geringe Schwefelmengen (je nach Konzentration im Spritzwasser) unter 10 kg/ha ausgebracht werden. Bei akut sichtbarem Schwefelmangel ist eine unverzügliche Blattdüngung als Notfallmaßnahme anzuraten.

Mit fortschreitender Bestandsentwicklung nimmt die Möglichkeit ab, Ertragsausfälle durch Schwefelmangel zu vermindern. Bei Raps ist die beste Wirkung der Blattapplikation zum Knospenstadium zu erwarten. Mit der Kombination von S und Mg kann eine Blattapplikation die Kornfüllung positiv beeinflussen. Bei Getreide ist dies bis Beginn Schossen möglich. Zur Kornfüllung kann positiv auf den Proteingehalt und die Proteinqualität eingewirkt werden.

Blattdüngung gleicht temporären Nährstoffmangel aus



Schwefelquellen und ihre Bedeutung

Schwefel ist Mangelware

Schwefel gelangt aus verschiedenen Quellen in die Wurzelzone des Bodens und trägt dort zur Versorgung der Pflanzen bei. Bedeutend waren in der Vergangenheit die Schwefeleinträge aus der Atmosphäre. Sie wurden über Niederschläge als „saurer Regen“ oder über Staub als sogenannte „trockene Deposition“ in die Böden eingetragen und entstammten im Wesentlichen Kohlekraftwerken, die bis in die 80er Jahre hinein noch nicht mit Rauchgasentschwefelungsanlagen ausgestattet waren.

Zusätzlich tragen auch andere Quellen wie beispielsweise die natürlichen Gehalte des Bodens zur Versorgung der Pflanzen bei.

Moderne Bewirtschaftungsmethoden und Veränderungen im Pflanzenbau bedingen eine angepasste Bewertung der natürlichen Schwefelquellen um Maßnahmen zur Sicherung der Schwefelversorgung zu treffen.

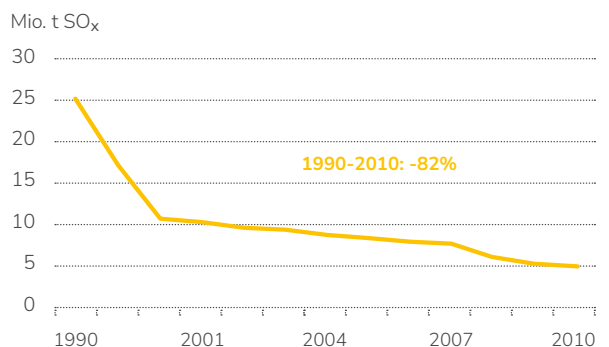
Schwefeleinträge aus der Atmosphäre

Es gibt die unterschiedlichsten Emittenten, die Schwefel in die Atmosphäre freisetzen.

Auf natürliche Art wird Schwefel durch die Aktivität von Vulkanen hauptsächlich als Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff freigesetzt. Aus einem kg Magma entweichen ca. 2 g SO_2 . So werden täglich mehrere hundert Tonnen Schwefel durch Vulkanismus freigesetzt. Der Schwefelkreislauf der Erde ist an deren Wasserkreislauf eng gekoppelt.

Weitaus mehr Schwefel gelangt über – menschliche Aktivitäten - wie beispielsweise die Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe in Feuerungsanlagen, aus Kraft – und Fernheizwerken der Energiewirtschaft, und aus Haushalten und Verkehr in die Luft. Schwefelhaltige fossile Brennstoffe gibt es heute als Braunkohle, Steinkohle und Erdöl. Erdgas enthält nur Spuren an Schwefel.

SO_x-Emissionen in Europa von 1990 bis 2010



Quelle: YARA

1980 betragen die SO_2 -Emissionen in Deutschland 7,5 Millionen Tonnen. Nach Berichten des Umwelt-Bundesamtes hat sich Deutschland im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention unter Federführung der Weltwirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (Economic Commission for Europe, UNECE) verpflichtet seine Schwefelemissionen zu senken. Bis 2010 sollten 550.000 Tonnen nicht mehr überschritten werden. Dieses Ziel wurde bereits

2003 erreicht und seitdem immer deutlich unterschritten. Zudem hat Deutschland zugesagt im Zuge der Novellierung des Protokolls die Schwefeldioxid-Emissionen um weitere 21 Prozent im Zeitraum 2005 bis 2020 zu senken. Erreicht wurde dies durch die Entschwefelung der Rauchgase, sowie die Senkung der Schwefelgehalte in Brenn- und Treibstoffen.

Erfolge dieser Maßnahme sind zu erkennen: Weniger Schäden an Gebäuden (Korrosion an Stahlbauten, Steinfraß an Gebäuden aus Stein), weniger Smog, Rückgang des Waldsterbens. Als Bioindikator für die Luftreinheit wird berichtet, dass im Ruhrgebiet Flechtenarten zugenommen haben – von zwei Arten im Jahre 1986 auf heute 34.

Für den Pflanzenbau bedeutet diese Entwicklung einen Rückgang der atmosphärischen Schwefeleinträge in der Fläche von ca. 100 kg S im Jahre 1980 auf ca. 7 kg S/ha in 2000 auf derzeit ca. 5 kg S/ha.

Die Schwefeleinträge sind regional unterschiedlich. Mehr Schwefel wurde in der Vergangenheit in industriellen Ballungsgebieten, weniger in industriefernen Regionen emittiert. Deshalb wurde Schwefelmangel auch zuerst auf Ackerflächen in industriefernen Standorten festgestellt.

Schwefel aus dem Boden

Der Gesamtschwefelgehalt der Böden beträgt 0,2 mg-50 g/kg Boden, abhängig vom Ausgangsgestein und der organischen Substanz (~5 g S/kg Humus). Im Mittel aller Böden kann von einem Gesamtschwefel von 4.500 kg/ha in der Ackerkrume ausgegangen werden. Dieser Gesamtschwefel ist zum größten Teil in organischen und anorganischen Verbindungen enthalten, aus denen der Schwefel nicht direkt pflanzenverfügbar ist. Der kleinste Teil liegt als pflanzenverfügbares Sulfat vor. Die jährliche Freisetzung von Schwefel beträgt 2-4 Prozent bezogen auf die Gesamtmenge an organisch gebundenen Schwefel im Boden. In 0-20 cm Boden (2.800 t/ha) sind 240-1.200 kg S/ha enthalten.

Durch Verwitterung und Mineralisation wird Schwefel zu Sulfat (SO_4^{2-}) mineralisiert und somit pflanzenverfügbar. Jährlich werden in der Vegetationszeit 2 bis 20 kg/ha aus dem Boden (0-20 cm) pflanzenverfügbar.

Änderung des Fungizideinsatzes

Zur Bekämpfung von Pilzbefall im Pflanzenbau waren schwefelhaltige Produkte die ersten bekannten Fungizide. Bereits im 19. Jahrhundert wurden Kupfersulfat, Schwefelkalkbrühe und auch elementarer Schwefel eingesetzt. Diese haben zur Versorgung der Pflanzen – auch indirekt über den Boden – mit Schwefel beigetragen.

Zwischen 1960 und 1980 folgten viele neue Verbindungsklassen für Fungizide ohne Schwefel. Somit entfiel diese Quelle für die Pflanzenversorgung.

Veränderung der Tierhaltung

Wirtschaftsdünger enthalten in Abhängigkeit des Düngers in unterschiedlichen Konzentrationen Schwefel und haben in den Betrieben in der Vergangenheit einen Beitrag zur Schwefelversorgung geleistet. Mit der zunehmenden Spezialisierung, das heißt Konzentration der Tierhaltung auf weniger Betriebe und Zunahme der Ackerbaubetriebe, entfällt auf vielen Flächen die Schwefelzufuhr über Wirtschaftsdünger.

Allgemeine Änderung in der pflanzlichen Produktion

Steigende Erträge in den letzten Jahrzehnten und der zunehmende Anteil schwefelbedürftiger Kulturen in den Fruchtfolgen haben einen höheren Schwefelbedarf zur Folge.

Alle natürlichen Schwefelquellen zusammen reichen heute nicht aus, um den Schwefel-Bedarf der Kulturen zu decken. Vor allem fehlen die Schwefeleinträge aus der Atmosphäre. Die Pflanzen bedienen sich vermehrt aus den Vorräten im Boden.

Aufgrund rückläufiger Immissionen und durch den Einsatz schwefelarmer Düngemittel versorgen sich die Pflanzenbestände überwiegend aus der Mineralisation organischer Bodensubstanz. Durch die Abfuhr mit dem Erntegut verbleibt weniger S mit den Ernterückständen im Feld. Damit wird bei der Umsetzung der Ernterückstände zu Humus auch weniger S in der organischen Bodensubstanz gespeichert – die Schwefel-Bodengehalte sind daher rückläufig.

Schwefeldüngemittel

Zu den Nährstoffformen

Schwefel ist in den Düngemitteln in Form von Sulfat, Thiosulfat oder als elementarer Schwefel enthalten. Nach diesen Nährstoffformen lässt sich die Wirkung der verschiedenen Produkte beurteilen.

Sulfat

Sulfat (SO_4^{2-}) gibt es in den verschiedensten Bindungsformen. In den Düngemitteln ist es als Ammonium-, Kalium-, Magnesium- oder als Calciumsulfat enthalten. Die Sulfate sind wasserlöslich und damit schnell pflanzenverfügbar.

Calciumsulfat (Gips) ist in verschiedenen N-haltigen Düngemitteln enthalten und wird auch Kalkdüngern zugemischt. Die Freisetzung von Schwefel daraus ist im Vergleich zu anderen Sulfatverbindungen verzögert und wirkt über einen längeren Zeitraum anhaltend. Hohe Gaben mit reinem Gips verlangen sehr gute Kenntnisse über Kationenaustauschprozesse im Boden.

Schwefelhaltige Flüssigdünger enthalten auch Sulfat in Form von Ammoniumsulfat oder als Ammoniumthiosulfat (ATS). Diese Sulfate sind in der Regel in Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) eingemischt. Deshalb ist der Stickstoffgehalt in diesen Produkten kleiner als in AHL. Der in ATS enthaltene Schwefel wird über Zwischenstufen auch recht schnell in die pflanzenverfügbare Sulfatform umgesetzt.

Beim Einsatz von Magnesium- oder Kaliumdüngern oder PK-Düngern mit Schwefel ist die Schwefeldüngung vom Stickstoff losgelöst. Dies empfiehlt sich bei der Anwendung reiner Stickstoffdünger oder beim Anbau von Leguminosen.

Nach Düngungsversuchen ist die Wirkung aller Sulfate vergleichbar, sofern die erforderliche Schwefelmenge rechtzeitig ausgebracht wird und Kationenantagonismen beachtet werden.

Elementarer Schwefel

Elementarer Schwefel wird entweder pulverisiert oder als Mikrogranulat (Netzschwefel), in Suspensionen oder als Schwefellinsen angeboten.

Als Netzschwefel oder in Suspensionen erfolgt die Applikation über die Pflanzenschutzspritze als Boden- oder Blattdüngung.

Bei den Schwefellinsen ist der Schwefel fein vermahlen und wird mit Bentonit vermischt zu Linsen verpresst. Schwefellinsen werden mit dem Düngerstreuer entweder als alleiniger Dünger oder in Düngermischungen ausgebracht.

Elementarer Schwefel wirkt – gleich ob über den Boden oder das Blatt gedüngt – erst, nachdem er zu Sulfat oxidiert ist. Diese Umsetzung geschieht über die Tätigkeit von schwefeloxidierenden Bakterien.

Die Geschwindigkeit der Umsetzung ist abhängig

- vom Vermahlungsgrad des Schwefels. Bei feiner Vermahlung geht die Umsetzung schneller.
- von der Bodentemperatur. Je höher die Bodentemperatur ist, umso aktiver sind die Bakterien.
- Von der Bodenfeuchte. In einem trockenen Boden finden die schwefeloxidierenden Bakterien keine guten Bedingungen.

Erfahrungsgemäß zieht sich dieser Vorgang bei den Bodentemperaturen im Frühjahr ($< 10\text{ °C}$) über Wochen hin.

Die Schwefelfreisetzung kann nicht kontrolliert werden. Die kurzfristige Behebung von Schwefelmangel mit elementarem Schwefel-Düngemitteln ist deshalb nicht möglich. Die Schwefelumwandlung in Sulfat kann auch nicht kalkuliert werden. Darüber hinaus wirkt die Umsetzung elementaren Schwefels stark versauernd auf den Boden-pH-Wert.

Eine mögliche Vorratsdüngung oder Herbstgabe für die kommende Vegetation sind nicht anzuraten. Schwefel kann zu Sulfat auch dann umgesetzt werden, wenn kein Schwefelbedarf vorhanden ist. Dieser Schwefel ist dann auswaschungsgefährdet. Andererseits kann in Phasen hohen Schwefel-Bedarfs nicht ausreichend pflanzenverfügbarer Schwefel durch die bakterielle Umsetzung zur Verfügung gestellt werden.

Auswahl schwefelhaltiger Mineraldünger

Dünger	Schwefel-Gehalt %	S Bindungsform	Weitere Nährstoffe	Name Handelsware
Ammoniumsulfat (schwefelsaures Ammoniak)	24	(NH ₄) ₂ SO ₄ Ammonsulfat	21 % N	SSA, AS, Domogran
Ammonsulfatsalpeter	13	(NH ₄) ₂ SO ₄ Ammonsulfat	26 % N	ASS 26, ENTEC 26
Ammoniumsulfat - Harnstoff	7,5 – 12	(NH ₄) ₂ SO ₄ Ammonsulfat	30 – 38 % N	Piammon 33 – S Yara Vera UREAS Yara Vera AMIDAS
Ammoniumnitrat mit S	6	(Ca)SO ₄ Calciumsulfat	24 % N	Nitrosulf 24+&s Entec Evo 24+6S
N-Düngerlösung mit S	3 – 6	(NH ₄) ₂ SO ₄ Ammonsulfat (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ Ammoniumthiosulfat	15 – 27 % N	PIASAN-S 25/6 PIASAN-G 20/8 ALZON flüssig-S 25/6 ALZON flüssig-G 20/8 NTS
Kaliumsulfat	18	K ₂ SO ₄ Kaliumsulfat	50 % K ₂ O	KALISOP
Patentkali	17	K ₂ SO ₄ , MgSO ₄ Kaliumsulfat Magnesiumsulfat	30 % K ₂ O, 10 % MgO	Patentkali
Polysulfat gran./ premium	18	K ₂ SO ₄ , MgSO ₄ CaSO ₄ Kaliumsulfat Magnesiumsulfat Calciumsulfat	13/14 % K ₂ O 5,6 % MgO	Polysulfat
Korn-Kali	5	MgSO ₄ Magnesiumsulfat	40 % K ₂ O 6 % MgO 3 % Na	Korn-Kali
PotashpluS 37	9	K ₂ SO ₄ , MgSO ₄ CaSO ₄ Kaliumsulfat Magnesiumsulfat Calciumsulfat	37 % K ₂ O 2,8 % MgO 3 % Na	PotashpluS
Magnesia Kainit	4	MgSO ₄ Magnesiumsulfat	11 % K ₂ O 5 % MgO 20 % Na	Magnesia Kainit
ESTA Kieserit	20	MgSO ₄ Magnesiumsulfat	25 % MgO	ESTA Kieserit
EPSO Top (bekannt als Bittersalz)	13	MgSO ₄ Magnesiumsulfat	16 % MgO	EPSO Top
Elementarer Schwefel	60 – 98	S Elementform		Schwefellinsen, Suspensionen, Pulver
Superphosphat	12	(Ca)SO ₄ , Gips, Calciumsulfat	18 % P ₂ O ₅	
PKpluS - Sorten	6-10	K ₂ SO ₄ , MgSO ₄ , CaSO ₄ ,	7 – 18 % P ₂ O ₅ 7 – 25 % K ₂ O	
Div NPK mit S	2 – 12	(NH ₄) ₂ SO ₄ Ammonsulfat		Nitrophoska NPK, Entec NPK, Blaukorn, NovaTec, Hakaphos, Floranid
Kalkdünger mit S	≥ 2	(Ca)SO ₄ , Gips, Calciumsulfat	≥ 80 % CaO	Kohlensaurer Kalk mit S Magnesiumkalk mit S

*) Die ausgebrachte Schwefel-Menge bezieht sich auf 100 kg Nährstoff/ha bei Stickstoffdüngern, Kaliumdüngern und Phosphatdüngern 30 kg/ha MgO bei Magnesiumdüngern

**) Bei flüssigen Produkten bezieht sich die angegebene Schwefel-Menge auf das Gewicht (kg). Bei Berechnung des Gehaltes in Volumen (l) ist das spezifische Gewicht zu berücksichtigen.

Mineraldünger

Es stehen eine Vielzahl von Düngemitteln mit Schwefel zu Verfügung. Der Schwefel ist entweder produktionsbedingt enthalten oder er wird gezielt zugesetzt. In der Tabelle sind die wichtigsten Dünger aufgelistet.

Die Düngemittel unterscheiden sich hinsichtlich:

- Form der Schwefelbindung, bewirkt Unterschiede hinsichtlich der Wirksamkeit.
- Gehalt an Schwefel, wirkt sich auf die Höhe der Ausbringmenge aus.
- Kopplung von Schwefel mit anderen Nährstoffen im Dünger. Diese Information ist notwendig zur Bestimmung des Ausbringzeitpunktes und Nährstoffmengen.

Schwefeldünger als Abfallprodukt aus industriellen Prozessen

Weitgehend aus Neutralisationsprozessen entstehen bei Produktionsverfahren der Industrie als Abfall- oder als Nebenprodukt schwefelhaltige Verbindungen, die der Landwirtschaft als Schwefeldünger angeboten werden (Gips).

Bekannt sind Ammoniumsulfat-Lösungen (ASL-Lösung) mit einem üblichen Nährstoffgehalt von 8 Prozent Stickstoff und 9 Prozent Schwefel oder auch Produkte aus der Rauchgas Entschwefelung. Diese Produkte dürfen in der Landwirtschaft eingesetzt werden, wenn die Bestimmungen des Düngemittelrechts eingehalten werden.

Einfluss der Schwefeldünger auf die Bodenreaktion

Schwefel beziehungsweise seine Umwandlung im Boden zum Sulfat (aufoxydierter Schwefel) wirkt kalkzehrend und somit senkend auf den pH-Wert des Bodens. Dies gilt insbesondere für elementaren Schwefel, da die schwefeloxidierenden Bakterien im Boden bei der Umsetzung Schwefelsäure bilden. Dieser Effekt kann auf Böden mit sehr hohen pH-Werten (zum Beispiel Kalkböden) gezielt zur pH-Absenkung genutzt werden. In Abhängigkeit von begleitend gedüngten Nährstoffen, kann dieser Effekt jedoch ganz unterschiedlich ausgeprägt oder teilweise kaum vorhanden sein. S-haltige Dünger sind daher hinsichtlich ihres Kalkverbrauchs durchaus unterschiedlich zu bewerten. Die Gleichung nach Sluijsman gibt eine Kalkzehrung von 1,743 kg CaO pro 1 kg S an.

So ist der Kalkverbrauch von elementarem Schwefel dreimal höher zu bewerten als von Schwefel aus ammonium-haltigen Stickstoffdüngern. Darüber hinaus können Nebenbestandteile in den einzelnen Düngemitteln sogar zur Neutralisation beitragen. So ist beispielsweise Gips als pH-neutral einzuordnen und es kann zu bedürftigen Kulturen schnell wirksamer Schwefel und gleichzeitig strukturwirksame Calcium-Ionen ausgebracht werden.

Schwefelgehalte in organischen Düngern

Dünger	Schwefel-Gehalt (kg/t bzw. kg/m ³)	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
Erntereste	< 2,5		
Öl- Eiweißpflanzen	< 5,0		

(versch. Quellen: DLG Merkblatt und VDLUFA – Standpunkt)

Schwefeldüngung aus organischen Quellen

Wirtschaftsdünger und auch Sekundär-Rohstoffdünger tragen aufgrund ihres natürlichen Schwefelgehaltes zur Schwefelversorgung der Kulturen bei.

Die Schwefelgehalte in den verschiedenen organischen Düngern sind großen Schwankungen unterworfen. Erfahrungsgemäß entspricht der Schwefelgehalt in organischen Düngern ausgehend vom Schwefel – Stickstoffverhältnis in der organischen Masse circa 7-10 Prozent des Gesamt N-Gehaltes. (Ähnlich, wie man es auch in der Blattanalyse findet. Siehe Kapitel: Schwefel in der Pflanze.)

Bei Wirtschaftsdüngern hängt dies – wie auch der Stickstoffgehalt – von der Tierart, der Qualität des Futters sowie der Lagerung ab (Verluste in Form von Schwefelwasserstoff). Individuelle Nährstoffuntersuchungen sind daher unbedingt angeraten. Einen beispielhaften Überblick bietet die Tabelle „Schwefelgehalte in organischen Düngern“.

Wichtiger als der absolute Gehalt ist die Wirksamkeit des Schwefels in organischen Düngern. In Gefäßversuchen konnte festgestellt werden, dass von der ausgebrachten Schwefelmenge im Anwendungsjahr nur 5 – 7 Prozent ausgenutzt werden. (Quelle: VDLUFA-Standpunkt.)

Der Grund dafür ist, dass der überwiegende Teil des Schwefels organisch gebunden ist. Um pflanzenverfügbar zu werden muss dieser Schwefel über Mineralisierungsprozesse in Sulfat-Schwefel überführt werden.

Der Gehalt an direkt wirksamen Sulfat-Schwefel ist gering. Er liegt bei meist unter 10 – 20 Prozent des Gesamt Schwefel-Gehaltes.

Mittel- bis langfristig kann allerdings bei regelmäßigem Einsatz organischer Dünger der Gesamt-Schwefelgehalt im Boden angehoben werden. Auf solchen Flächen kann von einer nennenswerten Schwefel-Nachlieferung und einem signifikanten Beitrag zur Schwefel-Versorgung aus dem Boden-Humus gerechnet werden.

Zuverlässige Methoden, die eine Kalkulation der Schwefelfreisetzung aus dem Bodenhumus zulassen, gibt es nicht, da die Mineralisation von den Witterungsbedingungen (Bodentemperatur und Feuchte) abhängt.

Beim Einsatz organischer Dünger ist auf eine ausreichende Schwefelversorgung der Kulturen zu achten:

- Nicht immer gibt es eine Übereinstimmung des akuten Schwefelbedarfs der Kultur mit der aktuellen S-Mineralisation. Besonders Wintergetreide und Winterraps benötigen bereits im zeitigen Frühjahr relativ hohe Schwefelmengen, die in der Regel aus den organischen Bodenvorräten zu diesem Zeitpunkt noch nicht freigesetzt werden.
- Anders verhält es sich bei Kulturen mit später Saat und langer Vegetationszeit wie beispielsweise Zuckerrüben oder Mais. Die Schwefelfreisetzung aus dem Boden beginnt ab Mai, bei hohen Bodentemperaturen. So können diese Kulturen den bodenbürtigen Schwefel besser verwerten.
- Die ausgebrachte Schwefelmenge über Wirtschaftsdünger ist gering und reicht zur Versorgung der Kulturen nicht aus.
- Beispiel: 10 m³ Gülle enthalten ca. 5 kg Schwefel. Davon sind möglicherweise 20 Prozent, d.h. 1 kg direkt pflanzenverfügbar. Bei einer Güllemenge von 25 m³/ha wären dies ca. 12,5 kg/ha S wobei nur 2,5 kg Schwefel als Sulfat direkt nutzbar wären.



Aufwuchs von Luzerne-Klee grasgemenge vor dem ersten Schnitt (links ungedüngt, rechts mit Schwefel gedüngt). Gladenbacherhof (Bild: S. Fischinger, Bioland)

Schwefeldüngung im ökologischen Landbau

Der Gründervater des organisch biologischen Landbaus Hans-Peter Rusch weist bereits sehr früh (1968) darauf hin, dass Nährstoffexporte aus dem Boden auszugleichen sind.

Jetzt wird festgestellt, dass auf ökologisch bewirtschafteten Flächen die Nährstoffgehalte der Böden, und mit ihnen auch die Erträge, abnehmen. (Quelle: Zeitschrift Bioland).

Landwirte beobachten seit einigen Jahren sinkende Erträge vor allem bei Leguminosen. Besonders relevant ist die Situation im Klee gras-Anbau. Düngeweniger auf Betriebsflächen zeigen regelmäßig, dass alleine Schwefel- und auch Kalkgaben den Klee gras-ertrag und damit die N_2 -Fixierung der Leguminosen verbessern. Diese Beobachtungen wurden am Lehrstuhl für organischen Landbau der Justus-Liebig-Universität Gießen aufgegriffen.

Aus den Forschungsarbeiten geht hervor, dass

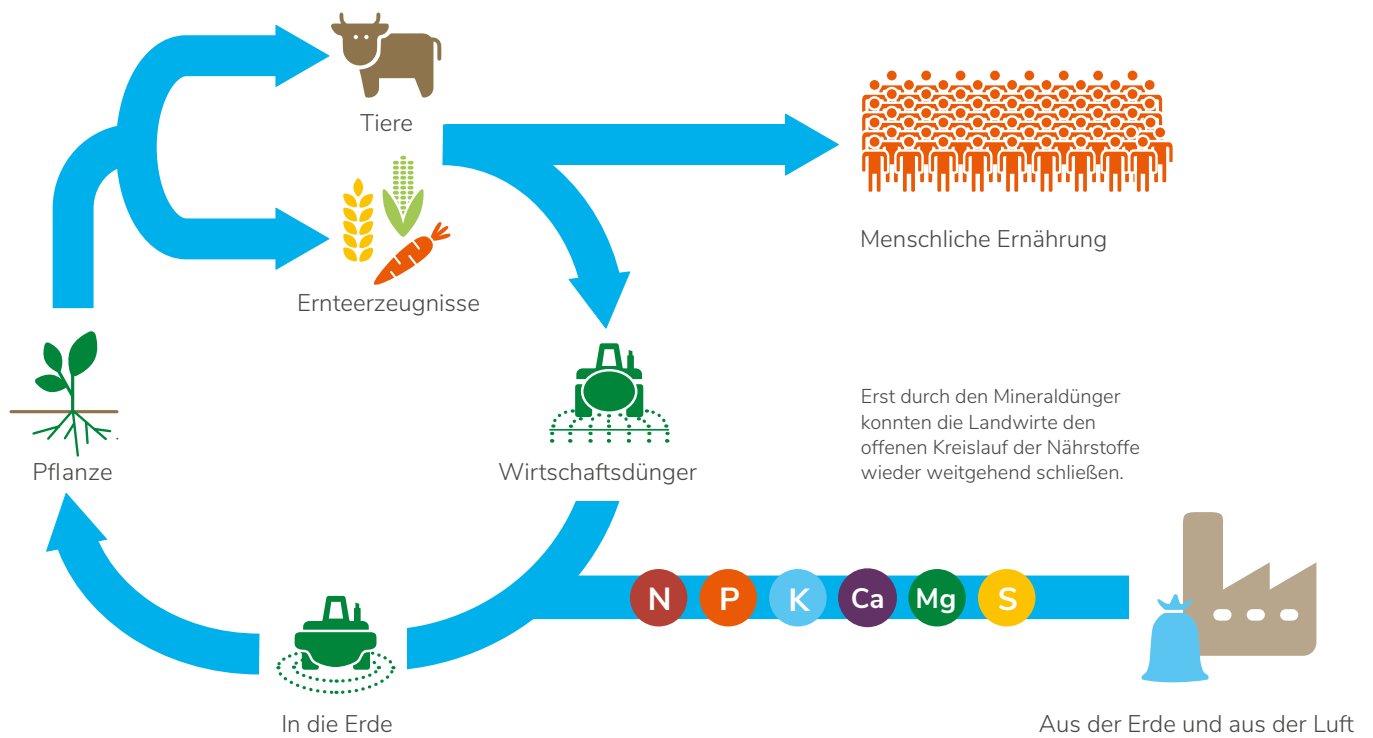
- bei geringer Schwefelverfügbarkeit im Boden die Schwefeldüngung die Qualität von Futterleguminosen verbessert.
- die Schwefeldüngung zu einer Verbesserung der Fixierleistung von Stickstoff führt.
- die Schwefeldüngung zu Leguminosen auch zu einer Ertragserhöhung der Nachfrucht führt.
- bei Körnerleguminosen nur geringe Ertragseffekte der Schwefeldüngung festgestellt wurden.

Die Höhe der Schwefeldüngung variiert in Abhängigkeit vom Leguminosenanteil. Zu Klee als alleinige Leguminose werden 50 kg/ha Schwefel empfohlen. Gedüngt werden sollte im Frühjahr zu Vegetationsbeginn mit Gips, Polysulfat oder Kieserit. Auch elementarer Schwefel ist möglich. Im Frühjahr ausgebracht wirkt er erst ab dem dritten Schnitt.

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit ist eine Nutzung von organischen Düngemitteln in landwirtschaftlichen Betrieben sinnvoll und richtig. Der Einsatz von mineralischem Schwefel bietet hervorragende Ergänzungsmöglichkeiten sowie eine Reihe von Vorteilen:

- präzise und einheitliche Nährstoffkonzentration
- genaue Verteilung der Nährstoffe auf dem Feld bei großer Arbeitsbreite
- geringe Ausbringungskosten
- hohe Nährstoffkonzentration und damit geringer Transport- und Lagerraum
- gezielte Ausrichtung der Nährstoffmenge auf den Nährstoffbedarf des Bodens und der Pflanzen. Über mineralische Düngung lässt sich die S-Versorgung genau anpassen.

Der Kreislauf der Nährstoffe





Rahmen- bedingungen der Schwefel- düngung

Aktuelles zur Deklaration des Schwefels nach dem Düngemittelrecht

Das EG Düngemittelrecht gestattet es den Schwefel entweder in Elementform (S) oder als Oxid in Form von Schwefeltrioxid (SO_3) zu deklarieren.

Die Empfehlungen zur Schwefeldüngung werden in der Elementform angegeben. Um anwendungstechnische Fehler zu vermeiden ist, zur Bewertung des betreffenden Düngemittels auf die entsprechende Deklarationsform zu achten! Falls in SO_3 -Form deklariert wird, ist der angegebene Wert mit dem Faktor 0,4 zu multiplizieren um den Wert der Elementform zu erhalten.

Beispiel Korn-Kali: Es werden 12,5 Prozent SO_3 wasserlösliches Schwefeltrioxid deklariert. Mit 0,4 verrechnet ergibt sich ein Wert von 5 Prozent Schwefel.

Bei der Auswahl des Düngemittels ist es wichtig, auf die Löslichkeitsangabe bei der Schwefel-Kennzeichnung zu achten! Sofern der wasserlösliche Schwefel-Anteil mehr als 25 Prozent des Gesamtgehalts beträgt, wird er zusätzlich ausgewiesen. Bei vollständig wasserlöslichem Schwefel wird nur der wasserlösliche Schwefel-Gehalt ausgewiesen.

Düngeverordnung

Nach Vorgaben der aktuell geltenden Düngeverordnung (26.5.2017 mit Novellierung vom 28.4.2020) sollen die Nährstoffüberschüsse in den Bilanzen so gering als möglich gehalten werden.

Wichtig ist es als erstes, die Pflanzen in jeder Wachstumsphase mit allen Nährstoffen in ausreichender Menge zu versorgen, das heißt eine ausgewogene Düngung. Schwefel ist dabei besonders zu beachten, weil Stickstoff und Schwefel in einem festen Verhältnis in der Pflanze zusammenwirken. Die Nährstoffaufnahme beider Nährstoffe verläuft zeitgleich.

Die angepasste Schwefeldüngung ermöglicht die volle Ausschöpfung des Ertragspotentials der Pflanzen bei gleichzeitig hohem Gehalt an hochwertigen Proteinen. Folglich wird auch die N-Ausnutzung optimiert und das N-Saldo zwischen gedüngtem und mit dem Erntegut abgefahrenen Stickstoff minimiert.



Die Auswertung eines Düngeversuches mit Stickstoff und Schwefel zeigt dies beispielhaft. In diesem Versuch brachte die zusätzliche Schwefeldüngung einen Mehrertrag von 4,3 dt /ha und eine Verbesserung des Proteingehaltes von 0,4 Prozent. Dies hat Bedeutung für die Stickstoffausnutzung: Die zusätzliche Schwefeldüngung verbesserte das N- Saldo um 13 kg/ha N.

Schwefeldüngung unter Umweltgesichtspunkten

Sulfat im Trinkwasser

Hohe Sulfatmengen im Trinkwasser sind unerwünscht. Die Trinkwasserverordnung Deutschlands (Deutsche Trinkwasserverordnung zuletzt geändert am 03.01.2018) gibt einen Grenzwert von 250 mg SO_4^{2-} /l Trinkwasser vor. Das entspricht 83,5 mg S/l. Dieser Grenzwert wird erreicht, wenn bei einer Grundwasserneubildung von 100 mm beziehungsweise 1.000.000 l/ha 83,5 kg/ha S ausgewaschen werden. Bei 50 mm Grundwasserneubildung wird dieser Wert bereits bei 41,75 kg/ha erreicht. Auch können erhöhte Schwefelmengen durch alternative Düngemittel wie ASL (Ammoniumsulfatlösung) und ATS (Ammoniumthiosulfat) dazu

führen, dass übermäßig hohe Schwefelmengen wiederholt in den Boden eingebracht werden. Bei einer Stickstoffdüngung für einen Weizen von 160 kg N/ha wird auf diese Weise oftmals ebenso viel Schwefel oder gar mehr ausgebracht. Solch eine Überversorgung sollte auch aus Gründen des Trinkwasserschutzes vermieden werden.

Schwefel im Grundwasser

Schwefel im Grundwasser kann zur Versorgung der Pflanzen beitragen. Im Frühjahr findet dies bei hohen Grundwasserständen statt (trifft für Grünlandstandorte zu). Im Laufe der Vegetation führt kapillarer Wasseranstieg aus dem Unterboden zu einer Anreicherung des Sulfatgehaltes im Wurzelbereich. Dies ist auf tiefgründigen Böden zu beobachten.

Jüngste wissenschaftliche Erkenntnisse stellen den Zusammenhang zwischen Nitratabbauprozessen im Boden mit gemessenen Gehalten an Sulfat im Grundwasser her. Nitrate werden in tiefen Bodenschichten zu molekularem Stickstoff (N_2) reduziert.

Quellen

DLG-Merkblatt 373 (2012),
Schwefeldüngung effizient gestalten

Sluijsmans (1969),
Der Einfluss von Düngemitteln auf den Kalkzustand
des Bodens

VDLUFA-Standpunkt (2000), Schwefelversorgung
von Kulturpflanzen – Bedarfsprognose und Düngung
In Zusammenarbeit mit dem Bundesarbeitskreis Dün-
gung (BAD) und den IVA-Mitgliedsunternehmen

Weitere Informationen
finden Sie unter

www.iva.de

Herausgeber: Industrieverband Agrar e. V. (IVA) · Mainzer Landstraße 55 · 60329 Frankfurt am Main ·
Tel.: +49 69 2556-1281 · Fax: +49 69 2556-1298 · E-Mail: service.iva@vci.de · www.iva.de

Redaktion: Dr. Thorsten Scheile und Johannes Monath,
Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) · Mainzer Landstraße 55 · 60329 Frankfurt am Main

Layout: Seippel & Weihe Kommunikationsberatung GmbH, Offenbach am Main, www.markenaktivisten.com

Bildnachweis: AdobeStock: Titel, 2, 4, 5, 6, 11, 16, 20, 24, 32, IVA: 14, 15 21, 23, 31, EuroChem: 9, Yara: 10, 12, 24,
Seling: 10 S. Fischinger Bioland: 30

Redaktionsschluss: März 2024 · Abdruck honorarfrei, Beleg erbeten