Pflanzenbauwissenschaften, 4 (1), S. 42–51, 2000, ISSN 1431-8857, © Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

Einfluß der Schwefelversorgung auf Ertrag und Inhaltsstoffe von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.)

Effects of Sulphur Nutrition on Yield and Chemical Composition of Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.)

F. Taube & Ute Jahns, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Kiel
R. Wulfes, Fachbereich Landbau, Fachhochschule Kiel
K.-H. Südekum, Institut für Tierernährung und Stoffwechselphysiologie, Universität Kiel

Herrn Prof. em. Dr. A. Kornher zum 70. Geburtstag gewidmet

Zusammenfassung

In einem dreijährigen Feldversuch wurde an einem Bestand von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.) bei viermaliger Schnittnutzung die Wirkung einer Schwefeldüngung (0 oder 50 kg S ha^{-1} Jahr^{-1}) auf Ertrag und Inhaltsstoffe in Abhängigkeit vom Stickstoffdüngungsniveau (200 oder 400 kg N ha^{-1} Jahr^{-1}) geprüft. Während bei moderater N-Düngung (200 kg) keine signifikanten Ertragseffekte einer S-Düngung zu verzeichnen waren, führte diese bei hoher N-Intensität (400 kg N) über alle Versuchsjahre zu einem gesicherten Ertragsanstieg. Allein 70% des Ertragsanstieges entfielen auf den zweiten Aufwuchs. Weitere Auswirkungen einer S-Düngung zeigten sich in einer Zunahme von N- und S-Ertrag, S- und Rohfasergehalt sowie einer leichten Abnahme im Rohproteingehalt. Schwefeldüngungsbedingte Veränderungen im Stickstoffhaushalt der Pflanze wurden charakterisiert durch ein verändertes Aminosäuremuster im Rohprotein, einen erhöhten Anteil an Reinprotein zu Lasten von Nicht-Protein-Stickstoff-Verbindungen und geringere Nitratgehalte im Gras. Auswirkungen der S-Düngung auf den Selengehalt konnten nicht festgestellt werden.

Schlüsselworte: Deutsches Weidelgras, Schwefel, Stickstoff, Ertrag, Chemische Zusammensetzung

Summary

This study was conducted to evaluate the effects on dry matter (DM) yield and chemical composition of sulphur fertilization (0 or 50 kg S ha^{-1} year^{-1}) of a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) sward cut four times per year as related to nitrogen fertilizer level (200 or 400 kg N ha^{-1} year^{-1}). Sulphur fertilization had no effect on DM yield when 200 kg N were applied, whereas DM yield increased significantly at 400 kg N ha^{-1} year^{-1}. Dry matter yield response varied among growths and 70% of the increase in DM yield could be attributed to the first regrowth. Other effects of sulphur fertilization were increased yields of nitrogen and sulphur and higher concentrations of sulphur and crude fibre and lower concentrations of crude protein in the grass. Sulphur fertilization also affected the amino acid pattern of the crude protein of the grass and increased the proportion of true protein at the expense of non-protein-nitrogen components and lowered the nitrate concentration. Sulphur fertilization had no effect on the selenium contents of the grass.

Keywords: perennial ryegrass, sulphur, nitrogen, yield, chemical composition

Einleitung

Schwefel (S) ist ein essentielles Mengenelement für pflanzliche und tierische Organismen. Damit kommt der adäquaten S-Versorgung von Futterpflanzenbeständen sowohl im Hinblick auf die Ansprüche der Pflanzenbestände als auch im Hinblick auf die Ansprüche der Nutztiere eine große Bedeutung zu. Die Reduktion der S-Emissionen aus industriellen Anlagen und die verminderten Applikationsmengen von S-haltigen Düngemitteln haben in den letzten zwei Jahrzehnten zu einer nachhaltigen Reduktion der externen S-Zufuhr in Agrarökosysteme geführt. Entsprechend wurden zunächst für Kulturarten mit hohem S-Bedarf wie Raps Defizite in der S-Versorgung identifiziert (SCHNUG & PISSAREK 1982). Doch auch für Futtergrasbestände wurden seit Mitte der 80er Jahre insbesondere in Nordwesteuropa positive Schwefeldüngungseffekte auf Ertrag und Inhaltsstoffe publiziert (SCOTT et al. 1983, KLESSA et al. 1989). Neuere Untersuchungen weisen zudem darauf hin, daß neben den N- und S-Gehalten sowohl die Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten als auch die Verdaulichkeit der organischen Masse von Futtergräsern maßgeblich durch den S-Status der Pflanzen beeinflußt werden (CHIY & PHILLIPS 1998). Die meisten publizierten Ergebnisse über positive Wirkungen einer S-Düngung auf Ertrag und Inhaltsstoffe von Futtergrasbeständen wurden unter Schnittnutzung und hoher N-Versorgung erzielt.

Ziel des vorliegenden Versuchs war die Analyse der Wirkungen einer S-Düngung bei unterschiedlichen N-Düngungsniveaus im Hinblick auf den Trockenmasse-(TM)-Ertrag und die chemische Zusammensetzung der TM. Letztere schließt für ausgewählte Varianten unter Berücksichtigung der Diskussionen über die Rohproteinqualität in Abhängigkeit von der S-Versorgung (MILLARD et al. 1985) die Analyse der Aminosäurenzusammensetzung, des Anteiles an in heißem Wasser unlöslichem Rohprotein

am Gesamt-Rohprotein als Schätzgröße für den Reinprotein-Gehalt von Grünfutter und des Nitratgehaltes ein, um hinsichtlich der Implikationen für die Wiederkäuerernährung eine Datengrundlage zu erstellen.

Material und Methoden

Standort und Versuchsanlage

Die Untersuchungen wurden auf dem Versuchsfeld Ostenfeld der Fachhochschule Kiel, 35 m über NN, durchgeführt. Der Boden ist als pseudovergleyte Parabraunerde mit einem pH-Wert von 5,8 anzusprechen, die Bodenart als lehmiger Sand (Ackerzahl: 40). Der Humusgehalt des Bodens beträgt 3,3%. Zu Versuchsbeginn betrug der S-Gehalt im Boden (0–30 cm) 147 mg kg^{-1} (gemessen als Bariumsulfat; SIEGEL 1976). Die langjährigen Mittel für Temperatur und Niederschlag betragen 7,8 °C bzw. 716 mm. Die Witterungsdaten des Versuchszeitraumes sind in Tab. 1 aufgeführt. Alle drei Jahre boten gute Wachstumsbedingungen, da gegenüber dem langjährigen Mittel sowohl höhere Durchschnittstemperaturen als auch erhöhte Jahresniederschlagsmengen zu verzeichnen waren. Jedoch führte die ungleichmäßige Niederschlagsverteilung über die Vegetationsperiode, verbunden mit hohen Temperaturen, im Jahr 1994 zu einer ausgeprägten Sommertrockenheit, wodurch es zu Ertragseinbußen kam.

Im August 1992 wurde Deutsches Weidelgras, Sorte Gremie, in Blanksaat nach zweijährigem Ackergrasanbau mit einer Saatmenge von 28 kg ha^{-1} ausgesät. Der Einfluß von N- und S-Düngung wurde mittels einer Blockanlage in vierfacher Wiederholung geprüft. Tab. 2 zeigt die Faktoren und Stufen der Versuchsanlage. Die Parzellengröße der Ernteparzellen betrug 9 m^2 (6 m × 1,5 m). Die Ernte erfolgte mit einem Futterpflanzenvollernter (Heege, Waldbruch). Die Bestände wurden viermal jährlich genutzt, wobei der 1. Schnitt im Stadium „Siloreife“ (50% geschobene Ähren) erfolgte und die Folgeschnitte jeweils etwa 6 Wochen später. Alle Varianten erhielten einheitlich 300 kg ha^{-1} K_2O (Kaliumchlorid) und 50 kg ha^{-1} P_2O_5 (Triple-Phosphat) pro Jahr. Die N- und S-Düngung erfolgte in Form von Kalkammonsalpeter für die S0-Varianten beziehungsweise in Form von Kalkammonsalpeter + S (24/6) für die S50-Varianten in aliquoten Mengen zu den vier Aufwüchsen.

Tab. 1: Jahresdurchschnittstemperaturen und Niederschlagsmengen der Versuchsjahre 1993–1995 und im langjährigen Mittel

Mean annual temperature and annual rainfall of experimental years 1993–1995 and long-term averages of temperature and rainfall

Variable	1993	1994	1995	langjähriges Mittel
Temperatur (°C)	8,2	9,4	8,8	7,8
Niederschlag (mm) Jahressumme	938	1013	781	716
Niederschlag (mm) Vegetationsperiode[1)]	462	488	422	

[1)] 1. März bis 31.Oktober.

Tab. 2: Faktoren und Stufen der Versuchsanlage

Factors and levels of factors of the experimental design

Faktor	Stufe	
1 Stickstoff-Düngung (kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$)	1.1	200 (4 × 50)
	1.2	400 (4 × 100)
2 Schwefel-Düngung (kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$)	2.1	0
	2.2	50 (4 × 12,5)
3 Hauptnutzungsjahr	3.1	1. Hauptnutzungsjahr (1993)
	3.2	2. Hauptnutzungsjahr (1994)
	3.3	3. Hauptnutzungsjahr (1995)

Probenahme und Untersuchungen

Jeweils zu den Ernteterminen wurden Teilproben direkt aus dem Häckselgutstrom des Futterpflanzenvollernters entnommen, 18 Stunden bei 65 °C getrocknet, mit einer Labormühle (Tecator, Rodgau; 1-mm Sieb) vermahlen und anschließend auf die chemische Zusammensetzung untersucht. Einige aufwendige Analysen wurden nur an einem begrenzten Material durchgeführt, um insbesondere spezielle Effekte von S-Mangelvarianten aufzuzeigen. Eine zusammenfassende Darstellung der durchgeführten Analysen und verwendeten Methoden ist in Tab. 3 enthalten.

Statistische Auswertung

Die Versuchsdaten wurden mittels dreifaktorieller Varianzanalyse einschließlich Zwei- und Dreifachwechselwirkungen statistisch ausgewertet (SAS 1988). Die Varianzen wurden mit dem F-Test und die Differenzen der Mittelwerte mit dem Tukey-Test auf Signifikanz geprüft (Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).

Da die Wirkung der Faktoren S-Düngung und N-Düngung in erheblichem Maß durch die Jahreswitterung beeinflußt werden kann, wurde zunächst geprüft, ob die Daten für die drei Versuchsjahre gemittelt werden können oder ob Wechselwirkungen zwischen Jahr und N-Düngung (NDG), Jahr und S-Düngung (SDG) bzw. Jahr × NDG × SDG eine jahresspezifische Betrachtung der Ergebnisse notwendig machen. Tab. 4 gibt die Varianzursachen und Signifikanzniveaus für die geprüften Ertrags- und Qualitätsmerkmale wieder. Für nahezu alle geprüften Merkmale gilt, daß keine signifikanten Wechselwirkungen für Jahr × NDG, Jahr × SDG und Jahr × NDG × SDG bestanden. Lediglich die S-Gehalte reagierten in Abhängigkeit von der S-Düngung in den Jahren unterschiedlich und zwar in der Weise, daß mit zunehmender Versuchsdauer die mittleren S-Gehalte gesichert zurückgingen. Alle anderen Variablen reagierten in den drei Versuchsjahren gleichgerichtet, so daß in den folgenden Ausführungen die Ergebnisse im Mittel der Versuchsjahre dargestellt und diskutiert werden. Das Versuchsjahr hatte jedoch, bedingt durch unterschiedliche Mengen an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, einen Einfluß auf das Ertragsniveau. Während 1993 und 1995 mit durchschnittlich 100 beziehungsweise 103 dt ha^{-1} TM nahezu identische Erträge ermittelt wurden, verursachte die ausgeprägte Sommertrockenheit im Jahre 1994 niedrigere Erträge (88 dt ha^{-1} im Durchschnitt aller Varianten).

Ergebnisse

Jahreserträge und Gehalte an Inhaltsstoffen

Abb. 1 zeigt den Einfluß der Faktoren N- und S-Düngung sowie ihrer Wechselwirkungen auf die Jahreserträge an TM, N und S, auf die durchschnittlichen Rohprotein-, S- und Rohfaser-Gehalte sowie auf das N:S-Verhältnis in Deutschem Weidelgras. Der Faktor N-Düngung verursachte gesicherte Wirkungen auf alle geprüften Merkmale, wobei die Ertragswirkung der N-Steigerung von 200 auf

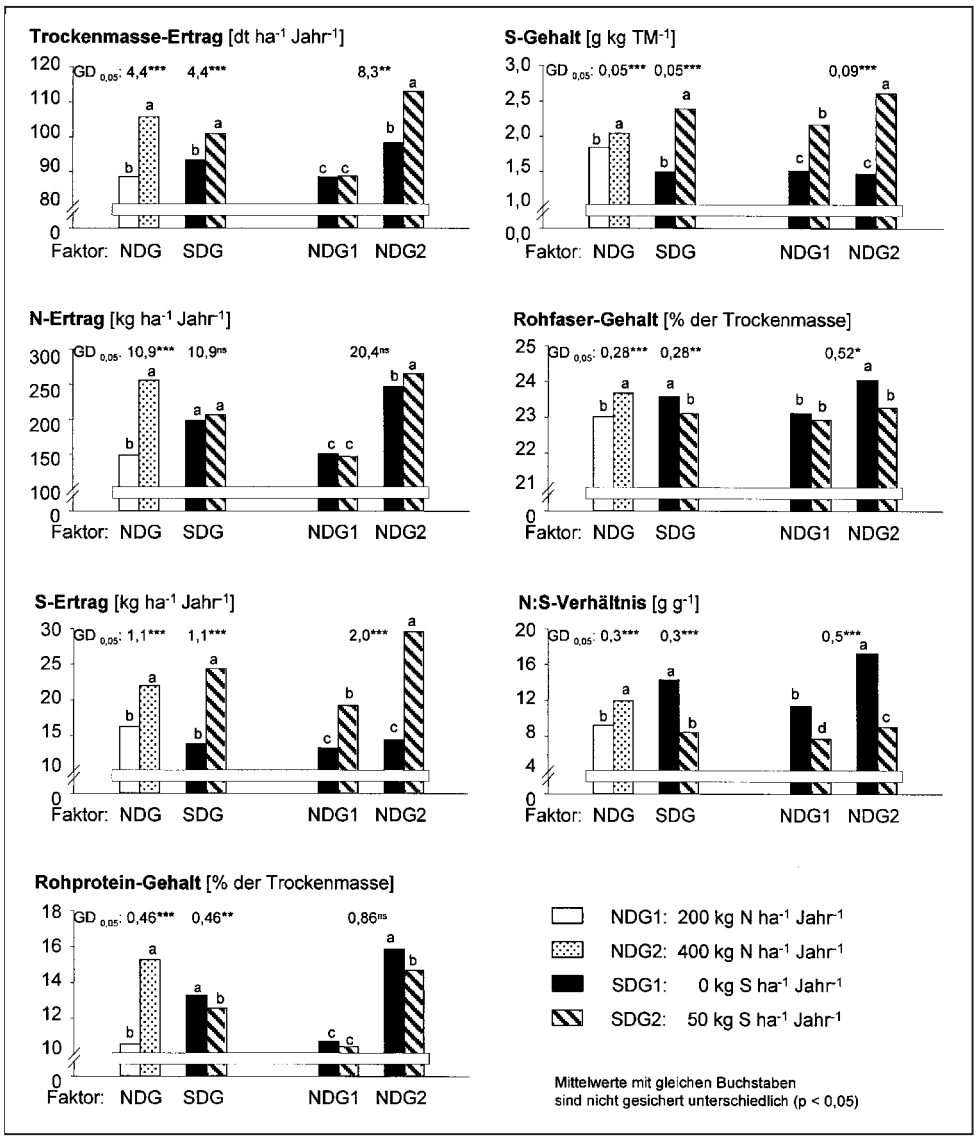

Abb. 1: Einfluß der Hauptfaktoren Stickstoff-Düngung (NDG) und Schwefeldüngung (SDG) sowie der Wechselwirkung NDG × SDG auf Ertrags- und Qualitätsvariablen der Grasbestände (1993–1995; Ertrag: Jahressummenwerte; Qualität: Gewichtete Mittelwerte aus vier Aufwüchsen und vier Wiederholungen)

Effects of nitrogen and sulphur fertilization and the interaction between nitrogen and sulphur fertilization on yield and quality of the grass

Tab. 3: Untersuchte Inhaltsstoffe, verwendete Methoden und untersuchte Varianten

Summary of methods of analysis for variables of chemical composition and analyzed treatments

Variable	Methode	Untersuchte Varianten
Rohprotein und Rohfaser	VDLUFA (BASSLER 1993); Rohprotein: Stickstoff (N) nach Kjeldahl; Rohprotein als N × 6,25; Rohfaser: Fettfreier, alkali- und säureunlöslicher organischer Rückstand.	Alle
Schwefel	VDLUFA (SIEGEL1976); Gesamtschwefel gravimetrisch als Bariumsulfat nach Oxidation, Veraschung und Lösung in Salzsäure.	Alle
Aminosäuren	ANONYM (1998); Oxidation (Methionin als Methioninsulfon, Cystein als Cysteinsäure); Tryptophan per HPLC nach alkalischer Hydrolyse mit Bariumchlorid.	Versuchsjahre 1993–1995 Variante 400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$
Lösliches/unlösliches Rohprotein	In heißem Wasser unlösliches Rohprotein nach GOERING & VAN SOEST (1970).	Versuchsjahr 1994
Nitrat	VDLUFA (BASSLER 1988); Gaschromatographische Bestimmung als 1,4-Dimethyl-2-nitrobenzol nach Nitrierung von p-Xylol.	Zweiter Aufwuchs der Versuchsjahre 1994 und 1995
Selen	VDLUFA (BASSLER 1991); AAS mit Hydrid-Technik; Druckaufschluß mit einem Mikrowellenaufschlußsystem.	Versuchsjahre 1994 und 1995

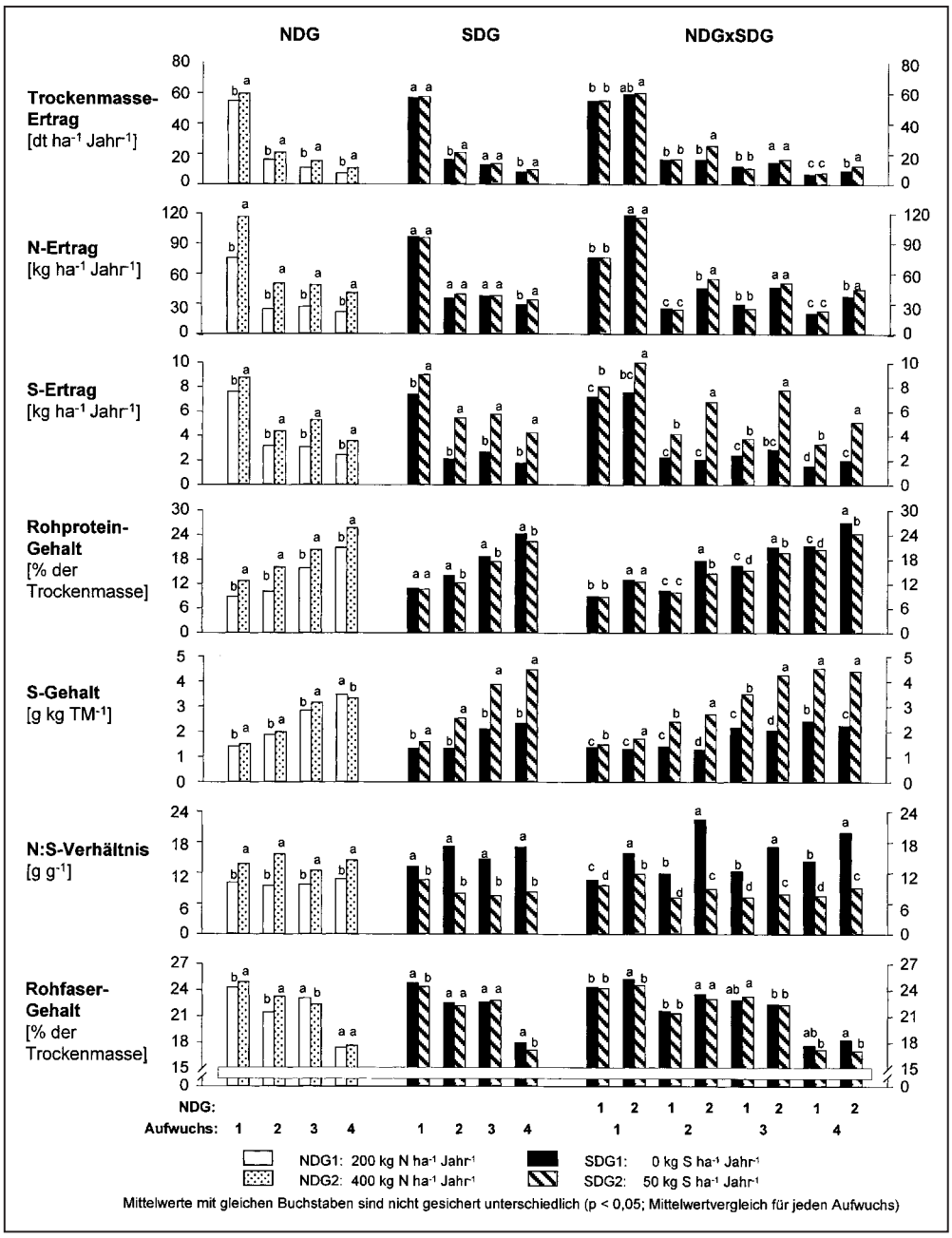

Abb. 2: Einfluß der Hauptfaktoren Stickstoff-Düngung (NDG) und Schwefeldüngung (SDG) sowie der Wechselwirkung NDG × SDG auf Ertrags- und Qualitätsvariablen der Grasbestände in den einzelnen Aufwüchsen (1993–1995; vier Wiederholungen)

Effects of nitrogen and sulphur fertilization and the interaction between nitrogen and sulphur fertilization on yield and quality of the grass as related to seasonal growth

Tab. 4: Varianzursachen und Signifikanzniveaus[1] für die geprüften Ertrags- (Jahressummenwerte) und Qualitätsvariablen[2] (gewichtete Jahresmittelwerte)

Sources of variance and levels of significance for variables of yield and chemical composition

Varianzursache	TM-Ertrag	N-Ertrag	S-Ertrag	RP-Gehalt	S-Gehalt	Rohfaser-Gehalt	N:S-Verhältnis
Jahr	***	***	***	***	***	***	***
N-Düngung (NDG)	***	***	***	***	***	***	***
S-Düngung (SDG)	**	NS	***	**	***	**	***
Jahr × NDG	NS	NS	*	*	*	**	***
Jahr × SDG	NS	NS	NS	NS	***	NS	***
NDG × SDG	**	NS	***	NS	***	*	***
Jahr × NDG × SDG	NS	NS	NS	NS	*	NS	*

[1] NS, nicht signifikant; *, p < 0,05; **, p < 0,01; ***, p < 0,001.
[2] TM, Trockenmasse; RP, Rohprotein.

400 kg N ha^{-1} mit 17 dt TM ha^{-1} am ausgeprägtesten war. Die S-Gehalte und S-Erträge stiegen mit zunehmender N-Düngung im Mittel der S-Stufen ebenfalls deutlich an. Die S-Düngung hatte im Mittel der N-Stufen ebenfalls gesicherte Wirkungen auf nahezu alle geprüften Variablen. Die Ergebnisse für die Wechselwirkung N × S verdeutlichen jedoch, daß die S-Wirkung im wesentlichen auf eine N-Stufe beschränkt war, und zwar auf 400 kg N ha^{-1}. Während bei 200 kg N ha^{-1} nur für die S-Gehalte und S-Erträge gesicherte Effekte der S-Düngung nachweisbar sind und die TM-Erträge, N-Erträge und Rohproteingehalte unbeeinflußt blieben, stellt sich das Resultat für die hohe N-Stufe völlig anders dar: Erhöhung der TM-Erträge um 15 dt ha^{-1}, Steigerung der N-Aufnahme in die erntbare pflanzliche Biomasse um nahezu 20 kg ha^{-1}, Reduktion des Rohproteingehaltes um circa 1,2 Prozentpunkte, Steigerung der S-Aufnahme um 15 kg ha^{-1} und nahezu eine Verdoppelung der S-Gehalte auf 2,6 g kg^{-1}. Auch die Rohfasergehalte als Indikator für die Energiedichte reagierten gleichgerichtet, wenn auch in weniger deutlicher Ausprägung. Das N:S-Verhältnis als ein Indikator für den S-Versorgungsstatus der Bestände wies insbesondere in den nicht mit S gedüngten Parzellen der hohen N-Stufe Werte auf, die deutlich größer als 15:1 ausfielen.

Somit kann festgestellt werden, daß bei moderater N-Düngungsintensität (200 kg N ha^{-1} Jahr^{-1}) keine Ertrags- und Qualitätswirkungen (Rohfaser, Rohprotein) der Schwefeldüngung abzusichern waren, während bei hoher N-Düngung die S-Düngung für alle geprüften Merkmale gesicherte Effekte aufwies.

Erträge und Inhaltsstoffe der einzelnen Aufwüchse

In Abb. 2 ist der Einfluß der Faktoren N-Düngung und S-Düngung sowie die Wechselwirkung der beiden Faktoren auf die untersuchten Merkmale in den einzelnen Aufwüchsen dargestellt. Auch die aufwuchsspezifische Betrachtung der Ergebnisse erfolgt unter Vernachlässigung der Einzeljahresdaten, da wiederum die Mehrfachwechselwirkungen zwischen Jahr, NDG, SDG und Aufwuchs entweder nicht gesichert waren (ohne Darstellung) oder – in Einzelfällen – zwar gesichert, aber lediglich auf unterschiedlichem Niveau gleichgerichtet waren. Es zeigt sich, daß die weiter oben dargestellten Effekte auf Jahreserträge und -durchschnittswerte durch sehr unterschiedliche Reaktionen in den einzelnen Aufwüchsen verursacht wurden. Wiederum ist festzustellen, daß zwar die Haupteffekte sehr deutliche Wirkungen hervorbringen, daß jedoch in keinem Aufwuchs der 200 kg N-Variante ein S-Düngungseffekt auf TM-Ertrag, N-Ertrag oder Rohproteingehalt abzusichern war. Lediglich die S-Gehalte und S-Erträge wurden in der niedrigen N-Stufe durch die S-Düngung positiv beeinflußt.

Dagegen wurden in der hohen N-Variante (400 kg N ha^{-1}) aufwuchsspezifische Muster der S-Düngewirkung für nahezu alle geprüften Variablen deutlich, die sich folgendermaßen charakterisieren lassen:

Im Primäraufwuchs war kein positiver Einfluß der S-Düngung auf TM-Ertrag, N-Ertrag, Rohprotein- und Rohfasergehalt festzustellen. Auffallend an diesem Resultat ist, daß trotz des hohen Ertragsniveaus von durchschnittlich fast 60 dt TM ha^{-1} keine Unterschiede abzusichern waren.

Im 2. Aufwuchs zeigten sich dagegen ausgeprägte Effekte der S-Düngung auf alle geprüften Merkmale, wobei insbesondere die Ertragswirkung von nahezu 9 dt ha^{-1} TM-Mehrertrag, das entspricht +55%, auffällt. Diese ausgeprägte Ertragssteigerung korrespondiert mit relativ geringen zusätzlich aufgenommenen S-Mengen von durchschnittlich 4,8 kg S ha^{-1}. Neben der Ertragswirkung ist ein deutlicher Einfluß auf die Rohproteingehalte festzustellen, die in der gedüngten S-Variante um mehr als 3% Rohprotein geringer ausfallen als in der ungedüngten S-Variante. Das N:S-Verhältnis dieses Aufwuchses liegt in der ungedüngten S-Variante bei 22,4 (S-gedüngt 8,8) und zeigt damit eindeutig defizitäre Bedingungen für den Faktor S an.

Schließlich kann für den 3. und 4. Aufwuchs festgehalten werden, daß zwar ebenfalls gesicherte Wirkungen der S-Düngung auf TM- und N-Erträge vorlagen, diese jedoch mit Mehrerträgen von 2,2–2,9 dt TM ha^{-1} bzw. 4,5 bis 6,7 kg N ha^{-1} ungleich schwächer ausgeprägt waren als im 2. Aufwuchs. Bemerkenwert ist in diesen ertragsschwachen Aufwüchsen die Verdoppelung der Schwefelgehalte in den schwefelgedüngten Varianten auf Werte deutlich über 4 g kg^{-1}.

Hinsichtlich der aufwuchsspezifischen Effekte kann somit festgehalten werden, daß allein die TM-Ertragsdifferenzen im 2. Aufwuchs mehr als 70% des Unterschiedes im TM-Jahresertrag erklärten und somit diesem Aufwuchs in allen drei Versuchsjahren eine zentrale Bedeutung zukam.

Ausgewählte Inhaltsstoffe

Stickstoffverbindungen

In der Literatur ist vielfach beschrieben, daß S-defizitäre Pflanzen mit einer Veränderung der Aminosäurenzusammensetzung reagieren (siehe DIJKSHOORN & VAN WIJK 1967). Speziell für Grünlandgräser liegen jedoch nur wenige Untersuchungen vor. Wie Tab. 5 zu entnehmen ist, zeigte das Aminosäurenmuster des Deutschen Weidelgrases deutliche Abhängigkeiten von den geprüften Faktoren. Die Aminosäurengehalte im Rohprotein im Mittel der Aufwüchse und Jahre für die hohe N-Düngungsstufe (400 kg N ha^{-1} Jahr^{-1}) sind in Tab. 6 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, daß durch eine S-Düngung die Anteile der überwiegend proteingebundenen Aminosäuren am Rohprotein statistisch gesichert anstiegen, dagegen besonders der Gehalt der direkt dem Citratzyklus entstammenden Vorstufe Asparaginsäure stark abnahm. Ebenso ist ein Einfluß der S-Düngung auf den Anteil unlöslichen Rohproteins am Gesamt-Rohprotein als Schätzgröße für den Gehalt an Reinprotein im Gras festzustellen. In Tab. 7 sind die Gehalte an Rohprotein und in heißem Wasser unlöslichem Rohprotein sowie der relative Anteil an unlöslichem Rohprotein für die vier Aufwüchse des 2. Versuchsjahres dargestellt. Durch eine S-Düngung konnte der Anteil an Reinprotein deutlich erhöht werden. Dieses Ergebnis korrespondiert mit den an ausgewählten Proben erfaßten Nitratgehalten der zweiten Aufwüchse der Jahre 1994 und 1995. Da S in der Pflanze unter anderem die Nitratreduktase katalysiert, ist bei S-defizitären Pflanzen mit erhöhten Nitratgehalten zu rechnen. Tab. 8 zeigt die Nitratgehalte im 2. Aufwuchs in Abhängigkeit von den geprüften Faktoren. Sowohl das N- als auch das S-Düngungsniveau beeinflußten die Nitratgehalte, wobei jedoch wiederum die Wechselwirkung NDG × SDG im wesentlichen die Streuung erklärt. Während die Bestände der niedrigeren N-Variante unabhängig von der S-Düngung als nahezu nitratfrei anzusprechen sind, weisen die S-defizitären Bestände der hohen N-Stufe Nitratkonzentrationen auf, die um den Faktor 100 bis 200 höher liegen.

Selen

Ebenfalls an den Proben der Jahre 1994 und 1995 wurden die Selengehalte bestimmt (ohne Darstellung). Diese reagierten nicht auf die geprüften Faktoren. Unabhängig von N- und S-Düngung wurden sehr niedrige Selengehalte zwischen <0,02 und 0,03 mg Se kg^{-1} TM gemessen.

Tab. 5: Varianzursachen und Signifikanzniveaus[1)] für das Aminosäurenmuster (% Aminosäure im Rohprotein) bei hoher Stickstoff-Versorgung (400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$)

Sources of variance and levels of significance for the amino acid pattern (% of amino acid of crude protein) at the high level of nitrogen fertilization (400 kg N ha^{-1} $year^{-1}$)

Aminosäure	Jahr	Aufwuchs (A)	S-Düngung (SDG)	Jahr × A	Jahr × SDG	A × SDG
Methionin	*	***	***	**	*	*
Cystein	***	***	***	**	*	***
Lysin	***	***	***	***	*	***
Threonin	**	***	***	***	***	***
Tryptophan	***	***	***	***	**	***
Arginin	NS	**	***	***	**	***
Isoleucin	NS	***	***	***	***	***
Leucin	NS	NS	*	*	NS	*
Valin	***	***	***	***	**	***
Histidin	NS	***	***	***	***	***
Phenylalanin	NS	***	***	*	NS	**
Glycin	NS	***	***	***	***	***
Serin	***	*	**	*	*	*
Prolin	***	*	***	***	*	*
Alanin	***	**	***	**	NS	*
Asparaginsäure	***	***	***	*	***	***
Glutaminsäure	NS	*	NS	NS	NS	NS

[1)] NS, nicht signifikant; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

Tab.6: Aminosäurenzusammensetzung des Rohproteins (%) bei unterschiedlicher Schwefel-Düngung im Mittel über drei Versuchsjahre und vier Aufwüchse (N-Düngung 400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$)

Amino acid composition of the crude protein (%) as related to sulphur fertilization averaged across three years and four harvests $year^{-1}$ (N fertilization 400 kg N ha^{-1} $year^{-1}$)

Aminosäure	0 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$	50 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$	Signifikanz[1)]
Methionin	1,28	1,55	***
Cystein	0,87	1,02	***
Lysin	3,57	3,98	***
Threonin	3,52	4,06	***
Tryptophan	1,42	1,65	***
Arginin	4,01	4,69	***
Isoleucin	3,36	3,92	***
Leucin	6,38	7,05	*
Valin	4,47	5,20	***
Histidin	1,71	1,94	***
Phenylalanin	4,29	5,03	***
Glycin	4,47	5,13	***
Serin	3,53	3,74	**
Prolin	3,91	4,69	***
Alanin	6,21	6,81	***
Asparaginsäure	13,66	8,37	***
Glutaminsäure	10,09	10,03	NS

[1)] NS, nicht signifikant; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

Tab. 7: Gehalte an Rohprotein und in heißem Wasser unlöslichem Rohprotein (% in der Trockenmasse) sowie Anteil an unlöslichem Rohprotein am Rohprotein in Abhängigkeit von Aufwuchs und der Schwefel-Düngung (0 oder 50 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$) im Mittel der N-Düngungsstufen (200 und 400 kg N ha^{-1} $year^{-1}$) 1994[1)]

Concentrations of crude protein and hot water insoluble crude protein (% of dry matter) and proportion of insoluble crude protein of total crude protein as related to growth and level of sulphur fertilization (0 or 50 kg ha^{-1} $year^{-1}$) averaged across levels of N fertilization (200 and 400 kg N ha^{-1} $year^{-1}$) in 1994

Aufwuchs	Rohprotein		Unlösliches Rohprotein		Anteil unlösliches Rohprotein am Rohprotein (%)	
	0 kg S	50 kg S	0 kg S	50 kg S	0 kg S	50 kg S
1	$14,8^{c}$	$15,0^{c}$	$9,2^{c}$	$10,9^{b}$	$62,1^{c}$	$72,5^{ab}$
2	$15,7^{c}$	$12,0^{c}$	$7,8^{c}$	$8,1^{c}$	$49,8^{d}$	$67,6^{bc}$
3	$19,9^{b}$	$19,6^{b}$	$14,4^{a}$	$15,3^{a}$	$72,5^{ab}$	$78,2^{a}$
4	$24,3^{a}$	$21,1^{b}$	$14,5^{a}$	$16,4^{a}$	$59,8^{c}$	$77,5^{a}$
Mittel	$18,7^{a}$	$16,9^{b}$	$11,5^{b}$	$12,7^{a}$	$61,0^{b}$	$74,0^{a}$

Mittelwerte mit ungleichen Buchstaben unterscheiden sich ($p < 0,05$).

Tab. 8: Nitratgehalte (mg kg^{-1} Trockenmasse) im zweiten Aufwuchs in Abhängigkeit von der Stickstoff- und Schwefeldüngung im Mittel der Jahre 1994 und 1995

Nitrate concentrations (mg kg^{-1} of dry matter) for the first regrowth as related to nitrogen and sulphur fertilization (average of 1994 and 1995)

	0 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$	50 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$
200 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$	92[b]	52[b]
400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$	3861[a]	795[b]

Mittelwerte mit ungleichen Buchstaben unterscheiden sich ($p < 0,05$).

Diskussion

Die in der vorliegenden Arbeit an Deutschem Weidelgras beobachteten Ertragswirkungen der S-Düngung in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau stehen im Einklang mit den Resultaten anderer Versuchsansteller an Futtergräsern. Unter Bedingungen im Gewächshaus (COWLING & JONES 1970, BOLTON et al. 1976, GILBERT & ROBSON 1984) und im Freiland (MURPHY & QUIRKE 1997) wurde gezeigt, daß Schwefeldüngungseffekte mit steigender N-Versorgung überproportional ansteigen. MURPHY & QUIRKE (1997) erzielten unter den klimatischen Bedingungen Irlands bereits bei N-Intensitäten ab 120 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$ signifikante S-Düngungseffekte auf den TM-Ertrag. Die Tatsache, daß in der vorliegenden Arbeit unter norddeutschen Klimabedingungen bei einem N-Düngungsniveau von 200 kg ha^{-1} $Jahr^{-1}$ auch nach drei Jahren ohne S-Düngung keine gesicherten S-Düngungswirkungen auf den Ertrag ermittelt werden konnten, zeigt die Notwendigkeit auf, die jeweiligen klimatischen und pedologischen Bedingungen zu berücksichtigen. So werden aufgrund der wesentlich günstigeren Wachstumsbedingungen in Irland im Vergleich zu Norddeutschland bei N-Düngungsniveaus von 200 kg ha^{-1} $Jahr^{-1}$ um mehr als 30% höhere TM-Erträge mit entsprechend höheren S-Aufnahmen erzielt, die dann auch bei moderater N-Düngung schneller zu einem S-Mangel führen dürften.

Im Hinblick auf die aufwuchsspezifische Analyse der Ertragswirkungen einer S-Düngung werden die vorgestellten Ergebnisse im wesentlichen durch andere Arbeiten bestätigt, lediglich STEVENS (1985) fand in Nordirland in einem Jahr bereits im Primäraufwuchs deutliche S-Düngungseffekte. Dagegen konnten unter anderem STEVENS & WATSON (1986), MURPHY & BOGGAN (1988), KLESSA et al. (1989) sowie MURPHY & QUIRKE (1997) keine Effekte einer S-Düngung im Primäraufwuchs, jedoch ausgeprägte Effekte in den Sommeraufwüchsen nachweisen. Zwei Einflußgrößen können zur Erklärung dieses Phänomens herangezogen werden: Zum einen erklären sich die ausbleibenden Effekte im Primäraufwuchs durch die externen S-Einträge während des Winterhalbjahres, die eine Versorgung im Primäraufwuchs sicherstellen, für die Nachwüchse jedoch nicht mehr ausreichend sind. Zum anderen werden die ausgeprägten Effekte in den Sommermonaten durch reduzierte Mineralisationsprozesse aufgrund von Trockenheit im Sommer hervorgerufen. Die in unserem Experiment verwendete Sorte Gremie ist hinsichtlich der phänologischen Entwicklung dem sehr frühen Sortenspektrum zuzuordnen, was Auswirkungen auf den Wachstumsrhythmus und damit die Verteilung des Jahresertrages auf die einzelnen Aufwüchse hat. So weisen frühe Sorten des Deutschen Weidelgrases einen überproportional hohen Ertrag im Primäraufwuchs und abnehmende Ertragsleistungen im Sommer und Herbst auf (TAUBE 1990). Hinsichtlich der Nachwüchse ist weiterhin darauf hinzuweisen, daß insbesondere der zweite Aufwuchs bei nicht zu spätem Schnitttermin des Primäraufwuchses aufgrund erheblicher Anteile generativer Triebe ein höheres Ertragspotential aufweist als die folgenden vollständig vegetativ geprägten Aufwüchse (BINNIE et al. 1980). Liegt für den ersten Aufwuchs noch eine gute S-Versorgung vor, so führt beim Folgeaufwuchs die Verknüpfung von im Vergleich zum Primäraufwuchs relativ kurzer Zuwachszeit bei ebenfalls hohem Ertragspotential mit ungünstigen Mineralisationsbedingungen in der für norddeutsche Klimaverhältnisse typischen Frühsommertrockenheit offensichtlich dazu, daß temporäre S-Defizite zu ausgeprägten Ertragseinbußen speziell im zweiten Aufwuchs führen. Die Tatsache, daß in den vegetativen dritten und vierten Aufwüchsen wesentlich geringere durch S-Düngung induzierte Ertragsdifferenzen gemessen werden, stützt diese These.

In Bezug auf die Identifizierung von S-Mangel wurden verschiedene Ansätze verfolgt: Während die Berücksichtigung des mineralischen Schwefelgehaltes im Boden offensichtlich kein geeigneter Indikator ist (JONES 1986, STEVENS & WATSON 1986, HEDLEY 1988), wurden auf der Basis der Pflanzenanalyse sowohl der Sulfat-S-Gehalt, der Gesamt-S-Gehalt als auch das N:S-Verhältnis als geeignete Indikatoren postuliert. Hinsichtlich des Gesamt-S-Gehaltes finden sich in der Literatur jedoch sehr unterschiedliche Befunde. So wiesen GILBERT & ROBSON (1984) unter Gewächshausbedingungen optimales Wachstum von *Lolium rigidum* ab S-Konzentrationen in der erntbaren Biomasse von 1,2 g kg^{-1} nach, während MILLARD et al. (1985) zeigten, daß S-Konzentrationen, die von 2,2 auf 3,1 g S kg^{-1} TM zunahmen, noch einen Anstieg der TM-Erträge induzierten. Nach von CORNFORTH (1981) publizierten Standards für optimale S-Gehalte in *Lolium perenne* L.-Beständen sind Gehalte von <2,4 g kg^{-1} in der Blatt-TM als defizitär einzustufen. JONES et al. (1972) und BOLTON et al. (1976) nannten als kritischen Wert 2,0 g kg^{-1} TM. Das offensichtlich insgesamt wenig aussagekräftige Merkmal S-Konzentration in der TM als Indikator für die Versorgung des Bestandes wird durch unsere Ergebnisse bestätigt. So führten S-Gehalte von 1,35 g kg^{-1} im Primäraufwuchs zu Maximalerträgen, während im zweiten Aufwuchs Werte von durchschnittlich 1,27 g kg^{-1} in der nicht mit S gedüngten Variante ausgeprägte Mindererträge zur Folge hatten. Entsprechend konnte keine gesicherte Beziehung zwischen dem Schwefelgehalt in der Pflanze und dem Ertrag abgeleitet werden.

Im Gegensatz dazu ergab sich jedoch für das N:S-Verhältnis eine gesicherte Beziehung zum TM-Ertrag. Um die unterschiedlichen Ertragsniveaus in den verschiedenen Aufwüchsen angemessen zu berücksichtigen, wurde jeweils der Aufwuchsertrag der S-gedüngten Variante als Referenz gewählt und der relativen Ertragsveränderung der nicht S-gedüngten Variante in allen Aufwüchsen, Jahren und N-Stufen gegenübergestellt. Das Ergebnis zeigt Abb. 3. Es bestand eine lineare Beziehung zwischen der Zunahme des N:S-Verhältnisses und einer verringerten Ertragsleistung und zwar in der Weise, daß bei einem N:S-Verhältnis von etwa 12:1 die Regressionsgerade die Null-Linie schneidet, ab Werten >15:1 zehnprozentige und ab >20:1 zwanzigprozentige Mindererträge im Vergleich zu ausreichend versorgten Beständen zu verzeichnen waren. Damit werden ähnliche Berechnungen (COWLING & JONES 1971) und Befunde (DIJKSHOORN & VAN WIJK 1967, STEVENS & WATSON 1986, RICHARDS 1990) bestätigt.

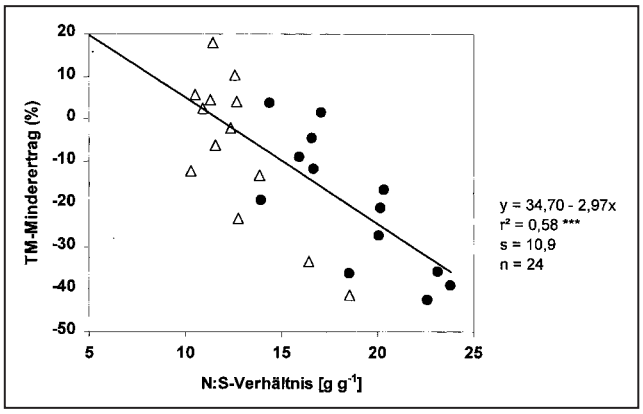

Abb. 3: Beziehung zwischen dem Schwefel:Stickstoff-(N:S)-Verhältnis und dem Trockenmasse-(TM)-Minderertrag ohne Schwefel-Düngung (1993–1995; vier Aufwüchse, zwei N-Stufen, S-gedüngter Bestand = 0; △ = 200 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$, ● = 400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$)

Relationship between the nitrogen:sulphur ratio in the grass and the decline of dry matter yield as related to level of sulphur fertilization

STEVENS & WATSON (1986) stellten an einem umfangreichen Material fest, daß das N:S-Verhältnis weitaus besser als die S- oder Sulfat-S-Konzentration in der Pflanze als Indikator für S-Mangel geeignet ist. Dieses wurde nachfolgend von RICHARDS (1990) bestätigt.

Die durch S-Düngung induzierten Veränderungen der Rohfasergehalte als Indikator für die Verdaulichkeit und damit den energetischen Futterwert des Pflanzenmateriales werden bezüglich anderer Faserfraktionen nicht durchgehend in der Literatur bestätigt. Während PANDITHARATNE et al. (1986) für *Dactylis glomerata* L. bei S-Düngung einen deutlichen Rückgang der Zellwand-(NDF)-Gehalte und höhere Verdaulichkeiten nachweisen konnten, traten diese Effekte bei *Trifolium pratense* L.-Beständen nicht auf. CHIY & PHILLIPS (1998) konnten ebenfalls keine Effekte der S-Düngung auf den Gehalt an Lignocellulose (modified acid detergent fibre, MADF) nachweisen, während gleichzeitig gesicherte Effekte auf die Verdaulichkeit des Pflanzenmateriales gemessen wurden. REES et al. (1974), die ebenfalls einen positven Einfluß der S-Düngung auf die Verdaulichkeit fanden, vermuteten eine höhere mikrobielle Aktivität im Pansen als Ursache für diesen Effekt. Da derartige Wirkungen mit Hilfe der Weender Analyse (Rohfaser) bzw. mit Hilfe der Detergenzienanalyse nach VAN SOEST (NDF, ADF) im Gegensatz zu den zitierten Verdauungsversuchen am Tier nicht abzubilden sind, ist die Schätzung der Verdaulichkeit oder Energiedichte von unterschiedlich mit Schwefel versorgten Beständen mit diesen Methoden als problematisch einzustufen.

Die positiven Ertragswirkungen einer S-Düngung verursachten „Verdünnungseffekte" der Rohproteingehalte in der Pflanze und Veränderungen des Gehaltes an Reinprotein, des Aminosäuremusters sowie des Nitratgehaltes. Die Zunahme der Gehalte an Reinprotein und die Abnahme der Nitratgehalte im Aufwuchs wurden wiederholt für Futtergräser beschrieben (COWLING & BRISTOW 1979, MILLARD et al. 1985). Letztere wurden zwar in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls beeinflußt, andererseits führte jedoch der ausgeprägte Schwefelmangel im zweiten Aufwuchs nicht zu kritisch hohen Nitratgehalten im Futter. Im Hinblick auf die Siliereignung des Erntegutes sind vielmehr die nahezu nitratfreien Aufwüchse der S-versorgten Bestände kritisch zu würdigen (KAISER et al. 1997, KAISER & WEISS 1997). Aber selbst der höchste ermittelte Nitratgehalt der Variante ohne S-Düngung mit 400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$ lag mit knapp 3,9 g kg^{-1} TM noch unterhalb des Wertes von 4,44 g Nitrat kg^{-1} TM, bei dem eine unerwünschte Buttersäurebildung durch Chlostridien vollständig unterbunden werden konnte (KAISER & WEISS 1997).

Der Einfluß der S-Düngung auf die Aminosäurenzusammensetzung folgte Mustern, wie sie von COWLING & BRISTOW (1979), MILLARD et al. (1985), BOLTON et al. (1976) sowie MORTENSEN & ERIKSEN (1994) beschrieben wurden. Insbesondere der Anstieg der Asparagin- bzw. Asparaginsäuregehalte unter schwefeldefizitären Bedingungen ist für vegetative wie generative Pflanzenorgane der C_3-Gramineen vielfach beschrieben. Zurückzuführen ist dies auf die Funktion der Asparaginsäure als Vorstufenaminosäure unter anderem für die Synthese schwefelhaltiger Aminosäuren (Methionin, Cystein). Bei Schwefelmangel kommt es zu einer Akkumulation der Asparaginsäure, weil der weitere Syntheseweg zu S-haltigen Aminosäuren blockiert ist (MARSCHNER 1995). MORTENSEN & ERIKSEN (1994) konnten ferner zeigen, daß es sich bei den hohen Gehalten von Asparaginsäure (+ Asparagin) unter S-defizitären Bedingungen bei *Lolium multiflorum* L. nahezu ausschließlich um freie Aminosäuren (heißwasserlöslich) handelte, während in der höchsten S-Düngungsstufe lediglich 12% der Asparaginsäure als freie Aminosäure vorlagen. Auch dies weist auf eine nachhaltige Störung der Proteinbiosyntese in den Blättern S-defizitärer Bestände hin. Die von uns gemessenen Asparaginsäuregehalte bestätigen nicht nur prinzipiell die in der Literatur dokumentierten Zusammenhänge (MILLARD et al. 1985), sondern weisen sogar eine ausgeprägte Übereinstimmung in den absoluten Gehalten auf. So wurden für gut mit S versorgte Bestände Werte zwischen 7 und 8% Asparaginsäure im Rohprotein ebenso übereinstimmend festgestellt wie Werte von 18–19% im Rohprotein für S-defizitäre *Lolium perenne* L.-Bestände. Somit erscheint der Asparaginsäuregehalt ähnlich wie das N:S-Verhältnis als Indikator für S-Mangel geeignet, wie die aus unseren Daten abgeleitete Beziehung zum Ertrag zeigt (Abb. 4).

Die Tatsache, daß die Selengehalte in der Pflanze nicht auf den Faktor Schwefeldüngung reagierten, dürfte durch das bodengenetisch bedingt niedrige Selenniveau im Boden verursacht sein. Entsprechende Ergebnisse finden sich bei MILCHUNAS et al. (1983), die durch die alleinige Variation der S-Versorgung ebenfalls keinen Effekt auf die Selengehalte in der Pflanze messen konnten, bei zusätzlicher Selenatversorgung des Bodens jedoch gesichert negative Wirkungen einer S-Düngung auf die Selengehalte im Aufwuchs nachwiesen.

Die S-Gehalte in Futterpflanzen sind sowohl bezüglich der Ertragswirkung auf die Pflanzenbestände als auch hinsichtlich der Ansprüche des Nutztieres zu diskutieren. Neben dem von REES et al. (1974) angeführten Mindestbedarf für das Mikrobenwachstum sind auch potentiell toxische Wirkungen zu hoher S-Gehalte zu berücksichtigen, hervorgerufen durch Komplexbildung von S mit anderen Elementen wie Kupfer, Selen, Eisen oder Molybdän im Verdauungstrakt des Wiederkäuers, wodurch die Löslichkeit der Spurenelemente im Inhalt des Verdauungstrakts der Tiere stark vermindert und die Absorption aus dem Verdaungstrakt behindert und reduziert wird. Dieses kann zu durch Spurenelementmangel bedingten Stoffwechselstörungen führen. Jüngst publizierte Ergebnisse von CHIY et al. (1999), die eine signifikante Abnahme der Milchleistung und des Fettgehaltes der Milch bei Applikation von Schwefeldünger auf der Weide (30 kg S ha^{-1} $Jahr^{-1}$) dokumentieren, werden von den Autoren mit den angeführten Ursache-Wirkungs-Beziehungen, d. h. einer Reduktion der Verfügbarkeit von Spurenelementen, in Verbindung gebracht. Vor diesem Hintergrund sind die im dritten

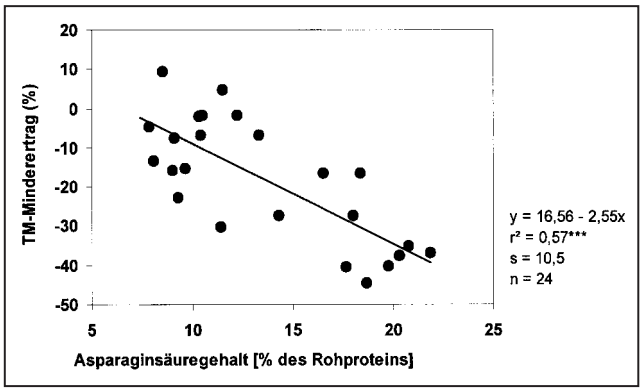

Abbildung 4: Beziehung zwischen dem Asparaginsäuregehalt im Rohprotein und dem Trockenmasse-(TM)-Minderertrag ohne Schwefel-Düngung (1993–1995; vier Aufwüchse, 400 kg N ha^{-1} $Jahr^{-1}$, S-gedüngter Bestand = 0)

Relationship between the concentration of aspartic acid (% of crude protein) in the grass and the decline of dry matter yield as related to level of sulphur fertilization

und vierten Aufwuchs in den S-gedüngten Varianten ermittelten Schwefelgehalte von 4–5 g kg^{-1} TM nach den Angaben des NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1988) bereits im Grenzbereich zu toxisch wirkenden Konzentrationen angesiedelt. Eine S-Düngung mit dem Ziel der Verbesserung der Futterqualität sollte daher gut auf den Bedarf der Tiere abgestimmt sein. Dies bedeutet, dass sowohl unterhalb des Bedarfs der Tiere liegende S-Gehalte im Gras als auch um mehr als zweifach über dem Bedarf liegende S-Konzentrationen vermieden werden sollten.

Literatur

ANONYM, 1998: Richtlinie 98/64/EG der Kommission vom 3. September 1998 zur Festlegung gemeinschaftlicher Analysenmethoden für die Bestimmung von Aminosäuren, Rohfetten und Olaquindox in Futtermitteln und zur Änderung der Richtlinie 71/393/EWG. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 257/14.

BASSLER, R. (Hrsg.), 1988: VDLUFA-Methodenbuch, Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 3. Auflage, 2. Ergänzungslieferung.

BASSLER, R. (Hrsg.), 1991: VDLUFA-Methodenbuch, Band VII. Umweltanalytik, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

BASSLER, R. (Hrsg.), 1993: VDLUFA-Methodenbuch, Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, VDLUFA-Verlag Darmstadt, 3. Auflage, 3. Ergänzungslieferung.

BINNIE, R. C., D. M. B. CHESTNUTT & J. C. MURDOCH, 1980: The effect of time of initial defoliation and height of defoliation on the productivity of *Lolium perenne* swards. Grass Forage Sci. **35**, 267–273.

BOLTON, J., T. Z. NOWAKOWSKI & W. LAZARUS, 1976: Sulphur-nitrogen interaction effects on the yield and composition of the protein-N, non protein-N and soluble carbohydrates in perennial ryegrass. J. Sci. Food Agric. **27**, 553–560.

CHIY, P. C., J. A. AVEZINIUS & C. J. C. PHILLIPS, 1999: Sodium fertilizer application to pasture. 9. The effects of combined or seperate applications of sodium and sulphur fertilizers on herbage composition and dairy cow production. Grass Forage Sci. **54**, 312–321.

CHIY, P. C. & C. J. C. PHILLIPS, 1998: Sodium fertilizer application to pasture. 6. Effects of combined applications with sulphur on herbage production and chemical composition in the season of application. Grass Forage Sci. **53**, 1–10.

CORNFORTH, I. S., 1981: Soils and fertilizers, plant analysis methods and interpretation. Aglink AST9, Ministry Agric. Fish., Wellington, New Zealand.

COWLING, D. W. & A. W. BRISTOW, 1979: Effects of SO_2 on sulphur and nitrogen fractions and on free amino acids in perennial ryegrass. J. Sci. Food Agric. **30**, 354–360.

COWLING, D. W. & L. H. P. JONES, 1970: A deficiency in soil sulphur supplies for perennial ryegrass in England. Soil Sci. **110**, 346–354.

COWLING, D. W. & L. H. P. JONES, 1971: Sulphur deficiency of two forage plants in England. Sulphur Inst. J. **6**, 8–13.

DIJKSHOORN, W. & A. L. VAN WIJK, 1967: The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur nitrogen ratio in the organic matter – a review of published data. Plant Soil **26**, 129–157.

GILBERT, M. A. & A. D. ROBSON, 1984: Studies on competition for sulphur between subterranian clover and annual ryegrass. III. Effect of plant density and nitrogen supply. Aust. J. Agric. Res. **35**, 75–83.

GOERING, H. K. & P. J. VAN SOEST, 1970: Forage fiber analysis (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Agric. Handbook 379, ARS, USDA, Washington, DC.

HEDLEY, M. J., 1988: Report on measuring the availability of soils – future directions workshop. In: Towards the More Efficient Use of Soil and Fertiliser Sulphur. Massey Univ. Occ. Rep. **2**, 304–307.

JONES, L. H. P., D. W. COWLING & D. R. LOCKYER, 1972: Plant-available and extractable sulphur in some soils of England and Wales. Soil Sci. **114**, 104–114.

JONES, M. B., 1986: Sulfur availability indices. In: TABATABAI, M. A. (ed.): Sulfur in Agriculture. Agronomy Monograph **27**, 549–566. Am. Soc. Agron., Madison, Wisc.

KAISER, E. & K. WEISS, 1997: Zum Gärungsverlauf bei der Silierung von nitratarmem Grünfutter. 2. Mitteilung: Gärungsverlauf bei Zusatz von Nitrat, Nitrit, Milchsäurebakterien und Ameisensäure. Arch. Anim. Nutr. **50**, 187–200.

KAISER, E., K. WEISS & J. ZIMMER, 1997: Zum Gärungsverlauf bei der Silierung von nitratarmem Grünfutter. 1. Mitteilung: Gärungsverlauf in unbehandeltem Grünfutter. Arch. Anim. Nutr. **50**, 87–102.

KLESSA, D. A., J. FRAME, R. D. GOLIGHTLY & R. D. HARKESS, 1989: The effect of fertilizer sulphur on grass production for silage. Grass Forage Sci. **44**, 277–281.

MARSCHNER, H., 1995: Mineral Nutrition of Higher Plants, Academic Press, London.

MILCHUNAS, D. G., W. K. LAUENROTH & J. L. DODD, 1983: The interaction of atmospheric and soil sulfur on the sulfur and selenium concentration of range plants. Plant Soil **72**, 117–125.

MILLARD, P., G. S. SHARP & N. M. SCOTT, 1985: The effect of sulphur deficiency on the uptake and incorporation of nitrogen in ryegrass. J. Agric. Sci., Camb. **105**, 501–504.

MORTENSEN, J. & J. ERIKSEN, 1994: Effect of sulphur deficiency on amino acid composition. Norwegian J. Agric. Sci. Suppl. **15**, 135–142.

MURPHY, M. D. & J. M. BOGGAN, 1988: Sulphur deficiency in herbage in Ireland. Irish J. Agric. Res. **27**, 83–90.

MURPHY, M. D. & W. A. QUIRKE, 1997: The effect of sulphur/nitrogen/selenium interactions on herbage yield and quality. Irish J. Agric. Food Res. **36**, 31–38.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1988: Nutrient Requirements of Dairy Cattle, National Academic Press, Washington DC, 28–29.

PANDITHARATNE, S., V. G. ALLEN, J. P. FONTENOT & W. H. MCCLURE, 1986: Yield, chemical composition and digestibility by sheep of orchardgrass fertilized with different rates of nitrogen and sulphur or associated red clover. J. Anim. Sci. **62**, 813–821.

REES, M. C., D. J. MINSON & F. W. SMITH, 1974: The effect of supplementary and fertilizer sulphur on voluntary intake, digestibility, retention time in the rumen and site of digestion of pangola grass in sheep. J. Agric. Sci., Camb. **82**, 419–422.

RICHARDS, I. R., 1990: Sulphur as a crop nutrient in the UK. Sulphur Agric. **14**, 8–9.

SAS® INSTITUTE INC., 1988. STAT User's guide, Release 6.03, SAS Inst. Inc., Cary, NC.

SCHNUG, E. & H.-P. PISSAREK, 1982: Kalium und Schwefel, Minimumfaktoren des schleswig-holsteinischen Rapsanbaus. Kali-Briefe (Büntehof) **16**, 77–84.

SCOTT, N. M., M. E. WATSON, K. S. CALDWELL & R. H. E. INKSON, 1983: Response of grassland to the application of sulphur at two sites in north-east Scotland. J. Sci. Food Agric. **34**, 357–361.

SIEGEL, O. (Hrsg.), 1976: VDLUFA-Methodenbuch, Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, Verlag J. Neumann-Neudamm, Melsungen.
STEVENS, R. J., 1985: Evaluation of the sulphur status of some grasses for silage in Northern Ireland. J. Agric. Sci., Camb. **105**, 581–585.
STEVENS, R. J. & C. J. WATSON, 1986: The response of grass for silage to sulphur application at 20 sites in Northern Ireland. J. Agric. Sci., Camb. **107**, 565–571.
TAUBE, F., 1990: Growth characteristics of contrasting varieties of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). J. Agron. Crop Sci. **165**, 159–170.

Eingegangen am 07. Januar 2000;
angenommen am 21. März 2000

Anschrift der Verfasser:
F. Taube, Ute Jahns, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Christian-Albrechts-Universität, D-24098 Kiel.
R. Wulfes, Fachbereich Landbau, Fachhochschule Kiel, Am Kamp 11, D-24783 Osterrönfeld.
K.-H. Südekum, Institut für Tierernährung und Stoffwechselphysiologie, Christian-Albrechts-Universität, D-24098 Kiel.