

**Justus-Liebig-Universität Gießen**  
Fakultät für Agrarwissenschaften,  
Ökotrophologie und Umweltmanagement

Masterarbeit  
im Studiengang Umwelt- und Ressourcenmanagement

**Auswirkungen eines erhöhten  
Schwefelversorgungszustandes auf  
Futterleguminosenbestände unter langjähriger  
ökologischer Bewirtschaftung am Beispiel des Lehr- und  
Versuchsbetriebs Gladbacherhof**

Prüfer:

Prof. Dr. G. Leithold

Dr. S. A. Fischinger

---

vorgelegt von

Sandra Heilmann

E-Mail: sandra.heilmann@arcor.de

Matrikelnummer: 3037671

Gießen, den 14.12.2012

**Für Agnes, Rebekka, Trixi und Ulrike**

Mit denen ich eine wunderbare Studienzeit verbracht habe,  
die ich immer in Erinnerung behalten werde

# Gliederung

<b>Gliederung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Literaturübersicht</b> .....	<b>2</b>
2.1 Bedeutung Schwefel in Agrarökosystemen insbesondere im Ökologischen Landbau .....	2
2.2 Schwefel im Boden.....	3
2.3 Schwefel in der Pflanze .....	7
2.4 Aktuelle Versorgungssituation und Bedeutung der Leguminosen im Ökologischen Landbau .....	11
2.4.1 Schwefelversorgungszustand der landwirtschaftlichen Flächen im Ökologischen Landbau .....	11
2.4.2 Bedeutung von Leguminosen im Ökologischen Landbau.....	12
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>15</b>
3.1 Zielsetzung .....	15
3.2 Standort- und Versuchsbeschreibung .....	15
3.2.1 Standort Gladbacherhof.....	15
3.2.2 Versuchsbeschreibung .....	16
3.3 Probenahme,-aufbereitung und Parametererfassung .....	20
3.3.1 Boden.....	20
3.3.2 Pflanze .....	20
3.4 Analyseverfahren.....	20
3.4.1 $S_{\min}$ - Analyse der Bodenproben.....	20
3.4.2 CNS-Analyse der Pflanzenproben.....	21
3.5 Datenauswertung .....	21
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>23</b>
4.1 $S_{\min}$ -Gehalt im Boden .....	23
4.2 Schwefelkonzentration im oberirdischen Aufwuchs.....	25
4.2.1 Leguminosen .....	25
4.2.2 Nichtleguminosen.....	27
4.3 Stickstoff-Konzentration im oberirdischen Aufwuchs .....	29

---

4.3.1	Leguminosen .....	29
4.3.2	Nichtleguminosen .....	31
4.4	N/S-Verhältnis im oberirdischen Aufwuchs .....	32
4.4.1	Leguminosen .....	32
4.4.2	Nichtleguminosen .....	34
4.5	Trockensubstanzertrag .....	35
4.5.1	Gesamtjahresertrag des Gemenges .....	35
4.5.2	Trockensubstanz-Ertrag der Leguminosen .....	37
4.5.3	Trockensubstanz-Ertrag der Nichtleguminosen .....	39
4.6	Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis im Aufwuchs .....	41
4.7	Schwefelabfuhr .....	42
4.7.1	Jahresübersicht .....	42
4.7.2	Leguminosen .....	44
4.7.3	Nichtleguminosen .....	45
4.8	Stickstoffflächenertrag .....	47
4.8.1	Jahresübersicht .....	47
4.8.2	Leguminosen .....	50
4.8.3	Nichtleguminosen .....	51
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>54</b>
5.1	Schwefel im Boden .....	54
5.2	Schwefel im oberirdischen Aufwuchs .....	58
5.3	S-Abfuhr und N-Flächenertrag .....	65
<b>6</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>69</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>70</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>78</b>
	<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b> .....	<b>79</b>
	<b>Danksagung</b> .....	<b>80</b>

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Schwefelkreislauf im Agrarökosystem
- Abbildung 2:** Schwefelassimilation der Pflanzen
- Abbildung 3:** Mangelercheinungen von Schwefel und Stickstoff
- Abbildung 4:** Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)-Emissionen in den Jahren 1990 bis 2009
- Abbildung 5:** Gladbacherhof
- Abbildung 6:** Schematische Darstellung des Versuchablaufs im Jahr 2010 und 2011
- Abbildung 7:** Schwefelkonzentration der Leguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 8:** Schwefelkonzentration der Leguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 9:** Schwefelkonzentration der Nichtleguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 10:** Schwefelkonzentration der Nichtleguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 11:** Stickstoffkonzentration der Leguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 12:** Stickstoffkonzentration der Leguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 13:** Stickstoffkonzentration der Nichtleguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 14:** Stickstoffkonzentration der Nichtleguminosen im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt.
- Abbildung 15:** Jahresertrag an Trockensubstanz der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2010
- Abbildung 16:** Jahresertrag an Trockensubstanz der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2011
- Abbildung 17:** Trockensubstanzerträge der Leguminosen in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2010

- Abbildung 18:** Trockensubstanzerträge der Leguminosen in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2011
- Abbildung 19:** Trockensubstanzerträge der Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2010
- Abbildung 20:** Trockensubstanzerträge der Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2011
- Abbildung 21:** Schwefelabfuhr der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2010
- Abbildung 22:** Schwefelabfuhr der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2011
- Abbildung 23:** S-Abfuhr der Leguminosenfraktion im Jahr 2010 der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 24:** S-Abfuhr der Leguminosenfraktion im Jahr 2011 der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 25:** S-Abfuhr der Nichtleguminosenfraktion der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 26:** S-Abfuhr der Nichtleguminosenfraktion im Jahr 2011 der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 27:** Stickstoffertrag der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2010
- Abbildung 28:** Stickstoffertrag Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2011
- Abbildung 29:** N-Flächnertrag der Leguminosenfraktion im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 30:** N-Flächnertrag der Leguminosenfraktion im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 31:** N-Flächnertrag der Nichtleguminosenfraktion im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt
- Abbildung 32:** N-Flächnertrag der Nichtleguminosenfraktion im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1:** Schwefelbedürftigkeit verschiedener Kulturen
- Tabelle 2:** N<sub>2</sub>-Fixierung verschiedener Leguminosenarten
- Tabelle 3:** Trockensubstanz-Erträge der Luzerne-/ Klee grasbestände auf dem Gladbacherhof in den Jahren 1993 bis 2010
- Tabelle 4:** Düngevarianten sowie Art und Menge in den Jahren 2010 und 2011
- Tabelle 5:** S<sub>min</sub>-Gehalte 2010 bei unterschiedlicher Schwefeldüngung in 30 bis 60 cm Bodentiefe (Mittelwert aus vier Wiederholungen) in Abhängigkeit des Probenahmezeitpunktes
- Tabelle 6:** S<sub>min</sub>-Gehalte 2011 bei unterschiedlicher Schwefeldüngung in 30 bis 60 cm Bodentiefe (Mittelwert aus vier Wiederholungen) in Abhängigkeit des Probenahmezeitpunktes
- Tabelle 7:** N/S-Verhältnis der Leguminosenfraktion in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2010.
- Tabelle 8:** N/S-Verhältnis der Leguminosenfraktion in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2011.
- Tabelle 9:** N/S-Verhältnis der Nichtleguminosenfraktion in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2010.
- Tabelle 10:** N/S-Verhältnis der Nichtleguminosenfraktion in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2010.
- Tabelle 11:** Jahresertrag an Trockensubstanz der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung für die Jahre 2010 und 2011, wie auch eine prozentuale Ertragssteigerung/ -minderung im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle
- Tabelle 12:** Verhältnis der Leguminosen zu Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2010
- Tabelle 13:** Verhältnis der Leguminosen zu Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr 2011
- Tabelle 14:** Gesamter N-Jahresertrag für das Jahr 2010 bzw. 2011 der Leguminosen bzw. Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung , wie auch eine Ertragssteigerung/ -minderung im Vergleich zur Kontrolle

# 1 Einführung

„Wenn eine Pflanze zwölf Stoffe zu ihrer Ausbildung bedarf, so wird sie nimmer aufkommen, wenn nur ein einziger an dieser Zahl fehlt, und stets kümmerlich wird sie wachsen, wenn einer derselben nicht in derjenigen Menge vorhanden ist, als es die Natur der Pflanze erheischt“ (Sprengel, 1828). Schon früh erkannte Sprengel die Bedeutung einzelner Nährstoffe für die Pflanzenernährung. Neben Stickstoff, Phosphor, Kalzium, Kalium, Magnesium und Eisen gehört ebenfalls Schwefel zu den essentiellen Pflanzennährstoffen, den sogenannten Makronährstoffen (Zhao *et al.*, 1997; Nultsch, 2001; Scherer, 2001). Schwefel wird demnach ebenfalls von der Pflanze in ausreichenden Mengen benötigt und beeinflusst maßgeblich den Ertrag, die Qualität des Ernteguts, die Pflanzengesundheit wie auch die Stickstofffixierung von Leguminosen. Dies ist besonders für den ökologischen Landbau bedeutend, da die Stickstofffixierung durch Leguminosenanbau die einzig relevante Stickstoffquelle darstellt. Allerdings wurde dieser Aspekt in den letzten dreißig Jahren eher vernachlässigt. Zum einen gab es keinerlei Anzeichen von Schwefelmangel in Ackerbeständen, da alleine die atmosphärischen Schwefeleinträge, mit bis zu  $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Scheffer/ Schachtschabel; 2010), deren Bedarf zu genüge deckten. Zum anderen wurden schon bald die hohen Schwefeldepositionen, welche den Ackerkulturen einerseits zu Gute kamen, in Verbindung mit der zunehmenden Bodenversauerung und dem Waldsterben gebracht. Woraufhin viel Forschungsarbeit auf dieses Themenfeld investiert wurde, die Schwefeleinträge zu reduzieren. Dies auch mit Erfolg, denn nach der verbindlichen Einführung von Rauchgasentschwefelungsanlagen sanken die Schwefeleinträge drastisch, bis unter  $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (EMEP/MS-CHE, 2012; Hu *et al.*, 2005), allerdings zum Nachteil der landwirtschaftlichen Kulturen, bei denen zunehmend Schwefelmangelsymptome festgestellt wurden. Dadurch gerät der Nährstoff Schwefel erneut in das Visier der Forschung, allerdings diesmal um die Schwefelkreisläufe in der Umwelt, Boden, Pflanze und Tier zu untersuchen um eine ausreichende Pflanzenversorgung sicher zustellen und eine bedarfsgerechte Düngung zu ermöglichen.

Auf Grund der wichtigen Rolle des Leguminosenanbaus im ökologischen Landbau und der Tatsache, dass Schwefelmangel die Stickstofffixierung hemmt (DeBoer *et al.*, 1982 und Zhao *et al.*, 1999) und zunehmend Mangelsymptome in Beständen beobachtet wurden, sollte in dieser Arbeit der Frage nachgegangen werden, ob und in wie weit Schwefelmangel in Leguminosenbeständen bereits vorliegt und ob eine Schwefeldüngung generell und insbesondere welche Art und Menge Auswirkungen auf die Bestände zeigt.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 *Bedeutung Schwefel in Agrarökosystemen insbesondere im Ökologischen Landbau*

Landwirtschaftliche Kulturen benötigen für ein gesundes Wachstum und hohe Erträge eine ausreichende Versorgung mit unterschiedlichen Nährstoffen. Hierzu gehören nicht nur, die sonst im Vordergrund stehenden Stoffe, Stickstoff (N) und Phosphor (P) sondern ebenfalls Schwefel (S) wie auch eine Reihe weiterer essentieller Makroelemente (C, O, H, K, Mg, Ca und Fe), die von der Pflanze in größeren Mengen benötigt werden (*Nultsch, 2001*). Ein Mangel hat schwerwiegende Folgen für das Wachstum, sowie auch für den Ertrag, die Qualität des Ernteguts, die Pflanzengesundheit wie auch auf die Stickstofffixierleistung von Leguminosen.

Schwefel wird in ähnlichen Mengen wie Phosphor benötigt (*Scherer, 2001*) und liegt je nach Art bei einem Bedarf von 15 bis 40 kg ha<sup>-1</sup> (*Scheffer/ Schachtschabel, 2010*). In der Pflanze selbst liegt Schwefel mit Gehalten von 1 bis 10 g kg<sup>-1</sup> Trockensubstanz (TS) vor. Kreuzblütler wie z.B. Raps haben einen etwas höheren Schwefelbedarf und der Gehalt in der TS kann bis zu 15 g pro kg betragen (*Scheffer/ Schachtschabel, 2010*).

Ähnlich wie Stickstoff durchläuft auch Schwefel einen Kreislauf im Agrarökosystem, der von Einträgen, Umwandlungsprozessen und Entzügen geprägt ist. Nach Schubert (2006) sind zwei Drittel der **Einträge** anthropogener Herkunft. Hierzu zählen Verbrennungsprozesse fossiler Energieträger, die anschließend in Form von H<sub>2</sub>S oder SO<sub>2</sub>, als nasse oder trockene Deposition, auf die Flächen gelangen. Natürliche Quellen sind Phytoplankton, Moore, Sümpfe und Vulkane, wobei die drei letztgenannten nur geringe Mengen ausmachen und für das Agrarökosystem eher unbedeutend sind (*Schubert, 2006*). Ebenfalls gelangt Schwefel über schwefelhaltige Dünge- oder Pflanzenschutzmittel in den Boden. Im Boden selbst spielen Umwandlungsprozesse (Mineralisation, Lösung, Oxidation oder Desorption), wie auch kapillarer Aufstieg mit dem Bodenwasser eine wichtige Rolle (*Haneklaus et al., 2003; Pultke, 2000*). **Entzüge** finden durch mikrobielle Prozesse im Boden statt, bei denen der Schwefel in eine nicht pflanzenverfügbare Form umgewandelt wird. Dies kann durch Reduktionsprozesse, Adsorption, Ausfällung oder Immobilisierung der Fall sein. Weitere Verluste treten durch Ernteentzüge auf wie auch durch Runoff- und Erosionsereignisse, bei denen Boden von der landwirtschaftlichen Fläche abgetragen wird. Allerdings finden die höchsten Schwefelentzüge, im humiden Klima, wo die Niederschläge die Verdunstung übersteigen (*DWD, 2012*), durch

Auswaschung statt. Je nach Menge kann dies eine Belastung für die Trinkwasseraufbereitung darstellen, da nach der Trinkwasserverordnung (*TrinkwV, 2001*) lediglich ein Wert von 250 mg Sulfat pro Liter zugelassen ist. Nach Scheffer/Schachtschabel (2010) werden in Mitteleuropa jährlich durchschnittlich zwischen 50 und 60 kg S ha<sup>-1</sup> mit dem Sickerwasser ausgewaschen und gehen für die Pflanzenernährung verloren. Diese Verluste können durch Einträge aus der Atmosphäre, die im deutschen Durchschnitt nur bei ca. 10 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (*EMEP/MSW, 2012; Hu et al., 2005*) oder sogar darunter liegen, nicht ausgeglichen werden, sodass eine Schwefeldüngung in der landwirtschaftlichen Praxis erforderlich ist. Im ökologischen Landbau sind vier verschiedene Düngemittel zugelassen, bei denen es sich um elementaren Schwefel, Kaliumsulfat (Kieserit), Calciumsulfat (Gips) und Magnesiumsulfat handelt (*BMELV, 2012*). Neben dem Einfluss von Schwefel auf die Pflanzenernährung, -gesundheit und Qualität spielt er eine wichtige Rolle bei der Stickstofffixierung von Leguminosen, was vor allem im ökologischen Landbau von zentraler Bedeutung ist. Dieser Aspekt wird in Kapitel 2.4 näher erläutert.

## **2.2 Schwefel im Boden**

Der Schwefelgehalt im Boden variiert je nach Bodenart, Ausgangsgestein und Humusmenge. In terrestrischen Böden des humiden Klimabereichs, zu welchem auch Deutschland zählt, liegt er in der Regel zwischen 0,1 und 0,5 g Schwefel pro kg Boden. In besonderen Fällen kann der S-Gehalt auch höher liegen, wie z.B. in Mooren (10 g kg<sup>-1</sup>) oder sulfatsauren Marschen mit 35 g kg<sup>-1</sup>. Ähnlich wie Nitrate sind Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sehr gut wasserlöslich (ca. 2 g l<sup>-1</sup>) und können schnell ausgewaschen werden (*Scheffer/Schachtschabel, 2010*). Somit kann es in humiden Gebieten zu keiner wesentlichen Sulfatanreicherung im Boden kommen (*Scheffer/Schachtschabel, 2010; Willms, 2005*), da das Klima durch hohe Niederschläge gekennzeichnet ist, die die Verdunstung übersteigen (*DWD, 2012*). Dadurch wird überschüssiges, nicht von Pflanzen aufgenommenes, Sulfat ausgewaschen. Die Höhe der Auswaschung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie beispielsweise der Witterung, den Bodenverhältnissen oder dem Pflanzenbewuchs (*Pultke, 2000*). In ariden Klimabereichen, wie in Wüsten oder Steppen, in denen die jährliche Verdunstung größer ist als die Niederschläge (*DWD, 2012a*), ist eine Anreicherung

allerdings möglich und es finden sich dort viele sulfatreiche Böden (z.B. Gypsisole) oder Horizonte (z.B. in Calcisolen oder Durisolen) (Scheffer/ Schachtschabel, 2010).

Der im Boden vorhandene Gesamtschwefel lässt sich in eine organisch- und eine mineralischgebundene Fraktion unterteilen, wobei nach Kertesz et al. (2004), Bloem (1998), Scherer (2009) und Eriksen (2009) der größte Teil organisch gebunden ist und im humiden Klimabereich je nach Bodenart bis zu 98 % ausmachen kann. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Sulfatester (-C-O-SO<sub>3</sub>H) und an Kohlenstoff gebundenen Schwefel (C-S-Bindung), welcher beispielsweise bei schwefelhaltigen Aminosäuren wie Cystein oder Cystin vorkommt (Scherer, 2001; Scheffer/ Schachtschabel; Edwards, 1998; McGill et al., 1981). Quellen für diese S-Fraktion stammen von Tieren, Mikroorganismen und Pflanzen wie auch organischen Düngern (Eriksen, 2009; Scherer, 2009; Willms, 2005). Die organische Schwefelfraktion befindet sich vor allem im Oberboden, wo ein hoher Anteil an organischer Substanz vorliegt. Diese nimmt mit zunehmender Bodentiefe hin ab und damit auch der Anteil organisch gebundener Schwefelverbindungen, sodass im Unterboden vor allem die mineralischgebundene S-Fraktion (z.B. Sulfat-Salze) überwiegt (Scheffer/ Schachtschabel, 2010). Der anorganische Schwefelvorrat im Boden wird insbesondere aus atmosphärischen Einträgen, mineralischen Düngern oder Pflanzenschutzmittelapplikationen gebildet.

Einen Überblick der verschiedenen Prozesse in der Pedosphäre zeigt Abbildung 1. Eine wichtige Quelle für Schwefeleinträge sind nasse und trockene Depositionen aus der Luft (als SO<sub>2</sub> oder SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), welche allerdings in den letzten Jahren, aufgrund der Einführung der Rauchgasentschwefelungsanlagen, deutlich zurückgegangen sind. In Deutschland liegt der Durchschnitt atmosphärischer Einträge bei ca. 10 kg Schwefel pro Hektar und Jahr (EMEP/MS-C-W, 2012; Hu et al, 2005). Weitere Eintragspfade sind Pflanzenrückstände, die auf dem Feld verbleiben, organische oder mineralische Dünger wie auch Pflanzenschutzmittelapplikationen, wobei die beiden letztgenannten Punkte lediglich im konventionellen Landbau eine Rolle spielen. In grundwasserbeeinflussten Böden können Schwefeleinträge über kapillaren Aufstieg mit dem Grundwasser von Bedeutung sein. Verluste finden vor allem durch Auswaschung von Sulfaten statt, die nach Scheffer/ Schachtschabel (2010) in Mitteleuropa 50 bis 60 kg pro ha und Jahr betragen. Weitere Schwefelentzüge finden durch die Ernteabfuhr statt wie auch durch Erosions- oder Runoff-Ereignisse. Im Boden selbst, kann das pflanzenverfügbare SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> aus der Bodenlösung durch unterschiedliche Prozesse wie Immobilisierung, Adsorption, Ausfällung oder

Reduktion in nicht pflanzenverfügbare Formen überführt werden (Scherer 2009; Haneklaus et al., 2003).

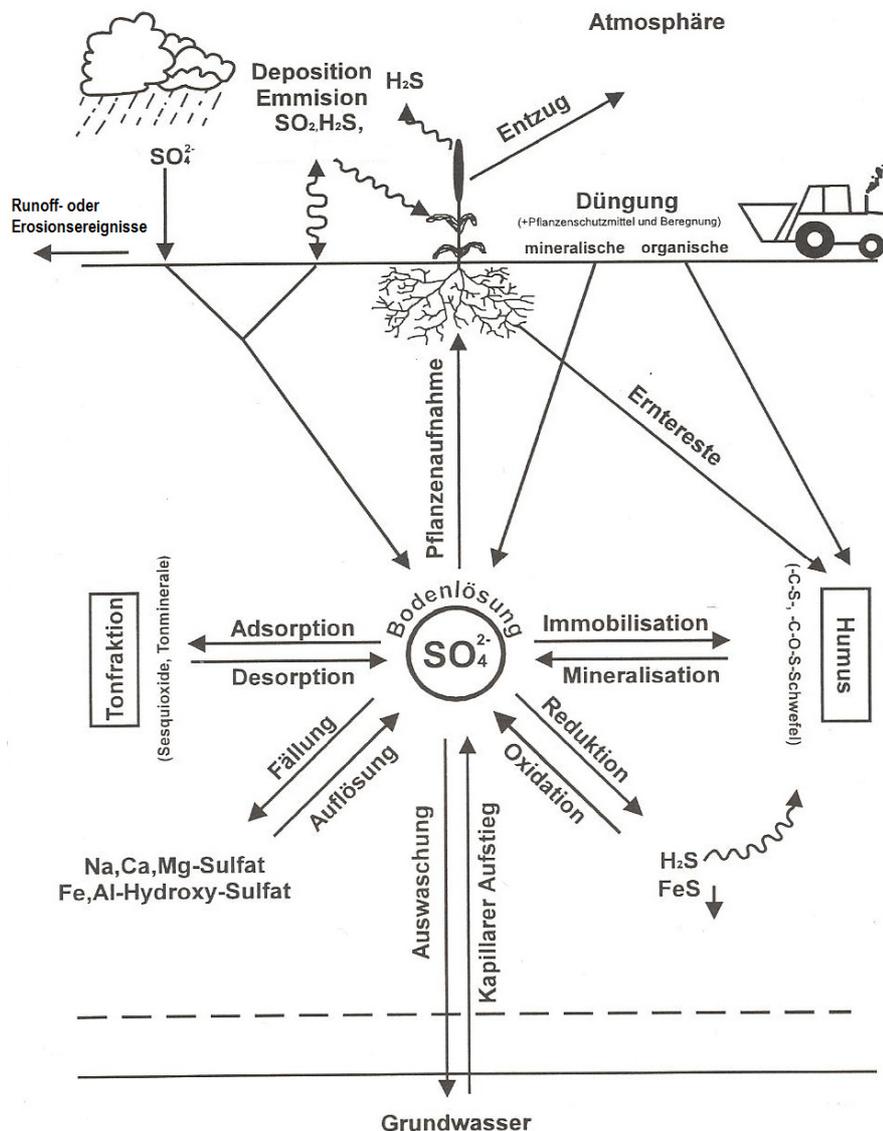


Abbildung 1: Schwefelkreislauf im Agrarökosystem (Quelle: verändert nach Mansfeld, 1994)

Im Boden liegt Schwefel mit bis zu 98% (des Gesamtschwefels im Boden) als **organische Fraktion** vor, bei der es sich vor allem um ester- und kohlenstoffgebundenen Schwefel handelt (Bloem, 1998; Scherer, 2009; Eriksen, 2009). Allerdings nehmen Pflanzen Schwefel hauptsächlich in Form von Sulfat aus der Bodenlösung auf, sodass die organisch gebundenen Schwefelverbindungen erst mit Hilfe von Mikroorganismen in  $\text{SO}_4^{2-}$  umgewandelt werden müssen. Diese Mineralisation organischer Substanz ist auf biologischen oder biochemischen Weg möglich (McGill et al., 1981) und von

Mikroorganismen wie z.B. *Pseudomonas* Spezien und Enzymen wie Sulfatasen abhängig. Sulfatasen können sowohl extrazellulär im Boden wie auch intrazellulär vorliegen und finden sich in Mikroorganismen, Pilzen und Pflanzen. Ebenfalls sind Pflanzenwurzeln in der Lage dieses Enzym zu bilden. Hierbei dient die Mineralisation entweder als S- oder Energiequelle für die Mikroorganismen (Eriksen, 2009; Edwards, 1998). Dadurch ist die Umwandlungsrate und -geschwindigkeit von verschiedenen Faktoren abhängig, die die mikrobielle Aktivität beeinflussen, wie zum Beispiel Temperatur, Bodenfeuchte, Anbaumethode oder die Verfügbarkeit und Qualität der organischen Substanz (Ghani et al. 1992; Eriksen, 2009; Scherer, 2009; Boye, 2011; Edwards, 1998). Weiterhin hat Williams (1967) festgestellt, dass durch Zugabe von Calciumcarbonat die Mineralisierung erhöht werden kann.

Der größte Teil der **anorganischen Schwefelfraktion** liegt in Form von Sulfat vor, nach Pultke (2000) bis zu 99%. Entweder gelöst, ausgefällt oder adsorbiert (Scherer, 2001; Pultke, 2000). Die jeweiligen Anteile sind von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem Bodentyp, pH-Wert, verfügbare Anionen oder die Schwefelaufnahme durch die Pflanze. Beispielsweise berichten Williams et al (1962), dass die Sulfatadsorption pH-abhängig ist und mit sinkendem pH immer stärker wird. Bei einem pH >6,5, welcher normalerweise auf Ackerböden vorkommt, ist die Sulfatadsorption zu vernachlässigen und das Sulfat liegt in der Bodenlösung vor, wodurch wiederum die Gefahr der Auswaschung besteht. Ebenfalls können Anionen wie Phosphate mehr als Nitrate und Chloride die Sulfatkonzentration in der Bodenlösung beeinflussen, da sie unterschiedliche Bindungsstärken besitzen und um Sorptionsplätze an Tonmineralen, Sesquioxiden oder an Humuskomplexen konkurrieren. Ebenfalls berichtet Scherer (2009), dass Bohn et al. (1986) herausgefunden haben, dass eine Phosphordüngung wie auch eine Kalkdüngung, die Sulfatverfügbarkeit erhöht. Letztlich stellt sich ein Gleichgewicht zwischen verfügbarem S in der Bodenlösung, gebundenem im Bodenvorrat, aufgenommenem Schwefel durch die Pflanzen und Schwefelzufuhr von außen (Dünger, atmosphärische Einträge, ...) ein.

Lediglich das  $\text{SO}_4^{2-}$  in der Bodenlösung kann von den Wurzeln der Pflanzen direkt aufgenommen werden und dient als Schwefelquelle. Andere im Boden vorkommende Formen (adsorbierter Schwefel, elementarer Schwefel oder andere schwefelhaltige Salze wie Sulfide oder Sulfite) können erst nach einer Umwandlung in Sulfat aufgenommen werden. Die Sulfate sind unterschiedlich stark gebunden, sodass bestimmte Stoffe schneller löslich und mobilisierbar sind als andere und der Pflanze eher als Nährstoff zur

Verfügung stehen. Hierzu zählen wasserlösliche Sulfatsalze wie Calcium-, Magnesium- oder Natrium-Sulfat (Scherer, 2001; Pultke, 2000). Bei diesen Salzen wie auch bei Sulfat in der Bodenlösung besteht jedoch die Gefahr der Auswaschung (Scheffer/ Schachtschabel, 2010; Boye, 2011; Pultke, 2000). Ebenfalls wie Nitrat bindet Sulfat auf Grund seiner negativen Ladung schlecht an Bodenminerale und kann somit schnell verlagert und ausgewaschen werden, sodass der Nährstoff der Pflanze nicht mehr zur Verfügung steht. Adsorbiertes Sulfat ist hingegen wesentlich stärker gebunden und damit weniger von Auswaschung gefährdet. Es kann entweder spezifisch oder unspezifisch (weniger starke Bindung) an Tonminerale wie auch an Eisen oder Aluminiumhydroxiden und – silikaten gebunden sein (Edwards, 1998; Pultke, 2000). Je nach dem, welche weiteren Anionen in der Bodenlösung in welcher Menge vorliegen, kann Sulfat wieder desorbiert werden. Dies ist abhängig von der Adsorptionsstärke der jeweiligen Anionen und wird von Strahm et al. (2007) in folgender Reihenfolge angegeben: Hydroxyle > Phosphate > Sulfate > Nitrate = Chloride. Somit kann eine Phosphatdüngung dazu beitragen, dass adsorbieretes Sulfat wieder frei wird und in der Bodenlösung vorliegt, sodass es von Pflanzen aufgenommen oder ausgewaschen werden kann.

### **2.3 Schwefel in der Pflanze**

Pflanzen sind in der Lage Schwefel sowohl als Sulfat-Ion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) aus der Bodenlösung aufzunehmen wie auch als Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) oder Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) aus der Atmosphäre (Schubert, 2006; Bloem, 1998; Pultke, 2000; DLG, 2012; Oenema, 2003). Dieses wird von den Blättern absorbiert und kann direkt dem weiteren Stoffwechsel zugeführt werden. Allerdings ist der Anteil des aufgenommenen  $\text{SO}_2$  oder  $\text{H}_2\text{S}$  aus der Atmosphäre, bei ausreichender Schwefelversorgung im Boden, sehr gering mit weniger als  $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  und damit, als Schwefelquelle, eher unbedeutend (Bloem, 1998). Hinzu kommt, dass die S-Emissionen in den letzten Jahren stark zurück gegangen sind (vgl. Kapitel 2.4.1), sodass über nasse oder trockene Deposition keine ausreichende Versorgung mehr möglich ist und zu vernachlässigen ist (DLG, 2012). In erster Linie decken Pflanzen ihren Schwefelbedarf durch Sulfat aus der Bodenlösung, welches vor allem durch Massenfluss und weniger durch Diffusion zu den Wurzeln gelangt und dort aufgenommen wird (Scheffer/ Schachtschabel, 2010; Scherer, 2001; DLG, 2012; Diepolder, 2006; Oenema et al., 2003). Der aufgenommene Schwefel gelangt über den Transpirationsstrom

in Spross und Blätter, und wird dort in den Chloroplasten unter Energieaufwand über die Zwischenprodukte Sulfit und Sulfid zu  $S^{2-}$  reduziert. Dieser kann anschließend in organische Verbindungen eingebaut werden (Schubert, 2006; Nultsch, 2001; DLG, 2012). Einen detaillierten Ablauf (vgl. Abbildung 2) der Schwefelreduktion geben De Kok et al. (2002), Hell (2002), Nultsch (2011), Scherer (2001), oder Schubert (2006a).

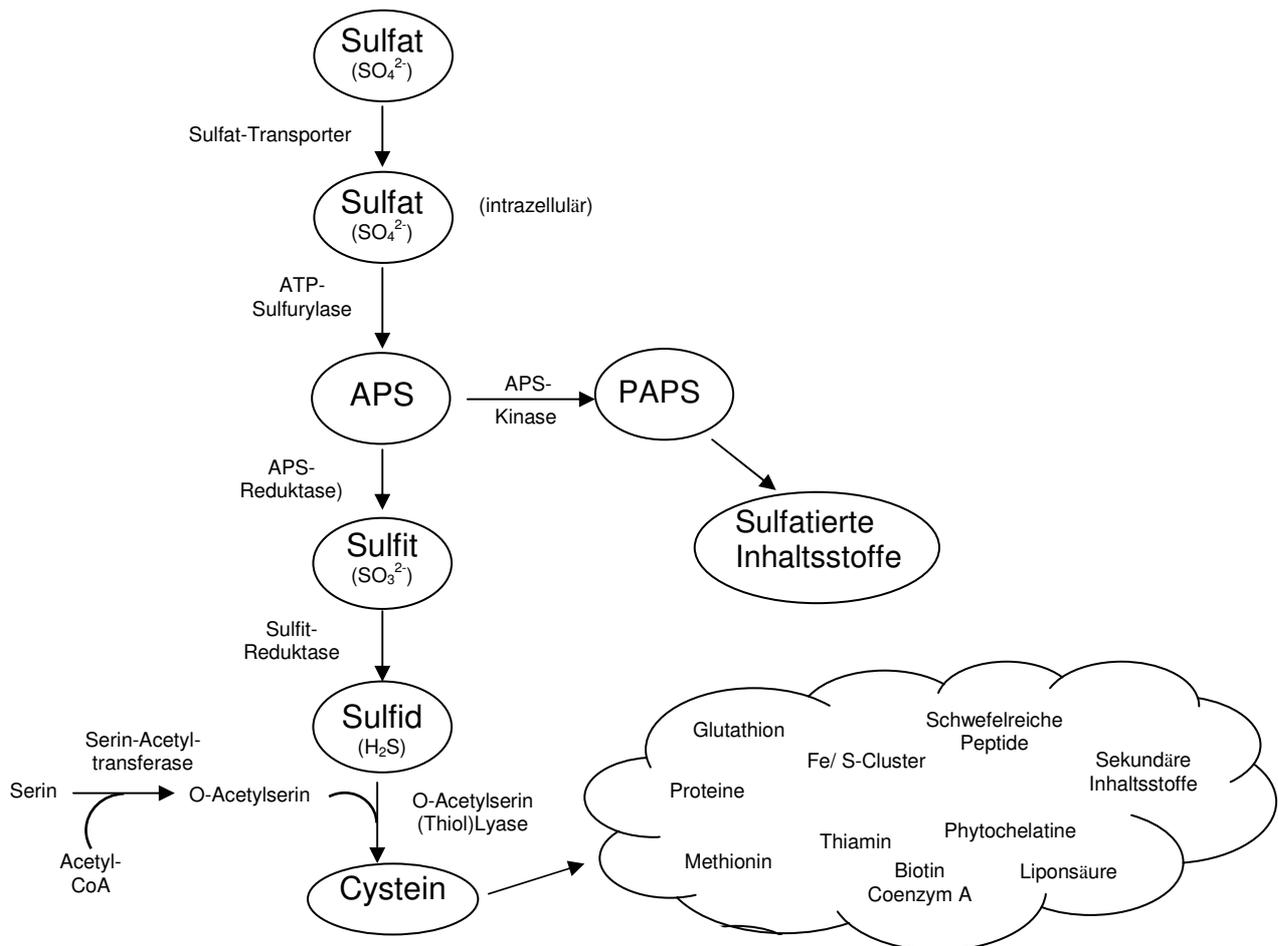


Abbildung 2: Schwefelassimilation der Pflanzen (verändert nach De Kok et al. 2002)

Schwefel ist ein essenzieller Bestandteil von schwefelhaltigen Aminosäuren wie Cystein, Cystin oder Methionin und somit unabdingbar für die Proteinbiosynthese (Scheffer/Schachtschabel, 2010; Nultsch, 2001; Oenema et al., 2003). Nach Morche (2008) liegt Schwefel zu 90%, nach De Kok et al. (2005) zu 70% in der Pflanze als Protein vor und ist damit Bestandteil vieler Enzyme (Coenzym-A), Vitamine (wie Biotin oder Thiamin) und sekundärer Metabolite wie zum Beispiel Senf- oder Lauchöle (Morche, 2008; Scheffer/Schachtschabel, 2010; Kleinhenz, 1999). Ebenfalls ist Schwefel in Redox-Reaktionen involviert und wird beispielsweise bei der Chlorophyll- oder Photosynthese benötigt

(*Oenema et al., 2003; Morche, 2008*). Daneben fördert Schwefel die Pflanzengesundheit (*Bloem et al., 2007*) und ist maßgeblich an einer verbesserten Stickstofffixierung bei Leguminosen beteiligt (*Varin et al., 2010; Pacyna et al., 2006; DeBoer et al., 1982*).

### Schwefelmangel

Je nach Kultur und Nutzungsintensität benötigt die Pflanze unterschiedlich hohe Mengen an Schwefel, wie aus Tabelle 1 hervorgeht.

Tabelle 1: Schwefelbedürftigkeit verschiedener Kulturen

Schwefelbedarf	Reaktion auf S-Düngung	Kultur
hoch	ausgeprägt	Raps/ Rübsen/ Senf Grünland Leguminosen Kohlarten/ Zwiebelgewächse
mittel	gering	Zuckerrüben
gering	mittel	Getreide/ Mais
gering	gering	Kartoffeln

(Quelle: DLG, 2012)

Wird der Schwefelbedarf nicht mehr ausreichend gedeckt, kommt es zu Störungen in der Protein- und Chlorophyllsynthese (*Scherer, 2001; Scheffer/ Schachtschabel, 2010*). Dadurch werden für den Stoffwechsel benötigte Verbindungen nicht mehr oder nur unzureichend synthetisiert. Dies führt letztlich zu verminderten Erträgen, einer schlechteren Qualität der pflanzlichen Produkte (z.B. die Backqualität oder den Ölgehalt in Samen) wie auch der Pflanzengesundheit selbst (*Scherer, 2001; DLG, 2012; Zörb, 2010*). Bei Leguminosen wird zudem die N<sub>2</sub>-Fixierung gehemmt, sodass die Stickstoffverfügbarkeit und -aufnahme der Pflanze reduziert ist (*Scherer et al., 1996 und 2007; Varin et al., 2010, Oenema et al., 2003; Paulsen, 2005*).

Sichtbare Effekte eines S-Mangels sind vor allem hellgrüne bis gelbe Blätter. Davon sind, im Gegensatz zum N-Mangel, die jüngeren Blätter betroffen, da Schwefel unter Mangelbedingungen in der Pflanze schlecht verlagerbar ist. Später treten noch Chlorosen an dem gesamten Blattapparat auf und die ganze Pflanze wirkt starr und spröde (*Scheffer/ Schachtschabel, 2010; K + S, 2011; DLG, 2012*). Eine Übersicht dazu ist in Abbildung 3 dargestellt.

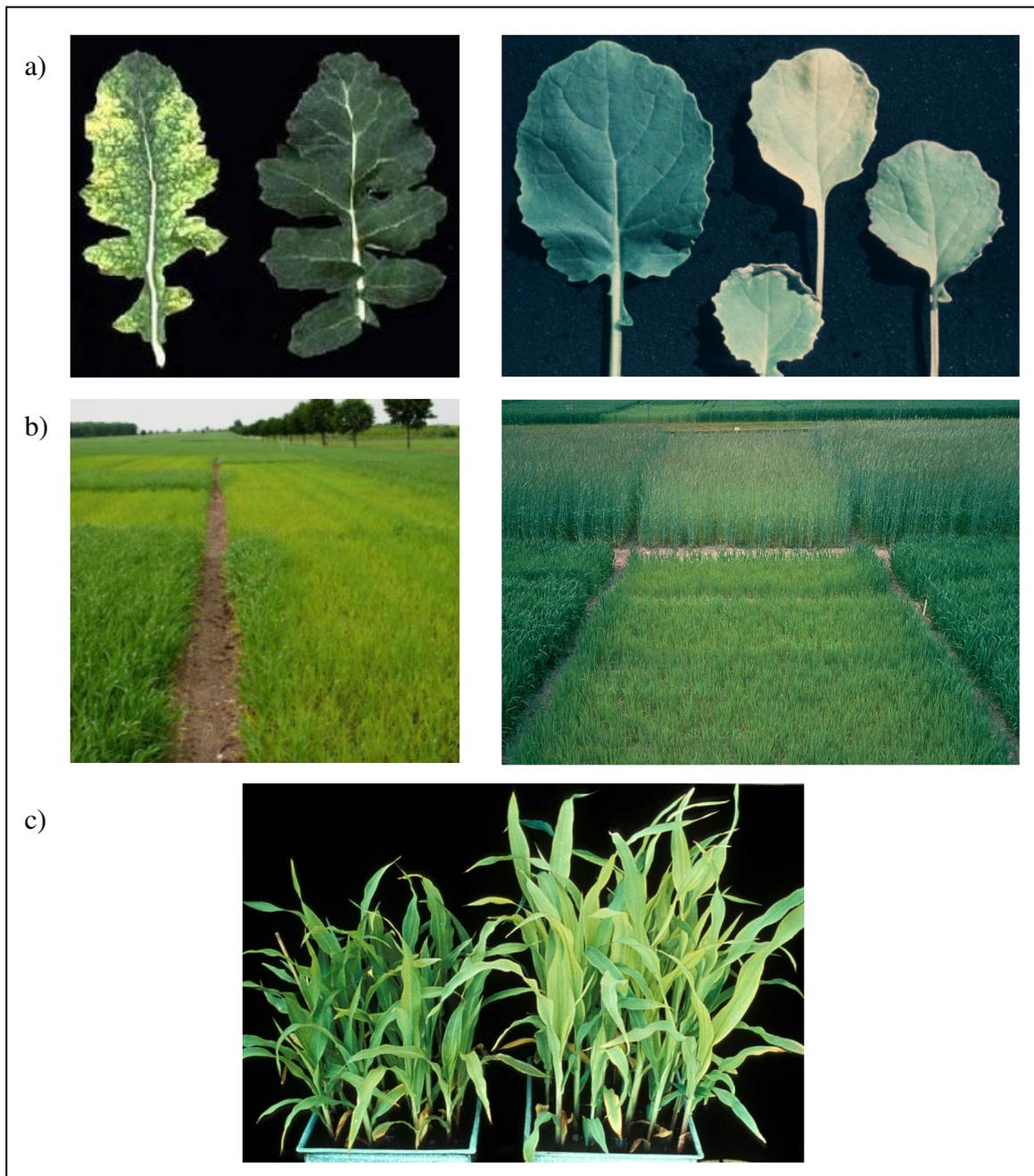


Abbildung 3: Mangelerscheinungen von Schwefel (links) und Stickstoff (rechts) a) Chlorosen und zum Teil löffelförmige Verformungen bei Raps, b) geringerer Wuchs und hellgelbe Verfärbung bei Getreide und c) hellgelbe Verfärbung bei Mais, bei Schwefelmangel sind zuerst die jungen Blätter betroffen, bei Stickstoffmangel die älteren (Quellen: LfL Bayern, 2008; Bussler; K + S, 2012; K + S, 2012a; Bergmann)

## 2.4 Aktuelle Versorgungssituation und Bedeutung der Leguminosen im Ökologischen Landbau

### 2.4.1 Schwefelversorgungszustand der landwirtschaftlichen Flächen im Ökologischen Landbau

In den letzten Jahren wurden weltweit immer häufiger Symptome von Schwefelmangel in landwirtschaftlichen Beständen beobachtet. Da in der Vergangenheit einer Schwefeldüngung kaum Aufmerksamkeit geschenkt wurde, war er im Gegensatz zu Stickstoff oder Phosphor häufig sogar ertragslimitierend. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der Rückgang der atmosphärischen S-Einträge in den letzten 25 Jahren. In Folge von Umweltbelastungen in Form von Saurem Regen oder Bodenversauerung sind Emissionsbestimmungen deutlich verschärft worden. In Deutschland wurden Rauchgasentschwefelungsanlagen gesetzlich vorgeschrieben und seitdem sinken die S-Emissionen stetig, wie aus Abbildung 4 deutlich wird. Während 1990 die Einträge noch bei 5312 tausend (Tsd.) Tonnen SO<sub>2</sub> pro Jahr lagen, werden 2009 lediglich noch 448 Tsd. Tonnen im Jahr emittiert, was einer Verminderung um fast 92 % entspricht.

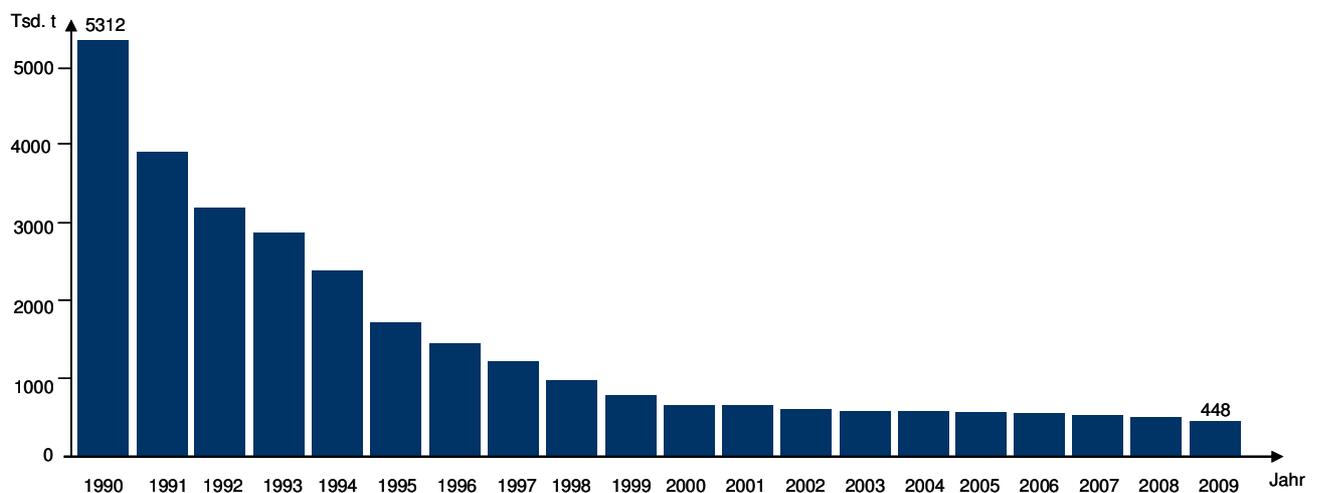


Abbildung 4: Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)-Emissionen in den Jahren 1990 bis 2009

(Quelle: verändert nach Umweltbundesamt, 2011)

Dies zeigt zum einen den großen Erfolg zur Luftreinhaltung, zum anderen stellt die Höhe der SO<sub>2</sub>-Emissionen für landwirtschaftliche Kulturen keine ausreichende Düngung mehr dar. Während Mitte der 80er Jahre der Schwefelbedarf der Pflanzen mit 20 bis 70 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Gutser et al., 2000) weitestgehend über die atmosphärischen Einträge gedeckt werden konnte, ist heute eine Düngung unerlässlich. Die Schwefeldepositionen liegen nur noch bei ca. 10 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (EMEP/MSW, 2012; Hu et al., 2005) oder sogar darunter (Gutser et al.,

2000; DLG, 2012) und decken somit den Bedarf nicht mehr annähernd. Weitere Gründe sind beispielsweise der Einsatz von schwefelfreien Dünge- und Pflanzenschutzmitteln wie auch Fungiziden. Ebenfalls trägt die intensive Landwirtschaft mit immer ertragsreicheren Arten und Sorten und dadurch immer höheren S-Entzügen durch die Ernte zu diesem Problem bei. Denn bei gleichzeitig abnehmenden Ernteresten auf dem Feld und unterlassener gezielter Schwefeldüngung in der Vergangenheit konnten die Verluste im Boden nicht ausgeglichen werden, sodass der Schwefelvorrat im Boden stetig abnahm (Scherer, 2001; Schnug et al., 2005; Messick et al., 2005). Dieses Problem wurde sowohl in der ökologischen wie auch konventionellen Landwirtschaft erkannt und findet bei Dünge- und Anbauplanung zunehmend Berücksichtigung. Dadurch ist der Makronährstoff Schwefel in den Fokus der Wissenschaft gerückt und führt zu allerhand Diskussionen in der landwirtschaftlichen Beratung.

#### 2.4.2 Bedeutung von Leguminosen im Ökologischen Landbau

Im Ökologischen Landbau sind keine chemisch-synthetischen Stickstoffdünger (Ammonium oder Nitrat) erlaubt (BMELV, 2012), sodass die Möglichkeiten einer Stickstoffdüngung bzw. –bereitstellung für die Pflanzenernährung relativ begrenzt sind. Dies ist insbesondere für viehlose Betriebe problematisch, bei denen organische Düngung in Form von Gülle und Mist entfällt, sofern diese nicht zugekauft werden. Neben Einträgen mit dem Niederschlag oder Mineralisierung im Boden ist die wichtigste N<sub>2</sub>-Quelle für ökologisch wirtschaftende Betriebe der Anbau von Leguminosen, mit ihrer Fähigkeit

Luftstickstoff zu binden (Naturland, 2012). Ihr Anteil sollte zwischen 25 und 33 % der gesamten Fruchtfolge betragen, wobei Feldfutterleguminosen, wie Klee oder Luzerne, ca. 20 % ausmachen sollten (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2010). Der Grund hierfür wird in Tabelle 2 deutlich. Je nach

Tabelle 2: N<sub>2</sub>-Fixierung verschiedener Leguminosenarten (in kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)

Kulturpflanze	Variationsbreite	Durchschnittswerte
Klee	45 - 670	250
Luzerne	90 - 340	250
Ackerbohne	100 - 300	200
Erbse	50 - 500	150
Lupine	140 - 200	150
Sojabohne	60 - 300	100
Erdnuss	50 - 150	100
Linse	50 - 150	80

(Quelle: Marquard, 1998)

Leguminosenart kann unterschiedlich viel Stickstoff im Boden gebunden werden. Die

höchste N<sub>2</sub>-Fixierung wird von Klee und Luzerne mit durchschnittlich 250 kg N pro ha und Jahr erreicht. Allerdings ist die Variationsbreite sehr hoch, sodass Klee im Idealfall bis zu 670, Luzerne bis zu 340 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> binden können. Andere Arten wie die Lupine oder die Linse fixieren wesentlich geringere Mengen an Stickstoff (vgl. Tab 2), sodass in erster Linie Luzerne- und Kleebestände die Stickstoffversorgung sichern. Generell haben Leguminosen einen vergleichsweise hohen Schwefelbedarf und reagieren sehr empfindlich auf eine ungenügende Versorgung, nicht nur im Hinblick auf Ertrag und Pflanzengesundheit. In vielen Studien wurde nachgewiesen, dass die Stickstofffixierung durch Schwefelmangel gestört wird, sodass die Leguminosen ihr Leistungspotential nicht mehr voll ausschöpfen können (Scherer et al., 2007 und 1996; Varin et al., 2010, Paulsen, 2005). Somit ist eine ausreichende S-Versorgung unumgänglich sowohl für die Pflanzenernährung wie auch für die Stickstofffixierleistung. Hierzu können unterschiedliche Diagnosemethoden genutzt werden, wie zum Beispiel der S<sub>min</sub>-Gehalt im Boden, die Schwefelkonzentration in der Pflanze oder auch das N/S-Verhältnis. Die Schwefelkonzentration in der Pflanze sollte nach Jordan (1964) und Diepolder (2006) um die 0,2 g pro 100 g TS liegen. Das N/ S-Verhältnis gilt nach Diepolder (2006) von unter 12 als optimal, ab 15 liegt Schwefelmangel vor und der Bereich dazwischen kann auf latenten Mangel hindeuten. Die DLG (2012) definiert für einen ausreichende Schwefelversorgung von Leguminosen sogar ein noch engeres N/S-Verhältnis von 5 bis 8 vor.

Bei unzureichender Schwefelversorgung von Leguminosen ist nach DeBoer et al. (1982), Paulsen (2005), Scherer et al. (2007 und 1996), Varin et al. (2010) und Zhao (1999) mit einer Beeinträchtigung der Stickstofffixierung zu rechnen. Die Wurzelknöllchen sind in ihrem Wachstum gehemmt und sind kleiner und weniger. Zum einen gibt es die Theorie, dass zuerst die Photosynthese betroffen ist, wodurch nicht genügend Photosyntheseprodukte für die Stickstofffixierung zur Verfügung stehen und diese dadurch beeinträchtigt ist (Zaroug et al., 1979). Zum anderen könnte die Stickstofffixierung direkt betroffen sein und vermindertes Wachstum der Pflanze wie auch eine Beeinträchtigung der Photosynthese treten erst in Folge dessen auf, was beispielsweise Studien von DeBoer (1982) oder Zhao et al. (1999) belegen. In erster Linie ist demnach die Proteinbiosynthese gehemmt, da nicht ausreichend schwefelhaltige Aminosäuren wie Methionin oder Cystein vorliegen, sodass nicht ausreichend Proteine für die Stickstofffixierung gebildet werden können. Für die Photosynthese ist das Schlüsselenzym RUBISCO (Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase-Oxygenase) mit einem relativ hohen Schwefelbedarf von Nöten. Dieses wiederum wird in

---

enger Verbindung mit dem Chlorophyllgehalt, der Größe und der Anzahl von Chloroplasten gesehen, welche dann bei einem Schwefelmangel ebenfalls reduziert werden, wie auch eine Chlorosenbildung statt findet (*Kawiani, 2006*).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der gesunkenen Schwefeldepositionen sollte der aktuelle Schwefelversorgungszustand in Leguminosenbeständen überprüft und dargestellt werden, wie auch die Wirkung unterschiedlicher Schwefeldüngungen. Für diesen Zweck wurde in den Jahren 2010 und 2011 auf den Flächen des Lehr- und Versuchsbetriebs Gladbacherhof ein Versuch angelegt. Im Vordergrund stand die Frage, in wie weit die Luzerne-Klee gras-Bestände ausreichend mit Schwefel versorgt sind. Weiterhin ob und in welchem Maß eine Düngung Einfluss auf den Schwefelgehalt im Boden und in der Pflanze hat und ob der Ertrag bzw. die N<sub>2</sub>-Fixierleistung der Leguminosen dadurch erhöht werden kann. Hierfür wurde die Zusammensetzung der einzelnen Pflanzenfraktionen, Leguminosen (hier: Weißklee und Luzerne) und Nichtleguminosen (hier: deutsches Weidelgras, Wiesenschwingel und Wiesen-Lieschgras), wie auch deren Menge in den Beständen beobachtet und analysiert.

### 3.2 Standort- und Versuchsbeschreibung

#### 3.2.1 Standort Gladbacherhof

Die für den Versuch ausgewählten Flächen gehören zu dem Lehr- und Versuchsbetrieb Gladbacherhof der Professur für Organischen Landbau der Justus-Liebig-Universität Gießen (siehe Abbildung 5). Der Hof liegt im nordwestlichen Taunus in 140 bis 230 m über NN mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9°C und einem mittleren jährlichen Niederschlag von 670 mm. Die Böden, Parabraunerden und Pararendzinen, bestehen überwiegend aus lehmigen Schluff (IU) und sandigem bis tonigem Lehm (sL, tL) und weisen Ackerzahlen zwischen 40 und 80 auf.



Abbildung 5: Gladbacherhof  
(Quelle: Betrieb Gladbacherhof, 2011)

Neben der Realisierung und Durchführung von Forschungsprojekten der Universität Gießen liegt der wirtschaftliche Schwerpunkt zum einen auf der Saatgutgewinnung für Getreide und zum anderen auf der Milchproduktion. Der Viehbesatz beträgt eine Großvieheinheit pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche. Die insgesamt 164 ha (davon 101 ha Ackerland, 58 ha Grünland und 5 ha Forst und Sonstiges) werden seit 1989 nach den Richtlinien des BIOLAND-Verbandes ökologisch bewirtschaftet und unterliegen einer achtfeldrigen Fruchtfolge, unter anderem mit zweijährigem Luzerne-Klee grasanbau (als Futterleguminosen) vor Winterweizen. In Tabelle 3 werden die Trockensubstanz (TS)-Erträge der Jahre 1993 bis 2010 für die Luzerne-Klee grasbestände dargestellt. Es wird deutlich, dass in den letzten Jahren auf den Flächen des Gladbacherhofs ein Ertragsrückgang statt gefunden hat. Bis 2000 wurden noch Erträge im dreistelligen Bereich (bis zu 135 dt ha<sup>-1</sup>) erwirtschaftet, ab 2001 liegen diese ausschließlich im zweistelligen Bereich, mit Erträgen meist unter 90 dt ha<sup>-1</sup> (vgl. *Betrieb Gladbacherhof, 2002 und 2011*). Ob dies durch eine unzureichende Schwefelversorgung bedingt ist, sollte im folgenden Versuch untersucht werden.

Tabelle 3: Trockensubstanz-Erträge (in dt ha<sup>-1</sup>) der Luzerne-/ Klee grasbestände auf dem Gladbacherhof in den Jahren 1993 bis 2010

Jahr	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
TS-Ertrag/ dt ha <sup>-1</sup>	112,5	60,6	123,2	134,7	74,4	87	74,5	111	87

Jahr	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
TS-Ertrag/ dt ha <sup>-1</sup>	89	87	90	64	88	86	93	83	78

(Quelle: *Betrieb Gladbacherhof, 2002 und 2011*)

### 3.2.2 Versuchsbeschreibung

Im Frühjahr 2010 und 2011 wurde auf den Flächen des Gladbacherhofs jeweils in einem Luzerne-Klee grasbestand (mit *Lolium perenne* L. (dt. Weidelgras), *Festuca pratense* L. (Wiesenschwingel), *Phleum pratense* L. (Wiesen-Lieschgras), *Medicago sativa* L. (Luzerne) und *Trifolium repens* L. (Weißklee)) im 2. Hauptnutzungsjahr ein Parzellenversuch angelegt um die Wirkung einer Schwefeldüngung im Frühjahr zu

untersuchen. Hierbei handelte es sich um eine randomisierte Blockanlage mit vierfacher Wiederholung. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Düngevarianten, die in Tabelle 4 dargestellt sind, wurden im Jahr 2010 32 Parzellen und im Jahr 2011 52 Parzellen mit einer Größe von je 3 m x 10 m angelegt. Die einzelnen Parzellen unterschieden sich in zwei Faktoren. Zum einen hinsichtlich der Gülldüngung (N0/ N1 mit 40 kg N ha<sup>-1</sup>) und zum anderen in der Art und Menge des Schwefeldüngers. Außerdem wurde 2011 noch die Wirkung einer zusätzlichen Düngung mit Rohphosphat bzw. EPSO Microtop<sup>®</sup> (Magnesiumsulfat mit den Spurennährstoffen Bor und Mangan) untersucht.

Tabelle 4: Düngevarianten sowie Art und Menge in den Jahren 2010 und 2011

Variante	2010	2011	1. Gabe (kg ha <sup>-1</sup> ) *	2. Gabe (kg ha <sup>-1</sup> ) **	Düngemittel
1	N0/ S0	N0/ S0	-	-	-
2	N0/ MgSO <sub>4</sub> _40	N0/ MgSO <sub>4</sub> _40	30 (MgSO <sub>4</sub> )	10 (MgSO <sub>4</sub> )	MgSO <sub>4</sub> ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
3	N0/ MgSO <sub>4</sub> _80	N0/ MgSO <sub>4</sub> _80	60 (MgSO <sub>4</sub> )	20 (MgSO <sub>4</sub> )	MgSO <sub>4</sub> ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
4	N1/ S0	N1/ S0	-	-	-
5	N1/ MgSO <sub>4</sub> _40	N1/ MgSO <sub>4</sub> _40	30 (MgSO <sub>4</sub> )	10 (MgSO <sub>4</sub> )	MgSO <sub>4</sub> ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
6	N1/ MgSO <sub>4</sub> _80	N1/ MgSO <sub>4</sub> _80	60 (MgSO <sub>4</sub> )	20 (MgSO <sub>4</sub> )	MgSO <sub>4</sub> ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
7	N1/ CaSO <sub>4</sub> _80	N1/ CaSO <sub>4</sub> _80	60 (CaSO <sub>4</sub> )	20 (CaSO <sub>4</sub> )	CaSO <sub>4</sub> Gips
8	N1/ Sel_80	N1/ Sel_80	60 (S <sub>el</sub> )	20 (S <sub>el</sub> )	elementarer Schwefel Schwedokal
9	-	N1/ Sel_40 <sub>H</sub> + 40 <sub>F</sub>	40 (S <sub>el</sub> )	40 (S <sub>el</sub> )	elementarer Schwefel Schwedokal
10	-	N1/ S0 + P	30 (P)	-	P Rohphosphat
11	-	N1/ MgSO <sub>4</sub> _80 + P	60 (MgSO <sub>4</sub> ) 30 (P)	20 (MgSO <sub>4</sub> )	P, Rohphosphat MgSO <sub>4</sub> , ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
12	-	N1/ K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _20	60 (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	20 (MgSO <sub>4</sub> )	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Kalisop MgSO <sub>4</sub> , ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert
13	-	N1/ (MgSO <sub>4</sub> + EPSO)_60	60 (MgSO <sub>4</sub> )	20 (EPSO)	EPSO-Microtop <sup>®</sup> MgSO <sub>4</sub> , ESTA <sup>®</sup> Kieserit granuliert

\* Die erste Gabe findet jeweils zu Vegetationsbeginn im Frühjahr (März) statt. Ausnahme ist die erste Gabe bei der Variante Sel\_40<sub>H</sub> + 40<sub>F</sub>, die bereits im Herbst des Vorjahres gedüngt wird. Neben einer S-Düngung erfolgt zum Teil eine Gülldüngung (N1), welche ebenfalls zum Vegetationsbeginn (März) ausgebracht wird und 40 kg N pro ha entspricht.

\*\* Die zweite Gabe findet nach dem ersten Schnitt (Juni) statt.

In dieser Arbeit werden lediglich, die mit Gülle gedüngten Varianten (N1) vier bis acht, die in Tabelle 4 schwarz umrandet sind und in beiden Jahren vorliegen, ausgewertet und diskutiert. Hierbei handelt es sich, neben der ungedüngten Kontrolle (S0), um die mit elementarem Schwefel ( $S_{el}$ , 80 kg Schwefel), mit Calciumsulfat ( $CaSO_4$ , 80 kg Schwefel) und mit Magnesiumsulfat ( $MgSO_4$ , 40 bzw. 80 kg Schwefel in Form von Kieserit) behandelten Bestände. Zur besseren Übersicht wird im Weiteren nur noch von den Düngevarianten S0,  $MgSO_4_{40}$ ,  $MgSO_4_{80}$ ,  $CaSO_4_{80}$  und  $S_{el_{80}}$  die Rede sein. Die bei diesen Varianten erfolgte Gülledüngung wird ab jetzt unterstellt und nicht mehr explizit erwähnt werden. Die anderen Düngekombinationen in Tabelle 4 wurden lediglich zur vollständigen Übersicht erwähnt, können allerdings, auf Grund des Umfangs dieser Arbeit, nicht weiter diskutiert werden.

In Abbildung 6 wird der Versuchsablauf sowie der Temperatur- und Niederschlagsverlauf in den Jahren 2010 und 2011 schematisch dargestellt. In beiden Jahren wurden je vier Schnitte vorgenommen, von denen jeweils Pflanzenproben entnommen und auf ihren Kohlenstoff (C)-, Stickstoff (N)- und Schwefel (S)-Gehalt hin analysiert wurden (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4).

Im Jahr 2010 wurden acht verschiedene Düngekombinationen getestet (vgl. Tabelle 4). Neben der Gülledüngung am 09.03., erfolgte die jeweilige S-Düngung in zwei Gaben. Einmal zu Anfang der Vegetationsperiode (25.03.) wie auch nach dem ersten Schnitt (10.06.). Insgesamt wurden an fünf Terminen (10.03., 21.04., 18.05., 30.06. und 22.09.) Bodenproben genommen um den  $S_{min}$ -Gehalt im Boden zu untersuchen. Diese fanden vor und nach der ersten S-Düngung statt, wie auch parallel zu den ersten beiden Schnitten. Die letzte Probe wurde zwischen dem dritten und vierten Schnitt entnommen.

Im Gegensatz zu 2010 wurden 2011 noch fünf zusätzliche Düngevarianten untersucht, wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird. Die erste Schwefeldüngung fand am 10.03. zum Beginn der Vegetationsperiode statt, die zweite am 06.06. nach dem ersten Schnitt. Die zu untersuchenden Bodenproben wurden nach der ersten Schwefeldüngung entnommen, wie auch nach jedem weiteren Schnitt (06.04., 18.05., 06.07., 17.08. und 14.09.).

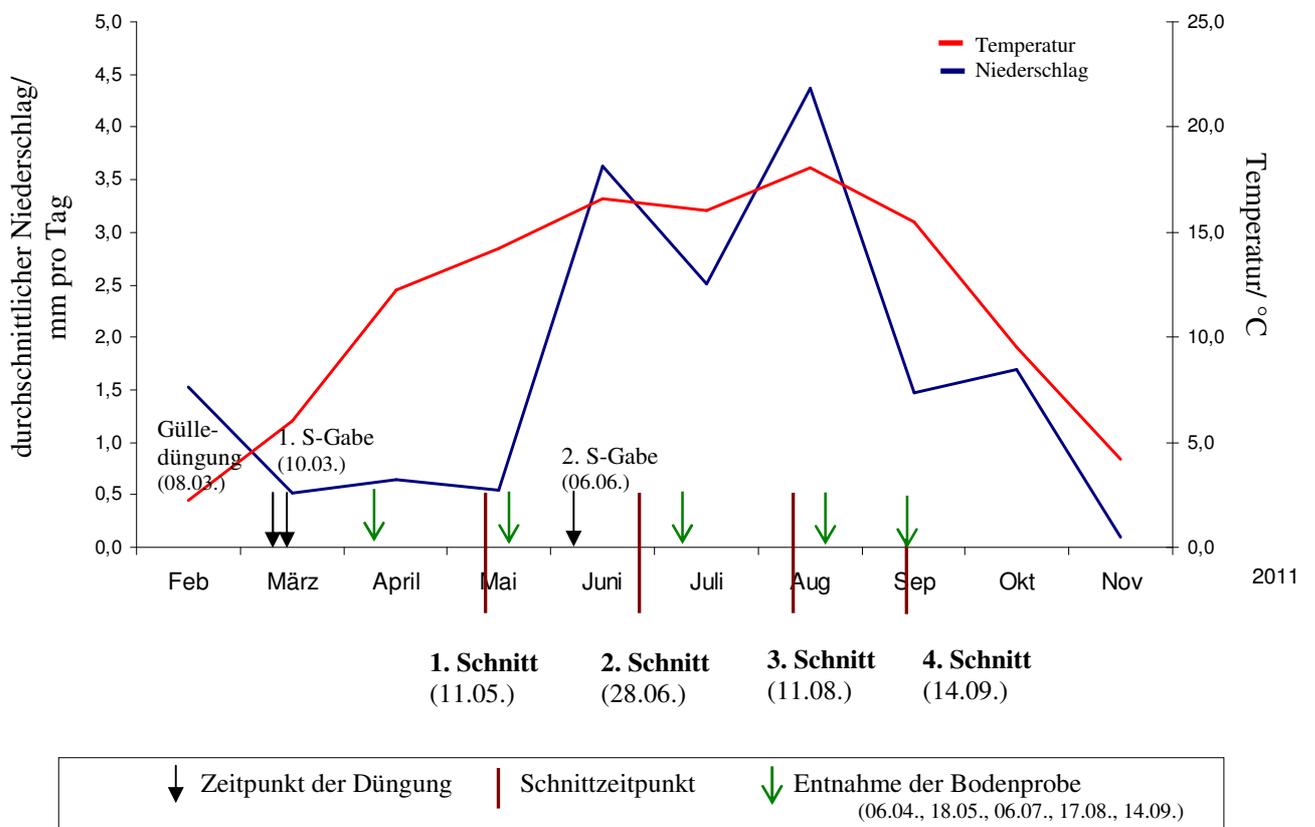
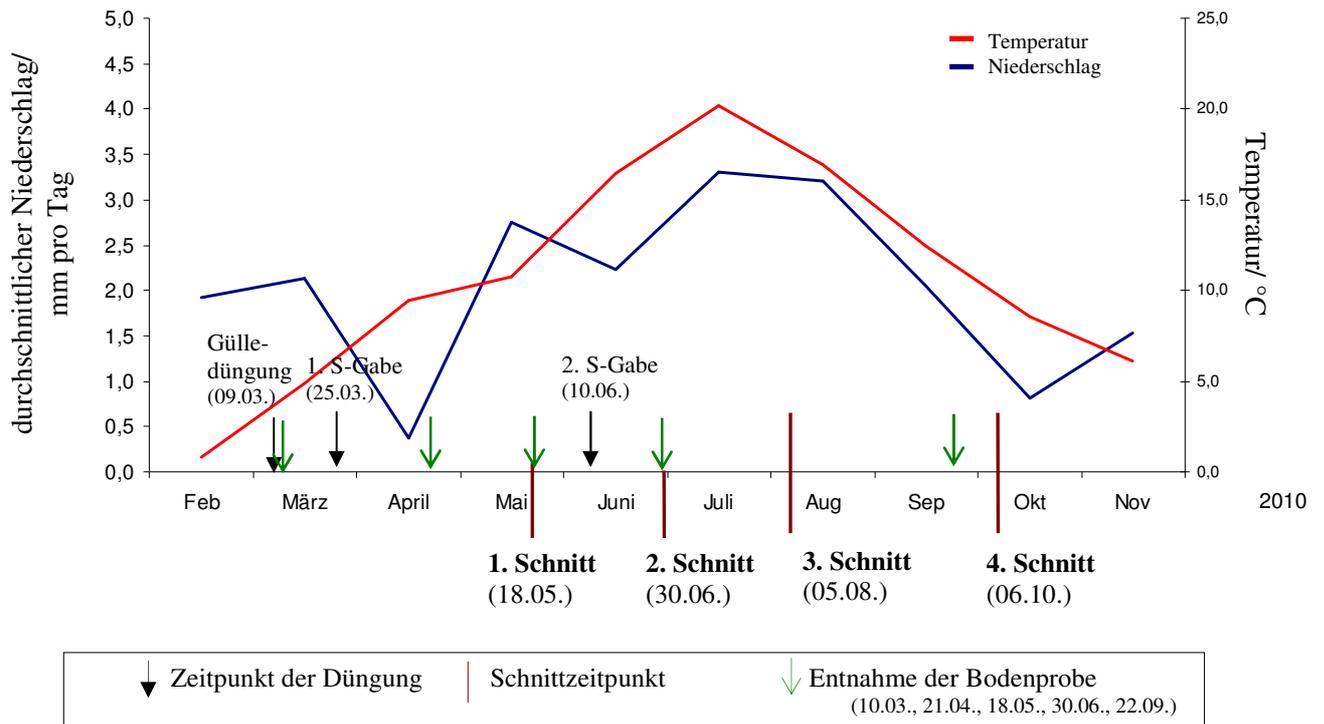


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchablaufs im Jahr 2010 (oben) und 2011 (unten)

### **3.3 Probenahme,–aufbereitung und Parametererfassung**

#### **3.3.1 Boden**

Mit Hilfe eines Bohrstocks wurden pro Parzelle zwei **Bodenproben** in jeweils 0 bis 60 cm Tiefe als Mischprobe gezogen. Der Boden wurde manuell homogenisiert und für die anschließende  $S_{\min}$ -Analyse aufbereitet. Hierzu wurden 50 g Boden in eine Kautex-Schüttelflasche eingewogen und mit 200 ml einer 0,0125 molaren Calciumchlorid-Lösung versetzt. Die Flasche wurde in einen Überkopfschüttler gespannt, eine Stunde bei Raumtemperatur geschüttelt (mit 30 bis 35 Umdrehungen pro Minute) und anschließend mit einem Faltenfilter der Marke Whatman (Sorte 512 ½) filtriert. Anschließend erfolgte eine Untersuchung auf den Schwefelgehalt dieser Extraktionslösung (vgl. Kapitel 3.4). Ebenfalls wurde der Trockensubstanz-Gehalt des Bodens erfasst. Dazu wurden ca. 90 g Boden im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend erneut gewogen. Dadurch ist es möglich den  $S_{\min}$ -Gehalt auf ein Kilogramm Boden zu beziehen.

#### **3.3.2 Pflanze**

Bei jedem Schnitt wurden für die CNS-Analyse (Methode Simultanbestimmung von C, N und S; vgl. Kapitel 3.4 Kap) zwei **Pflanzenproben** von je einem halben Quadratmeter pro Variante genommen, welche nach den einzelnen Pflanzenfraktionen, Leguminosen und Nichtleguminosen, sortiert wurden. Ein Aliquot daraus wurde bei 40°C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und fein vermahlen. Das Gewicht der einzelnen Fraktionen wurde als Frisch- wie auch als Trockenmasse erfasst.

### **3.4 Analyseverfahren**

#### **3.4.1 $S_{\min}$ -Analyse der Bodenproben**

Die Bestimmung des löslichen Schwefels im Boden erfolgte nach der **VDLUFU-Vorschrift HBU Schwefel 3.4.1.54f**. Hierbei wird der  $S_{\min}$ -Gehalt des Bodens mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) gemessen.

Hierzu wird in den aufbereiteten Bodenextrakten (vgl. Kapitel 2.3.1) der S-Gehalt bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 181.972$  bestimmt. Das ermittelte Ergebnis (ausgegeben in mg/l) wird dokumentiert und anschließend auf ein Kilogramm Schwefel pro Hektar (in 0 bis 60 cm Bodentiefe) umgerechnet.

### 3.4.2 CNS-Analyse der Pflanzenproben

Die CNS-Analyse wurde nach **VDLUFA 3.4.1.54b** mit dem Analysator „Vario EL“ der Firma Elementar durchgeführt. Hierzu wurden ca. 80 mg der vermahlenden Pflanzenproben in das Gerät eingebracht und nach den einzelnen Stoffen Kohlenstoff, Schwefel und Stickstoff hin untersucht. Es erfolgte jeweils eine Doppelbestimmung, woraus der Mittelwert gebildet wurde, der als Datengrundlage für die Auswertung diente.

## 3.5 Datenauswertung

Die Aufbereitung der Daten wie auch die Grafikdarstellungen erfolgte mit dem Programm **Microsoft Office Excel 2010**. Die anschließende Statistik wurde mit **PASW Statistics 18** berechnet. Um Unterschiede zwischen den jeweiligen Düngevarianten festzustellen, wurde für jedes Jahr und jeden Faktor (wie z.B.  $S_{\min}$ -Gehalte im Boden, Schwefel- bzw. Stickstoffkonzentration oder Trockensubstanzgehalt) eine **einfaktorielle ANOVA** gerechnet. Feste Faktoren waren die Düngevarianten S0, MgSO<sub>4</sub>\_40, MgSO<sub>4</sub>\_80, CaSO<sub>4</sub>\_80 und Sel\_80, die abhängige Variable war meist der Schnitzeitpunkt, in einigen Fällen auch die Pflanzenfraktion. Anzumerken ist, dass zum Teil die Testvoraussetzung einer Normalverteilung und/ oder homogener Varianzen nicht gewährleistet werden konnte und vernachlässigt werden musste. Allerdings lässt sich dies, auf Grund der geringen Anzahl von Wiederholungen pro Düngevariante, vertreten. Sofern das Ergebnis signifikant war, wurde der **Tuckey-B Test**, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,05$ , als Anschlussstest gewählt um homogene Gruppen zu erhalten und eine Aussage darüber treffen zu können, welche Varianten sich voneinander signifikant unterscheiden. Im Jahr 2010 (4. Schnitt der Nichtleguminosen der CaSO<sub>4</sub>\_80-Variante) lag aufgrund eines

---

Messfehlers ein nichtbilanziertes Design vor, sodass der Anschlussstest nach **Scheffé**, ebenfalls mit  $p = 0,05$ , durchgeführt werden musste, da dieser auch bei Unbilanziertheit möglich ist.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Versuchsergebnisse unterschiedlicher Schwefeldüngungen auf den Flächen des Gladbacherhofs in den Jahren 2010 und 2011 dargestellt werden. Hierzu wurden verschiedene Parameter untersucht, die im Folgenden dargestellt werden:

- $S_{\min}$ -Gehalt im Boden
- Schwefel- und Stickstoffkonzentration im oberirdischen Aufwuchs (getrennt nach Leguminosen und Nichtleguminosen)
- N/S-Verhältnis im oberirdischen Aufwuchs der Leguminosen und Nichtleguminosen
- Trockensubstanzertrag
- Verhältnis der Leguminosen zu Nichtleguminosen im Aufwuchs
- Schwefelabfuhr
- Stickstoffflächenertrag

### 4.1 $S_{\min}$ -Gehalt im Boden

In Tabelle 5 und 6 sind die  $S_{\min}$ -Gehalte des Bodens bei unterschiedlicher Schwefeldüngung auf den Versuchsflächen des Gladbacherhofs in den Jahren 2010 und 2011 dargestellt.

Tabelle 5:  $S_{\min}$ -Gehalte 2010 in kg ha<sup>-1</sup> bei unterschiedlicher Schwefeldüngung in 0 bis 60 cm Bodentiefe (Mittelwert aus vier Wiederholungen) in Abhängigkeit des Probenahmezeitpunktes. Die fett gedruckten Zahlen geben die jeweiligen  $S_{\min}$ -Werte wider, die Buchstaben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Probenahme, die kursiv gedruckten Zahlen die Standardabweichung.

Variante	nach Düngung (21.04.)	1. Schnitt (18.05.)	2. Schnitt (30.06.)	3./ 4. Schnitt (22.09.)
S0	<b>2,0</b> <sup>b</sup> ±0,7	<b>2,8</b> <sup>b</sup> ±1,2	<b>3,0</b> <sup>b</sup> ±1,3	<b>0,0</b> <sup>b</sup> ±0,0
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>28,1</b> <sup>a</sup> ±18,1	<b>54,9</b> <sup>b</sup> ±30,8	<b>23,6</b> <sup>ab</sup> ±18,2	<b>2,4</b> <sup>b</sup> ±3,0
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>40,5</b> <sup>a</sup> ±16,3	<b>120,1</b> <sup>a</sup> ±58,1	<b>59,0</b> <sup>a</sup> ±20,9	<b>44,7</b> <sup>a</sup> ±27,0
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>20,0</b> <sup>ab</sup> ±4,1	<b>39,4</b> <sup>b</sup> ±19,6	<b>48,0</b> <sup>ab</sup> ±38,9	<b>38,5</b> <sup>a</sup> ±23,1
Sel_80	<b>3,0</b> <sup>b</sup> ±1,8	<b>4,4</b> <sup>b</sup> ±1,4	<b>3,6</b> <sup>b</sup> ±0,9	<b>4,1</b> <sup>b</sup> ±6,7

Im Jahr 2010 (vgl. Tabelle 5) zeigt sich bereits nach der Düngung (21.04.) wie auch zu jedem weiteren Schnitt (18.05., 30.06. und 22.09.), dass die mit MgSO<sub>4</sub> oder CaSO<sub>4</sub> gedüngten Flächen sehr viel höhere  $S_{\min}$ -Gehalte im Boden aufweisen als die Kontrolle

(S0) oder die S<sub>el</sub>-gedüngten Flächen. Die beiden letztgenannten weisen lediglich Gehalte zwischen 0 und 4,4 kg Schwefel pro ha auf und unterscheiden sich zu keinem Zeitpunkt signifikant voneinander. Nur im vierten Schnitt zeigt die niedrig dosierte MgSO<sub>4</sub>-Variante ebenfalls einen vergleichbar niedrigen Wert von 2,4 kg S ha<sup>-1</sup>. Währenddessen liegen bei allen anderen Probenahmezeitpunkten die S<sub>min</sub>-Gehalte der magnesium- und calciumsulfatgedüngten Bestände um ein vielfaches höher. Direkt nach der Düngung liegen die Werte je nach Art und Menge der Behandlung zwischen 20 und 40,5 kg ha<sup>-1</sup>, zu den jeweiligen Schnitten zwischen 24 und einem maximal Wert von 120 kg ha<sup>-1</sup>. Trotz diesem sichtbaren Effekt weist nur die MgSO<sub>4</sub>\_80 Variante zu allen Zeitpunkten signifikante Unterschiede zu der Kontrolle wie auch zu den S<sub>el</sub>-gedüngten Beständen auf. Allerdings zeigen sich innerhalb der Varianten starke Schwankungen der S<sub>min</sub>-Gehalte in den Bodenproben, vor allem in den Varianten der Sulfatdünger, was durch die zum Teil sehr hohe Standardabweichung deutlich wird und vor allem bei den sulfatgedüngten Varianten höher liegt.

Tabelle 6: S<sub>min</sub>-Gehalte 2011 in kg ha<sup>-1</sup> bei unterschiedlicher Schwefeldüngung in 0 bis 60 cm Bodentiefe (Mittelwert aus vier Wiederholungen) in Abhängigkeit des Probenahmezeitpunktes. Die fett gedruckten Zahlen geben die jeweiligen S<sub>min</sub>- Werte wider, die Buchstaben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Probenahme, die kursiv gedruckten Zahlen die Standardabweichung.

Variante	nach Düngung (06.04.)	1. Schnitt (18.05.)	2. Schnitt (06.07.)	3. Schnitt (17.08.)	4. Schnitt (14.09.)
S0	<b>7,2</b> <sup>a</sup> ±4,5	<b>4,1</b> <sup>b</sup> ±1,4	<b>4,6</b> <sup>b</sup> ±2,4	<b>9,2</b> <sup>a</sup> ±2,9	<b>28,8</b> <sup>a</sup> ±3,8
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>29,1</b> <sup>a</sup> ±26,6	<b>23,1</b> <sup>ab</sup> ±9,1	<b>30,0</b> <sup>b</sup> ±9,3	<b>29,5</b> <sup>a</sup> ±9,0	<b>51,1</b> <sup>a</sup> ±11,6
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>87,9</b> <sup>a</sup> ±84,2	<b>51,8</b> <sup>a</sup> ±33,6	<b>139,2</b> <sup>a</sup> ±96,6	<b>85,9</b> <sup>a</sup> ±69,8	<b>77,3</b> <sup>a</sup> ±33,6
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>49,9</b> <sup>a</sup> ±47,3	<b>33,3</b> <sup>ab</sup> ±25,3	<b>93,3</b> <sup>ab</sup> ±67,8	<b>60,9</b> <sup>a</sup> ±35,6	<b>74,2</b> <sup>a</sup> ±34,9
S <sub>el</sub> _80	<b>4,2</b> <sup>a</sup> ±0,6	<b>4,9</b> <sup>b</sup> ±2,2	<b>3,2</b> <sup>b</sup> ±2,6	<b>9,3</b> <sup>a</sup> ±3,2	<b>29,9</b> <sup>a</sup> ±3,0

In 2011 (vgl. Tabelle 6) lässt sich ein ähnliches Ergebnis festhalten. Zum einen finden sich auch hier sehr hohe Schwankungen in den S<sub>min</sub>-Gehalten innerhalb der einzelnen Bodenproben, was die Standardabweichung mit Werten bis zu 96,6 deutlich macht. Vor allem die mit sulfathaltigen Düngern (CaSO<sub>4</sub>\_80, MgSO<sub>4</sub>\_40 und 80) behandelten Bestände weisen höhere Standardabweichungen auf als die Vergleichsgruppen. Zum anderen liegen die S<sub>min</sub>-Gehalte der mit Magnesium- bzw. Calciumsulfat gedüngten Flächen mit 23,1 (Minimum) und 139,2 (Maximum) kg ha<sup>-1</sup> wesentlich höher als die der anderen beiden Varianten (S0 und S<sub>el</sub>). Bei der S<sub>el</sub>-Variante wie auch der ungedüngten Kontrolle werden bis zum dritten Schnitt lediglich Werte zwischen 3,2 und 9,3 kg S ha<sup>-1</sup> erreicht. Beim vierten Schnitt steigen diese zwar stark an, auf 28,8 bzw. 29,9 kg ha<sup>-1</sup>,

dennoch lässt sich ein deutlicher Unterschied zu den  $\text{CaSO}_4$ - und  $\text{MgSO}_4$ -Varianten feststellen, bei denen Werte zwischen 51,1 und 77,3  $\text{kg ha}^{-1}$  gemessen werden. Trotz dieser deutlich erkennbaren Tendenz lassen sich signifikante Unterschiede nur bei dem zweiten und dritten Schnitt feststellen. Wie bereits auch 2010 unterscheiden sich nur die mit  $\text{MgSO}_4$  (80 kg) gedüngten Bestände von allen anderen Varianten.

## **4.2 Schwefelkonzentration im oberirdischen Aufwuchs**

### **4.2.1 Leguminosen**

Die Schwefelkonzentration gibt die Menge (in Gramm) an Schwefel an, welche sich in der jeweiligen Pflanzenfraktion bezogen auf die Einheit Trockensubstanz befindet. In Abbildung 7 und 8 sind die Ergebnisse für die Jahre 2010 und 2011 in der Leguminosenfraktion dargestellt.

Bei dem ersten Schnitt in 2010 (vgl. Abb. 7) befindet sich die Schwefelkonzentration im oberirdischen Aufwuchs der Pflanzen auf recht ähnlichem Niveau (0,27 bis 0,36  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$ ) und es lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen, allerdings sieht man eine deutliche Streuung der Werte innerhalb der einzelnen Varianten, sodass die Standardabweichung bei jeder Düngevariante um den Wert 0,1  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$  streut und recht hoch ist. In den darauffolgenden Schnitten ist diese wesentlich geringer (höchstens  $\pm 0,07 \text{ g (100 g TS)}^{-1}$ ). Im zweiten und dritten Schnitt erkennt man einen deutlichen und signifikanten Einfluss der  $\text{MgSO}_4$ - und  $\text{CaSO}_4$ -Düngung im Vergleich zu der Kontrolle und der  $\text{S}_{\text{el}}$ -gedüngten Variante. Im vierten Schnitt unterscheidet sich nur noch die Kontrolle signifikant von den anderen. Im Gegensatz zu der Kontroll- wie auch der  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante nehmen die Schwefelkonzentrationen der Leguminosen in den mit Sulfatdüngern gedüngten Beständen zum zweiten Schnitt deutlich zu und erreichen Werte zwischen 0,37 und 0,43  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$ . Die anderen beiden Varianten fallen unter einen Wert von 0,2  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$ . Die  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante steigt bis zum vierten Schnitt nochmals leicht an, verbleibt allerdings wie auch die Kontrolle und die  $\text{MgSO}_4$ -gedüngten Varianten unter einem Wert von 0,2  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$ .

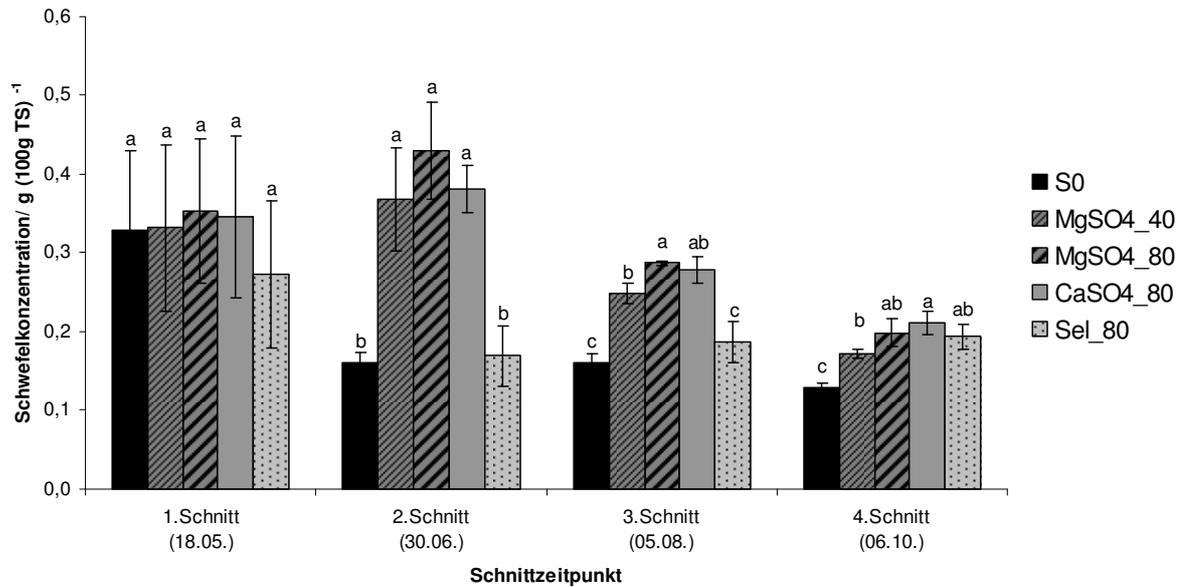


Abbildung 7: **Schwefelkonzentration der Leguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2010 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

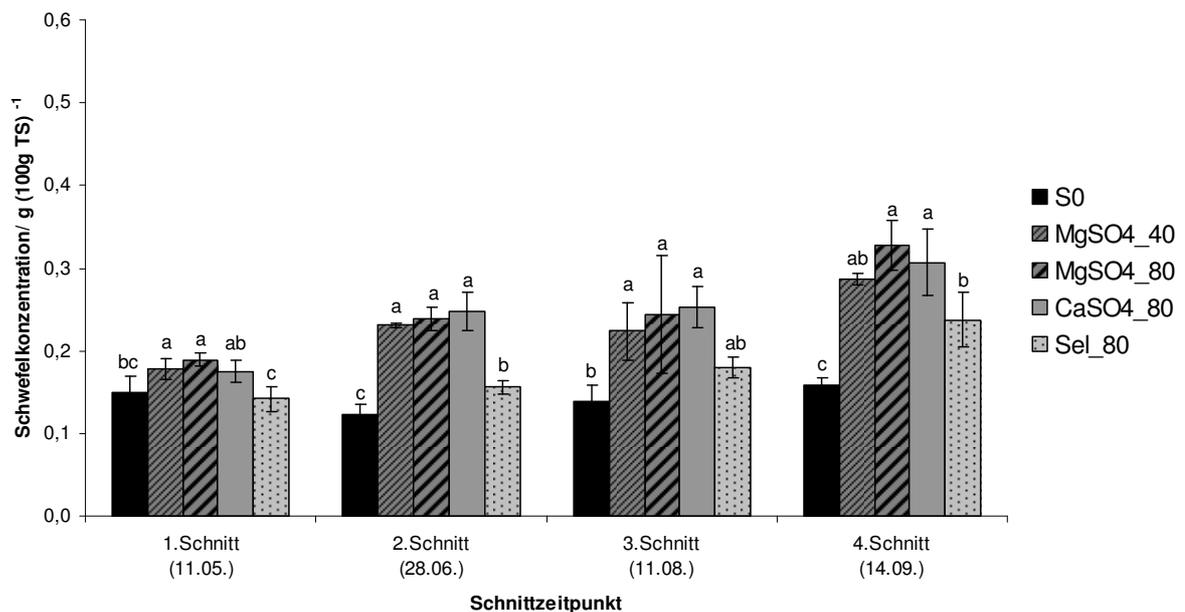


Abbildung 8: **Schwefelkonzentration der Leguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

In 2011 (vgl. Abb. 8) lässt sich bis zum vierten Schnitt eine leicht ansteigende Schwefelkonzentration in der Trockenmasse der Pflanzen feststellen. Ausnahme ist die Kontrolle, welche auf einem Niveau zwischen 0,12 und 0,16 g (100 g TS)<sup>-1</sup> stagniert und sich bei allen Schnitten signifikant von den MgSO<sub>4</sub>- und CaSO<sub>4</sub>-gedüngten Beständen

unterscheidet. Selbst die  $S_{el}$ -Variante zeigt sich im zweiten und vierten Schnitt signifikant verschieden von der Kontrolle und erreicht sogar im letzten Schnitt einen Wert über  $0,2 \text{ g (100 g TS)}^{-1}$ . Hingegen liegen die Schwefelkonzentrationen der Leguminosen in den mit Magnesium- und Calciumsulfat gedüngten Beständen schon bei dem zweiten Schnitt über einem Wert von  $0,2 \text{ g (100 g TS)}^{-1}$ . Bis zum vierten Schnitt steigt diese Konzentration noch auf  $0,29 \text{ g (MgSO}_4_{40})$ ,  $0,33 \text{ g (MgSO}_4_{80})$  bzw.  $0,31 \text{ g (CaSO}_4_{80})$  pro  $100 \text{ g TS}$  an. Ein signifikanter Unterschied zwischen einer Magnesium- bzw. Calciumsulfat-Düngung lässt sich zu keinem Zeitpunkt feststellen.

#### 4.2.2 Nichtleguminosen

In Abbildung 9 und 10 sind die Schwefelkonzentrationen im oberirdischen Aufwuchs ( $\text{g (100 g TS)}^{-1}$ ) in der Nichtleguminosenfraktion dargestellt. Im Vergleich zu der Leguminosenfraktion (vgl. Abbildung 7 und 8) erkennt man, dass im Schnitt sehr viel höhere Konzentrationen an Schwefel in der Trockensubstanz vorliegen. Allerdings treten diese sowohl im Jahr 2010 wie auch 2011 vor allem in den mit Calcium- bzw. Magnesiumsulfat gedüngten Beständen auf.

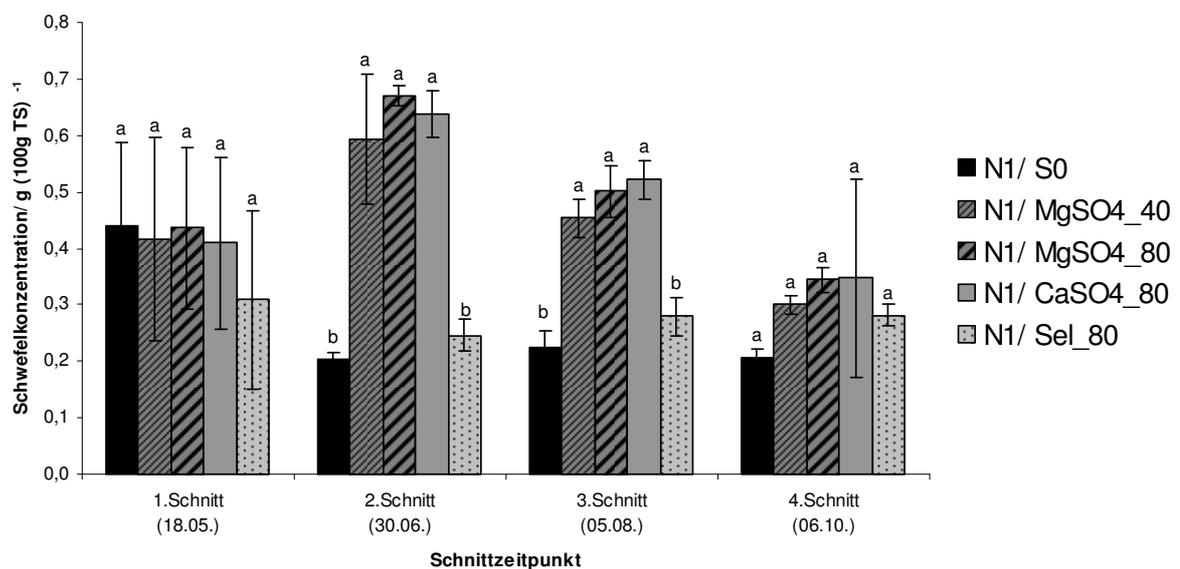


Abbildung 9: **Schwefelkonzentration der Nichtleguminosen** in  $\text{g (100 g TS)}^{-1}$  im oberirdischen Aufwuchs im Jahr **2010** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey bzw. nach Scheffe (nur 4. Schnitt der Nichtleguminosen) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

Nach dem ersten Schnitt in 2010 fällt die S-Konzentration in der Kontrolle wie auch in der  $S_{e1}$ -Variante auf 0,2 bis 0,3 g (100 g TS)<sup>-1</sup> und verbleibt bis letzten Schnitt auf diesem Niveau. Die Nichtleguminosen der anderen gedüngten Bestände (MgSO<sub>4</sub>\_40 bzw. 80 und CaSO<sub>4</sub>\_80) erhöhen im zweiten Schnitt ihre jeweiligen Schwefelkonzentrationen und erreichen mit 0,6 bis 0,7 g (100 g TS)<sup>-1</sup> ihr Maximum. Danach fallen sie wieder leicht ab.

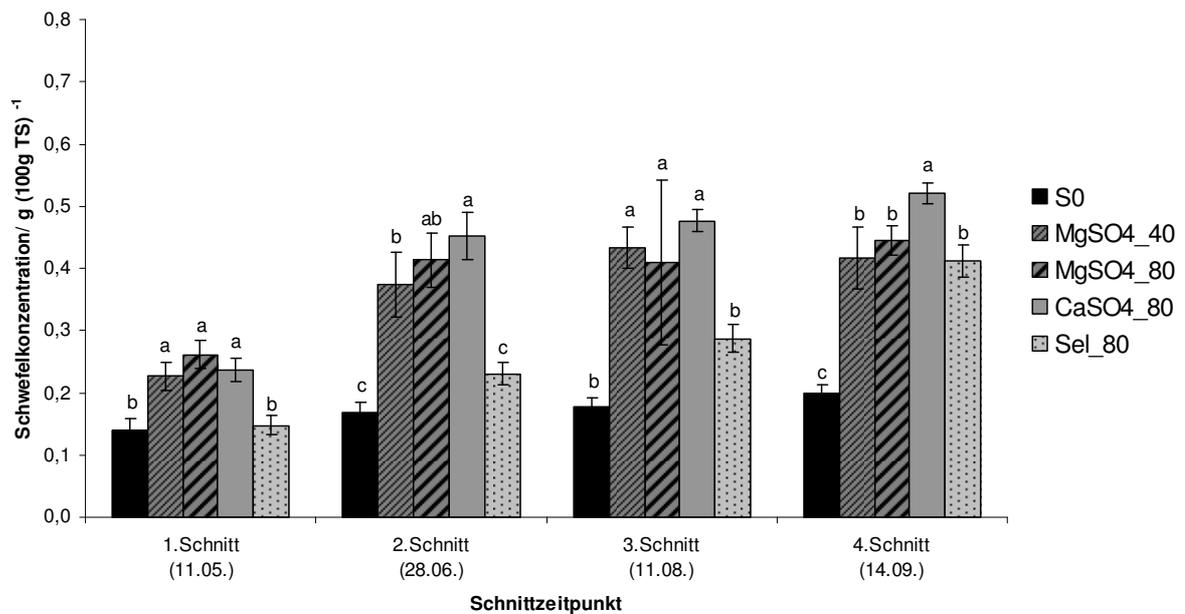


Abbildung 10: **Schwefelkonzentration der Nichtleguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

Hingegen zeigt sich 2011, dass die Schwefelkonzentration des Aufwuchses aller gedüngten Varianten nach dem ersten Schnitt ansteigt. Bei der  $S_{e1}$ -Variante relativ leicht, aber kontinuierlich. Bei den anderen gedüngten Beständen findet vom ersten zum zweiten Schnitt ein starker Konzentrationsanstieg statt, der je nach Sulfatdünger zwischen 59% und 91% liegt. Danach verbleiben sie auf ähnlichem Niveau mit Werten zwischen 0,4 und 0,5 g (100 g TS)<sup>-1</sup>. Die Kontrolle weist keine bedeutende Zunahme der S-Konzentration auf und erreicht nur Werte bis 0,2 g (100 g TS)<sup>-1</sup>.

Festzuhalten bleibt, dass die höchsten Schwefelkonzentrationen, sowohl im Jahr 2010 wie auch 2011, vor allem in den mit Calcium- bzw. Magnesiumsulfat gedüngten Beständen auftreten. Diese unterscheiden sich in beiden Jahren signifikant von der Kontrolle, mit Ausnahme des ersten und letzten Schnitts in 2010. Allerdings lässt sich die Tendenz erkennen, dass die Bestände der sulfatischen Dünger höhere Konzentrationen im oberirdischen Aufwuchs aufweisen, als eine  $S_{e1}$ - oder Nulldüngung.

### 4.3 Stickstoff-Konzentration im oberirdischen Aufwuchs

Analog zu der Schwefelkonzentration gibt die Stickstoffkonzentration den N-Gehalt in der Trockensubstanz der einzelnen Pflanzenfraktionen wieder. Die Ergebnisse sind für beide Jahre nach Leguminosen und Nichtleguminosen getrennt voneinander dargestellt.

#### 4.3.1 Leguminosen

In Abbildung 11 und 12 sind die Stickstoffkonzentrationen im oberirdischen Aufwuchs (in g), bezogen auf 100 g Trockensubstanz, der Leguminosenfraktion für die jeweiligen Schnitte und Dünger im Jahr 2010 und 2011 dargestellt. Die höchsten Konzentrationen in 2010 werden jeweils zu dem ersten Schnitt erzielt, wobei die mit Sulfat gedüngten Bestände Werte zwischen 4,2 und 4,4 g (100 g TS)<sup>-1</sup> annehmen, die S<sub>0</sub>- und S<sub>el</sub>-Variante bei 3,8 bzw. 3,5 g (100 g TS)<sup>-1</sup>. Bis zum vierten Schnitt nehmen die Stickstoffkonzentrationen ab und liegen nur noch in einem Bereich von 2,6 und 3,0 g (100 g TS)<sup>-1</sup>.

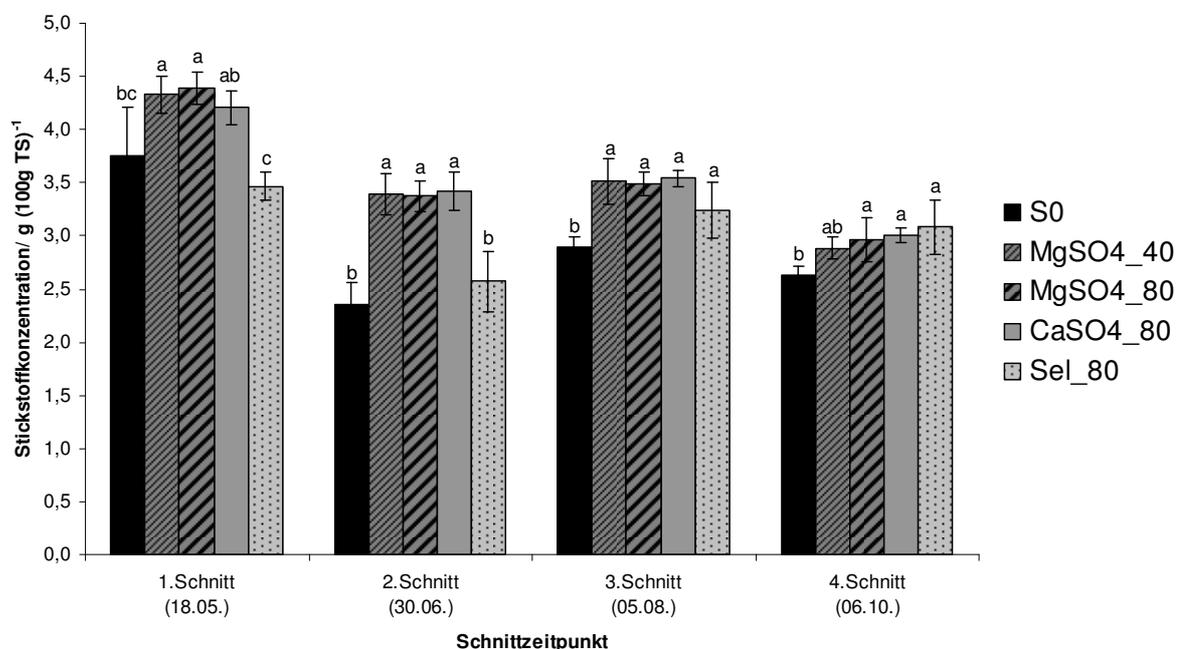


Abbildung 11: **Stickstoffkonzentration der Leguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr **2010** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

Besonders auffällig ist, dass die magnesium- und calciumgedüngten Bestände (bis zum dritten Schnitt) deutlich höhere Stickstoffkonzentrationen in der TS aufweisen als die der beiden anderen Varianten. Lediglich im vierten Schnitt liegen die Konzentrationen in einem recht ähnlichen Bereich. Signifikante Unterschiede zwischen  $\text{CaSO}_4_{80}$  und  $\text{MgSO}_4_{40}$  bzw. 80 lassen sich zu keinem Schnitt finden. Die Kontrolle allerdings unterscheidet sich fast immer signifikant in ihrer Konzentration von den Düngevarianten mit Magnesium- und Calciumsulfat. Im dritten und vierten Schnitt ebenfalls von den mit elementarem Schwefel gedüngten Beständen.

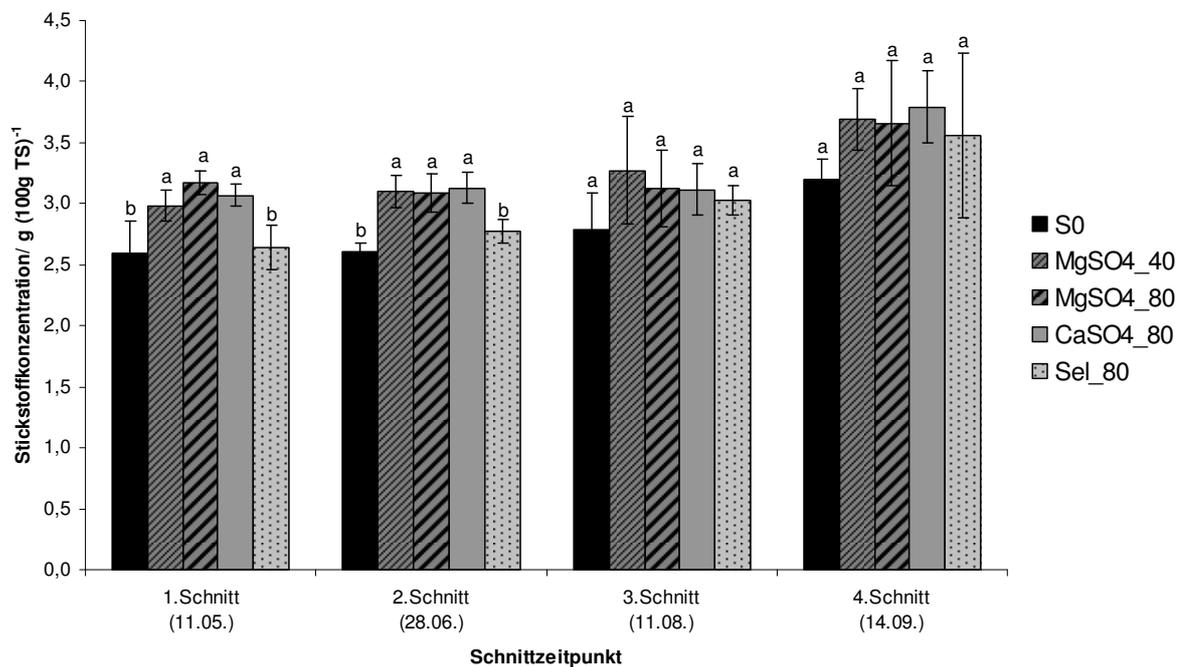


Abbildung 12: **Stickstoffkonzentration der Leguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr **2011** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt an, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

In Abbildung 12 sind die Stickstoffkonzentrationen im Aufwuchs der Leguminosen für das Jahr 2011 dargestellt. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Jahr 2010. Auch wenn die Ergebnisse nur im ersten und zweiten Schnitt signifikant unterschiedlich sind, zeigt sich, dass die Stickstoffkonzentrationen der  $\text{MgSO}_4$ - (40 bzw. 80 kg) und  $\text{CaSO}_4$ - gedüngten Bestände im Schnitt höher sind als die der S<sub>0</sub>- bzw. S<sub>el</sub>-Variante. Während den ersten drei Schnitten bleiben die Werte der jeweiligen Düngevarianten auf ähnlichem Niveau, nehmen aber im vierten Schnitt noch mal etwas zu, sodass Konzentrationen von 3,2 bis 3,8 g N (100 g TS)<sup>-1</sup> erreicht werden.

### 4.3.2 Nichtleguminosen

Die in Abbildung 13 und 14 dargestellten Stickstoffkonzentrationen im oberirdischen Aufwuchs der Nichtleguminosenfraktion zeigen sowohl für 2010 wie auch für das Jahr 2011 deutliche Effekte einer Schwefeldüngung. Betrachtet man die Grafik, für das Jahr 2010 (Abb. 13), erkennt man, dass die Konzentrationen zum dritten Schnitt hin ansteigen, dort bei jeder Variante ihr Maximum erreichen und zum vierten Schnitt wieder leicht abfallen. Während im ersten Schnitt vorerst nur ein sichtbarer Effekt und noch keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind, zeigen sich bereits zum zweiten Schnitt die Unterschiede in der Düngewirkung. Die Bestände, welche mit Magnesium- oder Calciumsulfat behandelt wurden, zeigen höhere Werte und sind signifikant von den anderen beiden Varianten ( $S_0$  und  $S_{el}$ ) verschieden. Diese Wirkung setzt sich im dritten Schnitt fort, wohingegen sich im vierten Schnitt nur noch die Kontrolle von allen anderen Varianten signifikant unterscheidet.

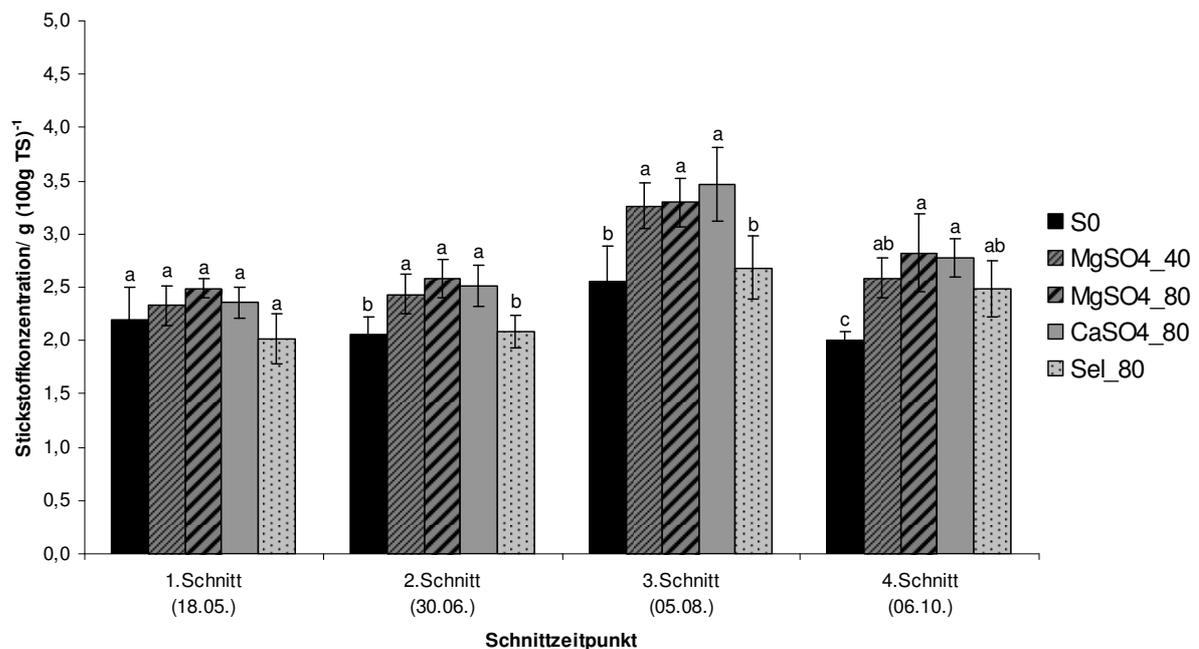


Abbildung 13: **Stickstoffkonzentration der Nichtleguminosen** in  $g (100 g TS)^{-1}$  im oberirdischen Aufwuchs im Jahr **2010** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey und Scheffé (4. Schnitt) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt wieder, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

Im Jahr 2011 (vgl. Abb. 14) nehmen die Stickstoffkonzentrationen mit jedem Schnitt kontinuierlich zu. Wobei die Konzentrationen in der Kontrolle und der  $S_{el}$ -Variante nur relativ leicht, die mit Sulfat gedüngten Bestände sehr stark, ansteigen. Während allen Schnitten zeigt sich, dass sich die Stickstoffkonzentrationen bei den ungedüngten und mit

S<sub>el</sub> behandelten Nichtleguminosen signifikant von den anderen (MgSO<sub>4</sub>\_40, MgSO<sub>4</sub>\_80 und CaSO<sub>4</sub>\_80) unterscheiden.

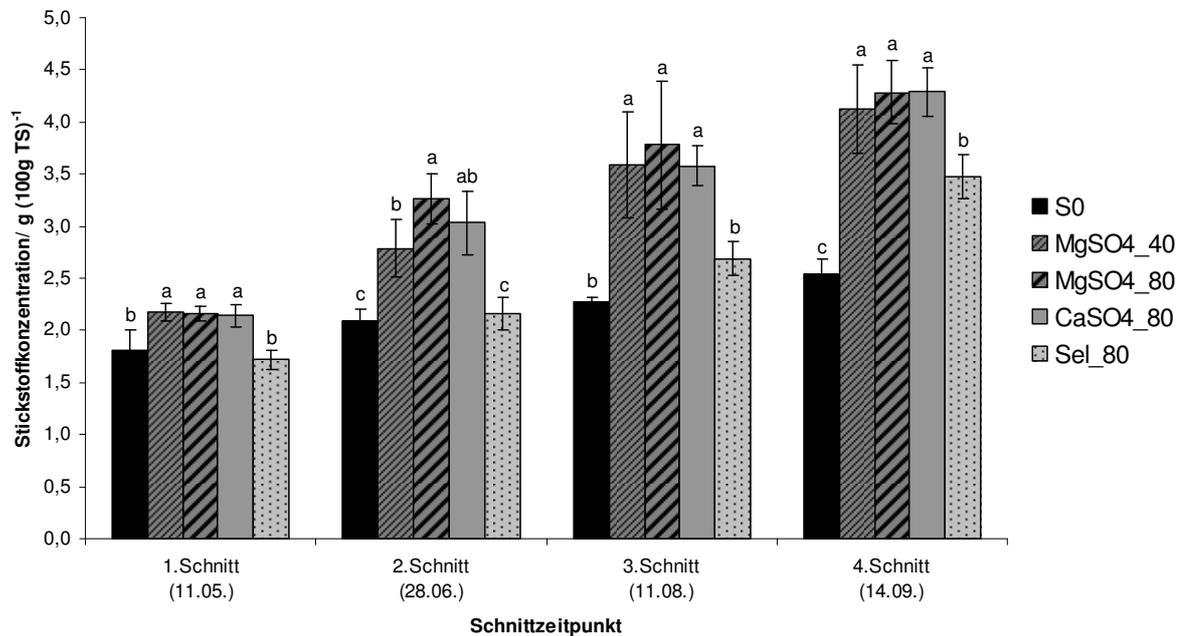


Abbildung 14: **Stickstoffkonzentration der Nichtleguminosen** in g (100 g TS)<sup>-1</sup> im oberirdischen Aufwuchs im Jahr 2011 in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der Düngevarianten in dem jeweiligen Schnitt wieder, die Fehlerbalken die Standardabweichung.

#### 4.4 N/S-Verhältnis im oberirdischen Aufwuchs

Das N/S-Verhältnis gibt das Verhältnis zwischen Stickstoff zu Schwefel an und wird von verschiedenen Autoren herangezogen um Aussagen über den Schwefelversorgungszustand von Beständen zu treffen.

##### 4.4.1 Leguminosen

In 2010 (vgl. Tab. 7) liegt das N/S-Verhältnis der Leguminosen der Sulfat gedüngten Bestände zu allen Schnittzeitpunkten unter 15, mit Ausnahme der niedrig dosierten Magnesiumsulfatdüngung im letzten Schnitt, die einen Wert von 16,7 hat. Hier wird zum zweiten Schnitt das engste Verhältnis erreicht, welches zwischen 8 und 9,5 liegt und

danach wieder leicht ansteigt. Bei den Varianten S<sub>0</sub> und S<sub>el</sub> wird zum zweiten bzw. dritten Schnitt ein N/S-Verhältnis über 15 erreicht, welches zum jeweils nächsten Schnitt eher noch weiter wird. Die Leguminosen der ungedüngten Kontrolle unterscheiden sich, bis auf den ersten Schnitt, immer signifikant von den mit Sulfat gedüngten Beständen, von der S<sub>el</sub>-Variante lediglich im vierten Schnitt.

Tabelle 7: **N/S-Verhältnis** (dimensionslos) **der Leguminosenfraktion** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2010**. Die fett gedruckten Werte geben das N/S-Verhältnis wider, die kursiv gedruckten Werte die Standardabweichung und die Buchstaben mögliche homogene Gruppen (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05)

Variante	1.Schnitt (18.05.)	2.Schnitt (30.06.)	3.Schnitt (05.08.)	4.Schnitt (06.10.)
S <sub>0</sub>	<b>12,4</b> <i>a</i> $\pm 4,2$	<b>14,7</b> <i>a</i> $\pm 1,9$	<b>18,0</b> <i>a</i> $\pm 0,9$	<b>20,4</b> <i>a</i> $\pm 0,5$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>14,8</b> <i>a</i> $\pm 7,3$	<b>9,5</b> <i>b</i> $\pm 2,2$	<b>14,2</b> <i>b</i> $\pm 0,5$	<b>16,7</b> <i>b</i> $\pm 0,7$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>13,2</b> <i>a</i> $\pm 4,0$	<b>8,0</b> <i>b</i> $\pm 1,0$	<b>12,2</b> <i>c</i> $\pm 0,5$	<b>15,0</b> <i>bc</i> $\pm 1,4$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>13,5</b> <i>a</i> $\pm 5,8$	<b>9,0</b> <i>b</i> $\pm 0,9$	<b>12,7</b> <i>bc</i> $\pm 1,0$	<b>14,2</b> <i>c</i> $\pm 1,3$
S <sub>el</sub> _80	<b>14,0</b> <i>a</i> $\pm 5,2$	<b>15,5</b> <i>a</i> $\pm 2,1$	<b>17,4</b> <i>a</i> $\pm 1,0$	<b>16,0</b> <i>bc</i> $\pm 1,5$

Tabelle 8: **N/S-Verhältnis** (dimensionslos) **der Leguminosenfraktion** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2011**. Die fett gedruckten Werte geben das N/S-Verhältnis wider, die kursiv gedruckten Werte die Standardabweichung und die Buchstaben mögliche homogene Gruppen (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05).

Variante	1.Schnitt (11.05.)	2.Schnitt (28.06.)	3.Schnitt (11.08.)	4.Schnitt (14.09.)
S <sub>0</sub>	<b>17,3</b> <i>ab</i> $\pm 0,4$	<b>21,4</b> <i>a</i> $\pm 2,0$	<b>20,2</b> <i>a</i> $\pm 2,8$	<b>20,1</b> <i>a</i> $\pm 0,6$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>16,8</b> <i>b</i> $\pm 0,9$	<b>13,4</b> <i>c</i> $\pm 0,7$	<b>14,9</b> <i>b</i> $\pm 3,0$	<b>12,9</b> <i>bc</i> $\pm 1,1$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>16,8</b> <i>b</i> $\pm 0,7$	<b>13,0</b> <i>c</i> $\pm 1,4$	<b>13,7</b> <i>b</i> $\pm 3,8$	<b>11,2</b> <i>c</i> $\pm 1,0$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>17,6</b> <i>ab</i> $\pm 1,1$	<b>12,7</b> <i>c</i> $\pm 1,4$	<b>12,4</b> <i>b</i> $\pm 0,9$	<b>12,5</b> <i>bc</i> $\pm 1,3$
S <sub>el</sub> _80	<b>18,7</b> <i>a</i> $\pm 0,9$	<b>17,8</b> <i>b</i> $\pm 0,6$	<b>16,9</b> <i>ab</i> $\pm 1,5$	<b>15,0</b> <i>b</i> $\pm 2,0$

In Tabelle 8 sind die N/S-Verhältnisse der verschiedenen Varianten für das Jahr 2011 dargestellt. Auffallend ist, dass in der Kontrolle in allen vier Schnitten das N/S-Verhältnis nicht unter 15 sinkt und sich (bis auf den ersten Schnitt) von allen Sulfat gedüngten Varianten signifikant unterscheidet. Von der S<sub>el</sub>-Variante unterscheidet sich die Kontrolle lediglich im vierten Schnitt, obgleich diese meist ein engeres N/S-Verhältnis aufweist, welches allerdings auch einen Wert von 15 oder höher annimmt. Im Gegensatz dazu zeigen die mit Sulfat gedüngten Bestände nur im ersten Schnitt N/S-Verhältnisse von 15. Anschließend liegen diese unter 15, mit Werten zwischen 11,2 (min) und 14,9 (max). Signifikante Unterschiede zwischen den Sulfat-Düngevarianten gibt es nicht.

#### 4.4.2 Nichtleguminosen

In Tabelle 9 und 10 sind die Ergebnisse des N/S-Verhältnisses für die Nichtleguminosenfraktion angegeben. Im Schnitt ist das N/S-Verhältnis der gedüngten Bestände wesentlich enger als das der Kontrolle wie auch der  $S_{el}$ -Variante.

Tabelle 9: **N/S-Verhältnis** (dimensionslos) **der Nichtleguminosenfraktion** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2010**. Die fett gedruckten Werte geben das N/S-Verhältnis wider, die kursiv gedruckten Werte die Standardabweichung und die Buchstaben mögliche homogene Gruppen (nach Tuckey und Scheffé (4. Schnitt) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05).

<b>Variante</b>	<b>1.Schnitt (18.05.)</b>	<b>2.Schnitt (30.06.)</b>	<b>3.Schnitt (05.08.)</b>	<b>4.Schnitt (06.10.)</b>
S0	<b>5,6</b> <i>a</i> $\pm 2,4$	<b>10,0</b> <i>a</i> $\pm 0,6$	<b>11,5</b> <i>a</i> $\pm 0,9$	<b>9,7</b> <i>a</i> $\pm 0,6$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>6,7</b> <i>a</i> $\pm 3,8$	<b>4,2</b> <i>c</i> $\pm 0,9$	<b>7,2</b> <i>c</i> $\pm 0,6$	<b>8,6</b> <i>a</i> $\pm 0,5$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>6,4</b> <i>a</i> $\pm 3,0$	<b>3,9</b> <i>c</i> $\pm 0,2$	<b>6,6</b> <i>c</i> $\pm 0,9$	<b>8,2</b> <i>a</i> $\pm 1,0$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>6,6</b> <i>a</i> $\pm 3,4$	<b>3,9</b> <i>c</i> $\pm 0,2$	<b>6,7</b> <i>c</i> $\pm 0,9$	<b>8,0</b> <i>a</i> $\pm 0,8$
$S_{el}$ _80	<b>7,6</b> <i>a</i> $\pm 3,0$	<b>8,5</b> <i>b</i> $\pm 1,1$	<b>9,6</b> <i>b</i> $\pm 0,5$	<b>8,8</b> <i>a</i> $\pm 0,3$

Betrachtet man das Jahr 2010 (vgl. Tab 9) wird dies vor allem im zweiten und dritten Schnitt deutlich, in denen das N/S-Verhältnis der MgSO<sub>4</sub>- und CaSO<sub>4</sub>-gedüngten Varianten lediglich zwischen 3,9 und 7,2 liegt und vergleichsweise niedrig ist (S0 hat ein Verhältnis um den Wert 10, die  $S_{el}$ -Variante um 9) und sich signifikant von den anderen unterscheidet. Danach kommt es zu einem leichten Anstieg auf ca. 8 bis 10, wodurch keine weiteren Unterschiede zu der Kontrolle und der  $S_{el}$ -Variante bestehen. Die  $S_{el}$  gedüngten Bestände schwanken im Jahresverlauf verhältnismäßig gering und unterscheiden sich im zweiten und dritten Schnitt von den anderen gedüngten Varianten wie auch von der Kontrolle signifikant. Die Kontrolle selbst zeigt ab dem zweiten Schnitt das höchste N/S-Verhältnis, welches um den Wert 10 liegt.

Dies ist ebenfalls in 2011 (vgl. Tab. 10) der Fall, allerdings liegen hier die Werte bei jedem Schnitt um die 13. Die  $S_{el}$ -Variante liegt mit einem Verhältnis von knapp 12 relativ nah an der Kontrolle, sodass sich diese auch nicht signifikant unterscheiden. Schon zum zweiten Schnitt und mit jedem weiteren wird das Verhältnis von  $S_{el}$  enger und nähert sich mit den Werten den anderen gedüngten Varianten an und unterscheidet sich im dritten und vierten Schnitt nicht mehr signifikant von diesen. Die mit MgSO<sub>4</sub>- und CaSO<sub>4</sub>-gedüngten Bestände weisen zu jedem Schnitt mit 7,5 bis 10 ein recht enges N/S-Verhältnis auf. Dieses schwankt leicht im Jahresverlauf, sodass es im zweiten Schnitt zu einem leichten Rückgang kommt und danach wieder leicht ansteigt. Signifikante Unterschiede zwischen

diesen werden allerdings nicht beobachtet nur, wie bereits erwähnt, deutlich zu der Kontrolle.

Tabelle 10: **N/S-Verhältnis** (dimensionslos) **der Nichtleguminosenfraktion** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2011**. Die fett gedruckten Werte geben das N/S-Verhältnis wider, die kursiv gedruckten Werte die Standardabweichung und die Buchstaben mögliche homogene Gruppen ( nach Tuckey und Scheffé (4. Schnitt) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05).

Variante	1.Schnitt (11.05.)	2.Schnitt (28.06.)	3.Schnitt (11.08.)	4.Schnitt (14.09.)
S0	<b>13,0</b> <i>a</i> $\pm 0,6$	<b>12,5</b> <i>a</i> $\pm 1,1$	<b>12,8</b> <i>a</i> $\pm 0,9$	<b>12,7</b> <i>a</i> $\pm 1,0$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>9,7</b> <i>b</i> $\pm 0,9$	<b>7,5</b> <i>c</i> $\pm 0,8$	<b>8,3</b> <i>b</i> $\pm 1,0$	<b>9,9</b> <i>b</i> $\pm 1,0$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>8,3</b> <i>b</i> $\pm 0,7$	<b>7,9</b> <i>bc</i> $\pm 0,7$	<b>9,8</b> <i>b</i> $\pm 2,4$	<b>9,6</b> <i>b</i> $\pm 0,7$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>9,1</b> <i>b</i> $\pm 0,3$	<b>6,7</b> <i>c</i> $\pm 0,2$	<b>7,5</b> <i>b</i> $\pm 0,6$	<b>8,2</b> <i>b</i> $\pm 0,4$
Sel_80	<b>11,7</b> <i>a</i> $\pm 1,5$	<b>9,4</b> <i>b</i> $\pm 1,1$	<b>9,4</b> <i>b</i> $\pm 0,6$	<b>8,5</b> <i>b</i> $\pm 0,9$

## 4.5 Trockensubstanzertrag

### 4.5.1 Gesamtjahresertrag des Gemenges

In Abbildung 15 und 16 sind die jährlichen Trockensubstanzerträge in Abhängigkeit der Düngewarienten dargestellt und wie viel auf die einzelnen Pflanzenfraktionen entfällt.

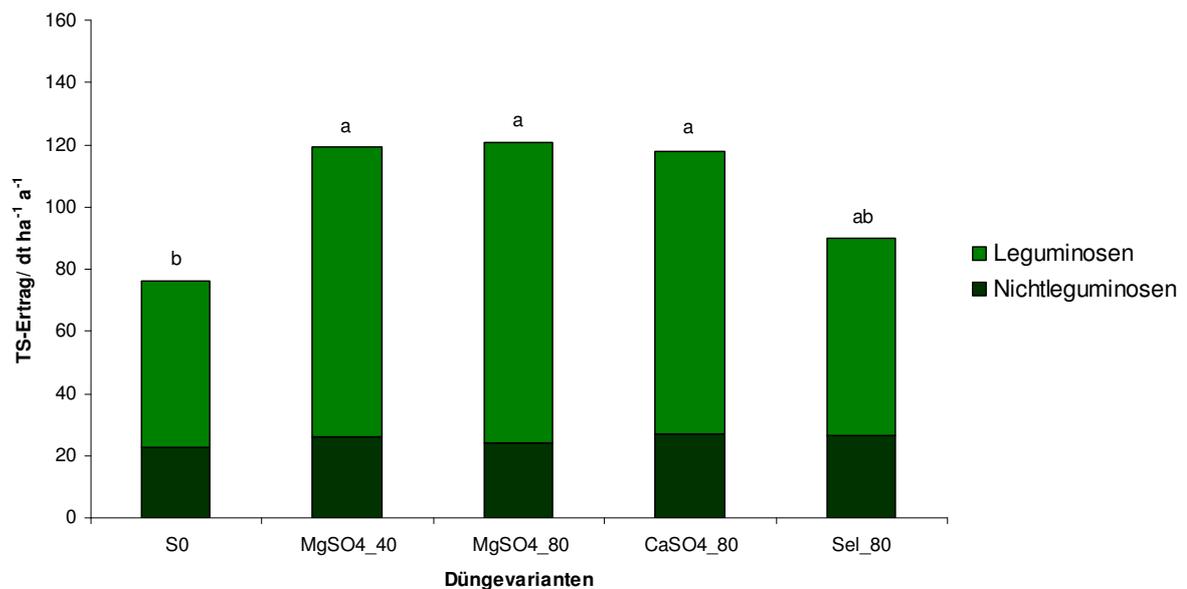


Abbildung 15: **Jahresertrag an Trockensubstanz** in dt ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr **2010**. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngewarienten wieder.

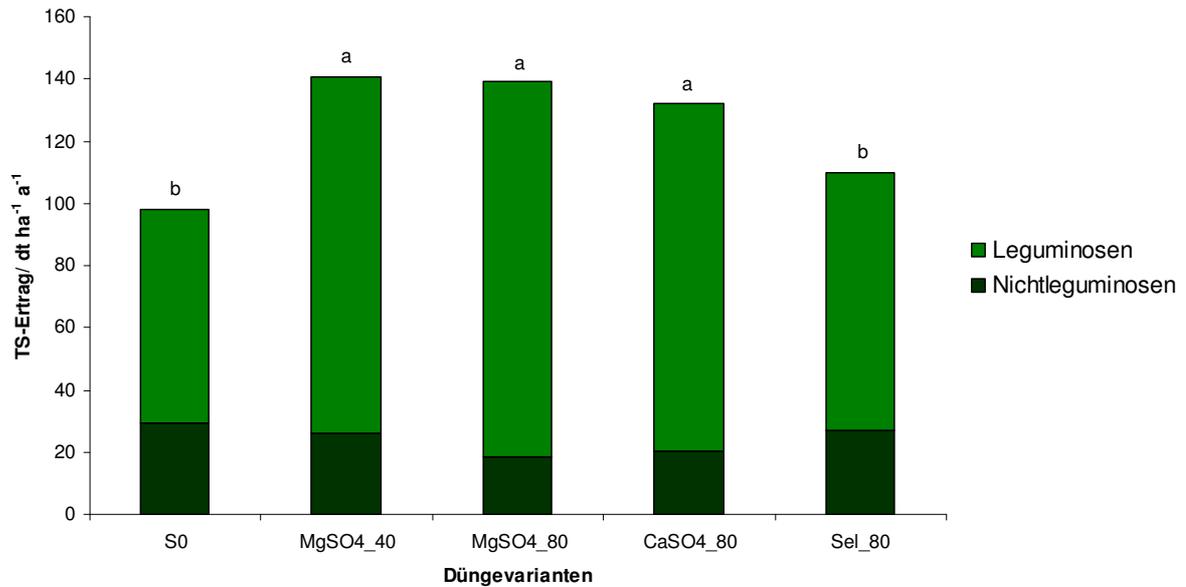


Abbildung 16: **Jahresertrag an Trockensubstanz** in  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr **2011**. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngevarianten wieder.

Betrachtet man Abbildung 15 und 16, wird deutlich, dass sich das Ergebnis beider Jahre sehr ähnelt. Sowohl in 2010 wie auch 2011 liegen die gesamten TS-Erträge (Leguminosen und Nichtleguminosen) bei einer Düngung von  $\text{MgSO}_4_{40}$ ,  $\text{MgSO}_4_{80}$  oder  $\text{CaSO}_4_{80}$  sehr viel höher als mit  $\text{S}_{\text{el}}$  oder gar ohne Schwefeldüngung. Ebenfalls sehr auffällig, dass der Anteil an Trockensubstanz der Nichtleguminosen im Vergleich zu den Leguminosen nur sehr gering ausfällt und bei allen Düngevarianten auf ähnlichem Niveau ist. In 2010 liegen die Erträge zwischen 23 und 27  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , in 2011 zwischen 19 und 29  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Ein signifikanter Unterschied lässt sich nicht feststellen (vgl. Tab. 11). Demgegenüber steht der TS-Ertrag der Leguminosen, der den weitaus größeren Anteil der Ernte bestimmt, wie in Abbildung 15 und 16 zu sehen. Vor allem mit einer Düngung von Magnesium- oder Calciumsulfat können die Erträge deutlich erhöht werden und liegen 2010 zwischen 91 und 97  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , in 2011 bei 112 bis 120  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , wohingegen die Kontrolle nur 53 (2010) bzw. 67 (2011)  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  erreicht und sich signifikant von den anderen unterscheidet (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: **Jahresertrag an Trockensubstanz** in  $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung für die Jahre **2010 und 2011**, wie auch eine prozentuale Ertragssteigerung/ -minderung im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle (gleich 100%). Die Buchstaben geben mögliche homogene Gruppen wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05, die TS-Erträge sind fett gedruckt, der prozentuale Ertrag kursiv.

Variante	Leguminosen				Nichtleguminosen			
	2010		2011		2010		2011	
	TS-Ertrag/ $\text{dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$							
S0	<b>53,3</b> c	<i>100%</i>	<b>68,6</b> b	<i>100%</i>	<b>22,9</b> a	<i>100%</i>	<b>29,4</b> a	<i>100%</i>
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>93,1</b> ab	<i>175%</i>	<b>114,2</b> a	<i>167%</i>	<b>26,0</b> a	<i>114%</i>	<b>26,3</b> a	<i>189%</i>
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>96,6</b> a	<i>181%</i>	<b>120,4</b> a	<i>176%</i>	<b>24,0</b> a	<i>105%</i>	<b>18,7</b> a	<i>164%</i>
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>90,8</b> ab	<i>170%</i>	<b>111,7</b> a	<i>163%</i>	<b>27,2</b> a	<i>119%</i>	<b>20,5</b> a	<i>170%</i>
Sel_80	<b>63,4</b> bc	<i>119%</i>	<b>82,6</b> b	<i>120%</i>	<b>26,7</b> a	<i>117%</i>	<b>27,2</b> a	<i>193%</i>

Tabelle 11 gibt ebenfalls einen Überblick, welche Ertragssteigerungen im Vergleich zu der Kontrolle in den einzelnen Pflanzenfraktionen stattgefunden hat. Bezogen auf die Kontrolle (gleich 100%) können in der Leguminosenfraktion Ertragssteigerungen bei einer MgSO<sub>4</sub>- oder CaSO<sub>4</sub>-Düngung von 70 bis 81% (2010) bzw. 63 bis 76% (2011) erzielt werden. Wohingegen S<sub>el</sub>-behandelte Bestände nur 19% höhere Erträge in der Leguminosenfraktion erzielen. Bei den Nichtleguminosen werden 2010 lediglich (je nach Variante) Steigerungen bis 19% erzielt, in 2011 nimmt der TS-Ertrag sogar trotz Düngung, bis zu 36%, ab.

#### 4.5.2 Trockensubstanz-Ertrag der Leguminosen

Die TS-Erträge der Leguminosen in 2010, welche in Abbildung 17 dargestellt werden, steigen vor allem vom zweiten zum dritten Schnitt stark an und erreichen dort ihr Maximum mit Erträgen bis  $35,5 \text{ dt ha}^{-1}$ . Danach fallen sie sehr stark ab, sogar bis unter das Niveau des ersten Schnittes. Auch wenn die Ergebnisse nicht immer signifikant sind, sieht man deutlich, dass durch eine Düngung mit Magnesiumsulfat, ganz gleich welche Menge, oder Calciumsulfat die TS-Erträge der Leguminosen zu jedem Schnitt höher liegen als die der Kontrolle oder mit einer elementaren Schwefeldüngung.

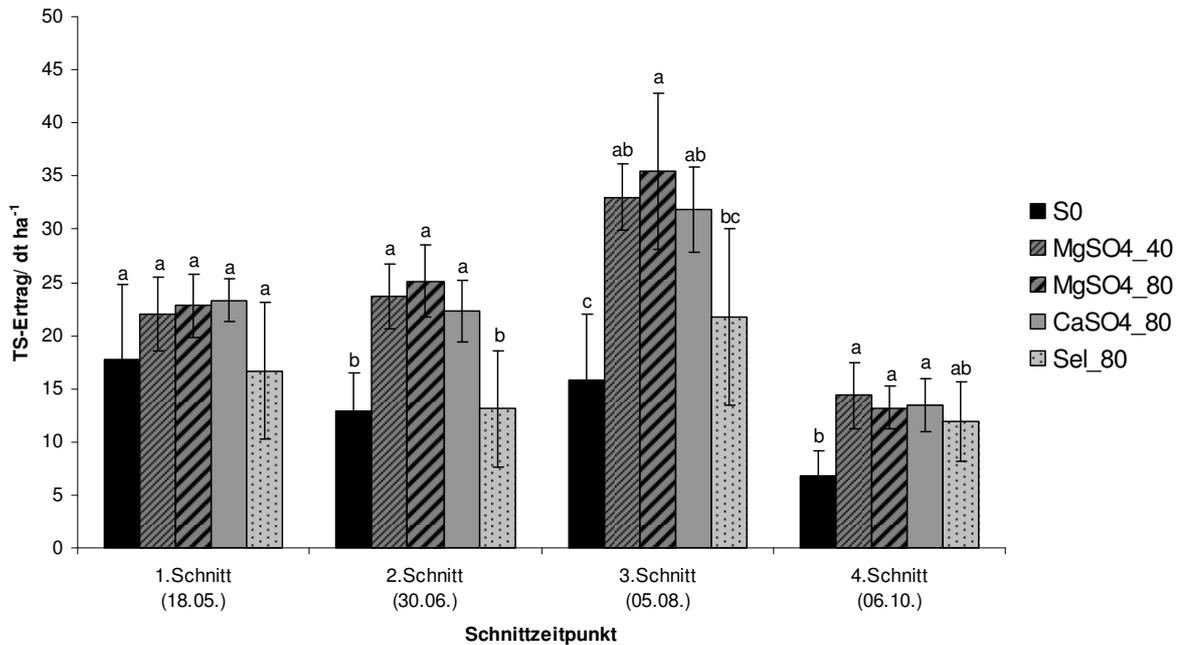


Abbildung 17: **Trockensubstanzerträge** in dt ha<sup>-1</sup> der **Leguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr **2010**. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar, die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05).

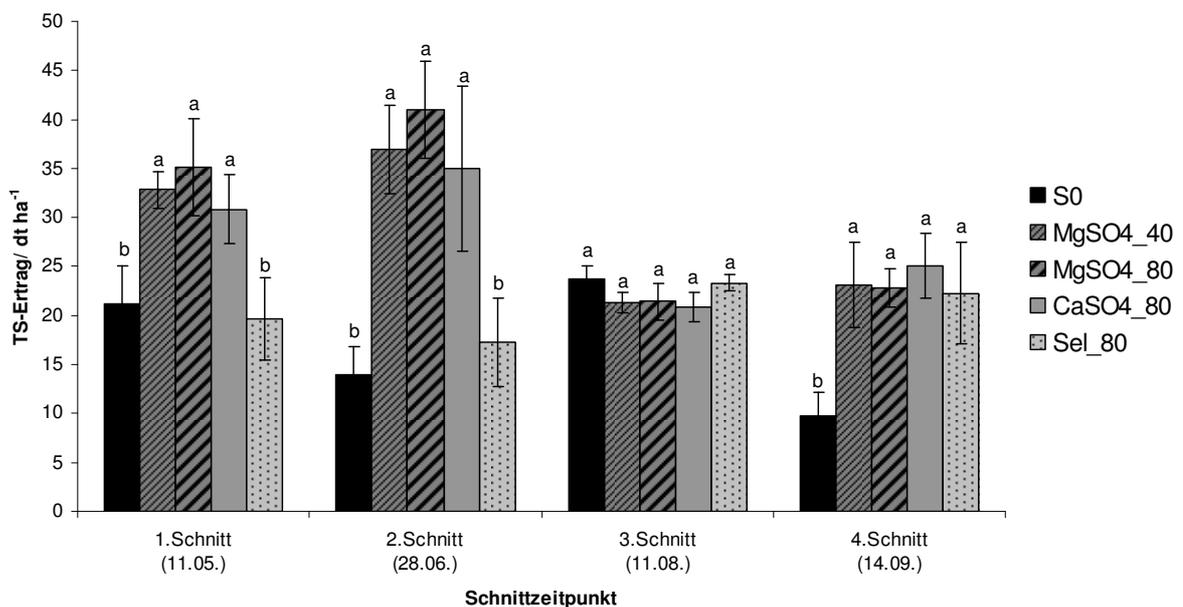


Abbildung 18: **Trockensubstanzerträge** in dt ha<sup>-1</sup> der **Leguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr **2011**. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar, die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05).

Wie bereits 2010 werden auch im Jahr 2011 (vgl. Abb. 18) die höchsten TS-Erträge durch eine Magnesium- oder Calciumsulfatdüngung erreicht. Im Gegensatz zu 2010, wo diese erst beim dritten Schnitt anfallen, werden Erträge bis 41 dt ha<sup>-1</sup> schon während dem ersten und zweiten Schnitt erreicht. Die S<sub>0</sub>- und S<sub>el</sub>-Variante weisen hier nur Erträge zwischen 14 und 21 dt ha<sup>-1</sup> auf und unterscheiden sich signifikant von den anderen. Im dritten Schnitt

erreichen alle Varianten ein ähnliches Ertragsniveau von 21 bis 24 dt ha<sup>-1</sup> und bleiben auch beim vierten Schnitt auf diesem Niveau. Mit Ausnahme der Kontrolle, die nochmals um gut die Hälfte an Trockensubstanz verliert und sich dann signifikant von den anderen unterscheidet.

#### 4.5.3 Trockensubstanz-Ertrag der Nichtleguminosen

Wie bereits in 4.5.1 erörtert bleiben die TS-Erträge im Jahr 2010 und 2011 der Nichtleguminosen auf ähnlich niedrigem Niveau und machen nur einen kleinen Teil der Gesamternte aus. Dies wird ebenfalls in Abb. 19 und 20 deutlich, in welcher die TS-Erträge der Nichtleguminosen nochmals zu jedem Schnittzeitpunkt dargestellt sind. Denn diese liegen in einem Bereich von 3 bis 11 dt ha<sup>-1</sup> (in 2010), wohingegen bei der Leguminosenfraktion Werte zwischen 7 und 35 dt ha<sup>-1</sup> erreicht werden. Auch 2011 werden je nach Variante und Schnittzeitpunkt nur 0,5 bis 17 dt ha<sup>-1</sup> Trockenmasse geerntet, bei den Leguminosen zwischen 10 bis 41 dt ha<sup>-1</sup>, was um ein vielfaches höher ist.

Betrachtet man in Abbildung 19 näher den Verlauf der TS-Erträge für das Jahr 2010 erkennt man eine Schwankung im Jahresverlauf wie auch innerhalb der einzelnen Schnitte und somit der verschiedenen Varianten. Trotzdem weisen sie keine signifikanten Unterschiede auf. Nach dem ersten Schnitt nehmen die Erträge ab, verbleiben bis zum dritten Schnitt auf diesem Niveau und steigen danach wieder etwas an. Ein ähnliches Ergebnis auch für das Jahr 2011 in Abbildung 20. Innerhalb jedem Schnitt gibt es sichtbare Unterschiede, wenn auch keinen statistisch signifikanten. Allerdings fällt auf, dass meist die TS-Erträge der Parzellen, die mit CaSO<sub>4</sub>\_80 bzw. mit hochdosiertem MgSO<sub>4</sub> gedüngt wurden, geringere Mengen an Trockensubstanz aufweisen. Die Kontrolle wie auch die S<sub>eI</sub>-Variante haben in jedem Schnitt die höchsten TS-Erträge. Generell sind die Erträge bei dem ersten Schnitt am höchsten und liegen zwischen 13,5 und 17,3 dt ha<sup>-1</sup>. Danach nehmen die Erträge kontinuierlich und sehr stark ab, im vierten Schnitt lassen sich nur 0,6 bis 2,6 dt ha<sup>-1</sup> ernten.

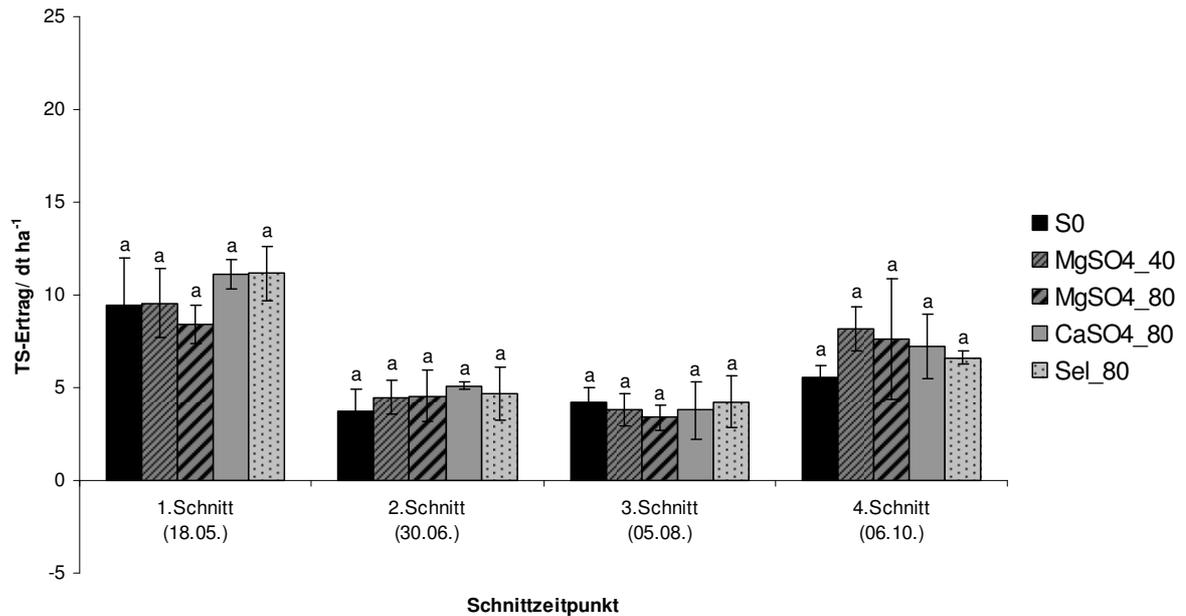


Abbildung 19: **Trockensubstanzerträge** in  $\text{dt ha}^{-1}$  der **Nichtleguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2010. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar, die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05).

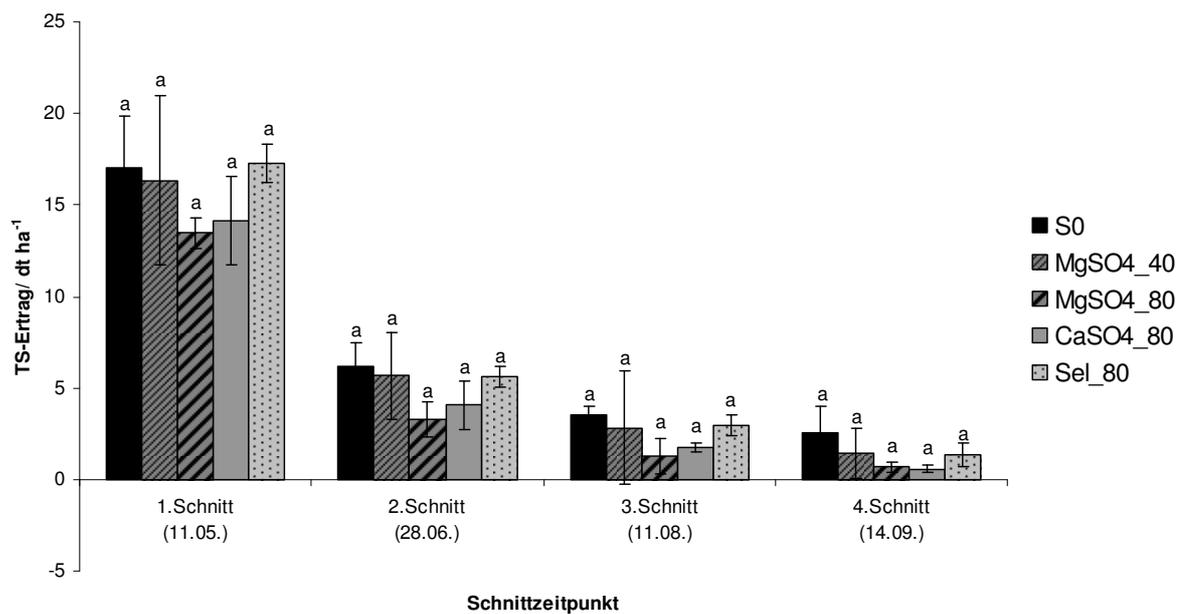


Abbildung 20: **Trockensubstanzerträge** in  $\text{dt ha}^{-1}$  der **Nichtleguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und des Schnittzeitpunktes im Jahr 2011. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar, die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05).

## 4.6 Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis im Aufwuchs

Dieses Verhältnis errechnet sich aus dem Quotienten des TS-Ertrags der Leguminosen und der Nichtleguminosen. Daraus folgt, dass je größer der Wert ist umso mehr Leguminosen befinden sich im Erntegut und umgekehrt. Sprich je kleiner das Verhältnis umso geringer ist der Anteil an Leguminosen.

In Tabelle 12 sieht man das Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis im Jahr 2010. Während den einzelnen Schnitten gibt es kaum sichtbare wie auch signifikante Unterschiede. Im zweiten und dritten Schnitt steigen die Werte etwas an, sodass sich eine leichte Tendenz abzeichnet, dass die mit Magnesium- und Calciumsulfat gedüngten Parzellen im Vergleich zu den anderen einen höheren Leguminosen- als Nichtleguminosenanteil aufweisen.

Tab 12: **Verhältnis der Leguminosen zu Nichtleguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2010**. Die kursivgedruckten Werte geben zudem die Standardabweichung an, die Buchstaben mögliche homogene Gruppen nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

Variante	1.Schnitt (18.05.)	2.Schnitt (30.06.)	3.Schnitt (05.08.)	4.Schnitt (06.10.)
S0	<b>2,1</b> a $\pm 1,5$	<b>3,8</b> ab $\pm 1,7$	<b>4,0</b> a $\pm 1,8$	<b>1,2</b> a $\pm 0,4$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>2,4</b> a $\pm 0,7$	<b>5,4</b> a $\pm 0,7$	<b>9,0</b> a $\pm 2,3$	<b>1,8</b> a $\pm 0,4$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>2,7</b> a $\pm 0,5$	<b>5,9</b> a $\pm 1,7$	<b>11,0</b> a $\pm 3,9$	<b>2,1</b> a $\pm 1,3$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>2,1</b> a $\pm 0,2$	<b>4,4</b> ab $\pm 0,6$	<b>9,7</b> a $\pm 4,2$	<b>1,9</b> a $\pm 0,7$
S <sub>el</sub> _80	<b>1,5</b> a $\pm 0,4$	<b>2,7</b> b $\pm 0,5$	<b>6,1</b> a $\pm 4,0$	<b>1,8</b> a $\pm 0,6$

Tab 13: **Verhältnis der Leguminosen zu Nichtleguminosen** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt im Jahr **2011**. Die kursivgedruckten Werte geben zudem die Standardabweichung an, die Buchstaben mögliche homogene Gruppen nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

Variante	1.Schnitt (11.05.)	2.Schnitt (28.06.)	3.Schnitt (11.08.)	4.Schnitt (14.09.)
S0	<b>1,3</b> bc $\pm 0,4$	<b>2,4</b> b $\pm 0,8$	<b>6,7</b> a $\pm 0,7$	<b>6,2</b> a $\pm 6,7$
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>2,2</b> ab $\pm 0,7$	<b>7,5</b> ab $\pm 3,8$	<b>18,9</b> a $\pm 19,6$	<b>35,2</b> a $\pm 34,1$
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>2,6</b> a $\pm 0,4$	<b>13,1</b> a $\pm 2,5$	<b>23,2</b> a $\pm 11,2$	<b>41,8</b> a $\pm 27,9$
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>2,3</b> ab $\pm 0,6$	<b>9,9</b> a $\pm 5,7$	<b>12,2</b> a $\pm 2,4$	<b>46,7</b> a $\pm 17,4$
S <sub>el</sub> _80	<b>1,1</b> c $\pm 0,2$	<b>3,1</b> b $\pm 0,6$	<b>8,1</b> a $\pm 1,7$	<b>19,3</b> a $\pm 9,2$

Für das Jahr 2011, in Tabelle 13 dargestellt, zeigt sich hingegen, dass sich das Verhältnis mit jedem Schnitt hin zu einem höheren Leguminosenanteil entwickelt. Vor allem die Varianten mit einer MgSO<sub>4</sub>- oder CaSO<sub>4</sub>-Düngung haben einen großen Anstieg zu verzeichnen. Zwar lassen sich keine statistischen Unterschiede zu den anderen beiden Varianten (S0 und S<sub>el</sub>) feststellen, aber trotzdem sind die Anteile der Leguminosen im Verhältnis zu den Nichtleguminosen wesentlich höher.

## 4.7 Schwefelabfuhr

### 4.7.1 Jahresübersicht

In Abbildung 21 und 22 sind die gesamten Mengen an Schwefel für das Jahr 2010 bzw. 2011 dargestellt, welche mit der Ernte abgefahren werden und sich für jede Düngevariante aus dem aufsummierten Produkt der Trockensubstanzerträge und der S-Konzentration in den Pflanzen ergibt. Ebenfalls zeigt die Grafik wie hoch daran der Anteil der Leguminosen bzw. Nichtleguminosen ist.

In beiden Jahren lässt sich ein ähnliches Bild feststellen. Zum einen tragen die Leguminosen zu einem viel höheren Anteil an der Schwefelabfuhr bei als die Nichtleguminosen. In 2010 beläuft sich der Leguminosenanteil je nach Variante auf 63 bis 74%, in 2011 liegt er etwas höher mit 68 bis 84% (vgl. Anhang A1). Zum anderen lässt sich deutlich erkennen, dass bei den mit  $\text{MgSO}_4$ - und  $\text{CaSO}_4$ -gedüngten Parzellen wesentlich höhere Schwefelmengen mit dem Erntegut abgefahren werden. In 2010 (vgl. Abb. 21) liegen die Werte zwischen 37 und 43  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , in 2011 (vgl. Abb. 22) etwas niedriger bei 33 bis 34  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Im Vergleich dazu die Nullparzelle mit einer S-Abfuhr von lediglich 18 (in 2010) und 14 (in 2011)  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , die  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante mit 21 (in 2010) bzw. 20 (in 2011)  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ .

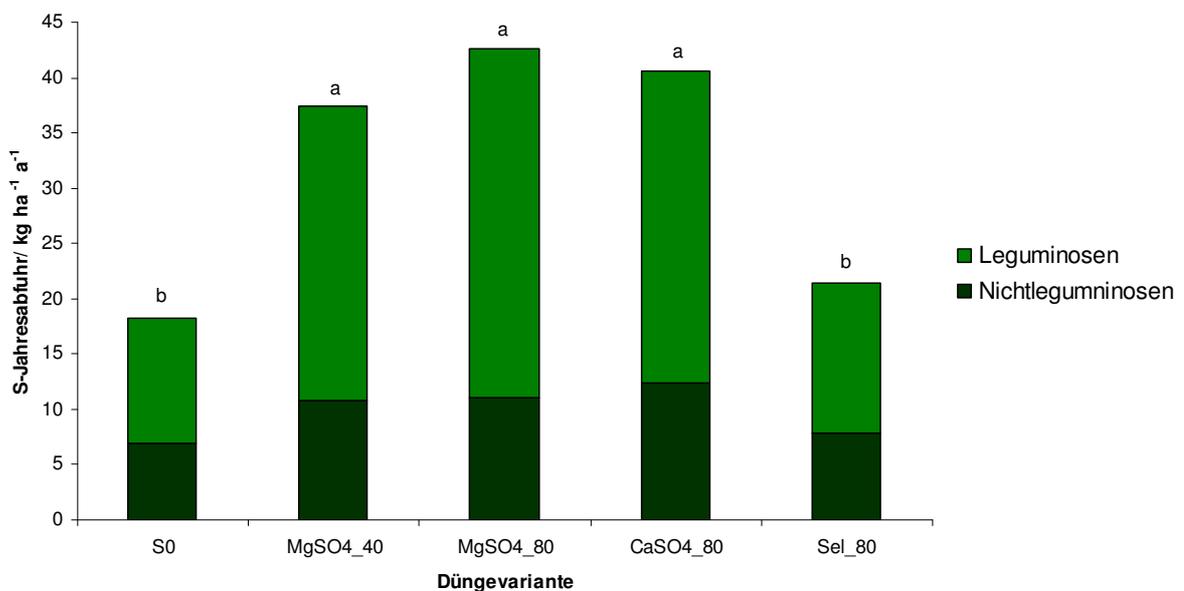


Abbildung 21: **S-Jahresabfuhr** in  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  der Leguminososen und Nichtleguminososen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr **2010**. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngevarianten wieder.

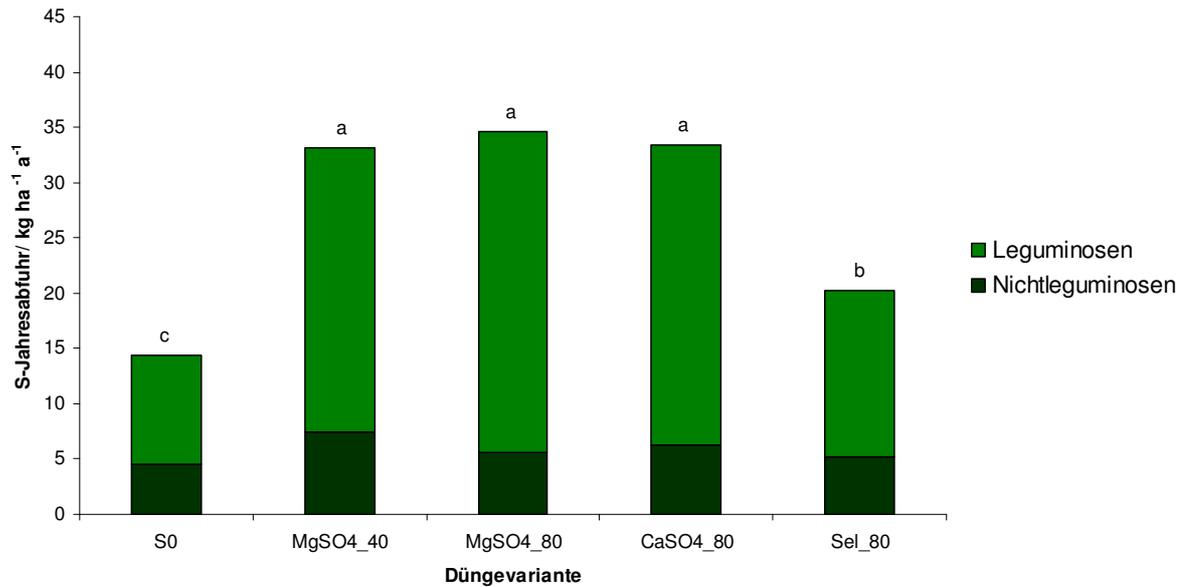


Abbildung 22: **S-Jahresabfuhr** in  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr **2011**. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngevarianten wieder.

Damit liegen die Abfuhrmengen der Magnesium- und Calciumsulfatvarianten um einiges höher, was sich ebenfalls in statistischen Unterschieden widerspiegelt. In 2010 wie auch 2011 unterscheiden sich alle Sulfatdünger signifikant von den anderen beiden Düngevarianten, allerdings nicht untereinander. Zudem weisen im Jahr 2011 die  $\text{S}_{\text{el}}$ -gedüngten Bestände noch zusätzlich signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf. Da der Leguminosenanteil an der Gesamtabfuhr weitaus größer ist, als der der Nichtleguminosen, lässt sich dieses Ergebnis übertragen. Sowohl in 2010 wie auch 2011 unterscheiden sich die Sulfatdünger signifikant zu der Null- und  $\text{S}_{\text{el}}$ -Düngung. In 2010 gibt es zwischen den beiden letztgenannten Varianten keinen Unterschied, in 2011 allerdings einen signifikanten. Betrachtet man die Nichtleguminosenfraktion und ihre S-Abfuhr sieht man, dass die Mengen auf relativ ähnlichen Niveau liegen, in 2010 zwischen 7 und  $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , in 2011 zwischen 5 und  $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Während sich in 2011 keine signifikanten Unterschiede unter den einzelnen Varianten zeigen, zeichnet sich 2010 ein leichter Trend ab, dass die Sulfatdünger eine etwas höhere S-Abfuhr haben als  $\text{S}_{\text{el}}$  oder S0. Allerdings unterscheiden sich lediglich die ungedüngte und die calciumsulfatgedüngte Variante voneinander.

### 4.7.2 Leguminosen

Das in 4.7.1 dargestellte Ergebnis der jährlichen Schwefelabfuhr soll in Abbildung 23 und 24 nochmals genauer untersucht werden. Hierfür werden die Schwefelabfuhr, die mit dem Erntegut anfallen, nach den einzelnen Schnitten und Pflanzenfraktionen aufgliedert. Die höchsten Erträge in jedem Schnitt werden sowohl in 2010 wie auch 2011 von den mit Magnesium- und Calciumsulfat gedüngten Beständen erzielt. Vor allem im zweiten und dritten Schnitt in 2010 (Abb. 23) zeigt sich ein deutlicher und auch signifikanter Unterschied zu der Kontrolle und der  $S_{el}$ -Variante. Es werden Abfuhrmengen von 8,2 bis 10,6  $kg\ ha^{-1}$  erreicht, wohingegen die Kontrolle und die  $S_{el}$ -Variante lediglich im Bereich von 2,1 und 4,0  $kg\ ha^{-1}$  liegen. Im ersten Schnitt sind die Standardabweichungen sehr hoch und es finden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen allen Varianten, allerdings zeichnet sich auch das Ergebnis ab, dass die sulfathaltigen Dünger höhere S-Abfuhrmengen aufweisen als die mit  $S_0$  oder  $S_{el}$ - behandelten Bestände. Im vierten Schnitt nehmen generell die Erträge deutlich ab und alle gedüngten Düngevarianten liegen auf ähnlichem Niveau, mit Erträgen von 2,3 bis 2,8  $kg\ ha^{-1}$ , und unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle, welche lediglich eine S-Abfuhr von 0,9  $kg$  pro Hektar erreicht.

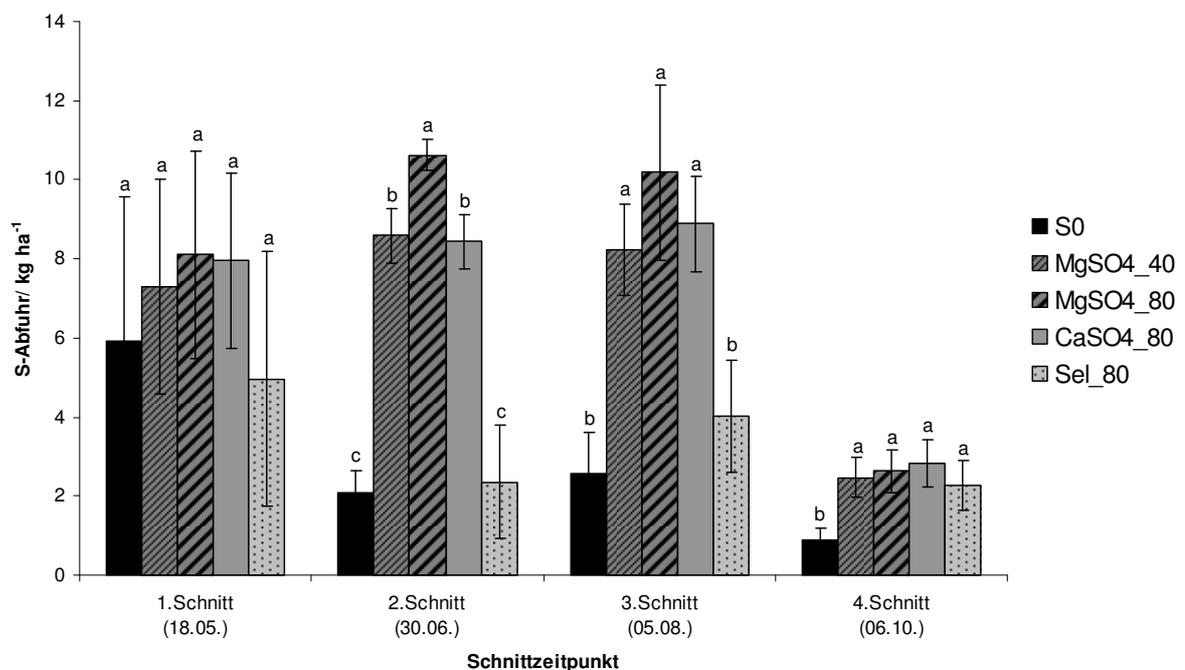


Abbildung 23: **S-Abfuhr** der **Leguminosenfraktion** in  $kg\ ha^{-1}$  im Jahr **2010** der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

In 2011 (vgl. Abb.22) erreichen ebenfalls die sulfatischgedüngten Bestände die höchste S-Abfuhr mit Werten von 8,5 bis 9,8 kg ha<sup>-1</sup>. Generell unterscheiden sich diese drei Varianten statistisch eindeutig von der S<sub>0</sub> und S<sub>el</sub>-Variante, mit Ausnahme der niedrigdosierten MgSO<sub>4</sub>-Variante im dritten und vierten Schnitt. Diese unterscheidet sich lediglich von der Kontrolle signifikant. Dies ist der Fall, da die S-Abfuhrmengen der S<sub>el</sub>-Bestände nach dem zweiten Schnitt noch mal leicht ansteigen, auf 4,2 kg ha<sup>-1</sup> (3.Schnitt) und 5,2 kg ha<sup>-1</sup> (4.Schnitt), und sich somit dem Niveau der gedüngten Bestände nähern.

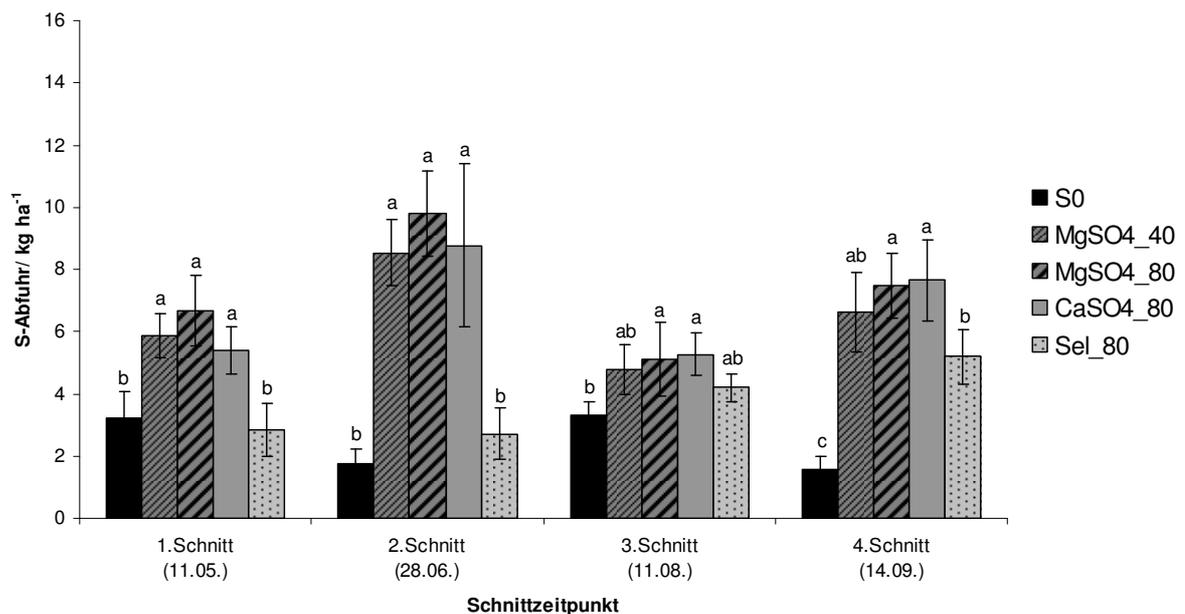


Abbildung 24: **S-Abfuhr** der **Leguminosenfraktion** in kg ha<sup>-1</sup> im Jahr **2011** der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

### 4.7.3 Nichtleguminosen

Wie bereits bei der Leguminosenfraktion zeigt sich auch bei den Nichtleguminosen im Jahr 2010 (vgl. Abb.25), dass bei einer MgSO<sub>4</sub>- oder auch CaSO<sub>4</sub>-Düngung meist eine höhere S-Abfuhr mit der Ernte erzielt werden kann als mit einer S<sub>el</sub>- oder Nulldüngung. Auf Grund der zum Teil sehr hohen Standardabweichungen und damit Schwankungen innerhalb der Varianten, kann dieses Ergebnis nur im zweiten Schnitt statistisch eindeutig belegt werden. Bei allen Varianten kommt es nach dem ersten Schnitt zu einem leichten Absinken der Schwefelmengen im Erntegut. Danach verleiben sie bis zum letzten Schnitt mehr oder weniger auf ihrem jeweiligen Niveau.

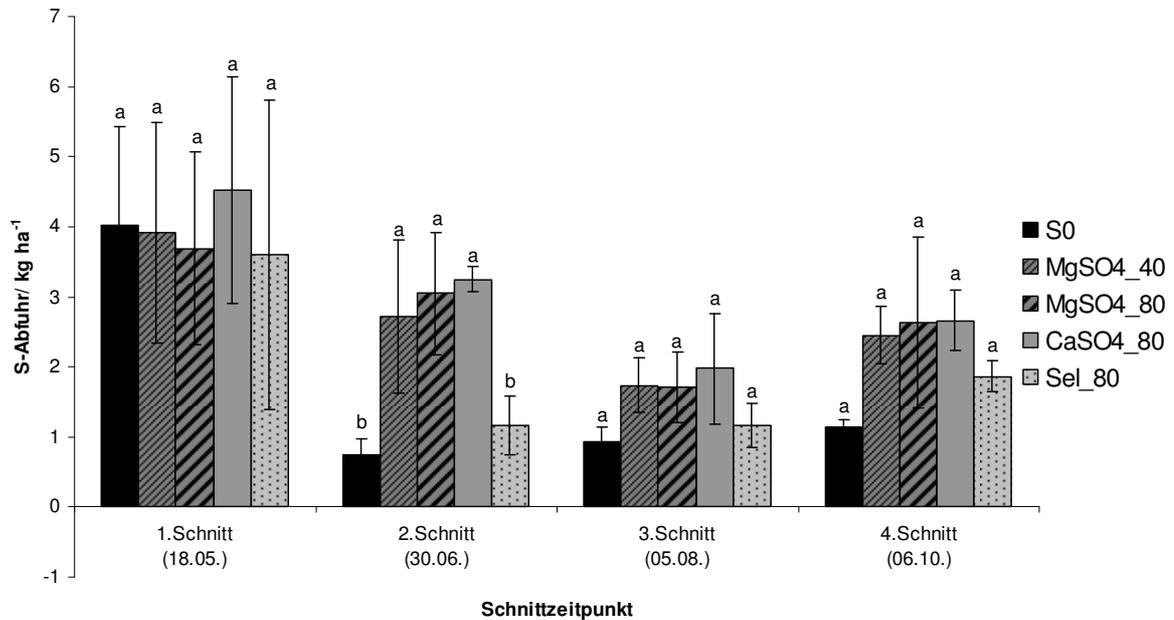


Abbildung 25: **S-Abfuhr** der **Nichtleguminosenfraktion** in  $\text{kg ha}^{-1}$  im Jahr **2010** der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey und Scheffé (4. Schnitt in 2010) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

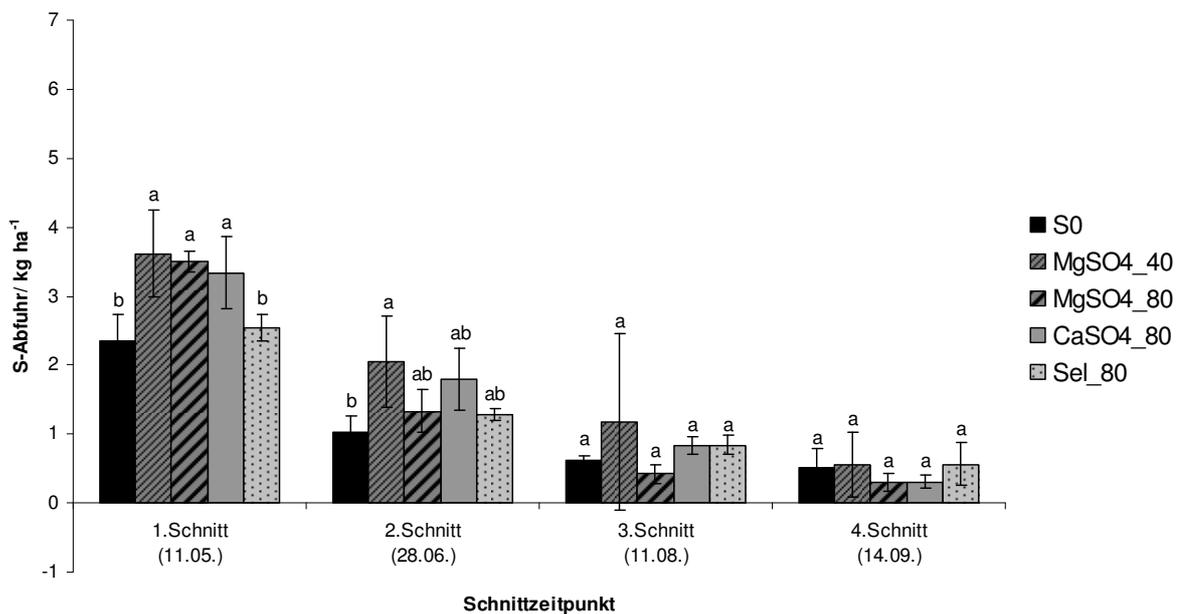


Abbildung 26: **S-Abfuhr** der **Nichtleguminosenfraktion** in  $\text{kg ha}^{-1}$  im Jahr **2011** der einzelnen Pflanzenfraktionen in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

Stattdessen nimmt die S-Abfuhr in 2011 (vgl. Abb. 26) von dem ersten bis zum vierten Schnitt kontinuierlich ab. Während im ersten Schnitt die Erträge noch zwischen 2,4 und 3,6  $\text{kg ha}^{-1}$  liegen, werden im vierten Schnitt nur noch 0,3 bis 0,6  $\text{kg ha}^{-1}$  erreicht. Statistische Unterschiede lassen sich nur im ersten Schnitt zwischen den mit Sulfat

gedüngten Beständen und den anderen beiden ( $S_{el}$  und  $S_0$ ) finden. Schon im zweiten Schnitt unterscheidet sich nur noch die Kontrolle von der niedrig dosierten  $MgSO_4$ -Variante signifikant.

## 4.8 Stickstoffflächenertrag

### 4.8.1 Jahresübersicht

Analog zu der S-Abfuhr errechnet sich der N-Jahresertrag für die jeweiligen Düngevarianten aus dem aufsummierten Produkt der Stickstoffkonzentration und dem TS-Ertrag der Pflanzen. Diese sind in Abbildung 27 und 28 dargestellt und geben einen Überblick über den gesamten Stickstoffertrag eines Jahres der einzelnen Düngevarianten wie auch der Anteil, der auf die jeweilige Pflanzenfraktion entfällt.

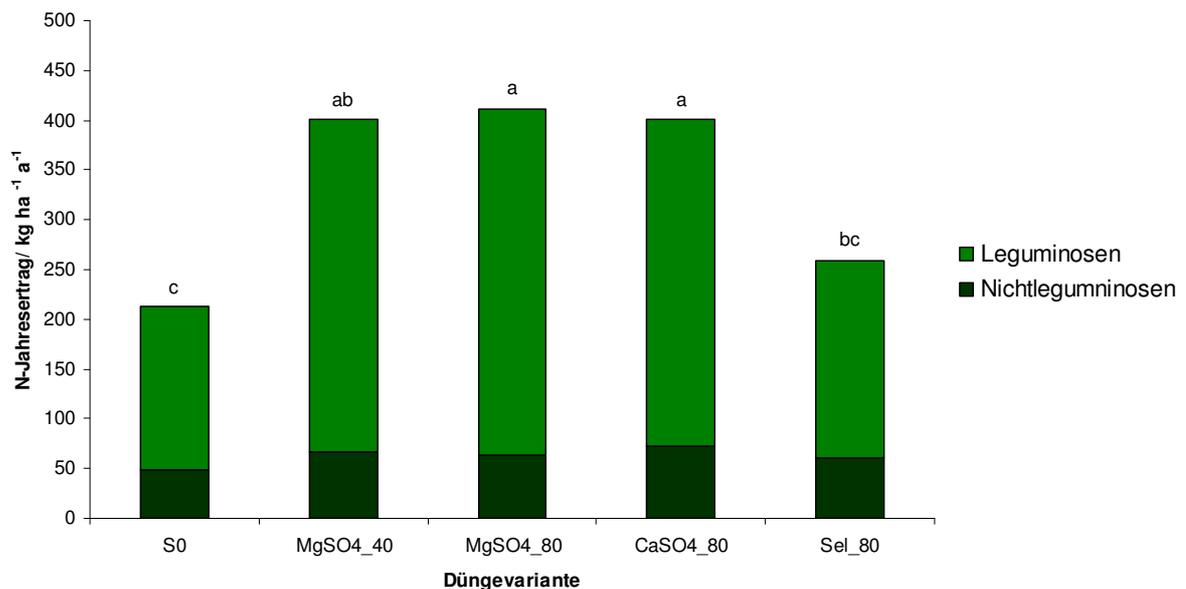


Abbildung 27: **N-Jahresertrag** in  $kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$  der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2010. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngevarianten wieder.

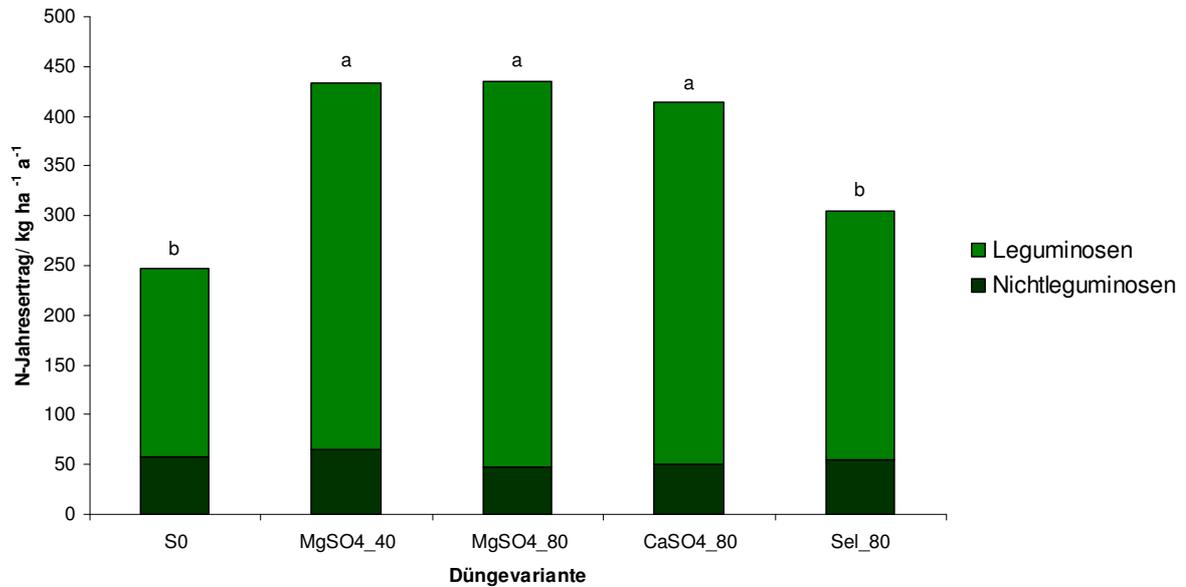


Abbildung 28: **N-Jahresertrag** in  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  der Leguminosen und Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung im Jahr 2011. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede der Gesamtmenge (nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 0,05) der jeweiligen Düngevarianten wieder.

Auf den ersten Blick fällt der ähnliche Verlauf in beiden Jahren auf wie auch die fast identischen N-Jahreserträge der gesamten Ernte, die 2011 allerdings mit 247 bis  $433 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  etwas höher liegen als 2010 mit 213 bis  $411 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Es fällt auf, dass durch eine Sulfatdüngung in beiden Jahren höhere N-Erträge erzielt werden. Mit einer  $\text{MgSO}_4$ - oder  $\text{CaSO}_4$ -Düngung liegen die Erträge über  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  ohne diese Düngung nur zwischen 200 und  $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . In beiden Jahren unterscheiden sich die Magnesium- bzw. Calciumsulfat gedüngten Bestände nicht untereinander wie auch nicht die  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante von der Kontrolle. Signifikante Unterschiede finden sich aber zwischen den Sulfatvarianten und der Kontrolle, in 2011 zudem noch zu der  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante. Auch hier fällt auf, dass der größte Teil des N-Ertrages pro Jahr mit weit über  $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  auf die Leguminosenfraktion entfällt. In 2010 liegt ihr Anteil am Ertrag bei 77 bis 84%, in 2011 bei 77 bis 90%. Demzufolge tragen die Nichtleguminosen einen sehr geringen Teil zum N-Jahresertrag, mit 11 bis 23% je nach Jahr und Düngevariante, bei (vgl. Anhang A2).

Betrachtet man die N-Jahreserträge der Nichtleguminosen liegen diese auf recht ähnlichem Niveau, was in Abbildung 27 und 28 deutlich wird und befinden sich zwischen 49 und  $73 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Während sich in 2010 die  $\text{MgSO}_4$ -Variante noch signifikant von der Kontrolle unterscheidet, finden sich 2011 keinerlei statistische Unterschiede. In der Leguminosenfraktion zeigen sich, wie bereits bei der S-Abfuhr, in beiden Jahren eindeutige Differenzen. Die mit  $\text{MgSO}_4$ - und  $\text{CaSO}_4$ -behandelten Bestände unterscheiden

sich signifikant von der S<sub>el</sub>- und Nullparzelle, wobei diese beiden wiederum keine Unterschiede untereinander aufweisen (vgl. Anhang A2).

Tab 14: **Gesamter N-Jahresertrag** (fett gedruckt) für das Jahr **2010 bzw. 2011** der Leguminosen bzw. Nichtleguminosen in Abhängigkeit der Düngung, wie auch eine Ertragssteigerung/ -minderung (kursiv gedruckt) im Vergleich zur Kontrolle (100%). Die Buchstaben geben mögliche homogene Gruppen wieder (nach Tuckey und Scheffé (in 2010 der Fraktion der Nichtleguminosen und Gesamt) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05)

Variante	Leguminosen				Nichtleguminosen			
	2010		2011		2010		2011	
	N-Flächenertrag/ kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>							
S0	<b>163,4</b> b	100%	<b>188,7</b> b	100%	<b>49,4</b> b	100%	<b>57,8</b> a	100%
MgSO <sub>4</sub> _40	<b>333,7</b> a	204%	<b>368,0</b> a	195%	<b>66,5</b> ab	135%	<b>65,1</b> a	113%
MgSO <sub>4</sub> _80	<b>347,4</b> a	213%	<b>388,5</b> a	206%	<b>64,3</b> ab	130%	<b>46,8</b> a	81%
CaSO <sub>4</sub> _80	<b>327,3</b> a	200%	<b>363,9</b> a	193%	<b>73,0</b> a	148%	<b>51,0</b> a	88%
Sel_80	<b>199,4</b> b	122%	<b>249,9</b> b	132%	<b>60,1</b> ab	122%	<b>54,5</b> a	94%

In Tabelle 14 sind die Erträge der einzelnen Pflanzenfraktionen dargestellt, wie auch deren signifikante Unterschiede und Ertragssteigerungen bzw. -minderungen im Vergleich zu der Kontrolle, welche 100% entspricht. Wie bereits bei den Ergebnissen der S-Abfuhr wird auch hier deutlich, dass der Flächenertrag der Leguminosenfraktion mit 163 bis 389 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> wesentlich größer ausfällt als der der Nichtleguminosen mit lediglich 49 bis 73 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Trotz einer Schwefeldüngung mit S<sub>el</sub>, MgSO<sub>4</sub>\_40 bzw. 80 oder CaSO<sub>4</sub>\_80 nehmen die Erträge der Nichtleguminosen im Vergleich zu der Kontrolle kaum zu oder nehmen sogar ab, wodurch sich alle Varianten auf einem ähnlichen Ertragsniveau befinden und sich, bis auf eine Ausnahme, nicht signifikant voneinander unterscheiden (vgl. Tabelle 14).

Betrachtet man allerdings die N-Flächenerträge der Leguminosenfraktion wird ein anderes Ergebnis deutlich. Eine Schwefeldüngung mit Magnesium- bzw. Calciumsulfat bewirkt in beiden Jahren, dass sich der Ertrag signifikant von der Kontrolle und auch der S<sub>el</sub>-Düngung unterscheidet. In 2010 werden bei einer Sulfatdüngung N-Erträge zwischen 327 bis 347 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> erreicht, bei der Kontrolle nur 163 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. In 2011 liegen die Flächenerträge einer Sulfatdüngung zwischen 364 und 389 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, bei der Kontrolle nur bei 189 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Dadurch wird, sowohl in 2010 wie auch 2011, der Stickstoffflächenertrag im Vergleich zur Kontrolle im Schnitt verdoppelt.

## 4.8.2 Leguminosen

In Abbildung 29 und 30 wird der Stickstofftrag der Jahre 2010 und 2011 noch mal separat für die vier Schnitte in der Leguminosenfraktion dargestellt. In beiden Jahren lässt sich ein starker Trend dahin gehend erkennen, dass die mit Magnesium- und Calciumsulfat gedüngten Bestände zu jedem Schnittzeitpunkt höhere Stickstoffträge aufweisen als die ungedüngten bzw. mit  $S_{el}$  gedüngten Bestände.

In 2010 lässt sich dies während den ersten drei Schnitten beobachten, allerdings nur für den zweiten und dritten Schnitt statistisch belegen. Im Vergleich zu der Kontrolle können die Stickstoffträge im ersten Schnitt um gute 40%, in den zwei darauffolgenden Schnitten um 150 bis 175% gesteigert werden. Die Maximalerträge werden im dritten Schnitt mit 113 ( $CaSO_4_{80}$ ), 116 ( $MgSO_4_{40}$ ) bzw. 124 ( $MgSO_4_{80}$ )  $kg\ ha^{-1}$  erreicht. Danach fallen die Erträge stark ab, sodass nur noch ca. 40  $kg\ N\ ha^{-1}$  abgefahren werden kann. Die  $S_{el}$ -Düngung zeigt während der ersten drei Schnitte keine Unterschiede zu der Kontrolle und verläuft ebenso wellenartig. Erst im vierten Schnitt unterscheidet sie sich, wie auch die sulfatischen Düngevarianten, signifikant von der Kontrolle.

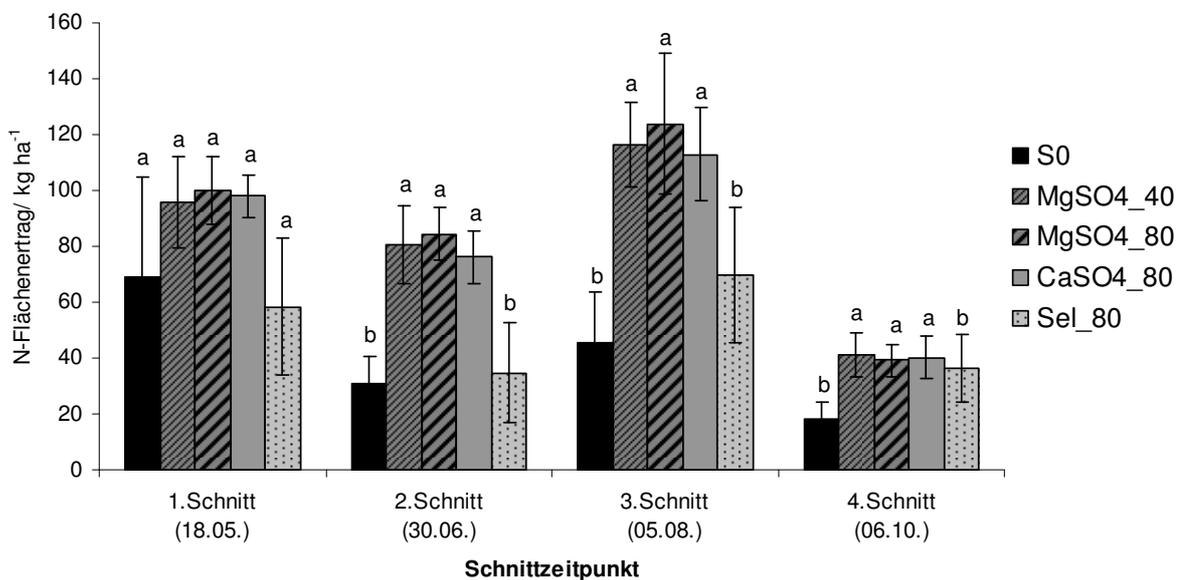


Abbildung 29: **N-Flächenertrag** der **Leguminosenfraktion** in  $kg\ ha^{-1}$  im Jahr **2010** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

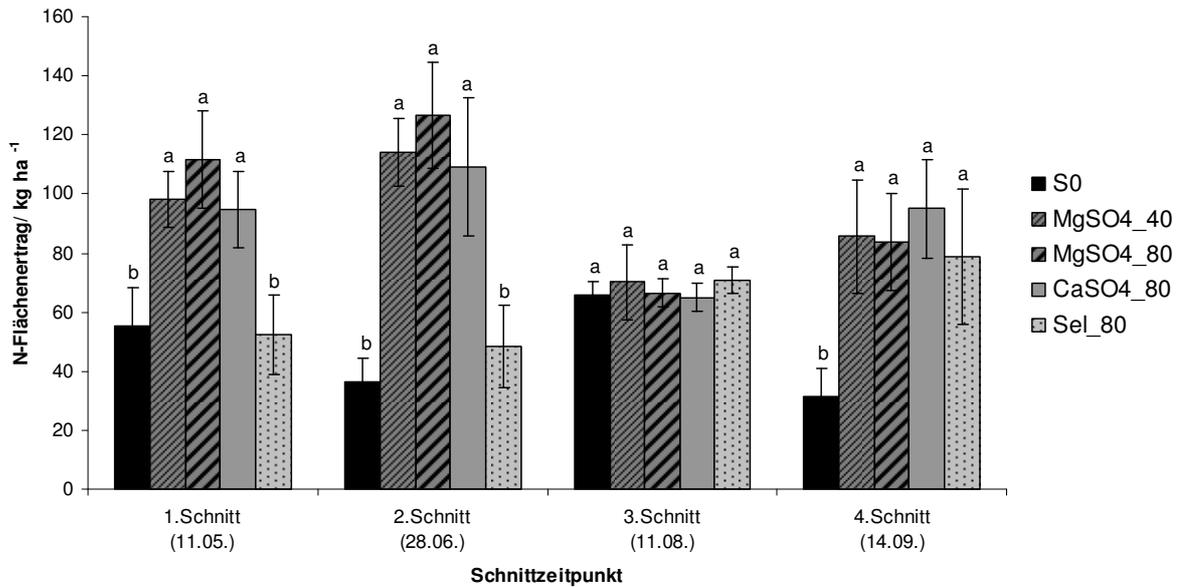


Abbildung 30: **N-Flächenertrag** der Leguminosenfraktion in  $\text{kg ha}^{-1}$  im Jahr **2011** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

Auch in 2011 zeigt sich, mit Ausnahme des dritten Schnittes, der signifikante Unterschied zwischen einer Sulfatdüngung und der Kontrolle. Es zeigt sich, dass sich die Erträge im Vergleich zur Kontrolle verdoppeln (4.Schnitt, zum Teil auch 1.Schnitt) oder verdreifachen (2.Schnitt). Die höchsten Stickstoffträge werden im zweiten Schnitt geerntet mit 109 bis  $127 \text{ kg ha}^{-1}$ , wohingegen die Kontrolle lediglich einen Wert von  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  erreicht. Danach fallen sie stark ab, können aber im vierten Schnitt noch mal ihren Stickstofftrag etwas steigern. Die  $\text{S}_{\text{el}}$ -Variante befindet sich hingegen in einem ähnlichen Ertragsbereich wie die Kontrolle. Allerdings steigt sie ab dem zweiten Schnitt leicht an und erreicht im vierten Schnitt das Ertragsniveau der Sulfatdünger. Dadurch unterscheidet sie sich letztlich auch signifikant von der S0-Variante und kann einen vergleichsweise 1,5-fach höheren Ertrag erzielen.

#### 4.8.3 Nichtleguminosen

Die in Abbildung 31 und 32 dargestellten N-Jahreserträge der Nichtleguminosen unterscheiden sich in ihrem Verlauf in beiden Jahren. Die höchsten Erträge 2010 (Abb. 31) werden jeweils beim ersten wie auch zum vierten Schnitt erreicht und liegen um die  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ , wobei die Kontrolle im vierten Schnitt nur einen Ertrag von  $11 \text{ kg ha}^{-1}$  verzeichnet. Im zweiten und dritten Schnitt werden zwischen  $8$  und  $13 \text{ kg N ha}^{-1}$  geerntet. Signifikante

Unterschiede lassen sich, bis auf eine Ausnahme im 2. Schnitt, nicht finden. Allerdings fällt auf, dass die Kontrolle im Schnitt die geringsten N-Jahreserträge aufweist, genauso wie die sulfathaltigen Düngemittel ( $\text{CaSO}_4_{80}$  und  $\text{MgSO}_4_{40}$  und 80) durchschnittlich höhere Erträge haben.

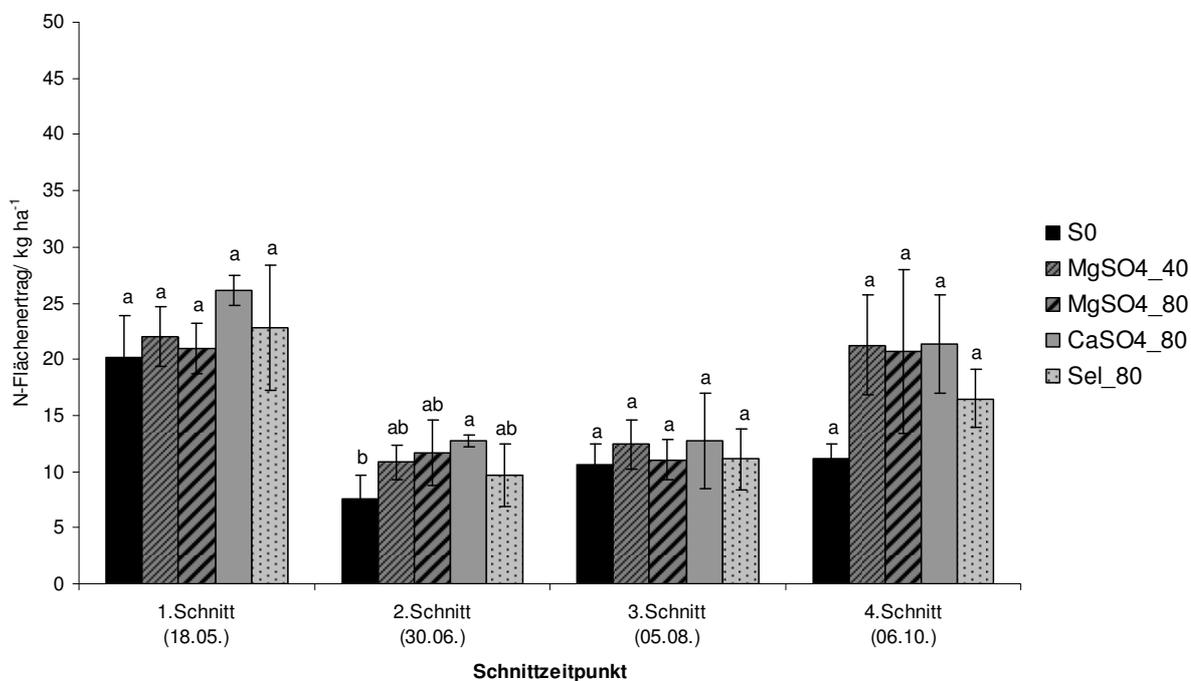


Abbildung 31: **N-Flächenertrag** der **Nichtleguminosenfraktion** in  $\text{kg ha}^{-1}$  im Jahr **2010** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey und Scheffé (4. Schnitt in 2010) mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

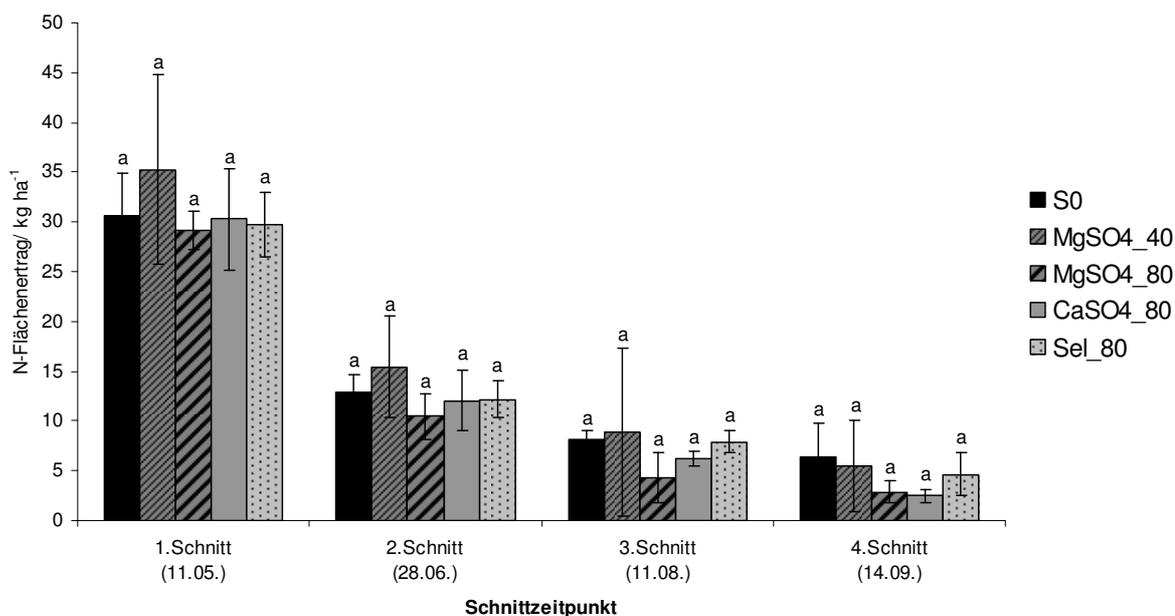


Abbildung 32: **N-Flächenertrag** der **Nichtleguminosenfraktion** in  $\text{kg ha}^{-1}$  im Jahr **2011** in Abhängigkeit der Düngung und dem Schnittzeitpunkt. Die Buchstaben geben signifikante Unterschiede wieder, nach Tuckey mit einem Signifikanzniveau  $\alpha$  gleich 0,05.

Für das Jahr 2011, in Abbildung 32 dargestellt, lassen sich zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede zwischen den Düngekompositionen feststellen. Allerdings gibt es hohe Standardabweichungen mit bis zu  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ , was auf starke Schwankungen innerhalb der Proben der einzelnen Varianten hindeutet. Mit jedem Schnitt kommt es zu einem kontinuierlichen Ertragsabfall und zwar unabhängig von der Art der Düngung. Vor allem der Unterschied zwischen dem ersten und zweiten Schnitt ist enorm. Während im ersten Schnitt verhältnismäßig hohe Erträge um die  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  geerntet werden, werden anschließend nur noch ca.  $12 \text{ kg ha}^{-1}$  erreicht, was einem Rückgang zwischen 36 und 44% ausmacht. Im letzten Schnitt werden nur noch 2 bis  $6 \text{ kg ha}^{-1}$  erreicht, was wiederum einen enormen Ertragsverlust darstellt.

## 5 Diskussion

In dieser Arbeit wurde der Frage nachgegangen, in wie weit eine ausreichende Schwefelversorgung von Leguminosenbeständen noch gewährleistet ist, vor dem Hintergrund, dass atmosphärische Schwefeleinträge bisher die wichtigste Schwefelquelle für die pflanzliche Ernährung waren, aber diese in den letzten 30 Jahren stark rückläufig waren und immer noch sind. Es wurde untersucht, ob eine Schwefeldüngung Auswirkungen auf den Ertrag und die Stickstofffixierleistung von Leguminosen zeigt. Denn es ist bekannt, dass diese sehr sensibel auf Schwefelmangel reagieren. Um diese Fragen zu beantworten, werden im Folgenden die Versuchsergebnisse diskutiert, insbesondere welchen Einfluss eine Düngung auf den Schwefelgehalt im Boden und die Schwefel- und Stickstoffaufnahme der Pflanzen hat und wie sich dies letztlich auf den Flächenertrag ausübt.

### 5.1 Schwefel im Boden

Zu allererst bleibt festzuhalten, dass eine Schwefeldüngung, wie zu erwarten, den  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden erhöht. Allerdings steigen die Gehalte in den Beständen, die mit Magnesium- oder Calciumsulfat gedüngt wurden, im Gegensatz zu der Kontrolle oder einer Düngung mit  $S_{el}$ , wesentlich stärker an. Wie bereits Janzen et al. (1986) und Gutser et al. (2000) formuliert haben, ist dies dadurch bedingt, dass das enthaltene Sulfat bereits in gelöster Form vorliegt und somit eine Sofortwirkung erzielt und schnell pflanzenverfügbar ist. Im Gegensatz zu elementarem oder im Bodenvorrat gespeicherter Schwefel, der zuvor mineralisiert werden muss. Dieser Prozess geht relativ langsam von statten und ist selbst wiederum von unterschiedlichen Faktoren wie zum Beispiel Bodenfeuchte und –temperatur abhängig (Ghani et al. 1992; Eriksen, 2009; Janzen et al., 1987), sodass die Mineralisierungsrate von Jahr zu Jahr schwanken kann. Dies zeigen auch die Ergebnisse einer  $S_{el}$ -Düngung auf den Versuchsflächen des Gladbacherhofs, bei denen der  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden erst gegen Ende der Vegetationsperiode ansteigt. Allerdings merkt Diepolder (2006) an, dass eine Mineralisierung von elementarem Schwefel unter Umständen auch sehr schnell stattfinden und der Pflanze als Nährstoff dienen kann. Nach Fox et al. (1964) und Janzen et al. (1986) ist die Umsetzungsrate von Elementarschwefel unter anderem

auch durch die Partikelgröße zu steuern. Mit abnehmender Partikelgröße und dadurch ebenfalls größerer spezifischer Oberfläche steigt nach Fox et al. (1964) die Mineralisierungsrate an und die Schwefelaufnahme ist bei einer Durchschnittsgröße von weniger als 0,05 mm sogar nur etwas weniger effektiv als Schwefelstaub oder Gips.

Auffällig sind ebenfalls die unterschiedlich hohen  $S_{\min}$ -Gehalte in der ersten Bodenprobe nach der Düngung. Obwohl diese zu ähnlichen Zeitpunkten (21.04.2010 und 06.04.2011) entnommen wurden, unterscheiden sie sich stark. Die  $S_{el}$ -Variante und die Kontrolle liegen im Jahr 2010 bei 3 und 2 kg S ha<sup>-1</sup>, in 2011 hingegen bei 4 ( $S_{el}$ ) und 7 ( $S_0$ ) kg S ha<sup>-1</sup>. Die Sulfatdünger erreichen 2010 Werte von 20 bis 41 kg S ha<sup>-1</sup> wohingegen im Jahr 2011  $S_{\min}$ -Gehalte zwischen 29 und 50 kg ha<sup>-1</sup> gemessen wurden. Vermutlich ist dies durch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen im Winter zu erklären, wie ebenfalls Bloem (1998) in ihrem Versuch festgestellt hat. Demnach können hohe Winterniederschläge Sulfat im Boden stark oder ganz auswaschen, sodass dieses nicht mehr pflanzenverfügbar ist. Im Umkehrschluss können geringe Niederschläge im Winter dazu beitragen, dass ein Teil des Schwefelvorrates für die Folgefrucht verfügbar ist. Werden die Niederschlagsmengen für den Gladbacherhof betrachtet, fällt auf, dass die Monate Januar bis April 2010 mit 179 mm Niederschlag wesentlich feuchter waren, als im darauffolgenden Jahr (133 mm NS). Dadurch wäre es möglich, dass über den Winter mehr Sulfat in tiefere Schichten verlagert und ausgewaschen wurde und nicht mehr im Wurzelraum der Pflanze liegt. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass die Temperaturen, sowohl in der Luft wie auch in dem Boden, im Jahr 2010 niedriger waren und dadurch die S-Verfügbarkeit und Mineralisierungsraten vermutlich geringer ausgefallen sind. Beide Punkte könnten dazu beitragen, dass der  $S_{\min}$ -Gehalt am Anfang des Jahres so unterschiedlich hoch ausfällt. Diese Aussage bekräftigt Scherer (2009), wenn er in seiner Arbeit Ghani et al. (1990) und Castellano et al. (1990) zitiert, welche herausgefunden haben, dass die niedrigste Sulfatkonzentration in der Bodenlösung während dem Winter und Frühjahr auftritt, was sie mit Sulfatauswaschung und niedrigen Mineralisationsraten begründen. Williams (1967) ermittelte in seinen Versuchen, dass die Mineralisation unter 10°C sehr gering ist, wie auch bei einem geringen oder sehr hohen Feuchtegehalt im Boden. Dadurch sind die Wintermonate mit einer hohen Bodenfeuchte stark von Sulfatauswaschung betroffen, da die fallenden Niederschläge von den Pflanzen nicht genutzt werden und die Niederschläge von keinem oder wenig Bewuchs zurückgehalten werden. Zudem kommt, dass die Mineralisierungsrate aufgrund der

niedrigen Temperaturen, wie beispielsweise auf dem Gladbacherhof, und der Bodenfeuchte im Winter gehemmt ist, sodass der Kultur im Frühjahr möglicherweise nicht ausreichend pflanzenverfügbarer Schwefel zur Verfügung steht. Ebenfalls gibt die VDLUFA (2000) zu bedenken, dass, aufgrund der langsamen Mineralisierung, der Pflanze erst ab Mitte Mai ausreichend Schwefel zur Verfügung steht.

Generell zeigen sich in beiden Jahren zum Teil sehr hohe Schwankungen (bis zu 97 kg ha<sup>-1</sup>) in den S<sub>min</sub>-Gehalten innerhalb der einzelnen Varianten. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass der Schwefeldünger granuliert ausgebracht und nicht eingearbeitet wurde und sich dadurch unterschiedlich stark verteilt haben könnte. Ebenfalls könnte dies in der sich kleinräumig ändernden und inhomogenen Struktur des Bodens begründet sein, sodass Schwefelmangel und -verfügbarkeit auf engstem Raum schwanken können. Dies zeigen auch Untersuchungen der LUFA Sachsen-Anhalt (2001), welche auf Löss-Schwarzerde-Standorten (im mitteldeutschen Trockengebiet) mit durchschnittlich hohen Schwefelgehalten im Boden jedoch bei einem engen Probenahmeraster extreme Unterschiede der S<sub>min</sub>-Gehalte feststellten, sodass ebenfalls eine ausreichende Schwefelversorgung wie auch -mangel kleinräumig wechselten. Die Autoren sind der Meinung, dass dieses Ergebnis ebenfalls auf andere Standorte übertragbar ist. Schnug et al. (1997) weisen darauf hin, dass bei der Entnahme von zufälligen Bodenproben, deren Mittelwerte betrachtet werden, oft weniger als 30% der realen Nährstoffsituation auf dem Feld repräsentiert wird, was durch die räumliche Variabilität der Schwefelverfügbarkeit bedingt ist. Weiterhin ist zu bedenken, dass die S<sub>min</sub>-Gehalte lediglich eine Momentaufnahme zu dem Zeitpunkt der Probennahme widerspiegeln und wie eben bereits diskutiert nicht unbedingt auf die gesamte Fläche übertragbar sind. Außerdem gibt es neben der räumlichen noch eine zeitliche Variabilität, wie Bloem (1998) anmerkt. Dadurch können die S<sub>min</sub>-Werte im Jahresverlauf stark schwanken, was auch bei dem Luzerne-Kleegrass-Versuch beobachtet wurde. Dadurch ist es äußerst schwierig anhand des S<sub>min</sub>-Gehaltes auf den pflanzenverfügbaren Schwefelgehalt zu schließen und bezüglich dessen Vorhersagen zu treffen. Zwar kann die S<sub>min</sub>-Untersuchung schon vor der Aussaat (und gegebenenfalls parallel zu der N<sub>min</sub>-Untersuchung) durchgeführt werden, so dass Schwefelmangel früh erkannt wird und ausreichend Zeit für eine mögliche Düngung ist, aber nach der LUFA Sachsen-Anhalt (2001) liegt bisher nur für Winterraps ein ausreichend gesicherter Richtwert vor. Bei allen anderen Kulturen ist noch Forschungsbedarf gegeben um eine verlässliche Aussage treffen zu können, ob genügend

pflanzenverfügbarer Schwefel im Boden vorliegt oder nicht. Zudem kommt, dass im Gegensatz zu der Stickstoffdynamik die Schwefeldynamik im Boden noch wenig bekannt ist, ebenfalls von welchen Faktoren, die Umwandlungsprozesse abhängen. Schnug et al. (1997) raten die Bodenuntersuchung nicht an Standorten durchzuführen, wo eine größere laterale oder vertikale Wasserbewegung zu erwarten ist, sodass Sulfate schnell verlagert, ausgewaschen oder mit dem kapillarem Aufstieg aufsteigen können. Bloem (1998) konnte nachweisen, dass bei grundwasserbeeinflussten Böden oftmals der Schwefelbedarf der Pflanzen durch den Schwefeleintrag aus dem Grundwasser gesichert werden kann. Generell ist es nach Jones (1986) sehr schwierig unter Feldbedingungen eine belastbare Korrelation zwischen Ertrag und  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden zu finden.

Dies zeigt auch der Luzerne-Klee gras-Versuch auf dem Gladbacherhof. Hier bedeutet ein hoher  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden zwangsläufig noch keine ausreichende Versorgung der Pflanzen mit verfügbarem Schwefel, was vor allem bei einem Vergleich zwischen der ungedüngten Kontrolle und Elementarschwefel deutlich. In der Literatur werden für eine ausreichende Schwefelversorgung unterschiedliche Richtwerte genannt, bei Jordan (1964) und Diepolder (2006) liegt der Wert bei 0,2 g pro 100 g TS, bei der VDLUFA (2000) sind Werte im Bereich von 0,3 g pro 100 g TS in Diskussion. Trotzdem die  $S_{\min}$ -Gehalte im Boden, für beide Jahre, im ähnlichen Bereich liegen und sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, gibt es Unterschiede bei der Schwefelkonzentration in den Pflanzen, was vor allem während den Schnitten zwei bis drei auffällt. Die ungedüngte Variante verbleibt auf gleichem Niveau und liegt sogar unter dem Wert 0,2 g Schwefel pro 100 g TS. Demgegenüber nimmt die  $S_{el}$ -Variante nach dem zweiten Schnitt konstant zu und kann im letzten Schnitt den Wert 0,2 g Schwefel pro 100 g TS knapp erreichen und 2011 sogar überschreiten. Daraus lässt sich folgern, dass der  $S_{\min}$ -Gehalt lediglich einen (frühen) Anhaltspunkt darstellt, ob eine ausreichende Versorgung der Leguminosen mit pflanzenverfügbarem Schwefel vorliegt oder nicht. Dies wird ebenfalls von LUFA Sachsen-Anhalt (2001) bestätigt. Ihrer Meinung nach „sind die Kenntnisse über die Schwefeldynamik der Böden noch sehr lückenhaft [und] die Beziehung zwischen dem  $S_{\min}$ -Gehalt der Böden und der Notwendigkeit einer Schwefeldüngung sind daher nicht sehr eng“. Bloem (1998) führt weiter aus, dass ihrer Meinung nach „die Bodenanalyse für die Beurteilung des S-Versorgungsniveaus einer Fläche [wenig] geeignet ist“. Dem gegenüber hat Westermann (1974) festgestellt, dass der  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden mit der S-Aufnahme der Pflanze stark korreliert und einen guten Index für Schwefelmangel darstellt. Allerdings sei angemerkt, dass die hierfür gewählten Untersuchungsstandorte, Gebirgstäler

im Westen der USA, wenig jährliche Niederschläge mit 180 bis 380 mm (vor allem als Schnee) aufwiesen, sodass demzufolge Auswaschungs- oder Verlagerungsprozesse zu vernachlässigen waren. Dies ist mit einem Standort wie dem Gladbachhof mit mittleren jährlichen Niederschlägen von 670 mm, wovon ein Großteil in den Sommermonaten fällt, nicht zu vergleichen. Auf Grund der Niederschläge und Bodenfeuchte ist hier eine relativ hohe Schwefeldynamik zu erwarten. Auch weist Westermann (1975) darauf hin, dass  $S_{\min}$ -Untersuchungen nicht immer erfolgreich sind und andere Diagnosemethoden wie die Pflanzenanalyse genutzt werden sollten.

## 5.2 Schwefel im oberirdischen Aufwuchs

Setzt man die im Boden gemessenen Schwefelgehalte in Bezug zu der Schwefelkonzentration in der Trockenmasse der Leguminosen, zeigt sich, dass höhere Schwefelgehalte im Boden ebenfalls zu höheren Schwefelkonzentrationen in der Trockenmasse führen, wie auch Westermann (1974) in seiner Studie beobachtet hat. Auf dem Gladbacherhof zeigt sich für das Jahr 2010 eine Korrelation ( $R^2$ ) von 0,4, in 2011 ein  $R^2$  von 0,5. Dies deutet auf einen leicht positiven Zusammenhang hin. Betrachtet man allerdings nur die sulfathaltigen Düngemittel, welche ebenfalls höhere  $S_{\min}$ -Gehalte im Boden aufwiesen, erhält man wesentlich höhere Korrelationen, je nach Jahr und Schnitt liegen diese in der Regel zwischen 0,5 und 1. Dies unterstreicht ebenfalls die Aussage, dass Sulfatdünger schnell pflanzenverfügbar sind und somit schneller und in größeren Mengen aufgenommen werden können. Außerdem sind Leguminosen in der Lage bei Überangebot eine S-Vorratsdüngung anzulegen und somit mehr Schwefel aufgenommen werden kann als benötigt. Allerdings sollte trotz des positiven Zusammenhangs der eben diskutierte Punkt beachtet werden, dass nach Schnug et al. (1997) die Nährstoffsituation durch Bodenproben nicht immer repräsentierend für die ganze Fläche dargestellt werden kann und daher die Korrelation vorsichtig betrachtet und interpretiert werden soll.

Generell wiesen die Bestände im oberirdischen Spross mit einer Sulfatdüngung wesentlich höhere Schwefelkonzentrationen auf als die, die mit  $S_{el}$  oder  $S_0$  behandelt wurden. Zieht man den Wert 0,2 g Schwefel pro 100 g TS, nach Jordan (1964) und Diepolder (2006), für eine ausreichende Schwefelversorgung heran, war im Jahr 2010 lediglich im vierten Schnitt die niedrig dosierte  $MgSO_4$ -Variante, wenn auch nur leicht, unterversorgt. Dies

hängt vermutlich mit dem im letzten Schnitt ebenfalls sehr niedrigen  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden zusammen. Im Jahr 2011 hingegen lag im ersten Schnitt bei allen Varianten ein Schwefelmangel vor. Ab dem zweiten Schnitt waren alle Sulfat-Varianten ausreichend mit Schwefel versorgt. Nach Westermann (1974) lässt sich dieses Ergebnis damit erklären, dass eine Sulfatdüngung den  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden erhöht und ebenfalls eine positive Korrelation zwischen  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden und der Schwefelaufnahme der Pflanze zu erwarten ist. Bei der  $S_{el}$ -Düngung liegt erst gegen Ende der Vegetationsperiode genügend Schwefel im Boden vor. In beiden Jahren steigt die Schwefelkonzentration im dritten und vierten Schnitt nochmals an, sodass die Bestände ausreichend mit Schwefel versorgt sind (2010: 0,21 g pro 100 g TS und 2011: 0,24 g pro 100 g TS). Dies liegt vermutlich auch an den höheren  $S_{\min}$ -Gehalten im Boden, vor allem im Jahr 2011 steigt der Gehalt im dritten und vierten Schnitt noch mal deutlich an. Dieses Ergebnis deutet auf eine langsame Mineralisation von elementarem Schwefel zu Anfang der Vegetationsperiode hin.

Nach Diepolder (2006) können allerdings auch Bestände, welche eine Schwefelkonzentration unter 0,2 g pro 100 g TS aufweisen und somit unterversorgt wären, Höchstserträge erzielen. Daher rät er wie auch die DLG (2012) zusätzlich das N/S-Verhältnis heran zu ziehen um ein weiteres und genaueres Maß für eine Schwefelversorgung zu haben. Ein Verhältnis von unter 12 gilt nach Diepolder (2006) als optimal, ein N/S-Verhältnis von über 15 bedeutet bei Leguminosen Schwefelmangel. Der Bereich dazwischen kann auf latenten Schwefelmangel hinweisen. Nach der DLG (2012) befindet sich das N/S Verhältnis für Leguminosen sogar zwischen 5 und 8, für Gras zwischen 8 und 12. Die Versuchsergebnisse vom Gladbacherhof zur Einschätzung eines Schwefelmangels mit einem Grenzwert von 0,2 g pro 100 g TS decken sich in diesem Fall nicht ganz so gut mit dem Maß des N/S-Verhältnisses. Zu überlegen wäre die von der VDLUFA (2000) oder DLG (2012) vorgeschlagenen 0,3 g Schwefel pro 100 g TS als Faustzahl heranzuziehen um eine bessere Übereinstimmung der Aussagen über die Schwefelversorgung zu bekommen. Wie bereits im Vorfeld des Öfteren angesprochen, sind Boden- und Pflanzenanalysen nur Hilfsmittel um Schwefelmangel mit Hilfe von Richt-/ Grenzwerten festzustellen, aber es momentan dazu noch nicht ausreichend belastbare Untersuchungen vorhanden sind.

Blake-Kalff et al. (2001) berichten, dass nach Melsted et al. (1969) die Pflanzenanalyse das beste Mittel ist um den Ernährungszustand der Pflanze im Vergleich zu ihrem Bedarf zum

Zeitpunkt der Probenahme wiederzugeben. Diese Untersuchung muss allerdings zu fest definierten Entwicklungsstadien erfolgen, da sich nach Blake-Kalff et al. (2001) der Bedarf und somit der Richtwert mit dem Entwicklungsstadium der Pflanze verändert und zudem von verschiedenen Autoren unterschiedlich hoch angesetzt wird. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bei einem positiven Ergebnis und somit vorliegendem Schwefelmangel dieser schon länger existiert und die Pflanze bereits in ihrer Entwicklung beeinträchtigt haben könnte. Erst ab dem Zeitpunkt des Untersuchungsergebnisses kann dem entgegen gewirkt werden, allerdings wird eine vollständige Korrektur der Mangelsituation oft nicht mehr erreicht. Weiter führen Blake-Kalff et al. (2000) aus, dass die beauftragten Labore, von denen eine hohe Genauigkeit gefordert wird, diese nicht immer gewährleisten können, sodass einige Labore die eingereichten Pflanzenproben als schwefelbedürftig einstufen, andere nicht. Dies führt vor Augen wie schnell und unbeabsichtigt ein falsches Ergebnis zustande kommen kann und dass diese immer kritisch betrachtet werden sollten bzw. immer in Kombination mit anderen Diagnosemethoden gesehen werden. Für die Praxis würde dies vermutlich steigende Kosten und einen erhöhten Aufwand an Probenahmen, etc. bedeuten, was im Idealfall eigentlich vermieden werden sollte. Daher sollten weitere Untersuchungen angestrebt werden, mit dem Ziel für die Landwirte selbst eine kostengünstige, einfache und wenn möglich selbst durchzuführende Diagnosemethode für Schwefelmangel zu finden. Hier wäre nach Blake-Kalff et al. (2001) das Verhältnis des Malate:Sulphatepeaks (durch eine ionenchromatographische Bestimmung) eine weitere Möglichkeit. Allerdings wurden die Versuche nur an Weizen und Raps durchgeführt, sodass noch nicht vorhersehbar ist, wie sich diese Diagnosemethode bei anderen Kulturen verhält. Vorteile wären, jedenfalls nach den Autoren, dass die Untersuchung schon zu einem sehr frühen Entwicklungsstadium der Pflanze durchgeführt werden kann und dass das Verhältnis des Malate:Sulphatepeaks von dem Entwicklungsstadium der Pflanze unabhängig ist. Wie eben erwähnt bleibt abzuwarten, ob dieses Verfahren mit Erfolg auf andere Kulturen übertragbar ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bestände trotz einer sulfatischen Düngung und damit einem höheren  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden überwiegend im Grenzbereich, nach Diepolder (2006) von 12 bis 15 liegen, was auf eine nicht ausreichende S-Versorgung hindeuten könnte. Blake-Kalff et al. (2001) geben zu bedenken, dass dies möglicherweise auch durch ein überproportionales Angebot an Stickstoff bedingt sein kann und Schwefel eigentlich in ausreichendem Maße der Pflanze zur Verfügung steht. Weiterhin sollte nach ihrer Meinung

bei einem engem N/S-Verhältnis überprüft werden, ob nicht beide Stoffe (S und N) in niedrigen Konzentrationen vorliegen, wodurch ebenfalls ein enges Verhältnis erreicht wird, aber keine ausreichende Versorgung mit den Nährstoffen gewährleistet wird. Auch hier weisen die Autoren darauf hin, dass eine akkurate Messung seitens der Labore nötig ist.

Im Vergleich zu der ungedüngten Kontrolle oder der  $S_{el}$ -Variante liegt das N/S-Verhältnis allerdings wesentlich enger zusammen und unterscheidet sich in den meisten Fällen signifikant von ihnen. Die Kontrolle zeigt in beiden Jahren und zu fast jedem Schnittzeitpunkt einen deutlichen Schwefelmangel, da das N/S-Verhältnis höher als 15 liegt und mit jedem Schnitt in der Regel noch weiter wird. Dies ist vermutlich dadurch bedingt, dass mit der Ernte mehr Schwefel entfernt und abgefahren wird als durch Mineralisierung aus dem Bodenvorrat nachgeliefert werden kann. Aber auch eine Düngung mit elementarem Schwefel zeigt keine ausreichende Schwefelversorgung während dem ganzen Jahr, sofern das N/S-Verhältnis herangezogen wird. Die Werte liegen in beiden Jahren deutlich über 15. Aufgrund dessen, dass eine  $S_{el}$ -Düngung anscheinend keine ausreichende Schwefelversorgung für Leguminosen darstellt und auch eine sulfatische Düngung nur selten das optimale N/S-Verhältnis erreicht, sollte überlegt werden, in wie weit das N/S-Verhältnis hier als belastbar heranzuziehen ist, ob eine andere Methode geeigneter erscheint oder wie eine ausreichende Schwefelversorgung gewährleistet werden kann. Daher könnten Einflussfaktoren wie zum Beispiel Düngerart bzw. Menge, Düngungszeitpunkt, Sortenauswahl oder das Anbaumanagement geprüft und gegebenenfalls optimiert werden um eine ausreichende Schwefelversorgung der Pflanzen sicher zu stellen. Ebenfalls sollte eine mögliche Langzeitwirkung der Dünger, nicht ausgeschlossen werden, so dass nach einigen Jahren eine bessere Schwefelversorgung der Pflanzen vorliegen könnte. Wen et al. (2003) haben in einem dreijährigem Versuch auf einem mäßig-unterversorgtem Tschernosem mit Rapsanbau im ersten Jahr und Hafer und Erbse in den darauffolgenden Jahren den Effekt einer  $S_{el}$ -Düngung (als feinvermahlene Partikel) im Vergleich zu Gips, Ammoniumsulfat und einer ungedüngten Kontrolle untersucht (bei je unterschiedlichen Düngermengen). Während im ersten Jahr die  $S_{el}$ -Variante kaum höhere Erträge hatte als die Kontrolle, fand in den darauffolgenden Jahren eine Ertragssteigerung statt, was nach den Autoren auf einen wachstumsfördernden Effekt der langsamen Oxidation zurückzuführen sei. Ebenfalls war die S-Aufnahme der  $S_{el}$ -Variante in allen drei Jahren im Vergleich zu den anderen höher. Dies zeigt, dass eine Langzeitwirkung von elementarem Schwefel nicht unterschätzt werden sollte.

Zu der Art und Menge der Dünger sei angemerkt, dass die Versuchsergebnisse des Gladbacherhofs zeigen, dass eine Erhöhung der Magnesiumsulfatdüngung auf insgesamt 80 kg keine signifikante Verbesserung zu der Variante mit 40 kg bringt. Allerdings war dies auch nicht das Ziel, sondern es sollte durch eine Düngung mit 80 kg Magnesiumsulfat eine ausreichende Versorgung der Pflanzen sicher gestellt werden. Wie hoch diese Menge nun tatsächlich sein sollte um als bedarfsgerecht zu gelten und die Landwirte nicht mit unnötigen Kosten zu belasten, wie auch das Risiko der Sulfatauswaschung zu minimieren, ist Bestandteil weiterer Forschungsarbeit.

Wie bereits im Kapitel 2.4.2 erörtert, beeinflusst die Schwefelverfügbarkeit die Stickstofffixierung der Leguminosen und auch deren Aufnahme, was ebenfalls Varin et al. (2010) und Zhao et al. (1999) beobachteten. Dies wird ebenfalls bei den Ergebnissen sowohl im Jahr 2010 wie auch 2011 deutlich. Die Stickstoffkonzentration verläuft in ähnlichem Maße wie die Schwefelkonzentration in den Pflanzen, das bedeutet, nimmt die Schwefelkonzentration in der Pflanze zu, nimmt ebenfalls die Stickstoffkonzentration zu und umgekehrt. Vor allem durch eine Düngung mit Magnesium- oder Calciumsulfat liegen die Stickstoffkonzentrationen signifikant höher als die der Kontrolle. Dies liegt, wie bereits erwähnt, an den ebenfalls höheren Schwefelkonzentrationen in der Pflanze, welche vermutlich wiederum auf eine erhöhte Verfügbarkeit im Boden zurück geht. Ähnliches bestätigen auch Zhao et al. (1999), die in Gefäßversuchen mit Erbsen auf „S-Mangelböden“ festgestellt haben, dass bei einer Schwefelzugabe ebenfalls die Stickstoffkonzentration in den Blättern und Stängeln erhöht werden konnte.

Weiterhin beeinflusst eine Düngung die Zusammensetzung der Bestände. Durch eine Schwefeldüngung und damit meist ausreichender Schwefelversorgung der Pflanzen zeigt sich ein dominierendes Verhalten und erhöhte Konkurrenzkraft der Leguminosen gegenüber den Nichtleguminosen. Nach Tallec et al. (2008) ist dies mit den unterschiedlichen Ansprüchen von Leguminosen und Nichtleguminosen hinsichtlich des N/S-Verhältnisses zu erklären. In ihrem Versuch wurde das Wachstum von Weißklee eher durch die Verfügbarkeit von Schwefel als von Stickstoff bestimmt, bei dem deutschen Weidelgras war dies genau umgekehrt. Dies stimmt mit den, von der DLG (2012) formulierten, unterschiedlichen N/S-Verhältnissen überein, bei denen Gräser typischerweise ein weiteres Verhältnis aufweisen als Leguminosen und somit weniger Schwefel benötigen. Weiterhin führen Tallec et al. (2008) aus, dass dadurch eine

Schwefeldüngung ein mögliches Instrument sein könnte, um das Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis in den Beständen zu steuern.

Auch auf den Versuchsfeldern des Gladbacherhofs zeigt sich, dass eine Schwefeldüngung das Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis zugunsten der Leguminosenfraktion verschiebt. Dies wird aus dem errechneten Verhältnis deutlich. Im Jahr 2010 liegt das höchste Verhältnis bei den mit Sulfat gedüngten Leguminosenbeständen im zweiten Schnitt bei über 4 bzw. im dritten Schnitt bei über 9. Das bedeutet, dass ein vier- bzw. neunmal höherer Anteil an Leguminosen existiert. Dies wird ebenfalls durch den TS-Ertrag der Nichtleguminosen bestätigt, der während diesen beiden Schnitten zurück geht, der Leguminosenertrag hingegen deutlich ansteigt. Bei paralleler Betrachtung der Schwefelkonzentration der Leguminosen und dem N/S-Verhältnis wird deutlich, dass auch hier im zweiten und dritten Schnitt mit die höchste Konzentration bzw. das engste N/S-Verhältnis in der Trockensubstanz des oberirdischen Aufwuchses vorliegt. Eine  $S_{el}$ -Düngung hat einen ähnlichen Effekt, allerdings nicht in dieser Ausprägung. Hier wird vor allem im dritten Schnitt ein hohes Leguminosen/ Nichtleguminosen-Verhältnis von über 6 errechnet und auch die TS-Erträge nehmen hier deutlich zu, trotzdem sind keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle feststellbar wie dies bei den Sulfatdüngern der Fall ist. Das Jahr 2011 bestätigt ebenfalls dieses Ergebnis. Ab dem zweiten Schnitt nehmen die gedüngten Bestände, vor allem die mit Sulfat, aber auch die mit  $S_{el}$ , im Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis stark zu, was sich ebenfalls in erhöhten TS-Erträgen der Leguminosen und verminderten Erträgen der Nichtleguminosen widerspiegelt. Durch den Vergleich mit den  $S_{min}$ -Gehalten im Boden und der Versorgung, zeigt sich, dass auch hier die höchsten  $S_{min}$ -Gehalte gemessen wurden und die beste Versorgung vorlag.

Letztlich führen alle der bisher diskutierten Punkte, sprich  $S_{min}$ -Gehalt, Schwefelkonzentration in der TS des oberirdischen Aufwuchses, das N/S-Verhältnis wie auch die Bestandszusammensetzung, zu dem Ergebnis, dass bei einer Schwefeldüngung, insbesondere mit Magnesium- oder Calciumsulfat, die Trockensubstanzerträge der Leguminosen erhöht werden und sich signifikant von der Kontrolle unterscheiden. Die Erträge der Nichtleguminosenfraktion bleiben hingegen unbeeinflusst und unterscheiden sich nicht von der ungedüngten Kontrolle. Leisen (2001) berichtet, dass beispielsweise bei Leguminosen auf einem extrem schwefelarmen Standort durch eine Düngung mit 50 kg Schwefel  $ha^{-1}$  eine Erhöhung des Trockensubstanzertrags um 50 % erreicht werden kann.

Hingegen zeigt sich auf dem Standort Gladbacherhof, dass wesentlich höhere Ertragssteigerungen und das allein in der Leguminosenfraktion möglich sind. Verglichen mit der Kontrolle, nahm im Jahr 2010 der Leguminosenertrag bezogen auf die Trockensubstanz bei einer sulfatischen Düngung um 70 bis 81 % zu. 2011 lag der Ertragszuwachs mit 63 bis 76 % etwas niedriger. Trotzdem ist dieses Ergebnis höchst signifikant und verdeutlicht „wie bedeutend die Schwefelversorgung ist“ (Leisen, 2011). Durch eine Düngung mit Elementarschwefel konnte in beiden Jahren der TS-Ertrag der Leguminosen um 20 % erhöht werden, allerdings ist dies statistisch betrachtet noch kein signifikanter Unterschied zur Kontrolle. Wie bereits erwähnt, weisen Wen et al. (2003) darauf hin mögliche Langzeiteffekte einer  $S_{el}$ -Düngung nicht zu vergessen. Somit kann eine  $S_{el}$ -Düngung mögliche positive physiologische Effekte auf die Folgefrucht haben, wie zum Beispiel erhöhtes Wachstum, was Wen et al. (2003) in ihrem Versuch festgestellt haben.

Bei der Fraktion der Nichtleguminosen finden sich in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der TS-Erträge. Allerdings fällt auf, dass im Jahr 2010 bei einer Magnesium- oder Calciumsulfatdüngung die Erträge im Vergleich zu der Kontrolle um bis zu 19 % höher liegen. Im Jahr 2011 liegen sie bis zu 36 % unter dem Ertragsniveau der Kontrolle. Dies ist vermutlich dadurch bedingt, dass während dem ersten Schnitt noch nicht ausreichend Schwefel im Boden für ein gutes Leguminosenwachstum vorhanden war, wie man an dem weiten N/S-Verhältnis von 17 bis 19 erkennt oder auch an einer Schwefelkonzentration in der TS der Leguminosen von unter  $0,2 \text{ g (100g TS)}^{-1}$ . Beide Faktoren sind Hinweise auf einen Schwefelmangel. Gräser sind hier nicht ganz so anspruchsvoll und reagieren nach Tallec (2008) weniger auf pflanzenverfügbaren Schwefelmangel als Leguminosen. Die Nichtleguminosen haben während dem ersten Schnitt, bei dem die Leguminosen noch einem Schwefelmangel unterliegen, eine sehr hohe Ertragsbildung von 14 bis 17  $\text{dt ha}^{-1}$ , die allerdings zum zweiten Schnitt sehr stark abfällt. Was durch die zunehmende Verfügbarkeit von Schwefel im Boden bedingt ist und dadurch, dass die Leguminosen besser versorgt sind und den Anteil der Nichtleguminosen stark zurückdrängen, was an dem ansteigendem Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis deutlich wird. Im Jahr 2010 können sich die Nichtleguminosen anscheinend etwas besser gegen die Leguminosen „behaupten“, da ihre TS-Erträge während allen Schnittzeitpunkten zwischen ca. 5 und 10  $\text{dt ha}^{-1}$  liegen und das Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis lediglich 2 beträgt. In 2011 liegen die Erträge im ersten Schnitt, wie bereits erwähnt, besonders hoch, danach fallen sie stark ab und liegen weit

unter  $5 \text{ dt ha}^{-1}$  und das Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis nimmt zum Teil bis auf 46 zu. Mit der Folge, dass in dem Bestand 2011 im Vergleich zu 2010 relativ wenige Nichtleguminosen vorkommen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Schwefeldüngung (sowohl mit Sulfat wie auch mit Elementarschwefel) in der Regel zu höheren Trockensubstanzerträgen führt. Allerdings fällt der Ertragszuwachs vor allem auf die Fraktion der Leguminosen aus, da die Nichtleguminosenfraktion unabhängig von der Düngung ähnliche Erträge erzielt. Hingegen werden die Erträge in der Leguminosenfraktion, insbesondere mit einer Sulfatdüngung ganz gleich welche Art und Menge, deutlich erhöht. Eine Düngung mit elementarem Schwefel erhöht ebenfalls die Ernte, allerdings weniger stark, sodass keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle gefunden werden können. Dies ist letztlich auf die bessere Versorgung mit pflanzenverfügbarem Schwefel der Bestände zurückzuführen. Denn nach Tallec et al. (2008) ist ihr Wachstum eher von Schwefelverfügbarkeit als Stickstoffverfügbarkeit bestimmt ist. Wie sich die erhöhten Trockensubstanzerträge auf die Schwefelabfuhr bzw. den N-Flächenertrag auswirken, wird im nächsten Kapitel diskutiert.

### **5.3 S-Abfuhr und N-Flächenertrag**

Die Schwefelabfuhr ergibt sich aus dem aufsummierten Produkt der TS-Erträge und der Schwefelkonzentration der einzelnen Varianten. Entsprechend berechnet sich der N-Flächenertrag. Im Hinblick auf die bisherige Diskussion lässt sich erahnen, dass eine Schwefeldüngung zwangsläufig auch darauf einen positiven Einfluss haben muss, denn alle Einflussgrößen (TS-Ertrag und N- bzw. S-Konzentration im oberirdischen Aufwuchs) wurden durch eine Düngung erhöht.

Die mit sulfatgedüngten Bestände weisen sowohl in 2010 wie auch 2011 signifikant höhere S-Abfuhrmengen wie die Kontrolle und die  $S_{el}$ -Variante auf. Im Vergleich zu der Kontrolle (mit 18 und 14 kg S pro ha) konnte die S-Abfuhr mehr als verdoppelt werden, die Varianten mit Elementarschwefel weisen nur um 3 (2010) bzw. 6 (2011) kg  $\text{ha}^{-1}$  höhere Mengen auf. Der größte Teil der S-Abfuhr geht auf die Leguminosenfraktion zurück, die 2010 zwischen 63 und 74%, im Jahr 2011 zwischen 68 und 84% ausmacht, was durch die Bestandszusammensetzung und den damit höheren TS-Erträgen der Leguminosen

verbunden ist. Allerdings wurden im Jahr 2010 generell etwas höhere Mengen an Schwefel mit der gesamten Ernte abgefahren als 2011. 2010 wurden beispielsweise, bei einer Sulfatdüngung, zwischen 37 und 43 kg Schwefel pro ha abgefahren, 2011 nur 34 bis 35 kg pro ha. Dies lässt sich auf die im Jahr 2010 ebenfalls höhere Schwefelkonzentrationen in der TS der Pflanzen zurück führen. Allerdings sollte demnach auch bedacht werden, dass der entzogene Schwefel über Düngung dem Boden wieder zugeführt werden muss, da sonst eine Verarmung des Bodens auftritt, was, wie in dieser Arbeit deutlich werden soll, vermieden werden sollte. Die Schwefelabfuhr kann je nach Kultur unterschiedlich hoch sein.

Analog zu dem positiven Zusammenhang der Schwefel- und Stickstoffkonzentration in der TS, ebenfalls von Zhao et al. (1999) beobachtet, verlaufen Schwefelabfuhr und N-Flächenertrag ähnlich. Wie bereits bei der Schwefelabfuhr erreichen auch die Magnesium- und Calciumsulfatdüngewarianten bei dem N-Flächenertrag die höchsten Erträge und unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle, zum Teil auch von der S<sub>el</sub>-Variante, die sich allerdings nicht von der Kontrolle unterscheidet. Im Jahr 2010 werden bei den mit Magnesium- oder Calciumsulfat gedüngten Beständen insgesamt N-Flächenerträge von 400 bis 412 kg ha<sup>-1</sup> erreicht, im Jahr 2011 etwas höhere mit 415 bis 433 kg ha<sup>-1</sup>, was auf das ebenfalls im Jahr 2011 sehr hohe Leguminosen/Nichtleguminosen-Verhältnis (bis zu 46) zurückzuführen sein könnte. Demnach wurde 2010 eine Ertragssteigerung im Vergleich zu der Kontrolle um 88 bis 93 %, 2011 um 68 bis 76 %, erreicht. Ähnliches beobachteten Zhao et al. (1999) bei einem Erbsenversuch, bei dem durch Zugabe von Schwefel die Menge an fixiertem Stickstoff verdoppelt werden konnte. In beiden Versuchsjahren auf dem Gladbacherhof ist der N-Flächenertrag vor allem durch die Leguminosenfraktion bestimmt, vermutlich dadurch, dass diese Luftstickstoff binden können. Ihr Anteil liegt bei mehr als 77% (bis max. 90%). Sowohl 2010 wie auch 2011 haben die Leguminosen ihre N<sub>2</sub>-Fixierungsrate verdoppelt und überschreiten deutlich den von Marquard (1998) aufgeführten Durchschnittswert von 250 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Im Jahr 2010 konnten sie durchschnittlich 336 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> binden, 2011 sogar 373 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Dies verdeutlicht den starken Zusammenhang zwischen einer Sulfatdüngung bzw. Schwefelverfügbarkeit und der Fähigkeit der Leguminosen ausreichend Stickstoff zu binden und ihr Leistungsspektrum auszuschöpfen. Auch gehen DeBoer et al. (1982) davon aus, dass Schwefelmangel bei Leguminosen schon früh zu einer negativen Beeinflussung der Stickstofffixierung führt, wohingegen die verminderte Photosyntheseleistung erst als

sekundärer Effekt von Schwefelmangel zu betrachten ist. Wie Zhao et al. (1999) bestätigen. Unterstützt wird diese Aussage, wenn man die Stickstofffixierleistung der Kontrolle und der S<sub>el</sub>-Variante betrachtet. 2010 haben die Kontroll- und die S<sub>el</sub>-Varianten 163 und 199 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> fixiert, in 2011 189 und 250 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, was nach Marquard (1998) eine unterdurchschnittliche Stickstofffixierleistung darstellt. Dies ist dadurch bedingt, dass beide Düngevarianten zu fast jedem Schnittzeitpunkt einen Schwefelmangel aufweisen, was an dem weiten N/S-Verhältnis oder auch der niedrigen Schwefelkonzentration in der TS der Leguminosen deutlich wird. Dadurch haben sie letztlich (im Gegensatz zu den Sulfatdüngern) signifikant geringere TS-Erträge und Schwefelabfuhrmengen erzielt, was sich ebenfalls in signifikant geringeren N-Flächenerträgen ausdrückt. Allerdings weisen Scherer et al. (1996) darauf hin, dass auch die Schwefelnachfrage von Leguminosen je nach Art variiert. In ihrem Versuch wiesen sie nach, dass die Erträge je nach verfügbarer Schwefel- und Stickstoffmenge für Wiesen-Klee, Ackerbohne, Luzerne und Erbse unterschiedlich hoch ausgefallen sind und sich je nach Erhöhung der Schwefelzufuhr im Vergleich zu der Kontrolle (ohne Schwefeldüngung) zum Teil sehr stark, bis zu einer Verdopplung der Erträge, verändert haben.

## 6 Ausblick

In dieser Arbeit wurde durch die Darstellung der Ergebnisse wie auch durch die anschließende Diskussion die schwerwiegende Bedeutung einer unzureichenden Schwefelverfügbarkeit im Leguminosenanbau verdeutlicht.

Der Versuch zu den Auswirkungen einer Schwefelversorgung auf Futterleguminosenbestände wurde unter den Rahmenbedingungen des Gladbacherhofs durchgeführt und die Ergebnisse hierzu ausführlich diskutiert. Als weiteren Schritt sollte nun dieser Versuch unter anderen Klima- und Bodenbedingungen stattfinden um weitere Daten sammeln können, um eine mögliche „Ausnahme“ auszuschließen und das hier dargestellte Ergebnis zu untermauern. Interessant ist ebenfalls die Auswirkungen auf die Folgefrucht bzw. auf die gesamte Fruchtfolge zu untersuchen, speziell im Hinblick auf eine Düngung mit Elementarschwefel, welche nach Wen et al. (2003) bei anderen Kulturen positive physiologische Effekte auf die Folgefrucht hatte. Aufgrund der Tatsache, dass sich in der Regel bei den Sulfatdüngern in der Art und Menge keine signifikanten Unterschiede gezeigt haben, sollte eine bedarfsgerechte Düngeempfehlung erarbeitet werden.

Generell liegt ein weiterer Forschungsschwerpunkt auf der Untersuchung der Schwefeldynamik im Boden, um die Umwandlungsprozesse besser zu verstehen und eine genauere und bedarfsgerechtere Düngeempfehlung aussprechen zu können. Ebenfalls sollten möglicherweise Untersuchungen zu neuen Diagnosemethoden in Betracht gezogen werden bzw. die bereits vorhandenen näher untersucht werden um bessere und relativ sichere Aussagen über den Schwefelversorgungszustand der Bestände treffen können. Momentan herrschen auf diesem Gebiet noch viele Unklarheiten, sodass noch keine eindeutig verlässlichen Werte abgeleitet werden können. Ein erster Schritt hierzu sind sicherlich Beratungsangebote für Landwirte um das Problem der Schwefelmangelsituation durch fehlende atmosphärische Einträge zu verdeutlichen und sie darüber aufzuklären, damit die Landwirte ihren Bestand „im Auge“ behalten und auf eine ausreichende Schwefelversorgung achten.

Weiterhin sollten andere Kulturen nicht außer Acht gelassen werden, die möglicherweise genauso von Schwefelmangel betroffen sind, denn eine Mangelernährung bei Pflanzen wirkt sich nicht nur auf deren Wachstum negativ aus, sondern ebenfalls auf deren Qualität und Gesundheit und somit letztlich auch auf die unsere.

## 7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Versuche in den Jahren 2010 und 2011 (unter den Standortbedingungen des Gladbacherhofes) zeigen deutlich, welche bedeutende Rolle einer ausreichenden Schwefelversorgung im Leguminosenanbau zukommt. In beiden Jahren konnte festgestellt werden, dass sich eine Düngung (vor allem mit Calcium- oder Magnesiumsulfat) positiv auf den Ertrag und die Stickstofffixierleistung auswirkt. Anzumerken ist, dass es zwischen den Sulfatdüngern in der Regel keine Unterschiede gab und im Gegensatz zu dem Elementarschwefel die Bestände besser versorgten. Dadurch erscheint es plausibel, dass unter den Rahmenbedingungen dieses Versuchs keine ausreichende Schwefelversorgung vorlag. Im Wesentlichen wurde durch eine Schwefeldüngung der  $S_{\min}$ -Gehalt im Boden erhöht und somit eine ausreichende Versorgung der Pflanzen sicher gestellt. Dies förderte das Wachstum der Leguminosen, was durch erhöhte TS-Erträge deutlich wurde, welche auch im Vergleich zu den Vorjahren höher lagen. Letztlich, und besonders für den Ökologischen Landbau bedeutend, konnte dadurch der N-Flächenertrag deutlich erhöht werden.

Durch diese Arbeit wurde die bedeutende Rolle des Schwefels für Leguminosenbestände, insbesondere im Ökologischen Landbau, deutlich und auch, dass durchaus eine Schwefelmangelsituation herrscht, die man nicht vernachlässigen sollte. Daher ist kritisch anzumerken, dass oftmals in Düngeempfehlungen (wie z.B. von der *LfL Bayern, 2008a*) für Luzerne, Klee und Klee grasbestände keine S-Düngeempfehlung genannt wird. Zukünftig sollte neben Makronährstoffen wie z.B. Stickstoff oder Phosphor unter anderem auch Schwefel größere Beachtung finden. Denn wie bereits Sprengel (1828) formuliert hat „(...) und stets kümmerlich wird sie wachsen, wenn einer derselben [Nährstoffe] nicht in derjenigen Menge vorhanden ist...“.

## Literatur

- Bergmann: [URL: <http://plantnutrition.iserver-online.de/hzeig.FAU?sid=F434222584&dm=1&ind=1&zeig=1177>, Abruf: 07.12.2012]
- Betrieb Gladbacherhof (2002): *Betriebsspiegel 2002, Professur für Organischen Landbau & LVB Gladbacherhof – Forschung und Lehre für den Ökologischen Landbau, unveröffentlicht*
- Betrieb Gladbacherhof (2011): *Betrieb, Professur für Organischen Landbau & LVB Gladbacherhof – Forschung und Lehre für den Ökologischen Landbau*, [URL: <http://www.uni-giessen.de/cms/fbz/tbe/llvb/GH/betrieb>, Abruf: 25.10.2012]
- Blake-Kalff M M A et al. (2000): *Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (Brassica napus L.) and wheat (Triticum aestivum L.)*, *Plant and Soil* 225 (2000), Kluwer Academic Publishers Seite 95–107
- Blake-Kalff M M A et al. (2001): *Using plant analysis to predict yield losses caused by sulphur deficiency*, *Association of applied Biologists* 138, Seite 123 - 127
- Bloem E M (1998): *Schwefelbilanz von Agrarökosystemen unter besonderer Berücksichtigung hydrologischer und bodenphysikalischer Standorteigenschaften*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 192*, Seite 53
- Bloem E M et al. (2007): *Schwefel-induzierte Resistenz (SIR) – Schwefeldüngung als nachhaltige Strategie zur Gesunderhaltung von Pflanzen*, *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 2 (2007), Birkhäuser Verlag, Seite 7- 12
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2012): *EU-Rechtsvorschriften für den ökologischen Landbau, Anhang I: Düngemittel, Bodenverbesserer und Nährstoffe*, [URL: [http://www.bmelv.de/cln\\_111/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Oekolandbau/EG-Oeko-VerordnungFolgerecht.html?nn=309814](http://www.bmelv.de/cln_111/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Oekolandbau/EG-Oeko-VerordnungFolgerecht.html?nn=309814), Abruf: 04.11.2012]
- Bohn et al. (1986): *Reactions of inorganic sulfur in soils*, in *Sulfur in Agriculture*, Tabatabai (ed.), *Agron. Monogr.* 27, ASA, CSSA, ISSSA, Madison, WI, Seite 233 – 249
- Boye K (2011): *Sulfur Cycling in Swedish Arable Soils*, *Doktorarbeit, Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala*, Seite 15 - 18
- Bussler: [URL: <http://plantnutrition.iserver-online.de/hzeig.FAU?sid=6369A15638&dm=1&ind=1&zeig=117>, Abruf: 07.12.2012]

- Castellano S D et al. (1990): *Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soils*, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.55 No.1 (1990), Seite 114 – 121
- DeBoer D et al. (1982): *Effects of sulphur nutrition on nitrogen and carbon metabolism in lucerne (Medicago sativa L.)*, *Physiologia Plantarum* 54, Seite 343 – 350
- De Kok L et al. (2002): *Sulphur in plant physiology*, Reprinted from the international fertilizer society, *Proceedings* 500 (2002), Seite 55 - 80
- De Kok L et al. (2005): *Pathways of plant sulfur uptake and metabolism - an overview*, *Landbauforschung Völkenrode, Special Issue* 283, Seite 5 – 10, [URL: <http://de.scribd.com/doc/52632262/Shenyang-Sulfur-Workshop>, Abruf: 02.11.2012]
- Diepolder M (2006): *Aspekte zur Rolle der Schwefeldüngung im Dauergrünland*, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, [URL: <http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/19639/>, Abruf: 01.11.2011]
- DLG (2012): *DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten*, DLG e.V.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2012): *Wetterlexikon, Humides Klima*, [URL: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=G&DAT=Klima-humides>, Abruf: 27.10.2012]
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2012a): *Wetterlexikon, Arides Klima*, [URL: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=K&DAT=Klima-arides>, Abruf: 27.10.2012]
- Edwards P J (1998): *Sulfur Cycling, Retention, and Mobility in Soils: A Review*, United States Department of Agriculture
- EMEP/MS-CHEM (European Monitoring and Evaluation Programme/ Meteorological Synthesizing Centre-West) (2012): *Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O<sub>3</sub>) and PM in 2010 Germany*, Norwegian Meteorological Institute, Seite 13, [URL: [http://www.emep.int/mscw/index\\_mscw.html](http://www.emep.int/mscw/index_mscw.html), Abruf: 08.12.2012]
- Eriksen J (2009): *Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems*, *Doktorthesis*, Faculty of agricultural Sciences, Aarhus University, Seite 15 – 21, [URL: [https://pure.au.dk/portal/files/4400345/Dr.Scient.\\_Thesis](https://pure.au.dk/portal/files/4400345/Dr.Scient._Thesis), Abruf: 08.12.2012]
- Fox R L et al. (1964): *Factors influencing the availability of sulphur fertilizers to alfalfa and corn*, *Soil Science Society of America Journal*, Band 28 Nr. 3, Seite 406-408

- Ghani A et al. (1990): *Seasonal fluctuations of sulfur and microbial biomass-S in the surface of a Wakanui soil, New Zealand Journal of Agricultural Research, Vol. 33 No. 3 (1990), Seite 467 – 472.*
- Ghani A et al. (1992): *Sulfur mineralization and transformations in soils as influenced by additions of carbon, nitrogen and sulphur, Soil Biol Biochem, Vol.24 No.4 (1992), Seite 331-341*
- Gutser R et al. (2000): *Zur Schwefelwirkung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern, VDLUFA-Schriftenreihe 53, Seite 48 bis 63*
- Haneklaus S et al (2003): *The global sulphur cycle and its links to plant environment, in: Sulphur in plants edited by Abrol and Ahmad, Kluwer Academic Publishers, Seite 17*
- Hell R (2002): *Der assimilatorische Schwefelstoffwechsel in Pflanzen, BIOSpektrum 3/02-8.Jahrgang, Seite 248 – 251, [URL: [http://biospektrum.de/blatt/d\\_bs\\_pdf&\\_id=932862](http://biospektrum.de/blatt/d_bs_pdf&_id=932862), Abruf: 03.11.2012]*
- Hu Z Y et al (2005): *Sulphur fractionation in calcereous soils and bioavailability to plants, Plant and Soil 268, Number 1 (2005), Springer, Seite 103*
- Janzen H H et al. (1986): *Release of available sulphur from fertilizers, Canadian Journal of Soil Science 66 (Februar 1986), Seite 91 - 103*
- Janzen H H et al. (1987): *The Effect of Temperature and Water Potential on Sulfur Oxidation in Soils, Soil Science, Volume 144 Issue 2 (August 1987), Seite 81 - 89*
- Jones M B (1986): *Sulfur availability indexes, in: Sulfur in Agriculture, Ed Tabatabai, USA: American Society of Agronomy, Vol. 27, Seite 549 – 566,*
- Jordan H V (1964): *Sulfur as a plant nutrient in the southern United States, U.S. Department of Agriculture, Technical bulletin No 1297, Seite 11 - 12*
- Kawiani B (2006): *Einfluss der Schwefelversorgung auf Gehalt und Qualität der Samenproteine von Pisum sativum L. und Glycine max. L. und Eignung verschiedener Methoden zur Diagnose der Schwefelversorgung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Seite 24*
- Kertesz M A et al. (2004): *The role of soil microbes in plant sulphur nutrition, in: Sulphur Metabolism in Plants Special Issue, J. Exp. Bot. 55 (2004), Seite 1939 -1945*
- Kleinhenz V (1999): *Sulfur and Chloride in the Soil-Plant System, K + S Aktiengesellschaft, [URL: <http://www.volkerkleinhenz.com/publications/sulfur-and-chloride-in-the-soil-plant-system/#Totalsoilsulfur221>, Abruf: 02.11.2012]*

- K+S (2011): Schwefel, K+S KALI GmbH, [URL: [http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory\\_service/nutrients/sulphur.html](http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory_service/nutrients/sulphur.html), Abruf: 02.11.2012]
- K + S (2012): Schwefelmangel, [URL: [http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory\\_service/deficiency\\_symptoms/cereals-s.html](http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory_service/deficiency_symptoms/cereals-s.html), Abruf: 07.12.2012]
- K + S (2012a): Stickstoffmangel, [URL: [http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory\\_service/deficiency\\_symptoms/cereals-n.html](http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory_service/deficiency_symptoms/cereals-n.html), Abruf: 07.12.2012]
- Leisen E (2011): Kleegrasmischung und Schwefelversorgung selbst testen, Landwirtschaftskammer NRW, [URL: [http://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/pflanzenbau/gruenland/el\\_juli2011\\_kleegrasmischung\\_schwefelversorgung.php](http://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/pflanzenbau/gruenland/el_juli2011_kleegrasmischung_schwefelversorgung.php), Abruf: 26.11.2012]
- LfL Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2008): Magnesium, Schwefel und Spurenelemente, Wendland und Offenberger, [URL: <http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/13734/index.php>, Abruf: 07.12.2012]
- LfL Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2008a): Integrierter Pflanzenbau- Feldfutterbau- Klee, Klee gras, Luzerne, Luzernegräser, Gräser, LfL Information
- LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) (2011): Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland in Baden-Württemberg, Seite 27
- LUFA Sachsen-Anhalt (Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt des Landes Sachsen-Anhalt) (2001): Grundlagen für die Schwefeldüngung- Hinweise zur Bestimmung des Bedarfs und zur Schwefeldüngung, Praxisinformation Nr. 5/2001, Sachsen-Anhalt, [URL: [http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek\\_Politik\\_und\\_Verwaltung/Bibliothek\\_LLFG/dokumente/Acker\\_und\\_Pflanzenbau/Pflanzenern\\_und\\_Duengung/praxisinfo5\\_01.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/Acker_und_Pflanzenbau/Pflanzenern_und_Duengung/praxisinfo5_01.pdf), Abruf: 22.11.2012]
- Mansfeld T (1994) Schwefeldynamik von Böden des Dithmarscher Speicherkoogs und der Bornhöveder Seenkette in Schleswig-Holstein, Dissertation, Christian Albrechts-Universität zu Kiel
- Marquard R A (1998): Stickstoffassimilation und die Symbiose mit Knöllchenbakterien, in: Leguminosen zur Körnernutzung, Schuster W H et al., [URL: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2000/320/original/sticksto.htm>, Abruf: 08.12.2012]

- McGill W B et al. (1981): *Comparative Aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter*, *Geoderma* 26, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Seite 267 - 286
- Melsted S W et al. (1969): *Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data*, *Agronomy Journal* 61, Seite 53 - 62
- Messick D L et al. (2005): *Global sulfur requirement and sulfur fertilizers*, *Landbauforschung Völkenrode, Special Issue* 283, Seite 97, [URL: <http://de.scribd.com/doc/52632262/Shenyang-Sulfur-Workshop>, Abruf: 02.11.2012]
- Morche, L. (2008): *S-Flüsse und räumliche Veränderungen anorganischer und organischer Schwefelfraktionen im Boden sowie deren An- und Abreicherung in der Rhizosphäre landwirtschaftlicher Kulturpflanzen unter partiellem Einsatz des Radioisotops <sup>35</sup>S*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Seite 37 ff, [URL: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2008/1554/1554-text.pdf>, Abruf: 11.05.2011]
- Naturland (2012): *Ackerbau*, [URL: [http://www.naturland.de/oeko\\_ackerbau.html](http://www.naturland.de/oeko_ackerbau.html), Abruf: 06.11.2012]
- Nultsch W (2001): *Allgemeine Botanik*, Thieme, 11. Auflage, Seite 4, 375 und 386
- Ökolandbau.de- Das Informationsportal (2011): *Versorgung mit Kalk, Magnesium, Schwefel und Natrium*, [URL: <http://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/gruenland/duengung/versorgung-mit-kalk-magnesium-schwefel-und-natrium/>, Abruf 20.09.2011]
- Oenema O et al (2003): *Managing sulphur in Agroecosystems*, in: *Sulphur in plants* edited by Abrol and Ahmad, Kluwer Academic Publishers, Seite 45 -52
- Pacyina S et al. (2006): *Influence of sulphur supply on glucose and ATP concentrations of inoculated broad beans (Vicia faba minor L.)*, *Biol Fertil Soils* (2006) 42, Seite 324–329
- Paulsen H M (2005): *Sulfur in organic farming*, *Landbauforschung Völkenrode, Special Issue* 283, Seite 105, [URL: <http://de.scribd.com/doc/52632262/Shenyang-Sulfur-Workshop>, Abruf: 02.11.2012]
- Pultke U (2000): *Freilanduntersuchungen zum Schwefelhaushalt eines Agrarökosystems mittels Analyse stabiler S-Isotope*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Landbauforschung Völkenode, Sonderheft 210

- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2010): Umstellen auf Öko-Landbau- Informationen für die Praxis, Seite 7 und 8, [URL: [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2746/4620\\_1.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2746/4620_1.pdf), Abruf: 06.11.2012]
- Scheffer/ Schachtschabel (2010): Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Seite 421- 423
- Scherer H W et al. (1996): N<sub>2</sub> fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization, *Biol Fertil Soils* (1996) 23, Springer Verlag, Seite 449 - 453
- Scherer H W (2001): Sulphur in crop Production- invited paper, *European Journal of Agronomy* 14, Elsevier, Seite 81 - 111
- Scherer H W et al. (2007): Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N<sub>2</sub> fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions, *Biol Fertil Soils* (2008) 44, Springer, Seite 909 - 916
- Scherer HW (2009): Sulfur in Soils, review Article, *J. Plant Nutrition Soil Sci.* 172, Seite 326 - 335
- Schnug E et al. (1997): Diagnosis of sulphur nutrition, in: *New Horizons for sulphur in european agriculture. Part of the series: Mineral nutrition in ecosystems*, Kluwer Academic Publ. Dordrecht
- Schnug E et al. (2005): Aspects of sulfur nutrition of plants; evaluation of China's current, future and available resources to correct plant nutrient sulfur deficiencies - report of the first Sino-German Sulfur Workshop, *Landbauforschung Völkenrode, Special Issue* 283, Seite 1 und 2, [URL: <http://de.scribd.com/doc/52632262/Shenyang-Sulfur-Workshop>, Abruf: 02.11.2012]
- Sprengel C P (1928): Zitiert in *Pflanzenernährung, Grundwissen Bachelor*, Schubert S, 2006, Kapitel 1, *Geschichte der Pflanzenernährung*, UTB Ulmer, Seite 11 -16
- Schubert S (2006): *Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor*, Kapitel 13 Schwefel-Kreislauf, UTB Ulmer, Seite 138- 141
- Schubert S (2006a): *Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor*, Kapitel 14 Schwefel-Assimilation der Pflanze, UTB Ulmer, Seite 142- 146
- Strahm B D et al. (2007): Mineral and Organic Matter Controls on the Sorption of Macronutrient Anions in Variable- Charge Soils, *SSSAJ, Volume 71 Number 6* (2007), Seite 1926–1933

- Taltec T et al. (2008): Nitrogen:sulphur ratio alters competition between *Trifolium repens* and *Lolium perenne* under cutting: production and competitive abilities, *European Journal of Agronomy* 29 (2008), Seite 94 - 101
- Trinkwasserverordnung (2001): 7. Abschnitt Straftaten und Ordnungswidrigkeiten, Anlage 3 (zu § 7) Indikatorparameter, Bundesministerium der Justiz, [URL: [http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv\\_2001/index.html#Seitenanfang](http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/index.html#Seitenanfang), Abruf: 29.10.2012]
- Umweltbundesamt (2011): Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)-Emissionen, Daten zur Umwelt, [URL: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3578>, Abruf: 06.11.2012]
- Varin S et al. (2010): How does sulphur availability modify N acquisition of white clover (*Trifolium repens* L.)?, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 61, No.1 (2010), Seite 225 - 234
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (2000): Schwefelversorgung von Kulturpflanzen - Bedarfsprognose und Düngung, Standpunkt des VDLUFA
- Wen G et al. (2003): Effectiveness of an elemental sulphur fertilizer on an oilseed-cereal-legume rotation on the Canadian prairies, *J. Plant Nutr. Soil Science*, No. 166 (2003), Seite 54 - 60
- Westermann D T (1974): Indexes of Sulfur Deficiency in Alfalfa. I. Extractable Soil SO<sub>4</sub>-S, *Agronomy Journal*, Vol. 66 (1974), Seite 578 - 581
- Williams C H (1962): The evaluation of plant-available sulphur in soils, *Plant and Soil*, Vol. 17 No. 3 (1962), Seite 279 - 294
- Williams C H (1967): Some factors affecting mineralization of organic sulphur in soils, *Plant Soil*, Vol. 26 No. 2 (1967), Seite 205-223
- Willms M (2005): Landwirtschaftliche Ursachen hoher Sulfatgehalte in gefördertem Trinkwasser, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Seite 16 - 20
- Zaroug M G et al. (1979): Nodulation, nitrogen fixation, leaf area, and sugars content in *Lablab purpureus* as affected by sulfur nutrition, *Plant Soil*. 53 (1979), Seite 319 – 328.
- Zhao F J et al. (1997): Sulfur nutrition- an important factor for quality of wheat and rapeseed, In: *Plant nutrition - for sustainable food production and environment*, Ando, T. (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Seite 917 - 922

---

*Zhao F J et al. (1999): Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (Pisum sativum L.), Plant and soil, 212 (1999), Kluwer Academic Publishers, Seite 209 - 219*

*Zörb C et al. (2010): Quantitative proteome analysis of wheat gluten as influenced by N and S nutrition, Plant Soil 327 (2010), Springer, Seite 225 – 234*

## Anhang

A1: S-Abfuhr ( $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) in Abhängigkeit der Pflanzenfraktion und der Düngevariante für die Jahre 2010 und 2011. Die Werte sind fett gedruckt, die Buchstaben stellen die Signifikanzen (nach Tuckey und Scheffé (in der Fraktion Nichtleguminosen und Gesamt im Jahr 2010) mit  $p=0,05$ ) dar und in Klammern steht der prozentuale Anteil an der Gesamt S-Abfuhr

Jahr	Pflanzenfraktion	Variante				
		S0	MgSO4 40	MgSO4 80	CaSO4	Sel 80
2010	Leguminosen	<b>11,44</b> b (63%)	<b>26,58</b> a (71%)	<b>31,55</b> a (74%)	<b>28,13</b> a (69%)	<b>13,62</b> b (64%)
	Nichtleguminosen	<b>6,86</b> b (37%)	<b>10,83</b> ab (29%)	<b>11,07</b> ab (26%)	<b>12,41</b> a (31%)	<b>7,80</b> ab (36%)
	Gesamt	<b>18,30</b> b (100%)	<b>37,41</b> a (100%)	<b>42,62</b> a (100%)	<b>40,69</b> a (100%)	<b>21,41</b> b (100%)
2011	Leguminosen	<b>9,79</b> c (68%)	<b>25,79</b> a (78%)	<b>29,06</b> a (84%)	<b>27,10</b> a (81%)	<b>14,94</b> b (74%)
	Nichtleguminosen	<b>4,53</b> a (32%)	<b>7,40</b> a (22%)	<b>5,55</b> a (16%)	<b>6,27</b> a (19%)	<b>5,24</b> a (26%)
	Gesamt	<b>14,32</b> c (100%)	<b>33,19</b> a (100%)	<b>34,61</b> a (100%)	<b>33,36</b> a (100%)	<b>20,18</b> b (100%)

A2: N-Jahresertrag ( $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) in Abhängigkeit der Pflanzenfraktion und der Düngevariante für die Jahre 2010 und 2011. Die Werte sind fett gedruckt, die Buchstaben stellen die Signifikanzen (nach Tuckey und Scheffé (in der Fraktion Nichtleguminosen und Gesamt im Jahr 2010) mit  $p=0,05$ ) dar und in Klammern steht der prozentuale Anteil an dem Gesamt N-Jahresertrag

Jahr	Pflanzenfraktion	Variante				
		S0	MgSO4 40	MgSO4 80	CaSO4	Sel 80
2010	Leguminosen	<b>163,37</b> b (63%)	<b>333,72</b> a (71%)	<b>347,37</b> a (74%)	<b>327,27</b> a (69%)	<b>199,40</b> b (64%)
	Nichtleguminosen	<b>49,43</b> b (37%)	<b>66,49</b> ab (29%)	<b>64,34</b> ab (26%)	<b>72,99</b> a (31%)	<b>60,06</b> ab (36%)
	Gesamt	<b>212,80</b> c (100%)	<b>400,21</b> ab (100%)	<b>411,71</b> a (100%)	<b>403,34</b> a (100%)	<b>259,46</b> bc (100%)
2011	Leguminosen	<b>188,68</b> b (77%)	<b>368,00</b> a (85%)	<b>388,53</b> a (90%)	<b>363,89</b> a (88%)	<b>249,94</b> b (82%)
	Nichtleguminosen	<b>57,84</b> a (23%)	<b>65,11</b> a (15%)	<b>46,78</b> a (11%)	<b>51,02</b> a (12%)	<b>54,46</b> a (18%)
	Gesamt	<b>246,52</b> b (100%)	<b>433,11</b> a (100%)	<b>433,11</b> a (100%)	<b>414,91</b> a (100%)	<b>304,40</b> b (100%)

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Masterarbeit selbständig durch den Verfasser und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde, die benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich als solche kenntlich gemacht wurden und diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungskommission vorgelegt wurde.

Gießen, den 14.12.2012

---

Sandra Heilmann

## Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Leithold für die Bereitstellung des Themas bedanken wie auch dafür, dass der Versuch an dem Institut für Ökologischen Landbau in Gießen stattfinden konnte, ohne den sich nicht das Thema für meine Masterarbeit ergeben hätte und es die vorliegende Arbeit selbst auch nicht geben würde.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die an dem Luzerne-Klee gras-Versuch in irgendeiner Weise beteiligt waren und mitgewirkt haben.

Mein Dank geht an alle Mitarbeiter des Instituts für Ökologischen Landbau, insbesondere an Herrn Prof. Dr. Leithold, Frau Dr. Stephanie Fischinger und Herrn Dr. Konstantin Becker für die Leitung des Projektes, die Organisation und die theoretische und zum Teil praktische Durchführung. Ebenfalls an alle Mitarbeiter des Gladbacherhofs, wo dieser Versuch durchgeführt wurde und auch an die Mitarbeiter des Labors im Institut für Ökologischen Landbau wie auch der Bodenkunde für die Analyse der Proben. Nicht zuletzt geht mein Dank an K + S, mit deren Unterstützung das Projekt durchgeführt wurde.

Besonderen Dank geht an meine Betreuerin Dr. Stephanie Fischinger, bei der ich eher zufällig mit meiner Anfrage für eine mögliche Abschlussarbeit gelandet bin. Ich möchte mich für die gute, angenehme und zeitintensive Betreuung bedanken, ebenso wie für die vielen Ratschläge und Ideen, mit denen ich während dem Schreiben unterstützt wurde. Und auch dafür, dass sie bei Fragen jederzeit für mich erreichbar war, auch als sie ihre Stelle in Göttingen antrat und seitdem nicht mehr in nur einer viertel Stunde Weg in ihrem Büro anzutreffen war. Ein großes Dankeschön für die tolle und hilfreiche Korrekturlesung mit so vielen neuen Ideen, dass ich gar nicht mehr glaubte alle noch umsetzen zu können und jemals wirklich fertig zu werden...

Auch möchte ich mich bei Frau Maria Nägele bedanken, die mir den riesigen Datensatz erläuterte, mir half mich darin zurechtzufinden und alle möglichen Fragen dazu beantwortete. Ebenfalls für die immer sehr schnellen Antworten, Datenauskünfte und deren Bereitstellung.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Franz Schulz für die umgehenden Antworten auf meine vielen Anfragen hin und die schnelle Datenbereitstellung.

Bedanken möchte ich mich auch bei Alexandra Riffel, bei der ich HiWi sein durfte und so die Möglichkeit hatte die Probenaufbereitung noch mal hautnah mitzuerleben, vor allem das Sortieren der Pflanzenproben in eine Leguminosen- und Nichtleguminosenfraktion.... Dies hat mir sicherlich geholfen den Methodikteil meiner Arbeit besser und (hoffentlich) nachvollziehbar zu schreiben. Ebenfalls für ihr immer offenes Ohr und die netten und lustigen Gespräche, wenn ich eigentlich nur mal „kurz“ vorbei schauen wollte, wie auch ihre Motivation und ihr Vertrauen in meine Arbeit.

Bei Helen Hornischer möchte ich mich für die schnelle Hilfe mit SPSS bedanken, ohne deren Unterstützung wäre meine statistische Auswertung nicht in dieser Form möglich gewesen und hätte bestimmt etwas länger gedauert.

Ebenfalls möchte ich mich bei Agnes Horwath für die unglaublich schnelle, sehr hilf- und ideenreiche Korrekturlesung bedanken.

Ein großes Dankeschön geht auch an meinem Bruder für seine Unterstützung, Motivation und vielen Ablenkungsvorschlägen in unseren zahlreichen Telefonaten. Ebenfalls für die Korrekturlesung, auch wenn diese nur eine halbe Seite lang war und ihm sprachlich nicht gefallen hat.... Glücklicherweise habe ich die Arbeit trotzdem fertig bekommen.

Letztlich möchte ich mich noch bei meinen Eltern für die Unterstützung und den Rückhalt bedanken. Dies nicht nur während meiner Masterarbeit sondern während meinem gesamten Studium. Auch, dass sie immer für mich da waren und mich bei jeder Entscheidung unterstützt haben und mir das Studium überhaupt ermöglichten.