Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich für Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement

Institut für Pflanzenzüchtung und Pflanzenbau II

Professur für Organischen Landbau

Masterarbeit im Studiengang

„Umwelt- und Ressourcenmanagement“

……

Die Bestimmung der Schwefelbedürftigkeit von Böden mit Hilfe von Gefäßversuchen und Pflanzenanalysen

……

Prüfer:

Prof. Dr. Günther Leithold

Dr. Konstantin Becker

Vorgelegt von:

Madeleine Joana Bosold

Matrikelnummer: 5013377

E-Mail: madeleine.bosold@umwelt.uni-giessen.de

Abgabedatum: 20. November 2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis II
Abbildungsverzeichnis V
Tabellenverzeichnis VII
Abkürzungsverzeichnis VIII
Abstract X
1 Einleitung 1
2 Literaturübersicht 3
2.1 Die Entwicklung der Schwefelversorgung auf landwirtschaftlichen Flächen 3
2.2 Schwefel in der Pflanze 4
2.3 Schwefelmangelsymptome 7
2.4 Schwefel im Boden 9
2.5 Schwefeleinsatz in der ökologischen Landwirtschaft 12
2.6 Die Ermittlung der Schwefelbedürftigkeit 13
2.7 Keimpflanzenversuch nach Neubauer 14
3 Material und Methoden 16
3.1 Die Düngevarianten 16
3.2 Verwendetes Saatgut 18
3.2 Versuchsvorbereitung 18
3.3 Versuchsdurchführung 19
3.4 Die Ernte 22
3.5 Aufbereitung der Pflanzen- und Wurzelmaterialien 22
3.6 Pflanzen- und Wurzelanalysen 23
3.7 Auswertung und Statistik 24
4 Ergebnisse und Diskussion 26
4.1 Roggen (*Secale cereale)* 26
4.1.1 Optische Auswertung 26
4.1.2 Trockenmasse 27
4.1.3 Stickstoffkonzentration 28
4.1.4 Schwefelkonzentration 29
4.1.5 Stickstoffgehalt 30
4.1.6 Schwefelgehalt 31
4.1.7 N/S-Verhältnis 33

4.1.8 Diskussion Roggen 34
4.2 Rotklee (*Trifolium pratense*) 36
4.2.1 Optische Auswertung 36
4.2.2 Trockenmasse 37
4.2.3 Stickstoffkonzentration 38
4.2.4 Schwefelkonzentration 40
4.2.5 Stickstoffgehalt 42
4.2.6 Schwefelgehalt 43
4.2.7 N/S-Verhältnis 46
4.2.8 Diskussion Rotklee 47
4.3 Rotkleegras (*Trifolium pratense, Lolium perenne)* 51
4.3.1 Optische Auswertung 51
4.3.2 Trockenmasse 53
4.3.3 Stickstoffkonzentration 54
4.3.4 Schwefelkonzentration 56
4.3.5 Stickstoffgehalt 57
4.3.6 Schwefelgehalt 58
4.3.7 N/S-Verhältnis 61
4.3.8 Diskussion Rotkleegras 62
4.4 Raps (*Brassica napus)* 64
4.4.1 Optische Auswertung 64
4.4.2 Trockenmasse 65
4.4.3 Stickstoffkonzentration 66
4.4.4 Schwefelkonzentration 67
4.4.5 Stickstoffgehalt 68
4.4.6 Schwefelgehalt 69
4.4.7 N/S-Verhältnis 72
4.4.8 Diskussion Raps 73
4.5 Gelbsenf (*Sinapis alba*) 75
4.5.1 Optische Auswertung 75
4.5.2 Trockenmasse 76
4.5.3 Stickstoffkonzentration 77
4.5.4 Schwefelkonzentration 78
4.5.5 Stickstoffgehalt 79

4.5.6 Schwefelgehalt 80
4.5.7 N/S-Verhältnis 81
4.5.8 Diskussion Gelbsenf 82
4.6 Gesamtdiskussion 82
5 Fazit 86
6 Ausblick 88
7 Zusammenfassung 90
Referenzen 91
Online Referenzen 96
Anhang 97
Eidesstattliche Erklärung 102
Danksagung 103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Schwefelemissionen in Deutschland 4
Abbildung 2: Sulfatassimilation der Pflanze 7
Abbildung 3: Schwefelmangelerscheinungen bei Raps 8
Abbildung 4: Schwefelmangelerscheinungen bei Rotklee. 9
Abbildung 5: Prozess des Schwefelkreislaufs in der Natur 11
Abbildung 6: Aufbringung der 100 Samen mit Hilfe der angefertigten Schablone 20
Abbildung 7: Die Varianten QS, A1- A4 der Versuchspflanze Roggen 26
Abbildung 8: Die Varianten B1- B5 der Versuchspflanze Roggen 26
Abbildung 9: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Roggen 27
Abbildung 10: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Roggen. 28
Abbildung 11: Schwefelkonzetration im Spross der Versuchspflanze Roggen 29
Abbildung 12: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Roggen 30
Abbildung 13: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Roggen 31
Abbildung 14: Ursprung des Schwefels im Spross der Versuchspflanze Roggen. 32
Abbildung 15: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Roggen 33
Abbildung 16: Die Varianten QS, A1-A4 der Versuchspflanze Rotklee 36
Abbildung 17: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotklee 36
Abbildung 18: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Rotklee. 37
Abbildung 19: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanzen Rotklee 38
Abbildung 20: Optimaler Stickstoffkonzentrationsbereich bei Rotklee 39
Abbildung 21: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotklee 40
Abbildung 22: Optimaler Schwefelkonzentrationsbereich bei Rotklee 41
Abbildung 23: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotklee 42
Abbildung 24: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotklee 43
Abbildung 25: Ursprung des Schwefels im Spross der Versuchspflanze Rotklee 44
Abbildung 26: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Rotklee 45
Abbildung 27: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Rotklee 46
Abbildung 28: Die Varianten QS, A1-A4 der Versuchspflanze Rotkleegras 51
Abbildung 29: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotkleegras 51
Abbildung 30: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotkleegras 52
Abbildung 31: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 53
Abbildung 32: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras. 54

Abbildung 33: Optimaler Stickstoffkonzentrationsbereich bei Rotkleegras 55
Abbildung 34: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 56
Abbildung 35: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 57
Abbildung 36: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 58
Abbildung 37: Ursprung des Schwefels im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 59
Abbildung 38: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Rotkleegras 60
Abbildung 39: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras 61
Abbildung 40: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Raps. 64
Abbildung 41: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Raps. 65
Abbildung 42: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Raps 66
Abbildung 43: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Raps 67
Abbildung 44: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Raps 68
Abbildung 45: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Raps 69
Abbildung 46: Ursprung des Schwefels im Spross der Versuchspflanze Raps 70
Abbildung 47: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Raps 71
Abbildung 48: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Raps 72
Abbildung 49: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Gelbsenf 75
Abbildung 50: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 76
Abbildung 51: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 77
Abbildung 52: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 78
Abbildung 53: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 79
Abbildung 54: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 80
Abbildung 55: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schwefelentzug von Winterraps, Rotklee, Luzerne und Gras bei mittleren Erträgen 6

Tabelle 2: Schwefelgehalte in organischen Düngern 12

Tabelle 3: Zugelassenen Schwefeldünger im Ökolandbau 13

Tabelle 4: Das gewählte Saatgut mit Angaben zu Sorte, Hersteller, Keimfähigkeit und Beize. 18

Tabelle 5: Korngröße der verwendeten Substrate 19

Tabelle 6: Aufteilung der zugeführten Nährlösungen 21

Tabelle 7: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Roggen. 97

Tabelle 8: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Rotklee. 98

Tabelle 9: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Rotkleegras 99

Tabelle 10: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Raps 100

Tabelle 11: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Gelbsenf 101

Abkürzungsverzeichnis

µg	Mikrogramm
ATP	Adenosintriphosphat
bzw.	beziehungsweise
Co A-SH	Coenzym A
CO_2	Kohlenstoffdioxid
dest.	Destiliert
d.h.	das heißt
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
g	Gramm
H^+	Proton
H_2S	Schwefelwasserstoff
H_2SO_4	Schwefelsäure
ha	Hektar
K	Kalium
K_2O	Kaliumoxid
kg	Kilogramm
L	Liter
m^3	Kubikmeter
mg	Milligramm
$MgCl_2$	Magnesiumchlorid
MgO	Magnesiumoxid
$MgSO_4$	Magnesiumsulfat
min	mineralisch
mL	Milliliter

N	Stickstoff
Na	Natrium
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
P	Phosphor
S	Schwefel
SO_2	Schwefeldioxid
SO_3	Anhydrid der Schwefelsäure
SO_4^{2-}	Sulfat
SO_4-S	Sulfatschwefel
t	Tonne
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt

Abstract

During the 1980's, forest dieback was responsible for raising public awareness of corrosive gasses which were emitted by the industrial sector into the atmosphere. As a result, the desulfurization of incineration plants became compulsory in Europe. On one hand, this led to a significant reduction of dangerous emissions. On the other hand, the reduction incurred a loss of sulphur immissions into agricultural ecosystems, where they played an important role as plant nutrients, and were essential for protein biosynthesis (SCHERER 2001). A lack of sulphur in soil affects plant growth as well as the quality of plant products. During the last 10 to 20 years, sulphur deficiency has been detected with increasing frequency in Western Europe (BOOTH et al. 1991). Conventional farm systems react to sulphur deficiency in soils by fertilizing fields with sulphur. In contrast to this, are organic farm systems, which have no existing recommendation for sulphur application on different crops especially legumes.

In lieu of these facts, this study was performed. It dealt with determining the sulphur needs of five different crops: legumes, a legume-grass mixture, rapeseed, yellow-mustard, and rye. Ten increasing levels of fertilization were gradually administered on each crop within a climatic chamber. This testing was based on the Neubauer-Method for sprouts, and took 17 days to complete.

The results of this test reveal that sulphur had a significant effect on plant growth, most noticeably for the legumes and the legume-grass mixture. Especially the plants which were supplied with NPK- and micronutrients showed the positive effect of sulfur. A fertilization with 1,334 mg $vessel^{-1}$ lead to a significant increase of plant dry matter in red clover, and the legume-grass mixture. This amount can be equated with 60 kg ha^{-1}. Because of a fungal infestation, the results of testing on yellow mustard and rapeseed were negligible. Consequently a deficiency of sulphur limited plant growth in this study. This Neubauer Method represents a good opportunity to validate other Methods, which are used to detect the sulfurneed of soils for examble the soil investigation (S_{min}). Either way research is necessary to detect the sulphur need from different crops and soils which are important for organic farming systems.

1 Einleitung

Schwefel zählt zu den essentiellen Hauptnährstoffen in der Pflanzenernährung und nimmt aus diesem Grund eine wichtige Stellung ein. Die Einführung der Rauchgasentschwefelung von Verbrennungsanlagen wirkte zum einen dem Waldsterben entgegen und zum anderen führte es zu weniger schwefelhaltigen Immissionen auf landwirtschaftlichen Flächen. In den letzten Jahrzehnten wurde, gerade im Westen Europas, Schwefel als limitierender Nährstoff bei landwirtschaftlichen Kulturen detektiert (SCHERER 2001). Dies zeigte sich in qualitativen Einbußen und Ertragsminderungen und führte dazu, dass die Schwefelversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in den Fokus der Forschung rückte. Aufgrund der relativ neuen Situation des Schwefelmangels gibt es in der Praxis der Düngeberatung wenig Erfahrung. Dies äußert sich dadurch, dass über ausreichende Konzentrationen an messbarem Schwefel in der Pflanze wenig bekannt ist. Insbesondere bei Futterleguminosen, die eine hohe Schwefelbedürftigkeit aufweisen und für den Ökologischen Landbau eine wichtige Stellung einnehmen, besteht Bedarf an solchen Empfehlungen.

Zur Ermittlung des Düngebedarfs dient die Bodenuntersuchung als klassische Methode um pflanzenverfügbare Nährstoffe nachzuweisen. Bei der Schwefelbedarfsermittlung wird der Sulfatschwefelgehalt der Bodenlösung bestimmt (S_{min}). Allgemein wird darauf hingewiesen, dass der S_{min}-Wert des Bodens nur in geringem Maße mit den erzielten Erträgen korreliert. Dieser Wert ist im Vergleich zur Stickstoffbedarfsermittlung (N_{min}) deutlich weniger aussagekräftig. Die einzige Empfehlung wurde von Axel Link ausgesprochen. Dieser sagt, dass ab 60 kg SO_4-S ha^{-1} im Frühjahr eine S-Düngungswirkung bei der Kulturpflanze Raps unwahrscheinlich ist (LINK, 1997). Die aktuellen Methoden basieren auf chemischer- bzw. physikalischer Extraktion. Ermittelt wird hierbei, welche Nährstoffe auf diese Art und Weise lösbar sind. Neubauer hingegen nutzt die Pflanze als Extraktionsmittel und erzielte Erfolge in der Ermittlung der Bedürftigkeit von Pflanzen bei den Nährstoffen Kalium und Phosphor, wie der Quantifizierung von Nährstoffgehalten in Böden. Die Neubauer Methode wurde in dieser Arbeit genutzt um die Schwefelbedürftigkeit verschiedener Kulturpflanzen aufzuzeigen. Folgenden Hypothesen sollten überprüft werden:

1. Kulturpflanzenarten eignen sich in unterschiedlichem Maße zur Bestimmung der Schwefelverfügbarkeit von Böden nach der Neubauer Methode.

2. Die Steigerung des Schwefelangebotes kann anhand von Gefäßversuchen nach Neubauer eine Wirkung auf Trockenmasse, Stickstoff- und Schwefelkonzentrationen erzielen.
3. Mit Hilfe der Neubauer Methode lassen sich Aussagen über eine Düngeempfehlung ableiten.

2 Literaturübersicht

2.1 Die Entwicklung der Schwefelversorgung auf landwirtschaftlichen Flächen

Schwefel ist ein essentieller Pflanzennährstoff (KÖPPEN 2004, DROUX 2003). Dies ist schon seit über 100 Jahren bekannt. Doch die Problematik des Schwefelmangels in der Pflanzenernährung kam erst in den letzten 10 bis 20 Jahren auf (ZORN et al. 2013). Dies ist durch viele Faktoren bedingt. Zum einen hat sich die Landwirtschaft enorm gewandelt, da eine intensivere Landwirtschaft den Schwefelbedarf auf landwirtschaftlichen Flächen steigert. Die wachsende Weltbevölkerung und ein damit verbundener gestiegener Nahrungsmittelbedarf erhöhen den Druck auf die landwirtschaftliche Produktion (CECOTTI und MESSIC 1994). Zum anderen besteht ein verminderter Schwefeleintrag in die Atmosphäre, der vor allem durch die Rauchgasentschwefelung beeinflusst wird. Diese führt zu deutlich geringeren Schwefelimmissionen in landwirtschaftliche Ökosysteme (ZORN et al. 2013, LUCHETA und LAMBAIS 2012, SCHERER 2001).

Seit 1990 sind die Emissionen um 90% gesunken. Die Schwefelemissionen betrugen im Jahr 1990 noch 5,3 Millionen Tonnen. Diese wurden im Jahr 2012 auf nur 0,43 Millionen Tonnen reduziert. Deutschland verpflichtete sich im Helsinki-Protokoll, die Emissionen von Schwefel bis 1993 jährlich um 30% im Vergleich zum Jahr 1980 zu senken. Die Ziele konnten in wenigen Jahren erreicht werden, vor allem durch den Einsatz von schwefelarmen Brennstoffen und durch die Stilllegung von industriellen Betrieben. Die Modernisierung bestehender Verbrennungsanlagen führte zu einem weiteren Rückgang. Die Entwicklung der Schwefelemissionen ist in Abbildung 1 dargestellt (UBA 2014).

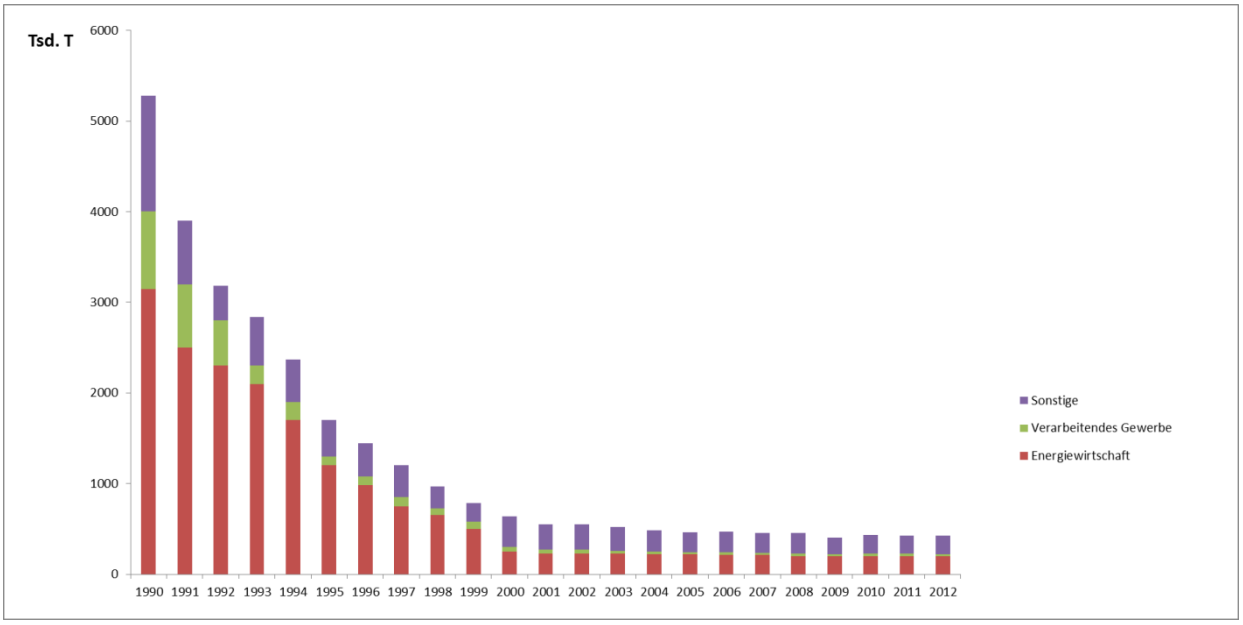

Abbildung 1: Entwicklung der Schwefelemissionen in Deutschland von 1990 bis 2012 (UBA, 2014)

Der größte Anteil der Schwefelemissionen wurde durch die Energiewirtschaft, im Jahr 1990, erzeugt. Dies liegt darin begründet, dass Schwefel, welcher in Brennstoffen enthalten ist, durch Oxidationsprozesse freigesetzt wird. Der zweitgrößte Verursacher der Schwefelemissionen ist das verarbeitende Gewerbe, in Abbildung 1 grün dargestellt. Zu den sonstigen Quellen der Schwefelemissionen zählen Haushalte und Kleinverbraucher, Verkehr, Militär, Diffuse Emissionen aus Brennstoffen, Industrieprozesse sowie Abfall (UBA 2014).

Ein weiterer Grund für die Verringerung der Schwefeleinträge auf landwirtschaftlichen Flächen ist ein verminderter Einsatz von schwefelhaltigen Pestiziden und Fungiziden (SCHERER et al. 2006, CECOTTI und MESSIC 1994). Durch eine Reduktion der Aufbringung von Wirtschaftsdünger wird der rückläufige Schwefeleintrag weiter verstärkt (SCHERER 2001). Der Schwefelmangel ist zudem auf eine hohe Stickstoffdüngung zurückzuführen, wodurch das N/S-Verhältnis gestört wird (ZORN et al. 2013). Beide Nährstoffe werden zur Bildung von Proteinen benötigt. Besteht ein Stickstoffüberschuss und ein Schwefelmangel, läuft die Proteinbiosynthese nicht optimal ab. Deshalb sollte die Schwefelgabe gezielt an die Stickstoffgabe angepasst werden (ZORN et al. 2013).

2.2 Schwefel in der Pflanze

Schwefel ist ein Makronährstoff mit einer vielseitigen Rolle in der Pflanzenphysiologie (LUCHETA und LAMBAIS 2012, KÖPPEN 2004, SCHERER 2001). Es ist ein Nährelement, welches für den Stoffwechsel unentbehrlich ist (BLUME et al. 2010, LÜTKE-ENTRUP und

OEHMICHEN 2000). Als Bestandteil von mehreren Enzymen und Coenzymen ist Schwefel in der Sulfhydryl (-SH-) Gruppen integriert. Diese funktionelle Gruppe weist eine besondere Reaktionsfreudigkeit auf (KÖPPEN 2004) und ist Bestandteil von Aminosäuren wie Cystein, Cystin und Methionin (BLUME et al. 2010, SCHUBERT 2006, KÖPPEN 2004, DROUX 2004, MARSCHNER 2003, SCHERER 2001, CECOTTI und MESSIC 1994). Diese Aminosäuren sind essentiell für den Metabolismus von primären und sekundären Stoffwechselprodukten. Zu den sekundären Metaboliten zählen beispielsweise Senf- und Lauchöle (BLUME et al. 2010, KÖPPEN 2004). Zudem befinden sich Schwefelverbindungen in essentiellen Vitaminen wie Thiamin und Biotin (DROUX 2004, CECOTTI und MESSIC 1994). Auch im Coenzym A (Co A-SH), welches im Citrat-Zyklus und bei der Synthese von Lipiden beteiligt ist, ist Schwefel ein wichtiger Bestandteil. Somit spielt Schwefel eine wesentliche Rolle beim Energiestoffwechsel der Pflanze (KÖPPEN 2004). Des Weiteren wird Schwefel eine Stärkung der Abwehrmechanismen bei Pflanzen zugesprochen (SCHUBERT 2008, BLOEM et al. 2007). Viele schwefelhaltige Metaboliten haben eine fungitoxische Wirkung. Dazu zählen beispielsweise Glucosinolate und Glutathion. Auch die Freisetzung von Schwefelwasserstoff kann Pathogenen entgegenwirken. Aus der Korrelation zwischen zunehmenden Schwefelmangelsymptomen und dem Anstieg von Pilzbefall bei Kulturpflanzen hat sich der Begriff „Schwefel-induzierte Resistenz“ (SIR) ergeben. Die Schwefelgabe zum richtigen Zeitpunkt kann den Befall von pathogenen Schaderregern reduzieren (BLOEM et al. 2007).

Schwefel wird in ähnlichen Mengen wie Phosphor aufgenommen, wobei der Schwefelbedarf sehr stark von den Pflanzenarten abhängig ist. Einen besonders hohen Schwefelbedarf weisen Kruziferen (Kreuzblütler) wie Raps und Senf auf (BLUME et al. 2010, KÖPPEN 2004, SCHERER 2001). Der Schwefelgehalt der Trockenmasse beträgt bei den meisten Pflanzen zwischen 1 und 10 g kg^{-1}. Der Schwefelgehalt bei Raps hingegen liegt bei 15 g kg^{-1}(BLUME et al. 2010). Dies wird durch die Bildung von schwefelhaltigen Glucosinolaten (Senföle) begründet. Auch Liliaceaen (Zwiebelgewächse) haben einen hohen Bedarf an Schwefel, was wiederum auf die Bildung von schwefelhaltigen Lauchölen zurückzuführen ist. Leguminosen haben einen mittleren Schwefelbedarf (SCHUBERT 2006, KÖPPEN 2004). Aufgrund des hohen Proteingehaltes der Leguminosen wird Schwefel vermehrt zur Biosynthese von Aminosäuren und daraus entstehender Eiweiße benötigt (SCHERER 2006). Der Schwefelentzug verschiedener Kulturpflanzen pro Hektar ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Schwefelentzug von Winterraps, Rotklee, Luzerne und Gras bei mittleren Erträgen (in Anlehnung an KÖPPEN, 2004)

Frucht	Pflanzenteil	Entzug in kg ha^{-1}
Winterraps (*Brassica napus oleifera*)	Korn Gesamtpflanze	25 45-70
Rotklee (*Trifolium pratense*)	Gesamtpflanze	15-30
Luzerne(*Medicago sativa* L.)	Gesamtpflanze	25-30
Gras (intensiv genutztes Grünland)	Gesamtpflanze	24-30

Im Gegensatz zu Mensch und Tier sind Pflanzen schwefelautotroph. Deshalb findet das Element Schwefel sowohl in reduzierter als auch in oxidierter Form Anwendung (SCHUBERT 2008). Die Hauptversorgung mit Schwefel läuft über die Aufnahme von Sulfat (SO_4^{2-}) über die Wurzelhaare ab. Diese Aufnahme wird durch einen aktiven H^+/SO_4^{2-} Transport ermöglicht (SCHUBERT 2006, MARSCHER 2003, SCHILLING 2000, LEUSTECK und SAITO 1999), woraufhin Sulfat über das Xylem in den Spross und die Blätter geleitet wird. In den Chloroplasten der Pflanzen findet die Reduktion von Sulfat statt, da dort die notwendigen Bedingungen vorherrschen. Begründet liegt dies in dem hohen Energieaufwand, der durch den Prozess der S-Assimilation benötigt wird. Diese Energie wird in Form von ATP in den Chloroplasten bereitgestellt. An der Sulfatassimilation sind folgende Enzyme beteiligt: ATP-Sulfurylase, APS-Reduktase, Sulfit-Reduktase und O-Acetylserin (Thiol) (DROUX 2004, DE KOK et al. 2002). Der schematische Ablauf der Sulfatassimilation ist in Abbildung 2 dargestellt und kann in vier Schritten zusammengefasst werden. Während im ersten Schritt zunächst Sulfat aufgenommen wird, findet im zweiten Schritt eine Aktivierung des Sulfats mit Hilfe des Enzyms ATP-Sulfurylase statt. Im Anschluss daran läuft eine Reduktion von Sulfat über die Zwischenprodukte Sulfit und Sulfid ab (SCHUBERT 2006), bevor im letzten Schritt die Aminosäure Cystein synthetisiert wird. Die zum einen Schwefeldonator und zum anderen Ausgangsstoff für die Synthese weiterer Schwefelverbindungen ist (DROUX 2004).

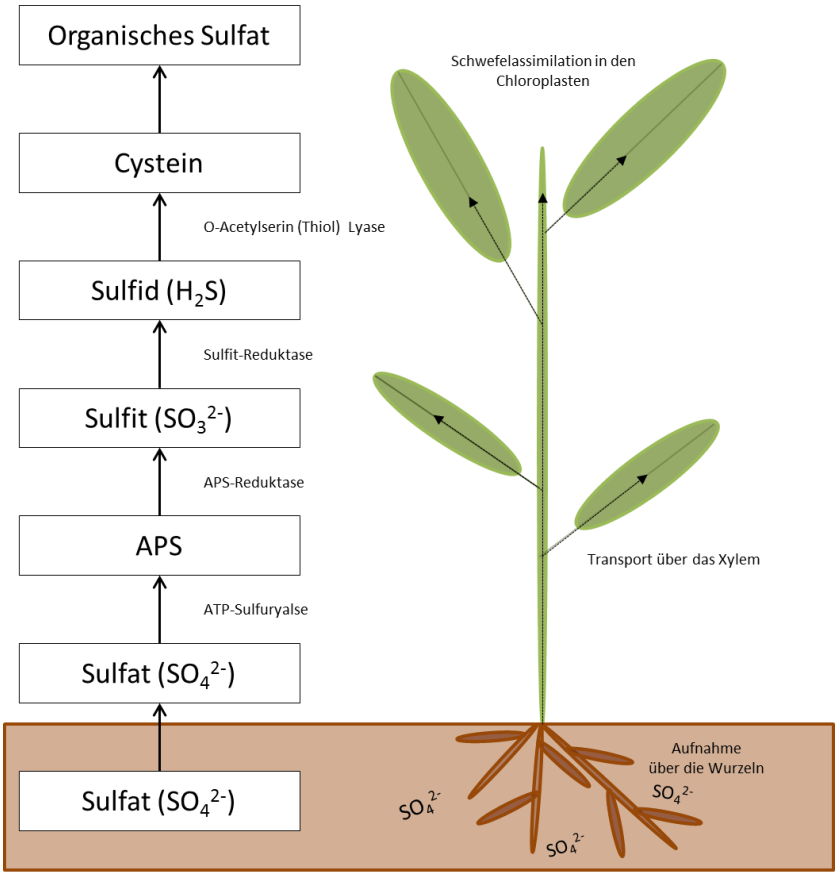

Abbildung 2: Sulfatassimilation der Pflanze (verändert nach SCHUBERT 2006, DE KOK et al. 2002).

Ein geringer Schwefelanteil wird über die Pflanzenstomata in die Blätter aufgenommen. Diese sind der atmosphärischen Deposition von SO_2 (Schwefeldioxid) ausgesetzt. In den Blättern reagiert SO_2 mit H_2O zu H_2SO_4 (SCHUBERT 2006, BALDOCCHI 1993). Pflanzen profitieren von dem atmosphärischen Schwefeleintrag, wenn dieser in geringem Maße stattfindet (SCHERER 2001). Zu hohe SO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre hingegen, können vor allem sensible Pflanzen schädigen (SCHUBERT 2006). Für annuelle Pflanzen liegt die kritische SO_2 Konzentration bei 120 µg m^{-3} (SAALBACH 1984). Eine Überversorgung mit Schwefel kann eine SO_2 Vergiftung zur Folge haben. Symptome dieser Vergiftung äußern sich durch eine Verfärbung der Blätter in gelbe bis weißliche Bereiche. Bei sehr starkem Überschuss kann es zu Nekrosen kommen (SCHILLING 2010).

2.3 Schwefelmangelsymptome

Schwefelmangelsymptome können verschiedene Ausprägungen annehmen. Der Proteinstoffwechsel kann durch Schwefelmangel gestört sein oder es erfolgt eine Beeinträchtigung der Chlorophyllsynthese. Mangelsymptome zeigen sich beispielsweise durch Verfärbungen, beginnend mit einer Farbveränderung der jüngeren Blätter von

hellgrün bis gelblich. In späteren Stadien ist der gesamte Blattapparat betroffen (BLUME et al. 2010).

In Abbildung 3 sind Schwefelerscheinungen von Raps dargestellt. Weitere Mangelsymptome können sich durch löffelartige Verformungen und Verfärbungen vor allem bei jüngeren Blättern äußern. Die fahlgelbe bis weiße Verfärbung der Blütenblätter, bis hin zu einer Anthocyan-Verfärbung der Blätter, sind weitere Ausprägungen der Schwefelmangelsymptomen dieser Kulturpflanzenart (BLUME et al. 2010, KÖPPEN 2004). In extremen Fällen kann bei Raps der Schwefelmangel zu Ausfällen der gesamten Ernte führen (BLUME et al. 2010).

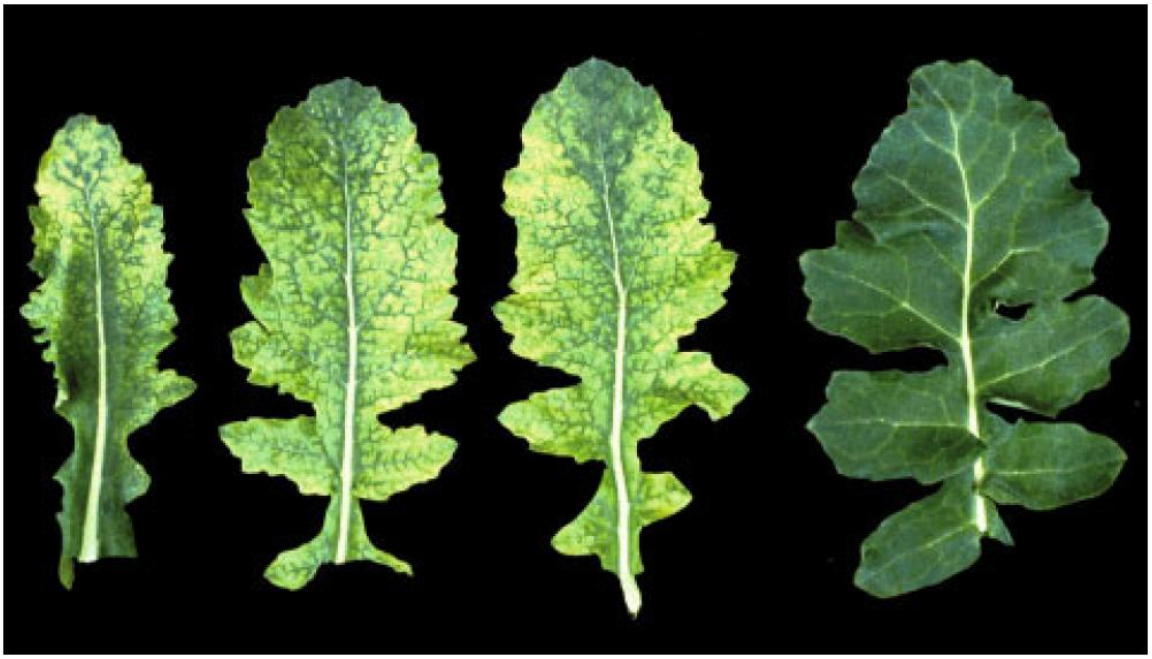

Abbildung 3: Schwefelmangelerscheinungen bei Raps (*Brassica napus oleifera*), links mit S-Mangelsymptomen; rechts: mit ausreichender S-Versorgung (Zorn et al. 2013).

Im Gegensatz zu den Mangelsymptomen bei Raps, sind die Mangelsymptome bei Getreide nicht eindeutig zu identifizieren. Symptome bei Stickstoffmangel äußern sich in ähnlicher Form, was unter Umständen zu Verwechslungen führen kann (KÖPPEN 2004, MARSCHNER 2003). Schwefelmangel führt bei Backweizenkulturen zu einer Verschlechterung der Back- und Mahlgutqualität (SCHNUG 1992). Begründet wird dies durch eine Hemmung der Polymerisation der Gluteninbestandteile beim Anteigen, da diese auf Disulfidbrücken beruhen (SCHILLING 2000).

Abbildung 4: Schwefelmangelerscheinungen bei Rotklee (*Trifolium pratense*), links mit S-Mangelsymptomen; rechts: mit ausreichender S-Versorgung (Zorn et al. 2013).

Aufgrund des hohen Proteingehaltes in Futterleguminosen wirkt sich ein Schwefelmangel ertragslimitierend aus. Abbildung 4 zeigt die Schwefelmangelsymptome bei Rotklee. Die linke Bildhälfte zeigt Rotklee unter Schwefelmangelbedingungen, die rechte Bildhälfte unter einer optimalen Schwefelversorgung.

2.4 Schwefel im Boden

Der Gehalt von Schwefel im Boden ist von Faktoren wie Ausgangsgestein, Bodenart und Menge an organischer Substanz abhängig. Der Gesamtgehalt an Schwefel setzt sich hierbei aus anorganischen und organischen Schwefelverbindungen zusammen (LÜTKE-ENTRUP und OEHMICHEN 2000, BERGMANN 1993). In Mineralböden liegt der Gesamtschwefelgehalt zwischen 0,02% und 0,2%. Auen- oder Moorböden können deutlich höhere Schwefelgehalte erzielen. Diese liegen bei bis zu 3% (LÜTKE-ENTRUP und OEHMICHEN 2000).

In der Bodenlösung ist nur ein geringer Anteil von Schwefel in Form von Sulfat gelöst. Bis zu 95% des Schwefels liegt organisch gebunden vor (LUCHETA und LAMBAIS 2012, SCHERER et al, 2012, BLUME et al. 2010, BALIK et al. 2009). Diese Bindungen sind zum einen Sulfatester (C-O-S) und zum anderen kohlenstoffgebundener Schwefel (C-O) (SCHERER et al. 2012, BLUME et al. 2010, MARSCHNER 2003, SCHERER 2001). Die organischen Schwefelverbindungen terrestrischer Böden befinden sich vor allem in den oberen Bodenhorizonten wie O- oder A-Horizont. Im Unterboden liegt Schwefel überwiegend mineralisch gebunden vor. Darüber hinaus spielen Sulfatester eine wichtige Rolle in der

kurzfristigen Mineralisierung. Kohlenstoffgebundener Schwefel hingegen benötigt einen längeren Zeitraum zur Mineralisierung (BLUME et al. 2010).

In anorganischer Form ist Sulfat die pflanzenverfügbare Form des Schwefels. Dieser liegt entweder frei in der Bodenlösung oder adsorbiert an Tonminerale oder Sesquioxide, vor. Sulfat kann auch in Form von Calciumsulfat, Magnesiumsulfat oder Natriumsulfat ausgefällt werden. Die Adsorption von Sulfat ist pH-Wert abhängig. Je geringer der pH-Wert, desto eher wird Sulfat adsorbiert (MARTINI und MUTTERS 1984). Der Sulfatgehalt in der Bodenlösung ist abhängig von der Pflanzenaufnahme, der Schwefeldüngung sowie der Mineralisation, Immobilisierung, mikrobielle Diversität und enzymatische Aktivität (SCHOENAU und MAHLI 2008, ERIKSTEN et al. 1998). Die Gesamtmenge an Schwefel auf Ackerböden kann zwischen 250 und 2500 kg ha^{-1} variieren (SCHERER et al. 2012). Das C/S-Verhältnis auf Grünland- und Waldflächen liegt etwa bei einem Wert von 200. Dem gegenüber stehen landwirtschaftlich genutzte Flächen, welche ein engeres C/S-Verhältnis von durchschnittlich 130 aufweisen.

Mikrobiell wird Schwefel auf unterschiedliche Weise genutzt. Organische Schwefelverbindungen sind größtenteils pflanzlichen Ursprungs wie beispielsweise Peptide, Polypeptide und andere schwefelhaltige Aminosäuren (SCHUBERT 2006, KÖPPEN 2004). Ein Teil der photoautotrophen Bakterien ist in der Lage, Schwefelwasserstoff als Elektronenquelle für die Photosynthese zu nutzen (SCHUBERT 2006). Unter aeroben Bedingungen findet die **Sulfurikation** statt, die Ähnlichkeiten zu der Nitrifikation aufweist (SCHUBERT 2006, KÖPPEN 2004). Bei der Sulfurikation wird elementarer Schwefel, unter Einfluss von Sauerstoff, zu Sulfat oxidiert. Liegen anaerobe Verhältnisse vor, findet die **Desulfurikation** statt. Bei dieser Reaktion wird Sulfat als Elektronenakzeptor in der Atmungskette von Bakterien genutzt, wobei Schwefelwasserstoff dem System entweicht.

In humiden Klimabereichen, wie beispielsweise Deutschland, kommt es zu keiner wesentlichen Sulfatanreicherung im Boden (BLUME et al. 2010). Mit einer Löslichkeit von ca. 2 g l^{-1} zählt Sulfat zu den leicht löslichen Stoffen. Eine ähnlich gute Löslichkeit liegt bei Nitrat vor (BLUME et al. 2010, SCHUBERT, 2006, KÖPPEN 2004). Zu der hohen Löslichkeit von Sulfat und Nitrat kommt eine negative Ladung, die sich erschwerend auf die Bindung an Bodenminerale auswirkt. Dies führt zu einer Verlagerung von Sulfat in tiefere Bodenschichten bis hin zur Auswaschung. Gefördert wird die Auswaschung dadurch, dass die

Sorption von Sulfat bei pH-Werten von größer 5,5 gering ist. Gerade diese pH- Werte herrschen auf landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen vor. Zwischen 50 und 60 kg Schwefel pro Hektar und Jahr werden im Mittel ausgewaschen (BLUME et al. 2010). Die Schwefelimmissionen aus der Luft entsprechen ungefähr 5 bis 10 kg pro Hektar und Jahr (LINK, 2002).

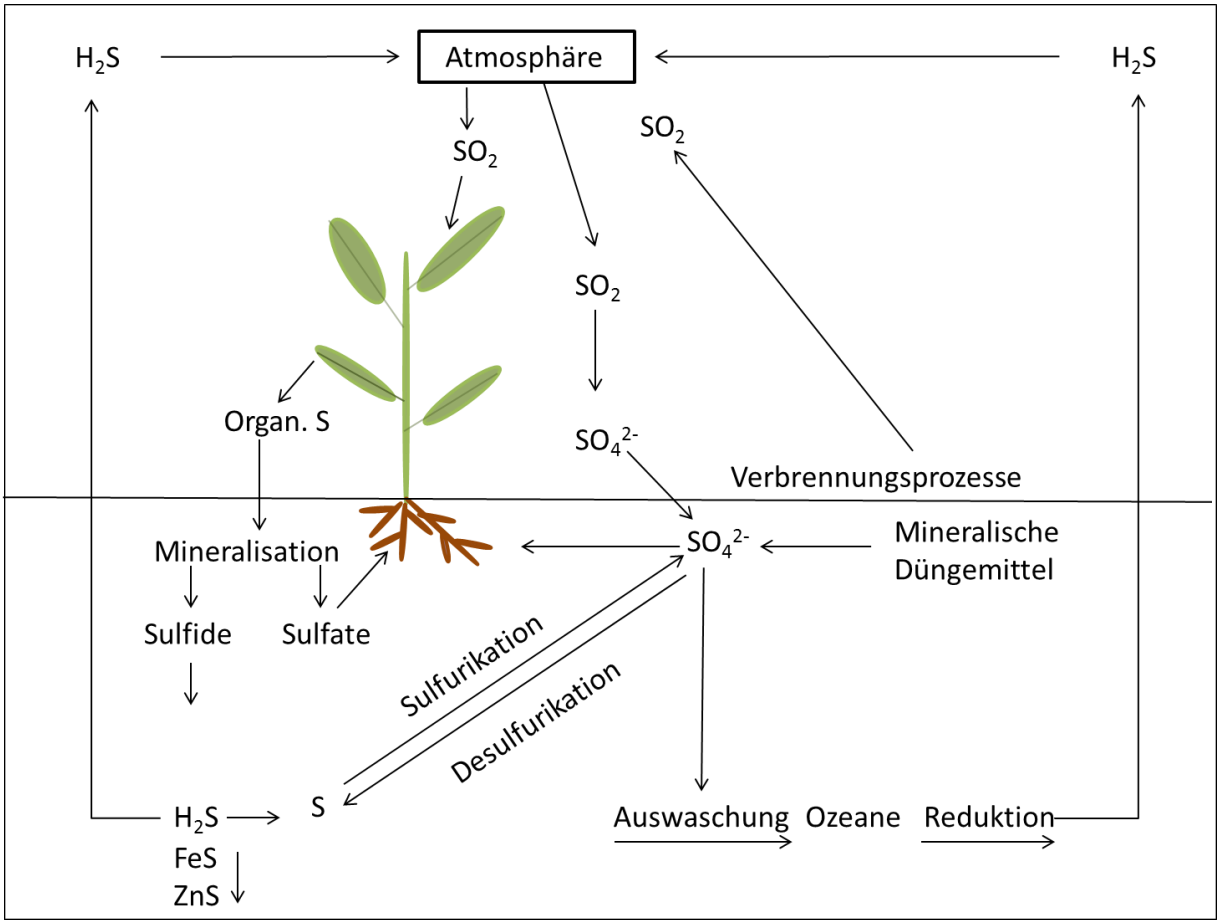

Abbildung 5: Prozess des Schwefelkreislaufs in der Natur (in Anlehnung an SCHUBERT 2006)

In Abbildung 5 ist der Schwefelkreislauf dargestellt. Erkennbar ist, dass Schwefel in Form von nasser oder trockener Deposition aus der Atmosphäre immitiert. Des Weiteren werden zwei Aufnahmewege vorgestellt. Zum einen immitieren Sulfatverbindungen auf die Bodenoberfläche und gelangen so in die Bodenlösung. Zum anderen treffen schwefelhaltige Verbindungen auf Blattoberflächen, von denen sie direkt aufgenommen werden können (SCHUBERT 2006, BALDOCCHI 1993). Die wichtigere Sulfatquelle stellt jedoch der Boden dar, in dem Sulfat über die Wurzeln aufgenommen wird (MARSCHNER 2003). Weitere Schwefeleintragswege sind organische Dünger und Pflanzenreste. Diese werden von Mikroorganismen verstoffwechselt und teilweise pflanzenverfügbar gemacht. Prozesse die

hinter der Mineralisation stehen, werden als Sulfurikation und Desulfurikation bezeichnet (SCHUBERT 2006).

2.5 Schwefeleinsatz in der ökologischen Landwirtschaft

Schwefel nimmt in der ökologischen Landwirtschaft eine wichtige Rolle ein (FISCHINGER und BECKER 2011). Er hat einen entscheidenden Einfluss auf die Stickstofffixierung bei Leguminosen. Liegt eine unzureichende Schwefelversorgung vor, dann ist die Knöllchenbildung gehemmt. Dies wiederum schränkt die Stickstofffixierung ein oder bringt sie gänzlich zum Erliegen (CECOTTI und MESSIC 1994, SCHERER et al. 2008). Durch den Leguminosenanbau wird die Anreicherung von Stickstoff auf landwirtschaftlichen Flächen unterstützt. Zudem wirkt sich eine Schwefeldüngung positiv auf die Erträge von Leguminosen aus (SCHERER und LANGE 1995, EPPENDORFER und BILLE 1992, BAILEY 1976). Aktuelle Untersuchungen bestätigen, dass eine Schwefelunterversorgung auf ökologischen Flächen keine Seltenheit ist (URBATZKA et al. 2013). Speziell auf Schwefelmangelstandorten oder auf Flächen, auf denen der Schwefelentzug größer ist als die Schwefelmineralisation, müsste zusätzlich Schwefel aufgebracht werden. Ein vermehrter Schwefelmangel tritt dann auf, wenn die Luft wenig schwefelhaltige Verbindungen enthält und darüber hinaus auf schwefelhaltige Düngemittel verzichtet wird. Besonders betroffen sind skelettreiche, sandige, humusarme und flachgründe Böden (ZORN et al. 2013, LÜTKE-ENTRUP und OEHMICHEN 2000).

Die Schwefeldüngung kann sowohl durch organische, als auch anorganische Dünger geschehen. Stallmist und Gülle sorgen hierbei für eine Rückführung des Schwefels in organischer Form (MÜCKE 2011).

Tabelle 2: Schwefelgehalte in organischen Düngern (DLG 2012).

Dünger	**S-Gehalt** [kg/t] bzw. [kg/m^3]	**Sulfat-Anteil** [%]	**C/S-Verhältnis**
Stallmist	0,3-0,8	<10	80-90
Gülle	0,2-0,7	10-20	30-50
Jauche	0,2-0,3	60-80	10-15
Biokompost	0,3-0,5	<10	60-80

Stallmist hat einen Sulfat-Anteil von weniger als 10%, bei einem Schwefelgehalt von 0,3 bis 0,8 kg t^{-1}. Gülle hingegen kann einen Sulfat-Anteil von bis zu 20% erreichen. Den höchsten Sulfat-Anteil der organischen Dünger, mit 60% bis 80%, verzeichnet Jauche (DLG 2012). Der Schwefelgehalt liegt bei 0,2- 0,3 kg m^{-3}. Weitere Angaben zu den Schwefelgehalten in organischen Düngern liefert Tabelle 2. Die Mineralisation des organischen Schwefels hängt von verschiedenen Faktoren im Boden ab und lässt sich nicht genau vorhersagen (FISCHINGER und BECKER, 2011). Im Ökolandbau zugelassene Mineraldünger liefern Schwefel in Form von Sulfat und sind dadurch direkt pflanzenverfügbar. Eine Auflistung der zugelassenen Schwefeldünger und deren Verfügbarkeit stellt Tabelle 3 dar.

Die Gabe von Schwefel in elementarer Form ist an mikrobielle Prozesse im Boden gebunden, da Schwefel erst zu Sulfat oxidiert werden muss. Aus diesem Grund ist eine präzise Vorhersage über die Verfügbarkeit nicht möglich (FISCHINGER und BECKER 2011, MÜCKE 2011).

Tabelle 3: Zugelassenen Schwefeldünger im Ökolandbau (MÜCKE 2011).

Dünger	Zusammensetzung	Verfügbarkeit
Kaliumsulfat	52% K_2O, 18% S	schnell
Kali-Magnesia	30% K_2O, 10% MgO, 17% S	schnell
Magnesia Kainit	11% K_2O, 5% MgO, 20% Na, 4% S	schnell
Bittersalz	16% MgO, 13% S	schnell
Naturgips (Calciumsulfat)	18-23% S	mittel
Elementarer Schwefel	90% S (feste Form), 50-90% S (flüssige Form)	langsam

2.6 Die Ermittlung der Schwefelbedürftigkeit

Zur Ermittlung des Schwefelbedarfs gibt es verschiedene Methoden. Die visuelle Diagnostik stellt die unkomplizierteste Methode dar. Anzeichen eines Schwefelmangels sind anhand der Aufhellung jüngerer Blätter zu erkennen (Zorn et al. 2013, SCHILLING 2000). Symptomatisch für Stickstoffmangel ist meist eine Aufhellung der älteren Blätter (ZORN et al. 2013, FISCHINGER und BECKER 2011, BERGMANN 1993). Die Gefahr von Fehlinterpretationen ist zu hoch um eine präzise Diagnose zu stellen.

Eine andere Möglichkeit neben der visuellen Diagnostik sind Schätzverfahren. So genannte Schwefel-Schätzrahmen berücksichtigen Faktoren wie beispielsweise Standorteigenschaften, Witterungsbedingungen, Art der Bewirtschaftung und Düngung der Flächen (EUROCHEM 2014). Die Bodenanalyse dient der Ermittlung von mineralischen Schwefelgehalten, abgekürzt S_{min}. Die Konzentration von mineralischem Schwefel variiert im Jahresverlauf und ist abhängig von den Faktoren: mikrobieller Aktivität, Auswaschung, Pflanzenentzug, atmosphärische Deposition und Düngung (SCHERER 2001). Aus diesem Grund sind Bodenanalysen Momentaufnahmen des mineralischen Schwefelgehaltes (SCHNUG und HANEKLAUS 1998).

Pflanzenanalysen bieten eine Option die Schwefelkonzentration im Pflanzenmaterial zu bestimmen. Darüber hinaus ist es möglich die N/S-Quotienten zu ermitteln, die Auskunft über den Schwefelversorgungszustand der Kulturpflanzen geben (FISCHINGER und BECKER 2011). Die gewonnenen Ergebnisse dieser Analyse können erst in der nächsten Wachstumsperiode Anwendung finden. Dabei ist zu beachten, dass der Schwefelbedarf kulturpflanzenspezifisch und damit nicht generalisierbar ist. In einigen Bundesländern Deutschlands werden Futtermittelanalysen durchgeführt, um den Schwefelgehalt im Futter bestimmen zu können.

2.7 Keimpflanzenversuch nach Neubauer

Hugo Neubauer entwickelte die Keimpflanzenmethode, die ein physiologisch-chemisches Verfahren zur Bestimmung der Nährstoffgehalte von Böden darstellt. Diese Methode fand weitreichend Anerkennung. Bei der ursprünglichen Keimpflanzenmethode wird sich auf die Nährstoffe Kalium und Phosphor beschränkt. Sie basiert auf der Annahme, dass die Keimpflanzen ihre gebildeten Wurzeln sofort nutzen, um Nährstoffe aus dem Bodenmedium aufzunehmen. Dabei kann die Leistungsfähigkeit der Wurzeln nicht überschritten werden, was wiederum bedeutet, dass ausschließlich der wurzellösliche Teil der Nährstoffe aufgenommen werden kann. Der Versuch wird mit 100 Roggenkörnern auf 100 g Boden angesetzt, die in eine Glasschale gegeben wurden. Es entsteht ein Überschuss an Wurzelkraft der jungen Pflanzen, sodass diese, selbst bei einem reichen Substrat, schnell hungern. Somit wird die Ausschöpfung aller wurzelverfügbaren Nährstoffe gewährleistet (Neubauer 1939).

Die 100 g des getrockneten Bodens werden mit 50 g grobem Sand vermengt. Anschließend wird das Gemenge mit 250 g feinem Sand bedeckt und mit 80 mL Flüssigkeit versetzt. Bei den blinden Bestimmungen wird der getrocknete Boden durch feinen Sand ersetzt. Die Temperatur im Vegetationsraum sollte 20 °C betragen, wobei Schwankungen im Bereich von 2 °C noch innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Die Versuchsdauer beträgt insgesamt 17 Tage und am Tag der Ernte soll eine Keimfähigkeit von 94% erreicht werden. Im Anschluss an die Ernte werden die Nährstoffgehalte bestimmt (Neubauer 1929). Diese werden zum einen für die Sprossmasse und zum anderen für die Wurzelmasse ermittelt. Um deren Nährstoffgehalte zu analysieren, müssen die Wurzeln durch Waschen vom Mineralboden getrennt werden. Der Keimpflanzenversuch geht davon aus, dass das Gesetz des Minimums in der Keimpflanzenphase noch keine Wirkung zeigt. Dieses tritt erst in einem späteren Entwicklungsstadium der Pflanze in Kraft, wenn der Pflanzenkörper aufgebaut wird. Eine Folge davon ist, dass die Roggenpflanzen Kalium und Phosphor in einem disharmonischen Verhältnis aufnehmen. Letztendlich lässt sich der Keimpflanzenversuch nicht direkte auf Ackerflächen übertragen. Klimatische, physikalische und standortspezifische Bodeneigenschaften sind in derartigen Versuchen ausgeschaltet. Nichtsdestotrotz können Aussagen über die pflanzenverfügbaren Nährstoffe, unter optimalen Bedingungen, formuliert werden. Unterschiede existieren hinsichtlich der Länge der Vegetationszeit und Pflanzenart. Die Pflanzen im freien Feld haben eine längere Wachstumsphase als im Keimpflanzenversuch. Trotzdem ist der Nährstoffentzug, bezogen auf die gleiche Menge Boden, bei den Keimpflanzen deutlich höher als im freien Feld (Neubauer 1929).

Nach einigen Jahren wurde die Keimpflanzenmethode um den Nährstoff Stickstoff erweitert, da sie sich als gute Hilfestellung zur Ermittlung der Nährstoffbedürftigkeit an Phosphor und Kalium erwiesen hatte. Zudem gewährleistet die Keimpflanzenmethode eine Überprüfung des Nährstoffvorrats zur Zeit der Saat und gibt, u.a. Aufschluss über den Nährstoffentzug der Pflanzen (Neubauer 1946). Des Weiteren ermöglicht sie eine Überprüfung der Genauigkeit anderer Bodenuntersuchungen und kann dabei helfen, den tatsächlichen Ernteentzug zu ermitteln. Die Ausweitung der Methoden führte beispielsweise zur Aufklärung, inwiefern verschiedene Wirtschaftsdünger wurzellöslichen Stickstoff liefern (Neubauer 1946).

3 Material und Methoden

3.1 Die Düngevarianten

Der vorliegende Gefäßversuch wurde auf der Gefäßversuchsstation des Instituts für Pflanzenernährung im Launsbacher Weg 31, in Gießen, durchgeführt. Geleitet wird die Versuchsstation von Prof. Dr. Diedrich Steffens. Insgesamt wurden fünf verschiedene Versuchspflanzen ausgewählt. Die Extraktionspflanze nach Neubauer ist Roggen, weshalb die Auswahl bei einer der Versuchspflanzenarten auf Winterroggen (*Secale cereale*) fiel. Um auf Pflanzenarten einzugehen, die im ökologischen Landbau eine besondere Rolle spielen, wurde Rotklee (*Trifolium pratense*) als Vertreter der Futterleguminosen, gewählt. Aufgrund der Tatsache, dass Leguminosengrasgemenge in der ökologischen Landwirtschaft eine verbreitete Anwendung finden, wurde zudem Rotkleegrasgemenge (*Trifolium pratense, Lolium perenne*) eingesetzt. Kruziferen weisen einen erhöhten Schwefelbedarf auf, daher wurden Gelbsenf *(Sinapis alba*) und Winterraps *(Brassica napus*) ebenfalls in die Auswahl aufgenommen.

Für jede Versuchspflanze wurden 10 verschiedene Düngevarianten angewendet, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Um eine statistische Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden vier Wiederholungen pro Variante angesetzt. Im Folgenden wird die Wahl der Abkürzungen für die einzelnen Varianten kurz vorgestellt. Die Varianten QS geben Auskunft über den Nährstoffgehalt, der aus dem Korn geliefert wurde. Hierbei wurden die Samen ausschließlich auf nährstofffreien Quarzsand aufgebracht und darüber hinaus erfolgte keine weitere Düngegabe. Die Varianten, die mit dem Buchstaben A beginnen, erhielten keine NPK-und Mikronährstoffdüngung. Die Variante A1 liefert Aufschluss darüber, wie viele Nährstoffe aus dem Boden des Gladbacherhofs pflanzenverfügbar waren. Alle vier Wiederholungen dieser Variante wurden nicht mit Nährlösungen versetzt. Zur Überprüfung, ob eine alleinige Gabe von Schwefel ausreicht, um ein verbessertes Pflanzenwachstum zu fördern, wurde die Schwefelgabe von der Variante A2 bis A4 gesteigert. Die spezifischen Düngegaben der Varianten A1, A2, A3 und A4 sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die Varianten der Gruppe B wurden sowohl mit Mikronährstoffen, als auch mit NPK-Dünger versetzt. Als Vergleichsvariante wurde bei der Variante B1 kein Schwefel aufgebracht. Die Schwefeldüngung wurde von der Variante B2 bis B5 gesteigert.

Tabelle 4: Die 10 Varianten und deren spezifische Düngegabe [mg 100 g Boden^{-1}].

Variante	Stickstoff	Phosphor	Kalium	Bor	Kupfer	Chlorid	Zink	Mangan	Molybdän	Magnesium	Schwefel
	N	P	K	Bo	Cu	CL	Zn	Mn	Mo	Mg	S
	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]	[mg 100 g Boden^{-1}]
QS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	1,473	-	-	-	0,505	0,667
A3	-	-	-	-	-	0,736	-	-	-	1,010	1,334
A4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,515	2,001
B1	50,103	37,5	125,4	0,1	1	2,111	2	4	0,02	-	-
B2	50,103	37,5	125,4	0,1	1	3,584	2	4	0,02	0,505	0,667
B3	50,103	37,5	125,4	0,1	1	2,847	2	4	0,02	1,010	1,334
B4	50,103	37,5	125,4	0,1	1	2,111	2	4	0,02	1,515	2,001
B5	50,103	37,5	125,4	0,1	1	2,111	2	4	0,02	6.06	8.004

3.2 Verwendetes Saatgut

Das, den ökologischen Richtlinien entsprechende, Saatgut der fünf verschiedenen Kulturpflanzenarten ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Das gewählte Saatgut mit Angaben zu Sorte, Hersteller, Keimfähigkeit und Beize.

Pflanzenart	Botanischer Name	Sorte	Hersteller	Keim-fähigkeit	Beize
Rotklee	*Trifolium pretense*	Taifun	Camena-Samen	93%	-
Winterroggen	*Secale cereale*	Amillo 2012	Gladbacherhof	94%	Cerall
Gelbsenf	*Sinapis alba*	Litember	Camena-Samen		-
Winterraps	*Brassica napus*	Visby	Lemke KG	95%	-
Rotkleegras	*Trifolium pratense* *Lolium perenne*	Rotklee-Gras 84	Camena-Samen		-

Die Beizung des Winterroggens richtete sich gegen Fusarienbefall und wurde nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus durchgeführt. Hierbei wurde kein zusätzlicher Schwefel zugesetzt.

3.2 Versuchsvorbereitung

Um einen reibungslosen Ablauf des Versuches sicherzustellen, wurden verschiedene Vorbereitungen getroffen. Am 13.11.2013 wurden 18 kg Boden auf einen Durchmesser von ≤ 2 mm gesiebt. Der Boden lag bereits in luftgetrockneter Form vor und stammte aus der Fläche “schöne Aussicht“ des Gladbacherhofs. Dieser ist ein ökologischer Lehr- und Versuchsbetrieb der Professur Organischer Landbau. Bei der Bodenart handelte es sich um schluffiger Lehm (Lu) bis schluffig-toniger Lehm (Ltu) mit einem neutralen pH-Wert von 7. Der gesiebte Boden wurde durchmischt und somit homogenisiert. Mit Waagen der Marke Mettler Toledo wurden je 100 g Boden in handelsübliche Gefrierdosen abgefüllt, deren Länge und Breite jeweils 11 cm und die Tiefe 5 cm betrug. Diese Gefrierdosen wurden vorher gespült, um potentielle Störsubstanzen zu minimieren. Zu den 100 g Boden wurden 50 g Grobsand mit einem Durchmesser von 1-2 mm hinzugegeben. Die Korngrößen sind in

Tabelle 5 dargestellt. Ein Glasrührstab diente der Homogenisierung des Boden-Sand-Gemisches.

Insgesamt 180 Kunststoffgefäße wurden mit dem Boden-Sand-Gemisch befüllt. Die restlichen 20 Gefäße wurden für die Quarzsandvarianten des Versuchs verwendet. Dafür wurden 100 g Grobsand mit 50 g Feinsand vermengt. Hilfsmittel war wieder ein Glasstab.

Tabelle 5: Korngröße der verwendeten Substrate

Substrat	Korngröße [mm]
Gladbacherhofboden „schöne Aussicht“	≤ 2
Grobsand	1-2
Feinsand	0,63-1,25

Zur Versuchsvorbereitung zählte zudem das Ansetzen der Nährlösungen. Die benötigten Nährlösungen wurden in den Laboren des Instituts für Pflanzenernährung im Interdisziplinären Forschungszentrum in Gießen hergestellt.

3.3 Versuchsdurchführung

Am 15.11.2013 wurde der Gefäßversuch mit einem Umfang von 200 Gefäßen und fünf Versuchspflanzenarten angesetzt. Auf die vom 13.11.2013 vorbereiteten Gefäße wurden 125 g Feinsand gleichmäßig gestreut. Abgewogen wurde der Feinsand in einem Becherglas und einer Waage des Models Mettler PM4600 Delta Range.

Um eine eindeutige Zuordnung der Gefäße zu vereinfachen, wurden spezifische Etiketten an den Kunststoffgefäßen angebracht. Anschließend wurde das Substrat in jedem Gefäß, mit 20 mL destilliertem Wasser befeuchtet. Mittels einer Pipette konnte eine exakte Bewässerung erzielt werden. Im nächsten Schritt wurden die 100 Samen mit vorgefertigten Schablonen auf das Substrat gesetzt. Pinzetten vereinfachten das Einsetzten des Saatguts, wie in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Aufbringung der 100 Samen mit Hilfe der angefertigten Schablone (eigene Aufnahme)

Die abschließende Schicht bildete 125 g Feinsand, der zunächst abgewogen und anschließend gleichmäßig aufgebracht wurde. Der letzte Schritt der Versuchsvorbereitung stellte die Gabe der verschiedenen Nährlösungen dar. Jedem Gefäß wurden insgesamt 80 mL Flüssigkeit zugeführt. Die Aufteilung in destilliertes Wasser, Magnesiumchloridlösung, Magnesiumsulfatlösung, NPK-Lösung und Mikronährstofflösung wurde durch die verschiedenen Varianten bestimmt. Diese Aufteilung ist in Tabelle 6 erkennbar.

Tabelle 6: Aufteilung der zugeführten Nährlösungen und destilliertem Wasser in mL für die 10 unterschiedlichen Varianten

Varianten	H_2O dest. [mL]	$MgCl_2$ [mL]	$MgSO_4$ [mL]	NPK [mL]	Mikronährstoffe [mL]
QS	80	-		-	-
A1	80	-		-	-
A2	65	10	5	-	-
A3	65	5	10	-	-
A4	65	-	15	-	-
B1	65	-	-	10	5
B2	50	10	5	10	5
B3	50	5	10	10	5
B4	50	-	15	10	5
B5	50	-	15	10	5

Nachdem die Gefäße diesen letzten Schritt durchlaufen hatten, wurden sie abschließend gewogen. Das Gewicht wurde auf dem Etikett notiert, um den Wasserverlust in den einzelnen Gefäßen bestimmen zu können. Diese genauen Angaben ermöglichten es, die verdunstete Wassermenge auszugleichen.

Alle 200 Gefäße kamen anschließend in eine Klimakammer der Gefäßversuchsstation. Um gleichmäßige Bedingungen für alle Pflanzensamen zu schaffen, wurden die Gefäße randomisiert. Die Randomisierung erfolgte über den gesamten Zeitraum des Gefäßversuches, also vom 15.11.2013 bis zum 03.12.2013. Die Temperaturen wurden auf 18 °C in der Nacht und 26 °C am Tag eingestellt. Vom 15.11.2013 bis zum 18.11.2013 blieb das Licht in der Klimakammer aus. Zudem wurden die Gefäße in diesem Zeitraum mit einer handelsüblichen Kunststofffolie abgedeckt, um mögliche Verdunstungsverluste vorzubeugen. Bereits am 17.11.2013 konnte in vielen Gefäßen eine Keimung des Saatguts beobachtet werden. Am 18.11.2013 wurde die Kunststofffolie entfernt und die Beleuchtung wurde eingeschaltet. Dies führte zu einer erhöhten Verdunstung, was einen täglichen Wasserausgleich erforderte. Mit der Waage des Models Mettler PM4600 Delta Range wurde

der tägliche Wasserverlust erfasst und mit destilliertem Wasser ausgeglichen. Dieses wurde mit einem Peleusball in die Pipetten gezogen und gleichmäßig auf der Sandoberfläche verteilt. Es erfolgten weitere Düngegaben am 21.11.2013 und 27.11.2013. An diesen Terminen wurden die jeweilig vorgesehenen Nährlösungen von NPK, Mikronährlösung und Schwefeldüngung gegeben. Am 01.12.2013 fand eine weitere spezifische Düngung mit NPK- und Schwefelnährlösungen statt.

3.4 Die Ernte

Aufgrund eines pathogenen Schaderregerbefalls der Versuchspflanzen Gelbsenf und Raps, wurde für diese beiden Pflanzenarten der Versuch bereits am 02.12.2013 abgebrochen. Die Pflanzenarten Rotkleegras, Rotklee und Roggen wurden planmäßig am 03.12.2013 geerntet. Bei dem Erntevorgang wurden die Pflanzen mit handelsüblichen Nagelscheren direkt am Spross von der Wurzel getrennt. Anschließend wurde die Pflanzenfrischmasse, mit einer Waage der Firma Mettler Toledo, ermittelt. Um eine eindeutige Zuordnung zu garantieren wurden etikettierte Papiertüten mit dem Pflanzenmaterial befüllt und in den Trockenschrank gestellt. Dort verblieben die Pflanzen über mehrere Stunden bei 60 °C. Nach der Trocknung wurden die Pflanzen zurückgewogen, um die Trockensubstanz sowie die Trockenmasse bestimmen zu können. Zur Bestimmung des Gewichts wurde eine Sartorius-Analysewaage des Typs Leco-250 verwendet. Die Messtoleranz liegt bei 1 mg und gewährleistet die nötige Präzision.

Um die Wurzeln von dem Boden-Sandsubstrat zu trennen wurden diese in Kunststoffwannen gelegt und mit Wasser gespült. Die reinen Wurzeln wurden ebenfalls in spezifisch etikettierte Papiertüten gefüllt. Da die Wurzelmasse unterschiedlich viel Wasser gebunden hatte, wurde die Frischmasse nicht bestimmt. Die Pflanzenwurzeln trockneten bei 60 °C im Trockenschrank über mehrere Stunden. Zur Bestimmung der Trockenmasse erfolgte ein Gegenwiegen der Wurzelmasse.

3.5 Aufbereitung der Pflanzen- und Wurzelmaterialien

Die folgenden Analysen erforderten eine Zerkleinerung der Pflanzen- und Wurzelmaterialen zu feinem Staub. Mit Hilfe einer Rüttelplatte und Mahlkugeln konnte diese Anforderung erfüllt werden. Die Rüttelplatte zählt zu dem Horizontalrüttler der Infors AG des Typs Tisch-Rund-Schüttelmaschine TR 125. Die einzelnen Proben wurden in etikettierte

Szintillationsgefäße mit einem Volumen von 20 mL und Schraubdeckel gegeben. Jedes Gefäß wurde mit drei Mahlkugeln der Firma Retsch bestückt. Die Mahlkugeln hatten einen Durchmesser von 12 mm und bestanden aus Edelstahl.

Mit handelsüblichem Klebeband fand eine Fixierung der Szintillationsgefäße auf der Rüttelplatte statt. Diese wurden auf die Platte gelegt, festgeklebt und über einen Zeitraum von zehn Minuten pro Durchlauf geschüttelt. Die Leistung der Rüttelplatte liegt bei 400 Umdrehungen pro Minute. Sehr faserreiche Varianten wurden mit der Kaffeemühle von Krups Typ 702 vorbehandelt. Aufgrund eines nichtzufriedenstellenden Ergebnisses bei der Zerkleinerung von Roggen und Rotkleegras wurden diese Varianten erneut in den Trockenschrank gegeben, um störendes Restwasser zu beseitigen. Anschließend erfolgte ein erneuter Mahlprozess, der zu dem gewünschten Ergebnis führte.

Die Aufbereitung der Wurzelmaterialien begann mit einer Vorzerkleinerung in der Kaffeemühle von Krups Typ 702. Anschließend wurden die, mit Mahlkugeln bestückten Proben, auf der Rüttelplatte angebracht und für 10 bis 15 Minuten geschüttelt. Das Mahlergebnis war bei vielen Proben unzureichend, was eine Gefriertrocknung in der Tiefkühltruhe notwendig machte. Dort verweilten die Proben bis zu drei Tage und durchliefen anschließend einen erneuten Mahlprozess auf der Rüttelplatte.

3.6 Pflanzen- und Wurzelanalysen

Die CNS-Analyse wurde mit dem Analysator „Vario EL“ der Firma Elementar durchgeführt. Der Analyseablauf basierte auf einer oxidativen Aufschlussmethode, bei der eine Wärmeleitfähigkeitsmesszelle als Detektor eingesetzt wurde. Helium diente bei dieser Analyse als Träger- und Spülgas. Die Referenzprobe war „Hay-BCR“ der Firma Sigma Altrich und entspricht dem europäischen Standard. Die Kontrollprobe war IPE 556, welches standardisiertem Weizenpuder entspricht. Zu 25 mg der vermahlenen Pflanzen- und Wurzelproben wurden 25 mg Wolframoxid dazugegeben. Das Wolframoxid diente als Zuschlagstoff, der eine vollständige Verbrennung sicherstellen sollte. Zinnschiffchen wurden aus Zinnfolie (50 mm x 50 mm) der Firma Lab-need und dem zu analysierenden Material mit Handpresswerkzeug geformt. Abgewogen wurde mit einer Sartorius-Mikrowaage, die eine Messtoleranz von 0,001 mg aufweist. Aus den Elementen C, N und S entstanden im Analyseprozess die Oxidationsprodukte CO_2, NO, NO_2, SO_2 und SO_3.

Der quantitative Substanzaufschluss der CNS-Analyse gelingt durch eine explosionsartige Verbrennung in einer mit Helium angereicherten Atmosphäre. Es werden Temperaturen von ca. 1150 °C erreicht.

Um eine eindeutige Identifizierung der Konzentration zu gewährleisten, müssen die zu analysierenden Substanzen S, N und C voneinander getrennt werden. Dies geschieht in U-förmigen Trennsäulen. Durch die einzelne Analyse der Substanzen kann die Wärmeleitfähigkeitsmesszelle die Konzentrationen von S, N und C erfassen.

3.7 Auswertung und Statistik

Die Ergebnisse des CNS-Analysers wurden mit Microsoft Excel aufbereitet. Der erste Schritt der Aufbereitung war die Durchführung eines Ausreißertests. Dabei wurden die Daten der Trockenmasse, der Stickstoffkonzentration in % sowie die Schwefelkonzentration in % genauer betrachtet.

Zu Beginn wurden die vier Wiederholungen jeder Variante, der Größe nach aufsteigend, sortiert. Anschließende wurden drei Standardabweichungen innerhalb der vier Wiederholungen berechnet. Hierbei wurde zunächst die Standardabweichung für die zwei kleinsten Werte der Wiederholungen berechnet. Es folgte die Aufnahme des drittgrößten Wertes in die Betrachtung und daran anschließend wurde die Standardabweichung aller vier Werte berechnet. Das Ergebnis der Standardabweichungen wurde durch die Mittelwerte,der mit einbezogenen Werten geteilt und mit 100 multipliziert. Dies ermöglichte die eindeutige Bestimmung des Ausreißers in %. Die Grenzen zur Ermittlung der Ausreißer lagen für den Trockenmassegehalt bei 15%, für die Stickstoffkonzentration bei 10% und für die Schwefelkonzentration bei 15%.

Die bereinigten Daten wurden mit dem Statistikprogramm SPSS ausgewertet. Eine einfaktorielle Anova wurde durchgeführt, um die Mittelwerte der Varianten miteinander vergleichen zu können. Als fester Faktor wurden die Düngestufen QS, A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4 und B5 festgelegt. Variable Faktoren waren Trockenmasse [g], Schwefelkonzentration [%], Schwefelgehalt [mg], Stickstoffkonzentration [%] und Stickstoffgehalt [mg]. Als post-hoc Test, wurde der Scheffé-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von p= 0,05 ausgewählt. Dieser ermöglichte den Vergleich von Mittelwertskombinationen. Ein gleicher Stichprobenumfang wird bei diesem Post-Hoc-Test nicht gefordert. Der Scheffé-Test zählt zu

den konservativen Post-Hoc-Tests. Das führt dazu, dass eine größere Differenz der Mittelwerte vorliegen muss, um eine Signifikanz anzuzeigen. Die Anfertigung von Abbildungen erfolgte mit Microsoft Excel.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Roggen (*Secale cereale)*

4.1.1 Optische Auswertung

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen alle Varianten der Versuchspflanze Roggen. Optische Unterschiede gibt es zwischen den Varianten ohne NPK- und Mikronährstoffgabe und den Varianten, die eine NPK- und Mikronährstoffgabe erhalten hatten. Die Farbsättigung der Blätter wird mit zunehmendem Schwefelgehalt leicht verbessert, wie Abbildung 8 zeigt.

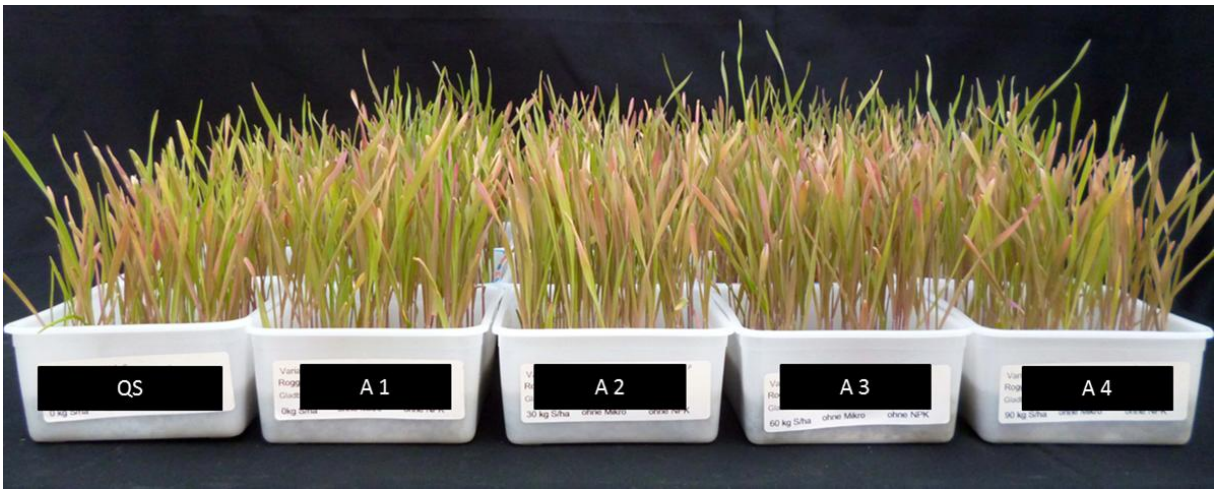

Abbildung 7: Die Varianten QS, A1- A4 der Versuchspflanze Roggen zum Erntezeitpunkt am 03.12.2013 (eigene Aufnahmen).

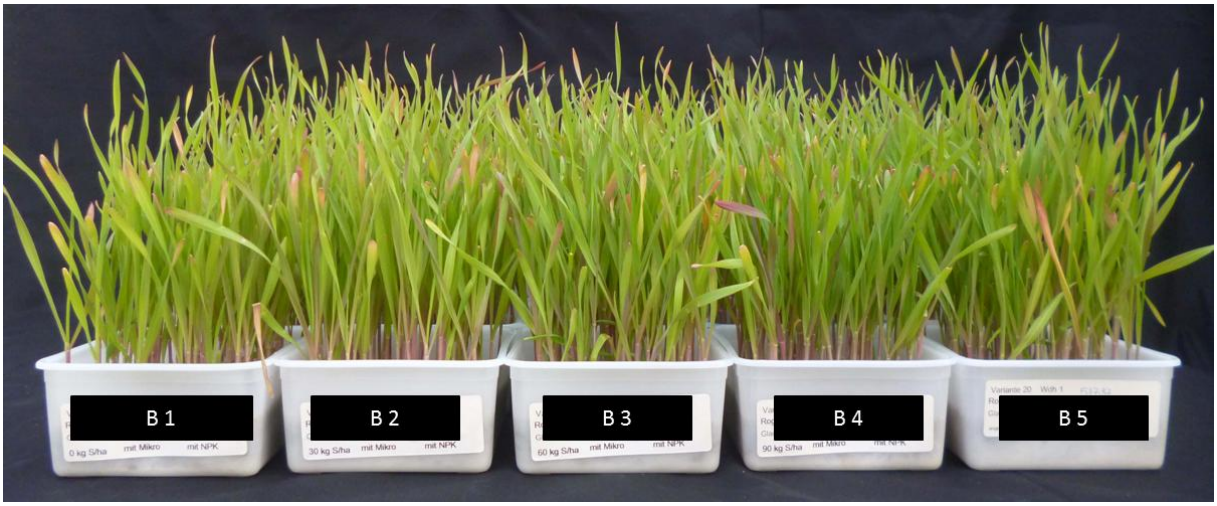

Abbildung 8: Die Varianten B1- B5 der Versuchspflanze Roggen zum Erntezeitpunkt am 03.12.2013 (eigene Aufnahmen)

4.1.2 Trockenmasse

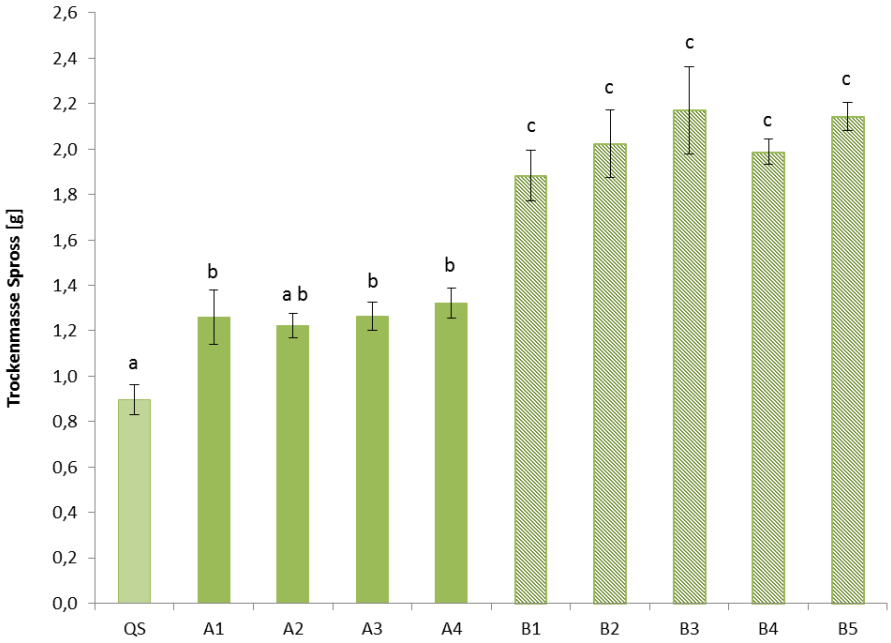

Abbildung 9: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Roggen in g, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 9 stellt die Trockenmasse der 10 Varianten der Versuchspflanze Roggen dar. Erkennbar ist, dass innerhalb der Gruppen A und B keine Signifikanzen auftreten. Die Trockenmasse der Varianten ohne NPK- und Mikronährstoffdüngung liegen bei Werten zwischen 1,2 bis 1,3 g. Größere Schwankungen verzeichnen die Varianten B1 bis B5, die eine NPK- und Mikronährstoffdüngung erhalten haben. Diese Werte liegen im Bereich 1,9 bis 2,2 g. Die Variante, die die höchste Trockenmasse erreicht, ist Variante B3. Diese erreicht ein Gewicht von 2,2 g.

4.1.3 Stickstoffkonzentration

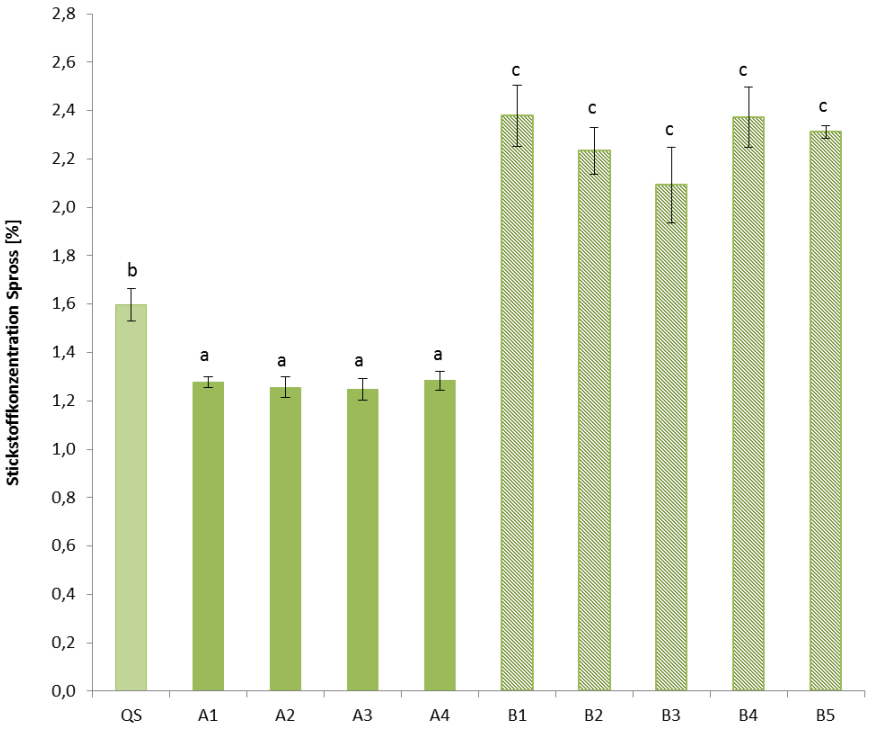

Abbildung 10: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Roggen in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Stickstoffkonzentrationen der Varianten A1 bis A4 bei Roggen liegen zwischen 1,25 und 1,28%. Diese Konzentrationen sind am geringsten, da keine Stickstoffgabe erfolgte. Aufgrund des Gladbacherhof Bodens fand ein stärkeres Wachstum statt als bei der QS-Variante, was Abbildung 10 zeigt. Signifikanzen existieren zwischen QS, den Varianten der Gruppe A und den Varianten der Gruppe B.

4.1.4 Schwefelkonzentration

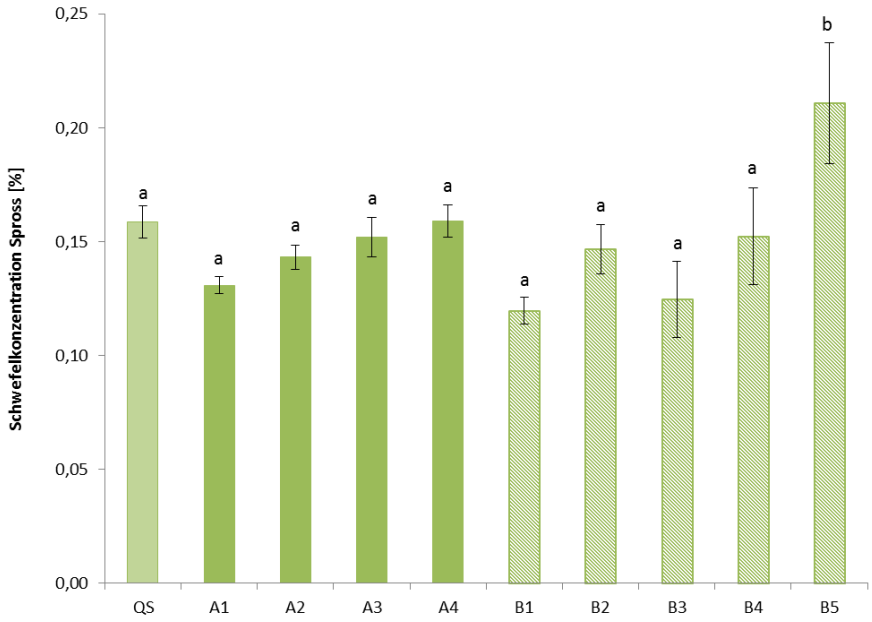

Abbildung 11: Schwefelkonzetration im Spross der Versuchspflanze Roggen in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 11 sind die Schwefelkonzentrationen der Versuchspflanze Roggen dargestellt. Auffällig ist, dass es ausschließlich eine Variante gibt, die eine Signifikanz aufweist. Bei der Variante B5 wurde mit 8 mg S Gefäß$^{-1}$ am meisten Schwefel hinzu gegeben. Die Schwefelkonzentration liegt bei 0,2%. Die restlichen Varianten schwanken zwischen 0,12 und 0,16% Schwefel. In den Varianten A1 bis A4 ist eine steigende Schwefelkonzentration bei steigender Schwefelgabe erkennbar. Der Zuwachs pro Düngestufe beträgt ca. 0,01% und spiegelt einen relativ konstanten Anstieg wieder. In den Varianten B1 bis B5 ist kein eindeutiger Trend nachweisbar.

4.1.5 Stickstoffgehalt

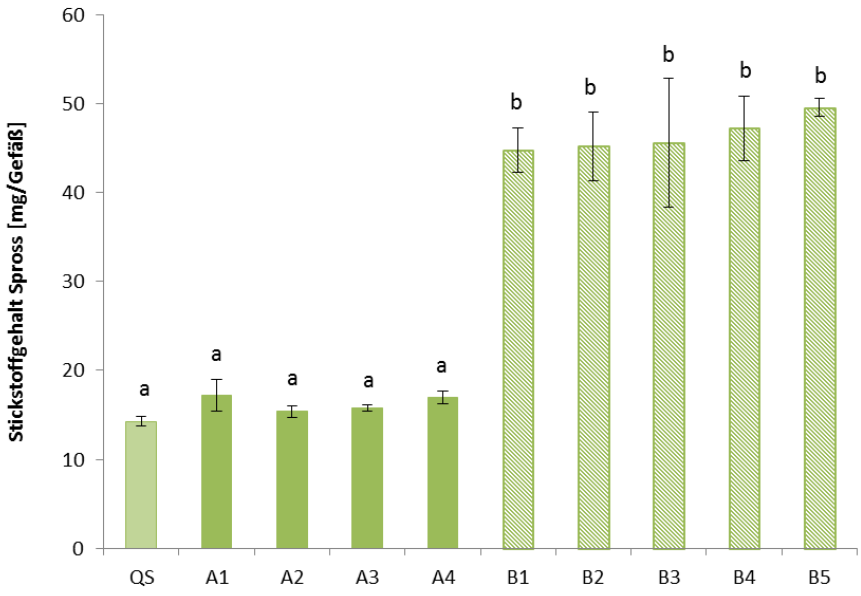

Abbildung 12: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Roggen in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Der Stickstoffgehalt der Roggenpflanzen ist in mg Gefäß$^{-1}$ angegeben und in Abbildung 12 dargestellt. Es konnten Signifikanzen zwischen den Varianten der Gruppe A, ohne NPK-Gabe und den Varianten der Gruppe B, mit NPK-Gabe nachgewiesen werden. Innerhalb der Gruppen sind jedoch nur geringe Unterschiede erkennbar. Den höchsten Stickstoffgehalt weist die Variante B5 auf. Dieser liegt bei 49,5 mg Gefäß$^{-1}$.

4.1.6 Schwefelgehalt

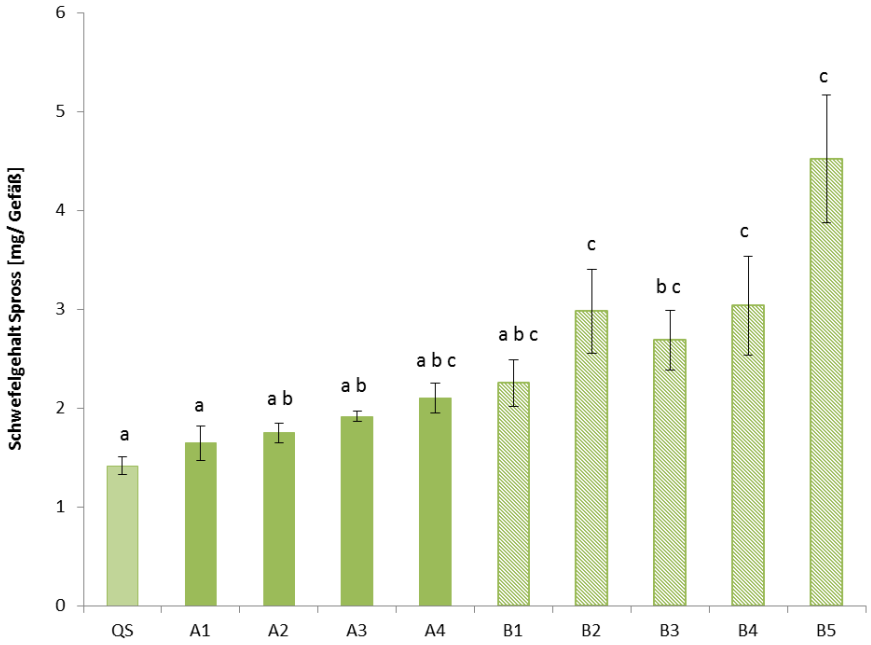

Abbildung 13: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Roggen in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Schwefelgehalte der Versuchspflanze Roggen [mg Gefäß$^{-1}$] unterliegen deutlich höheren Schwankungen, wie in Abbildung 13 erkennbar. Von der Variante A1 bis zur Variante B1 erfolgt ein kontinuierlicher Anstieg. Zwischen diesen Varianten liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Signifikant verschieden ist jedoch die Variante A1 im Vergleich mit den Varianten B2, B3, B4 und B5. Zudem sind die Varianten A2 und A3 signifikant verschieden zu B2 und B5. Die Variante A4 mit der höchsten Schwefelgabe aus der Gruppe A, ist zu keiner anderen Gruppe signifikant verschieden.

Die Schwefelgehalte der Gruppe B sind deutlich höher, als die der Gruppe A. Den deutlichsten Anstieg des Schwefelgehaltes ist an der Variante B4 zu B5 zu erkennen. Der höchste Schwefelgehalt liegt bei 4,5 mg Gefäß$^{-1}$. Der zweithöchste Wert ist deutlich geringer und liegt bei 3 mg Gefäß$^{-1}$. Dieser Wert wird von der Variante B4 erreicht.

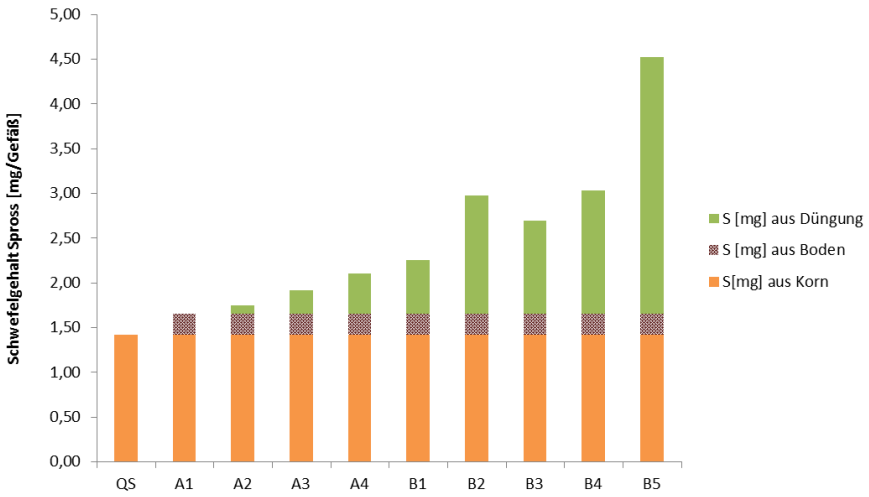

Abbildung 14: Ursprung des Schwefelgehalts im Spross der Versuchspflanze Roggen in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren den Ursprung des Schwefels.

In Abbildung 14 ist der Ursprung des Schwefels der Versuchspflanze Roggen dargestellt. Aufgeteilt wurde der Schwefelgehalt nach Herkunft aus dem Korn, Herkunft aus dem Boden und Effekt der Düngung. Die Variante A1 und B1 werden durch den Boden des Gladbacherhofs mit Schwefel versorgt, wobei die Variante B1 einen höheren Schwefelgehalt aufweist. Aus dem Korn werden 1,42 mg Schwefel geliefert. Der Schwefelgehalt, der seinen Ursprung im Boden hat, beträgt 0,23.

4.1.7 N/S-Verhältnis

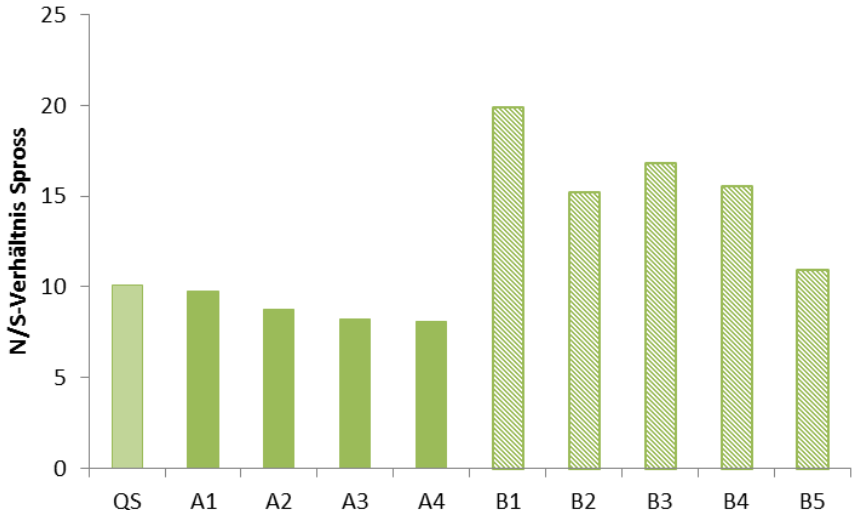

Abbildung 15: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Roggen in Abhängigkeit von den Düngevarianten.

Abbildung 15 zeigt das N/S-Verhältnis der Versuchspflanze Roggen. Die QS Variante weist ein Verhältnis von 10 auf. Mit zunehmender Schwefelgabe, von A3 bis A4, wird das N/S-Verhältnis enger. Einen deutlichen Anstieg des N/S-Verhältnisses verzeichnet die Variante B1. Bei dieser liegt ein Verhältnis von ca. 20 vor. Mit zunehmender Schwefelgabe verringert sich das N/S-Verhältnis. In den Varianten der Gruppe B verzeichnet die Variante B 5 das engste N/S-Verhältnis. Bei dieser Variante wurde eine Schwefelmenge von 8 mg Gefäß$^{-1}$ gegeben, bei einer gleichzeitigen Gabe von 50 mg Stickstoff Gefäß$^{-1}$.

4.1.8 Diskussion Roggen

Roggen diente als ursprüngliche Extraktionspflanze im Keimpflanzenversuch nach Neubauer. Die **optische Auswertung** zeigt deutliche Mangelsymptome der Varianten, die keine zusätzliche NPK- und Mikronährstoffdüngung erhalten hatten (vgl. Abb. 7). Diese äußerten sich durch Verfärbungen der Sprossmasse der Varianten QS, A1, A2, A3 und A4, die ausschließlich über den Boden des Gladbacherhofs mit Nährstoffen versorgt wurden. Durch die Gabe von NPK-und Mikronährstoffen wird bei der visuellen Auswertung der Varianten der Gruppe B ein deutlich besseres Wachstum aufgezeigt (vgl. Abb. 8). Optische Unterschiede zwischen den Varianten B1, B2, B3, B4 und B5 sind nicht feststellbar.

Die **Ermittlung der Trockenmasse** zeigt, dass die Gabe von Schwefel, bei einem gleichzeitigen Verzicht auf NPK- und Mikronährstoffe, zu einer geringfügigen Abnahme des Trockenmasseertrages führt (vgl. Abb. 9). Folglich hat die Gabe von Schwefel der Varianten A2, A3 und A4 keinen Effekt auf das Pflanzenwachstum. Bei den Varianten der Gruppe B, denen NPK-und Mikronährlösungen zugesetzt wurde, bewirkt die Schwefelgabe eine Steigerung des Ertrages (vgl. Abb. 9). Daraus resultiert eine positive Beeinflussung der Schwefelaufnahme durch Stickstoff. Innerhalb der Gruppe B zeigen sich keine signifikanten Ertragssteigerungen, wobei B3 die meiste Trockenmasse bildet. Dies impliziert, dass die höchsten Erträge bei einer Schwefelgabe von 1,334 mg pro Gefäß, beziehungsweise mg 100 g Boden erreicht werden. Unter Feldbedingungen wären derartige Werte mit einer Gabe von 60 kg ha^{-1} gleichzusetzen. Durch die Gabe von 2 mg S $Gefäß^{-1}$ bei der Variante B4 ist ein Rückgang des Trockenmasseertrages zu beobachten, woraus abgeleitet wird, dass eine zusätzliche Schwefelgabe keine weiteren positiven Effekte bewirkt.

Bei der Betrachtung der **N/S-Analysen** fällt auf, dass in der Trockenmasse von Roggenpflanzen üblicherweise Konzentrationen von 0,1% bis 0,5% Schwefel aufgefunden werden (BERGMANN 1993). Die Konzentrationen, die in diesem Gefäßversuch bei Roggen erreicht wurden, lagen zwischen 0,12% und 0,16%, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne Schwefeldüngung aufgetreten sind. Anhand der ermittelten Schwefelkonzentration lässt sich keine Aussage über den Versorgungszustand des Roggens treffen (vgl. Abb. 11).

Die Schwefelgehalte im Spross steigen mit zunehmender Schwefeldüngung an (vgl. Abb. 13). Vor allem in den Varianten B2 und B4 war dieser Anstieg erkennbar. Aus dem Vergleich der

Schwefelgehalte der Varianten mit der erzeugten Trockenmasse, lässt sich ableiten, dass die optimalen Schwefelgehalte des Sprosses bei Roggen bei 3 mg Gefäß$^{-1}$ liegen. Diese Angabe ist spezifisch für diesen Gefäßversuch. Im Vorversuch von Désirée Dirich im Juni 2013 wurden ähnliche Ergebnisse für Roggen erzielt. Die Schwefelkonzentrationen sind in beiden Versuchen nahezu identisch. Große Unterschiede fallen jedoch zwischen den Stickstoffkonzentrationen im Spross auf. Im Vorversuch lagen die Stickstoffkonzentrationen zwischen 1,5% und 1,8%, während in diesem Versuch Konzentrationen zwischen 2,0% und 2,4% erreicht wurden. Gründe liegen in der veränderten Stickstoffgabe. Bei einer Betrachtung der N/S-Verhältnisse fällt auf, dass die Varianten mit dem höchsten Trockenmasseertrag ein weites N/S-Verhältnisse von 17 aufweisen. Erst bei der höchsten Schwefelgabe verengt sich das N/S-Verhältnis auf 12.

4.2 Rotklee (*Trifolium pratense*)

4.2.1 Optische Auswertung

Die Abbildungen 16 und 17 stellen die Varianten der Versuchspflanze Rotklee am Tag der Ernte dar. Abbildung 16 zeigt, dass die QS-Variante kaum oberirdische Pflanzenmasse ausbilden konnte. Unter Zugabe des Gladbacherhof Bodens, in A1, konnte deutlich mehr Sprossmasse gebildet werden. Aussagen über optische Unterschiede von A1 bis A4 können nicht getroffen werden.

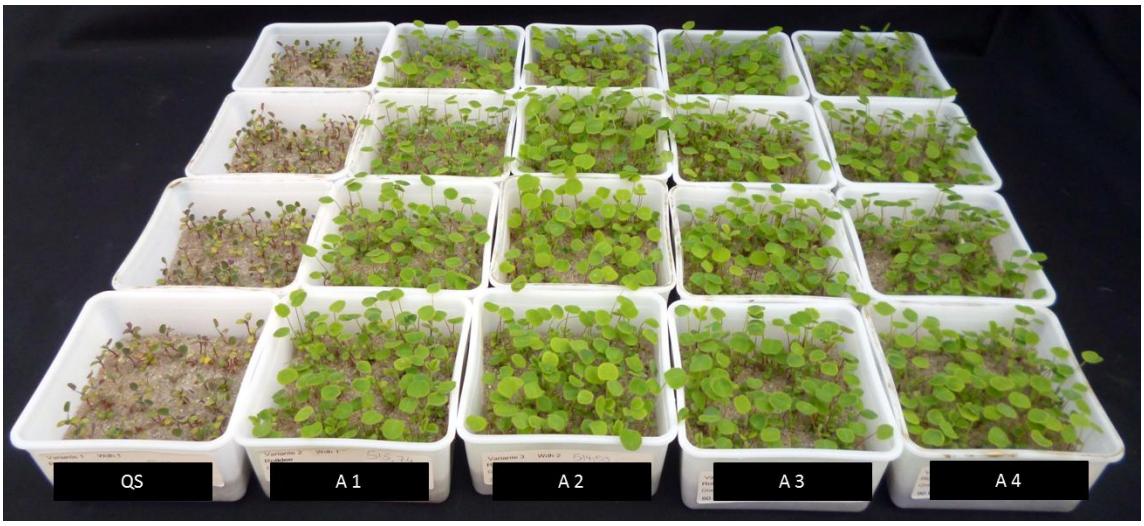

Abbildung 16: Die Varianten QS, A1-A4 der Versuchspflanze Rotklee am 03.12.2013 (eigene Aufnahme).

Es ist einer leichten Steigerung der oberirdischen Pflanzenmasse der Varianten B2 bis B5 erkennbar. Die Variante B1, die keine Schwefelgabe erhalten hat, weist vereinzelt gelbliche Verfärbung jüngerer Blätter auf.

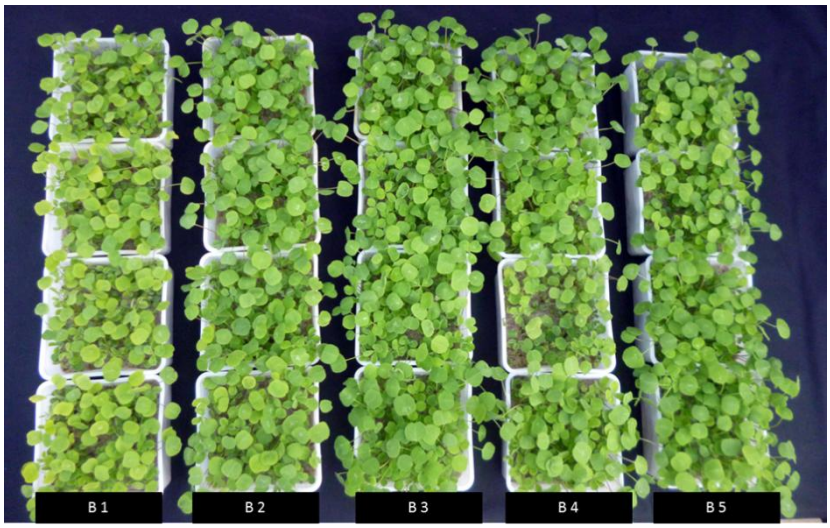

Abbildung 17: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotklee am 03.12.2013 (eigene Aufnahme).

4.2.2 Trockenmasse

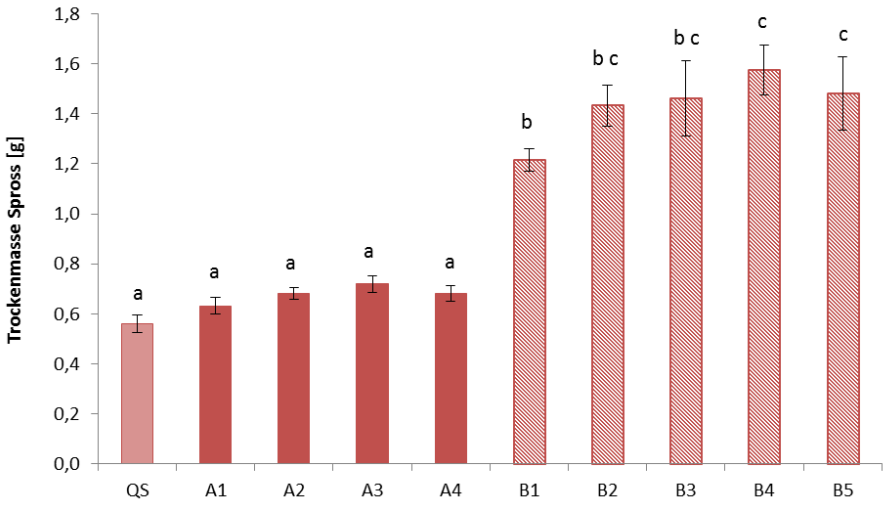

Abbildung 18: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Rotklee in g, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 18 zeigt die Trockenmasse des Sprosses der Versuchspflanze Rotklee. Innerhalb der Gruppe A gibt es keine signifikanten Unterschiede im Trockenmasseertrag. Den höchsten Ertrag weist die Variante A3 mit einer Trockenmasse von 0,72 g auf. Mit der NPK-und Mikronährstoffgabe steigt der Trockenmasseertrag deutlich an. Die Variante B1 erreicht eine Trockenmasse von 1,22 g und ist signifikant verschieden zu den Varianten der Gruppe A. Innerhalb der Gruppe B gibt es weitere signifikante Unterschiede im Trockenmasseertrag. Die Varianten B4 und B5 liefern signifikant höhere Trockenmasseerträge, als die Variante B1. Bei der höchsten Schwefelgabe, in Variante B5, ist der Trockenmasseertrag leicht rückläufig. Den größten Trockenmasseertrag erreicht die Variante B4 mit 1,58 g. Innerhalb der Gruppe B sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten B2 und B3 erkennbar.

4.2.3 Stickstoffkonzentration

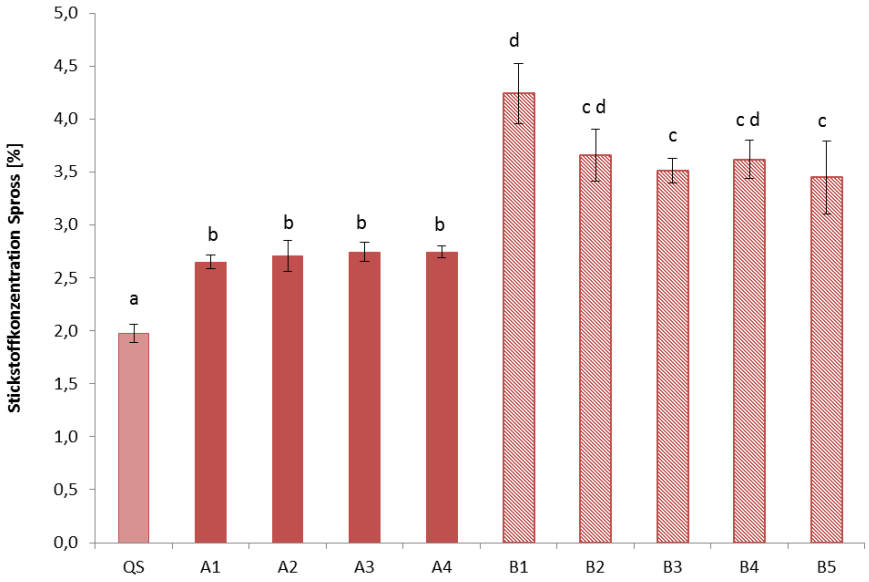

Abbildung 19: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanzen Rotklee in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Stickstoffkonzentrationen der Versuchspflanze Rotklee sind in Abbildung 19 dargestellt. Es bestehen signifikante Unterschiede zwischen der QS Variante und den restlichen Varianten. Die Zugabe des Gladbacherhof Bodens bei den Varianten der Gruppe A bewirkte eine signifikante Steigerung der Stickstoffkonzentration. Die zusätzliche Schwefelgabe innerhalb der Gruppe A führte zu keiner signifikanten Änderung der Stickstoffkonzentration im Spross. Die höchste Stickstoffkonzentration erreicht die Variante B1, mit 4,24%. Diese ist signifikant höher, als die Varianten B3 und B5 der Gruppe B. Die zunehmende Stickstoffgabe in den Varianten B2 bis B5 führt zu einer deutlichen Abnahme der Stickstoffkonzentration um 0,58 bis 0,63%.

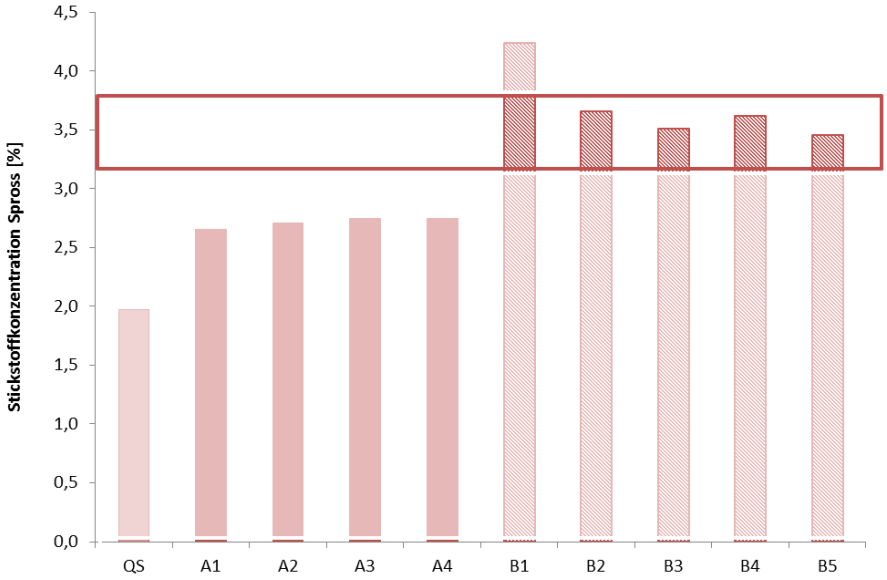

Abbildung 20: Optimaler Stickstoffkonzentrationsbereich im Spross der Versuchspflanzen Rotklee bei den verschiedenen Düngevarianten.

In Abbildung 20 ist der Bereich gekennzeichnet, der in diesem Versuch für eine optimale Stickstoffkonzentration im Spross spricht. Die optimalen Konzentrationen im Spross liegen zwischen 3,2 bis 3,7% Stickstoff. Die Varianten, die den höchsten Trockenmasseertrag erzielten befinden sich in diesem Bereich. Die Rede ist von den Varianten B2, B3, B4 und B5. Ausschließlich die Varianten, die eine Schwefelgabe erhielten, fallen in diesen Bereich.

4.2.4 Schwefelkonzentration

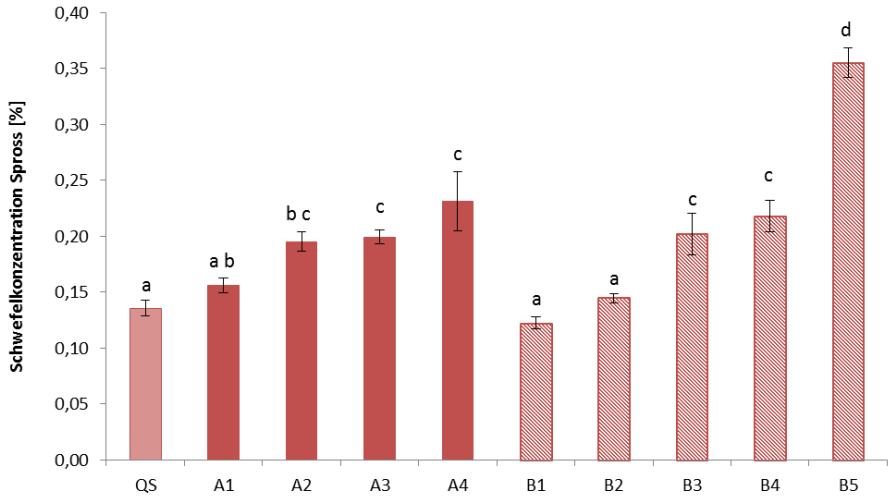

Abbildung 21: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotklee in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 21 zeigt die Schwefelkonzentrationen im Spross der Versuchspflanze Rotklee. Bei einem Verzicht der Schwefelgabe liegen die Schwefelkonzentrationen im Bereich von 0,12 bis 0,1%. Die Schwefelkonzentrationen der Varianten A2, A3 und A4 übersteigen die Schwefelkonzentrationen der Varianten B2, B3 und B4, trotz gleicher Schwefelgabe in den jeweiligen Untergruppen. Keine Signifikanzen treten zwischen den Varianten QS, A1, B1 und B2 auf. Signifikant höhere Schwefelkonzentrationen werden in den Varianten A2, A3, B2 und B3 erreicht. Die höchste Schwefelkonzentration weist die Variante B5 auf, die eine Schwefelgabe von 8 mg Gefäß$^{-1}$ erhielt.

Abbildung 22: Optimaler Schwefelkonzentrationsbereich im Spross der Versuchspflanzen Rotklee bei den verschiedenen Düngevarianten.

Abbildung 22 zeigt die optimale Schwefelkonzentration im Spross bei der Versuchspflanze Rotklee. Diese liegt in einem Bereich von 0,2-0,27%. Die Varianten A2, A3, B3 und B4 fallen in diesen Bereich.

4.2.5 Stickstoffgehalt

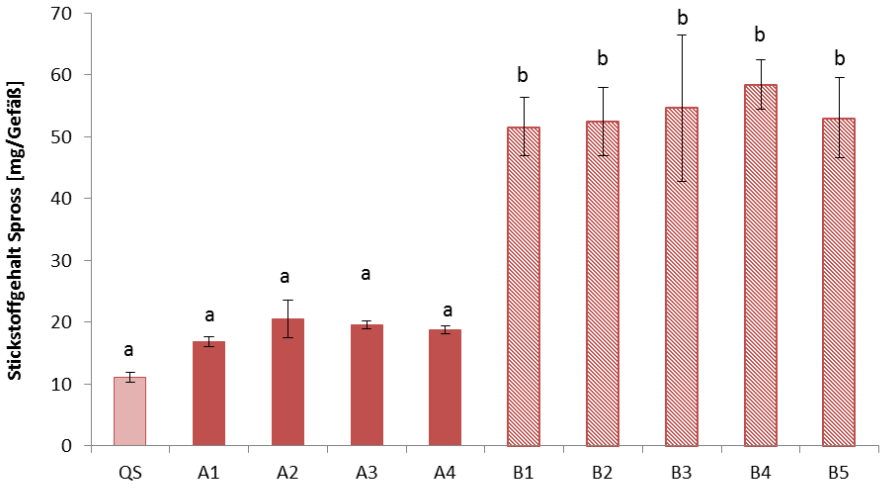

Abbildung 23: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotklee in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Der Stickstoffgehalt im Spross wird pro Gefäß angegeben und liegt für die Gruppe A im Bereich von 16,8 bis 20, 5 mg Gefäß$^{-1}$. Zwischen den einzelnen Varianten der Gruppe A gibt es keine signifikanten Unterschiede, wie in Abbildung 23 dargestellt. Einen deutlichen Zuwachs verzeichnen die Varianten der Gruppe B, die mit NPK-und Mikronährstoffdünger versetzt wurden. Diese Düngung führte zu einer signifikanten Verbesserung des Stickstoffgehaltes im Spross. Die Variante B1 hat den geringsten Stickstoffgehalt der Gruppe B mit 51,6 mg Gefäß$^{-1}$. Die Variante mit dem höchsten Schwefelgehalt ist B4 mit einer Schwefelgabe von 2 mg S Gefäß$^{-1}$.

4.2.6 Schwefelgehalt

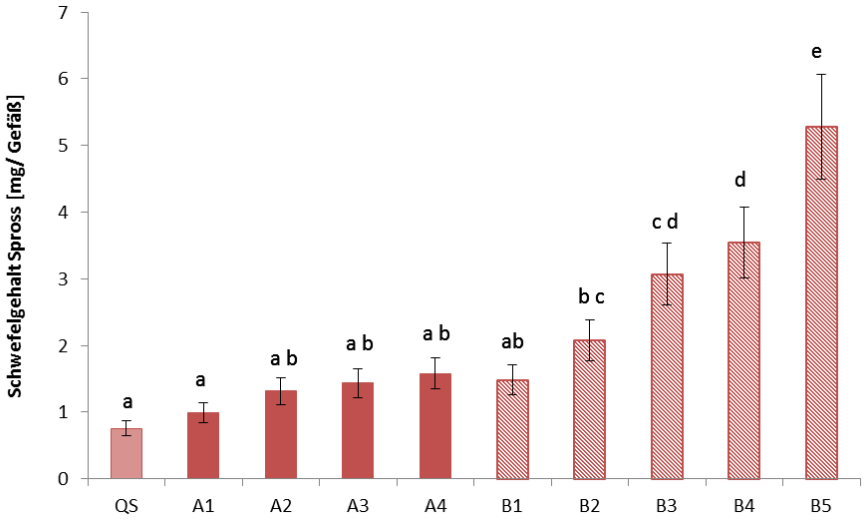

Abbildung 24: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotklee in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Der Schwefelgehalt in der Sprossmasse steigt, innerhalb der Gruppen A und B, mit zunehmender S-Düngung an, wie in Abbildung 24 dargestellt. Der Zuwachs von A2 zu A4 ist hingegen weniger deutlich ausgeprägt als der Zuwachs von B2 zu B4, obwohl die Steigerung der Schwefelgabe von A2 zu A3 sowie von B2 zu B3 identisch war. Die Variante B2 erzielt einen signifikant höheren Schwefelgehalt, als die Varianten der Gruppe A und der Variante B1. Eine weitere Signifikanz zeigt B4 auf. Diese übersteigt B3 um 0,5 mg Gefäß$^{-1}$. Den höchsten Schwefelgehalt erreicht die Variante B5 mit einem Gehalt von 5,3 mg Gefäß$^{-1}$. Diese Variante hat einen signifikant höheren Schwefelgehalt, als alle anderen Varianten.

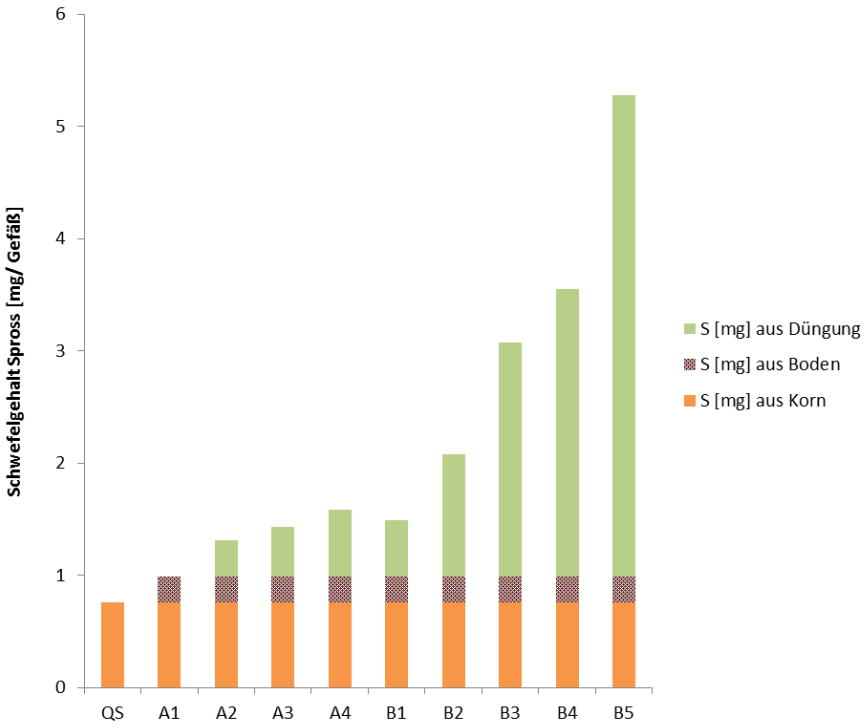

Abbildung 25: Ursprung des Schwefelgehalts im Spross der Versuchspflanze Rotklee in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren den Ursprung des Schwefels.

In Abbildung 25 ist der Ursprung des Schwefels veranschaulicht. Aufgeteilt wurde der Schwefelgehalt nach Herkunft aus dem Korn, Herkunft aus dem Boden und Effekt der Düngung. Erkennbar ist, dass die Schwefeldüngung der Varianten B2, B3 B4 und B5 einen Effekt erzielt. Die Variante A1 und B1 werden durch den Boden des Gladbacherhofs mit Schwefel versorgt, wobei die Variante B1 einen höheren Schwefelgehalt erzielt. Bei der Versuchspflanze Rotklee werden 0,76 mg Schwefel aus dem Korn geliefert. Der Schwefelgehalt, der aus dem Boden geliefert wird, beträgt 0,23 mg.

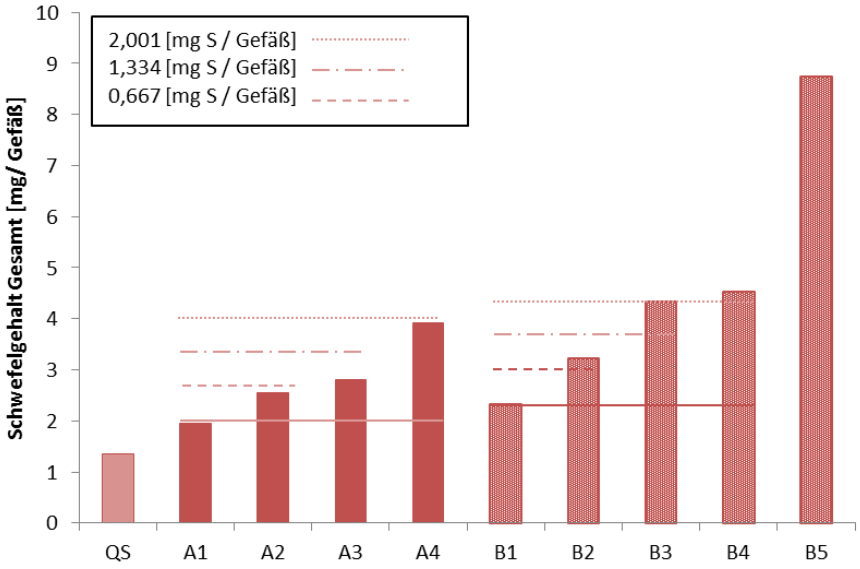

Abbildung 26: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Rotklee in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die verschiedenen Linien veranschaulichen die jeweilige Schwefelgabe in den Düngevarianten und deren Wiederfindung in der gesamten Pflanzenmasse.

Der Gesamtschwefelgehalt setzt sich aus dem Schwefelgehalt im Spross und dem Schwefelgehalt in der Wurzel zusammen. Angegeben wird dieser in mg Gefäß$^{-1}$, wie in Abbildung 26 dargestellt. Die unterschiedlichen Striche veranschaulichen die Menge an Schwefel in mg, die pro Gefäß gegeben wurden. Bei der Variante A2 konnte die Gabe von 0,667 mg S Gefäß$^{-1}$ fast vollständig nachgewiesen werden, während in der Variante A3 der aufgebrachte Schwefel nicht vollständig detektiert werden konnte. Die Wiederholungen der Variante A4 nutzten fast den gesamten Schwefel. Bei den Varianten B2, B3 und B4 konnte der gegebene Schwefel ebenfalls vollständig nachgewiesen werden.

4.2.7 N/S-Verhältnis

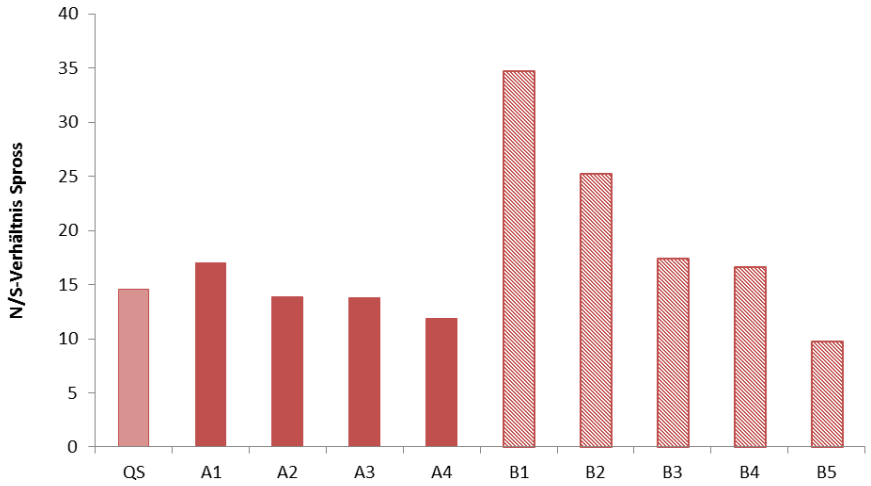

Abbildung 27: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Rotklee in Abhängigkeit von den Düngevarianten.

Abbildung 27 zeigt das N/S-Verhältnis der Versuchspflanze Rotklee. Ein sehr enges N/S-Verhältnis weisen diejenigen Varianten auf, die keine zusätzliche Stickstoffgabe erhielten. Das engste Verhältnis der Gruppe A liegt bei 11,9 und wird von der Variante A4 erreicht. Diese Variante wurde mit 2 mg S Gefäß$^{-1}$ gedüngt. Die Variante B1 hat das weiteste N/S-Verhältnis mit 34,7. Hier erfolgte eine Düngung ausschließlich mit NPK- und Mikronährstoffen. Mit zunehmender Schwefelgabe wird das N/S-Verhältnis der Gruppe B enger. Die Variante B5, die die höchste Schwefelgabe erhielt, erreicht ein N/S-Verhältnis von 9,7.

4.2.8 Diskussion Rotklee

Die **visuelle Auswertung** der Varianten ohne NPK- und Mikronährstoffgabe zeigt, dass in den 17 Versuchstagen kaum oberirdische Pflanzenmasse ausgebildet werden konnte (vgl. Abb. 16). Zudem wurden keine Wachstumssteigerungen durch die Gabe von Schwefel beobachtet. Einen deutlicheren Effekt auf das Pflanzenwachstum erzielte der Gladbacherhof Boden, wie bei den Varianten A1, A2, A3 und A4 ersichtlich. Beim Auswaschen der Wurzeln zeigte sich, dass kaum Wurzelknöllchen gebildet wurden, was das geringe Wachstum erklärt. Somit war die Luftstickstofffixierung der Knöllchenbakterien noch inaktiv. Diese Beobachtung bestärkte die Vermutung, dass sich die Schwefelgabe nicht signifikant ertragssteigernd auswirken konnte. Bei den Varianten, die mit NPK- und Mikronährstoffen versetzt wurden, konnte eine Verbesserung des Pflanzenwachstums festgestellt werden (vgl. Abb. 17). Die Gabe von NPK- und Mikronährstoffen führte sowohl zu einem deutlichen Zuwachs der Wurzelknöllchen, als auch zu einer Steigerung der oberirdischen Pflanzenmasse. Die Variante B1, die keine Schwefelgabe erhalten hatte, bildete am wenigsten Blattmasse aus und vereinzelte jüngere Blätter zeigten gelbliche Verfärbungen auf. Diese könnte ein Hinweis für Schwefelmangel sein.

Die gezielten Auswertungen der **Trockenmasseermittlung** und **N/S-Analyse** bestätigten die Annahme, dass sich Schwefel positiv auf Rotklee auswirkt, sofern eine gute Nährstoffversorgung vorliegt. Die Schwefelgabe führte, unter diesen Voraussetzungen, zu einer signifikanten Steigerung des Trockenmasseertrages (vgl. Abb. 18). Die Variante, die in diesem Versuch die höchste Trockenmasse bildete, war die Variante B4. Sie wurde mit 2 mg S Gefäß$^{-1}$ gedüngt und erzielte einen signifikant höheren Ertrag als die Variante B1. Durch eine Steigerung der Schwefeldüngung auf 8 mg S Gefäß$^{-1}$ konnte keine weitere Trockenmassesteigerung erzielt werden, wie die Variante B5 zeigt. Folglich führt eine Überversorgung mit Schwefel in diesem Fall eher zu einem Ertragsrückgang. Die Ergebnisse im Vorversuch bestätigen, dass Schwefel sich wachstumssteigernd auf Rotklee auswirkt. Schon ab einer Schwefelgabe von 0,667 mg Gefäß$^{-1}$ war ein deutlicher Zuwachs zu erkennen. Im Freiland ist diese Menge vergleichbar mit der Gabe von 30 kg S ha^{-1}. Ein ähnliches Ergebnis wird in Feldversuchen erreicht. Die Ergebnisse von Fischinger et al. (2011) zeigten, dass eine Gabe von 30 kg S ha^{-1} deutliche Verbesserungen der Ertrags- und Qualitätsleistung erzielten. Die Felduntersuchungen von Böhm (2013) bestätigten, dass eine Gabe von

30 kg S ha^{-1} zu einer deutlich höheren N_2- Fixierleistung führt. Eine Steigerung der Schwefelgabe auf 60 kg S ha^{-1} führte in diesem Feldversuch zu keinem weiteren positiven Effekt. In diesem Gefäßversuch wurde eine signifikante Ertragssteigerung bis zu der Gabe von 2 mg S $Gefäß^{-1}$ erreicht. Diese Menge entspricht 90 kg S ha^{-1} und weicht damit von Böhm´s Untersuchungen (2013) ab. Des Weiteren konnte in dieser Variante eine signifikant höhere Schwefelkonzentration im Vergleich zu der Variante ohne Schwefelgabe festgestellt werden (vgl. Abb. 21).

Mithilfe der gezielten Auswertungen des Trockenmasseertrages kann eine optimale Stickstoffkonzentration im Spross abgeleitet werden. Dieser Bereich liegt zwischen 3,2% und 3,7% Stickstoff in der oberirdischen Pflanzenmasse (vgl. Abb. 20). Ausschließlich die Varianten, die sowohl NPK- Mikronährstoffe und eine Schwefelgabe erhielten, fallen in diesen Bereich. Dies verdeutlicht, dass im Keimstadium von Rotklee eine gute Nährstoffversorgung entscheidend für die Ertragsbildung ist. Optimale Schwefelkonzentrationen für diesen Versuch liegen im Bereich von 0,2% bis 0,27%. Die Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende NPK-Versorgung. Unter Freilandbedingungen werden ähnliche Ergebnisse erzielt. Fischinger et al. (2011) beschreiben eine Steigerung der Schwefelkonzentration von 0,13 auf 0,24% durch die Gabe von 30 kg S ha^{-1}. Eine ähnliche Steigerung konnte in diesem Versuch beobachtet werden. Während die Variante B1 Schwefelkonzentrationen von 0,12% aufweist, wird durch die Gabe von 1,334 mg S $Gefäß^{-1}$, die Konzentration auf 0,2% angehoben.

Durch die Schwefelgabe konnte ein positiver Effekt auf den Stickstoffgehalt erzielt werden (vgl. Abb. 22). Diese Steigerung fand bis zu der Variante B4 statt. Mit der höchsten Schwefelgabe ging ein Rückgang des Stickstoffgehaltes einher. Die Variante B4 erreicht den höchsten Stickstoffgehalt, was die Annahme bestätigt, dass bei dieser Variante eine optimale Versorgung mit Nährstoffen gewährleistet wurde. Die optimalen Schwefelgehalte liegen in Bereichen zwischen 2,8 und 3,8 mg $Gefäß^{-1}$. Diese Angaben haben ihre Gültigkeit nur im Rahmen dieses Gefäßversuches. Bei einer Betrachtung des Schwefelursprungs in Abbildung 25 zeigt sich, dass in der Variante B1 mehr Schwefel nachgewiesen werden konnte, als in der Variante A1, obwohl beide Varianten ausschließlich über den Boden des Gladbacherhofs mit Schwefel versorgt wurden. Dieser Effekt wurde nicht in der Hauptthese nach Neubauer betrachtet, der davon ausgeht, dass in den 17 Tagen die gesamte Nährstoffmenge aus dem

Boden von der Pflanze aufgenommen wird. Somit müsste der Schwefelentzug bei allen Varianten ohne Schwefelgabe gleich hoch sein. Tatsächlich liegt aber der Schwefelgehalt bei der Variante mit NPK- und Mikronährstoffgabe deutlich höher. Dieses Ergebnis lässt sich u.a damit begründen, dass durch die NPK- und Mikronährstoffgabe eine höhere Aktivität der Pflanze und somit eine höhere Aufnahmeleistung erzielt werden konnte. Folglich führen veränderte Nährstoffbedingungen zu einer anderen Aufnahmeleistung der Pflanzen.

Um die aufgenommene Schwefelmenge mit der Schwefelgabe zu vergleichen, wurde Abbildung 26 erstellt. Der Gesamtgehalt, aus Pflanzen- und Wurzelmasse bestehend, wurde mit den jeweiligen Schwefelgaben der Düngevarianten verglichen. Das Ergebnis ist positiv zu bewerten, da die Varianten, die zusätzlich mit NPK- und Mikronährstoffen versorgt wurden, die gesamte Schwefelgabe vollständig ausschöpften. Dies spricht für eine Anwendbarkeit der Neubauer Methode auf den Nährstoff Schwefel. Teilweise liegen die nachgewiesenen Mengen über den gegebenen Schwefelmengen, was auf Messungenauigkeiten hindeuten kann. Diese können beispielsweise durch Verluste beim Wurzelwaschen entstanden sein. Des Weiteren lag eine erschwerte Trennung von Sandkörnern und Wurzelästen vor, wodurch Ungenauigkeiten bei der Trockenmassebestimmung entstanden sein könnten. Diese Ungenauigkeiten beeinflussten im weiteren Verlauf die Berechnung der Stickstoff- und Schwefelgehalte der Wurzeln.

Besonders auffällig ist, dass die Varianten, die keine zusätzliche NPK- und Mikronährstoffdüngung erhalten haben, die Schwefelgabe nicht vollständig ausnutzen konnten. Erkennbar wird dies in Abbildung 26. Die aufgebrachten Schwefelmengen können bei allen 3 Varianten nicht vollständig nachgewiesen werden. Daraus lässt sich ableiten dass eine ausreichende Versorgung mit wichtigen Mikro- und Makronährstoffen die Sulfataufnahme aus dem Boden fördert.

Bei der Betrachtung der N/S-Verhältnisse der Versuchspflanze Rotklee fällt auf, dass die Ergebnisse stark von den erforschten Werten in Literaturquellen abweichen. Das kritische N/S-Verhältnis liegt für Kleearten bei 15 (SAALBACH 1973, SAALBACH 1970). Die Rotkleevarianten mit den höchsten Trockenmasseerträgen dieses Versuchs, liegen hingegen im Bereich von 16 bis 18. Die Ergebnisse des Vorversuchs weichen ebenfalls von den ermittelten Ergebnissen ab (DIERICH 2013). Erkennbar wird dies an den deutlich engeren Verhältnisse, die im Vorversuch bestimmt werden konnten. Doch das N/S-Verhältnis alleine

ist, nach Rendig et al. (1976), kein zuverlässiger Anhaltspunkt für einen Schwefelmangel. Diese Aussage wird von den erzielten Ergebnissen bestätigt, denn obwohl ein kritisches N/S-Verhältnis laut Saalbach (1973) vorlag, bestand kein Nährstoffmangel in den betreffenden Düngevarianten B2, B3, B4 und B5.

4.3 Rotkleegras (*Trifolium pratense, Lolium perenne)*

4.3.1 Optische Auswertung

Bei der Versuchspflanze Rotkleegras fällt auf, dass es keine gleichmäßigen Anteile zwischen Gras und Rotklee gibt. Einen sehr deutlichen optischen Unterschied weisen die Varianten ohne NPK-und Mikronährstoffgabe im Vergleich zu den Varianten mit Nährstoffgabe auf, wie die Abbildungen 28 und 29 zeigen. Innerhalb der Varianten A1 bis A4 lassen sich keine eindeutigen optischen Unterschiede erkennen.

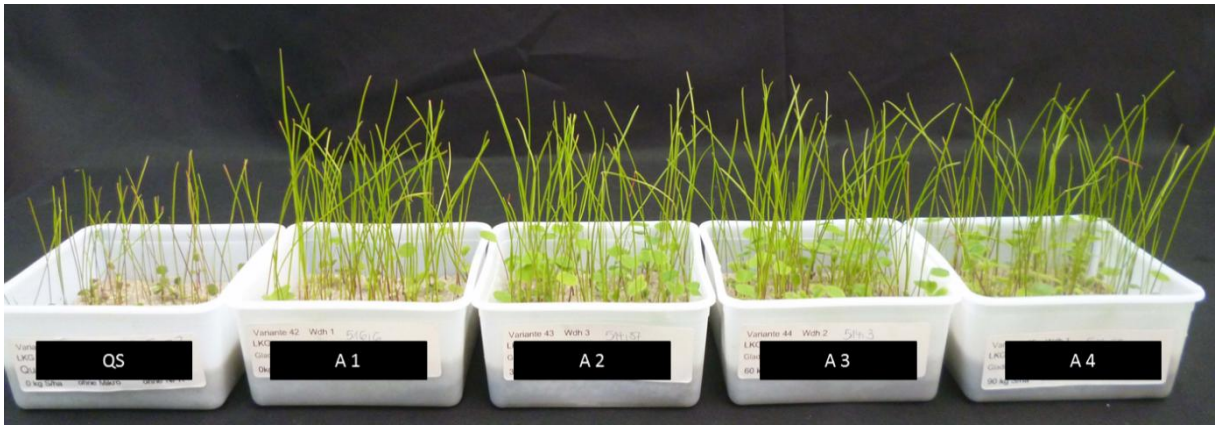

Abbildung 28: Die Varianten QS, A1-A4 der Versuchspflanze Rotkleegras am 03.12.2013 (eigene Aufnahme).

In Abbildung 29 ist die Frontalansicht der Varianten B1 bis B5 dargestellt. Erkennbar ist, dass die Variante B1 am wenigsten Sprossmasse ausgebildet hat. Es lässt sich eine Steigerung der Farbsättigung beobachten, die bis zur Variante B5 kontinuierlich zunimmt. Des Weiteren ist in Abbildung 29 ein Anstieg des Höhenwuchses erkennbar, der von Variante B1 bis zu Variante B4 verläuft.

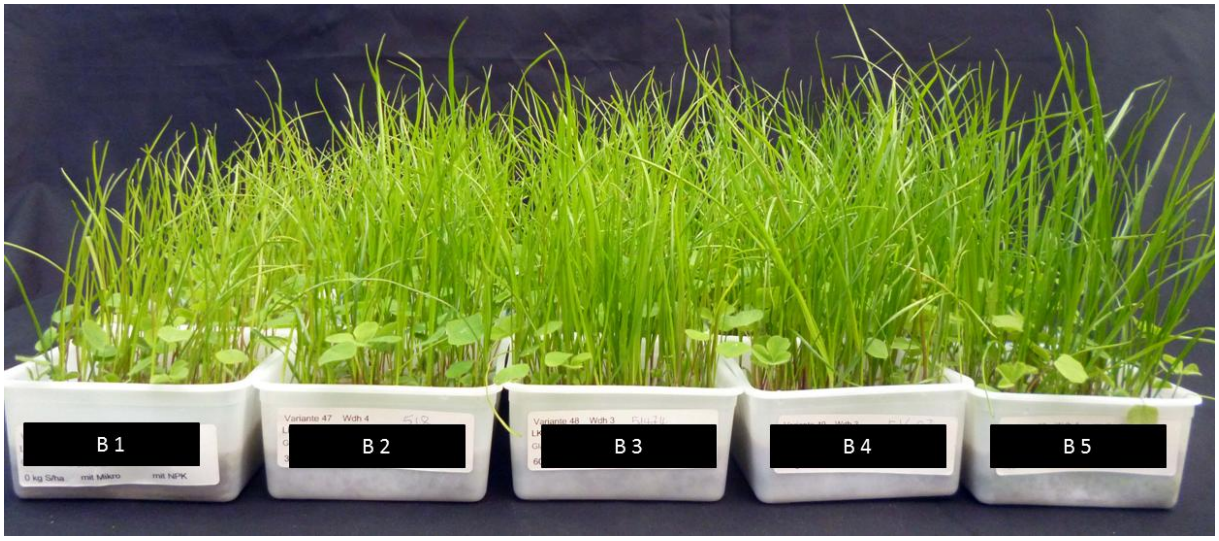

Abbildung 29: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotkleegras am 03.12.2013 (eigene Aufnahme).

In Abbildung 30 zeigt sich im Vergleich mit der Frontalsicht in Abbildung 29 eine ähnliche Tendenz. Sowohl die Farbsättigung als auch die oberirdische Sprossmasse nimmt von der Variante B1 bis zur Variante B5 kontinuierlich zu.

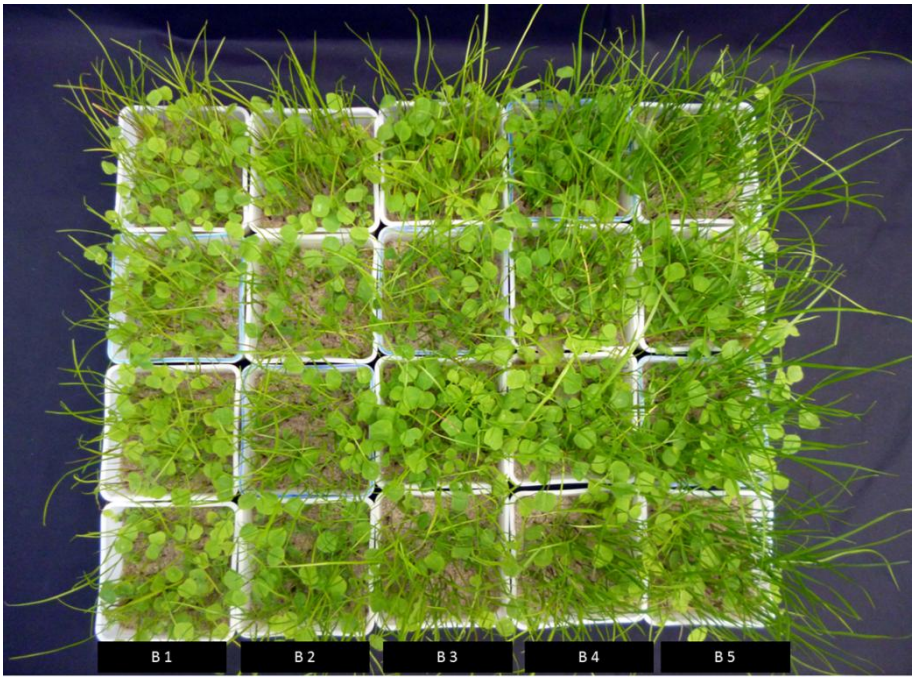

Abbildung 30: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Rotkleegras in der Draufsicht vom 03.12.2013 (eigenen Aufnahme).

4.3.2 Trockenmasse

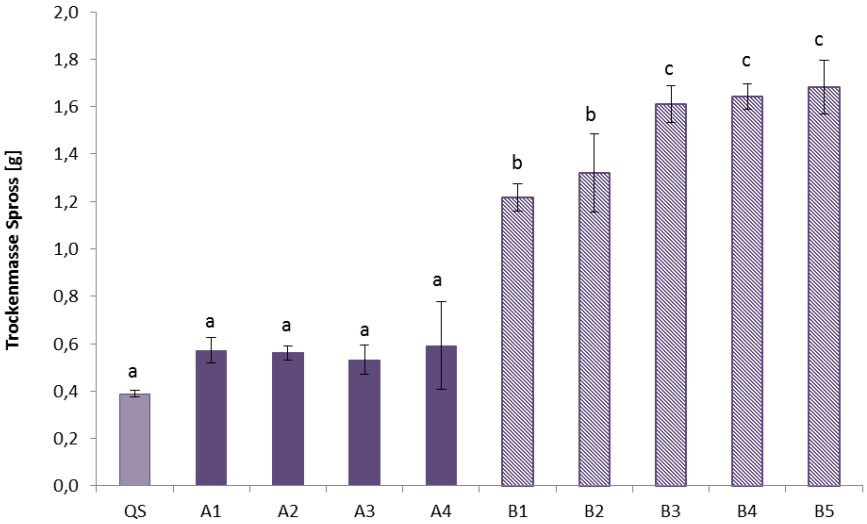

Abbildung 31: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in g, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Trockenmasse des Sprosses der Versuchspflanze Rotkleegras ist in Abbildung 31 dargestellt. Innerhalb der Varianten der Gruppe A treten keine signifikanten Unterschiede im Trockenmasseertrag auf. Die Variante B1, die mit NPK-und Mikronährstoffen versetzt wurde, verzeichnet hingegen einen signifikanten Zuwachs. Während die schwefelgedüngte Variante B2 keine weitere signifikante Steigerung aufzeigt, gibt es einen signifikanten Zuwachs zu den Varianten B3, B4 und B5. Innerhalb dieser Varianten wurden keine Signifikanzen detektiert. Den größten Trockenmasseertrag erzielt die Variante B5 mit 1,68 g.

4.3.3 Stickstoffkonzentration

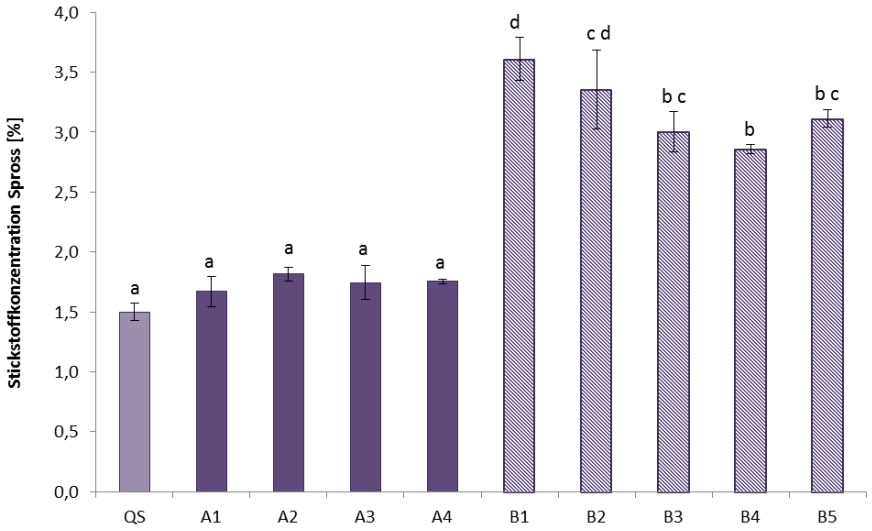

Abbildung 32:Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Stickstoffkonzentration im Spross ist bei der Variante B1 am höchsten, wie Abbildung 32 zeigt. Diese liegt bei 3,6% und ist signifikant verschieden zu B3, B4, B5, QS sowie zu allen Varianten der Gruppe A. Innerhalb der Gruppe A gibt es keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Stickstoffkonzentration. Im Vergleich zu der Variante QS kann eine leichte Abnahme der Stickstoffkonzentration festgestellt werden. Die Variante B4 weist mit 2,9 % in der Gruppe B die geringste Stickstoffkonzentration auf. Im Vergleich zu dieser Variante erzielen die Varianten B1 und B2 eine signifikant höhere Stickstoffkonzentration.

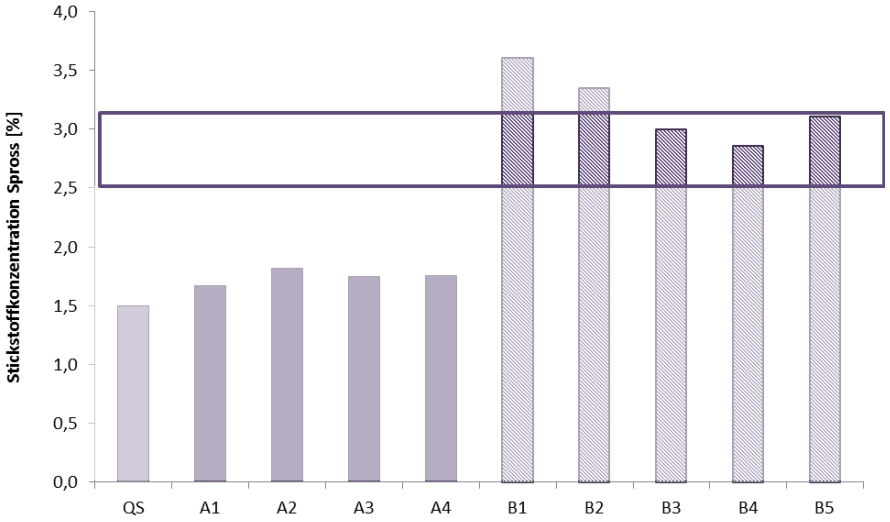

Abbildung 33: Optimaler Stickstoffkonzentrationsbereich im Spross der Versuchspflanzen Rotkleegras bei den verschiedenen Düngevarianten.

In Abbildung 33 ist der Bereich gekennzeichnet, der eine optimale Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras wiederspiegelt. Dieser liegt im Konzentrationsbereich von 2,5% bis 3,2% Stickstoff. In diesen Bereich fallen die Varianten B3, B4 und B5.

4.3.4 Schwefelkonzentration

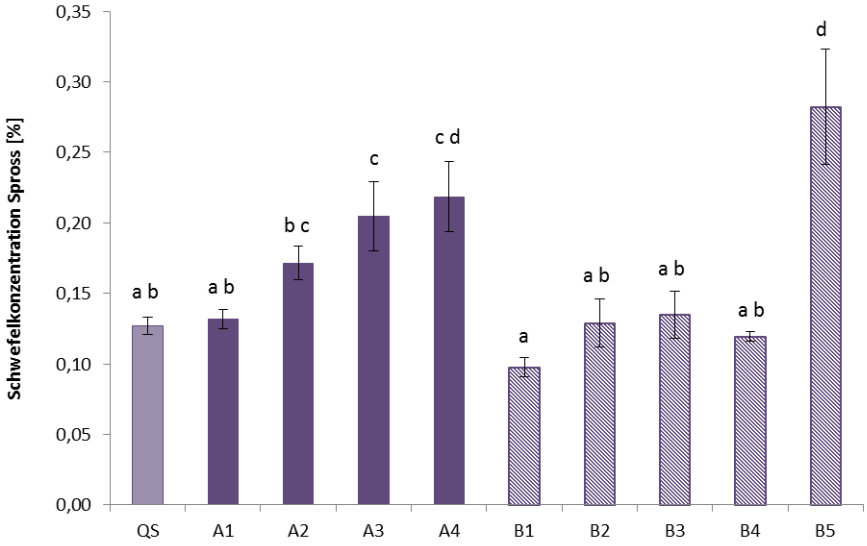

Abbildung 34: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 34 zeigt die Schwefelkonzentrationen im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras. Die geringste Schwefelkonzentration lässt sich bei der Variante B1 nachweisen und liegt dort bei 0,1%. Im Vergleich zu den Varianten QS, A1, A2, B1, B2, B3 und B4 erreicht die Variante A3 eine signifikant höhere Schwefelkonzentration von 0,2%. Die signifikant höchste Schwefelkonzentration liegt bei 0,28% und wird von der Variante B5 erreicht.

4.3.5 Stickstoffgehalt

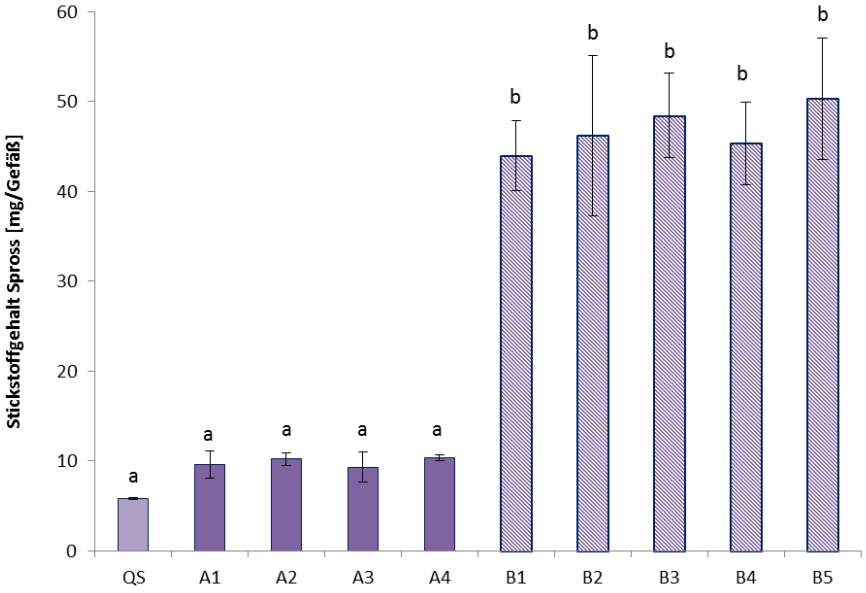

Abbildung 35: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 35 zeigt den Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras. Dieser wird in mg Gefäß$^{-1}$ angegeben. Bei der Auswertung der Stickstoffkonzentration der zehn verschiedenen Düngevarianten fällt auf, dass keine signifikanten Steigerungen von der Variante QS zu der Variante A1 entstehen. Die Variante A1 wurde auf den Boden des Gladbacherhofs angesetzt. Einen signifikanten Zuwachs verzeichnet die Variante B1, die mit NPK- und Mikronährlösungen versetzt wurde. Innerhalb der Gruppe B wird der Stickstoffgehalt von 44 mg Gefäß$^{-1}$ bei B1 auf 50 mg Gefäß$^{-1}$ bei der Variante B5 gesteigert. Dieser Zuwachs ist jedoch nicht signifikant.

4.3.6 Schwefelgehalt

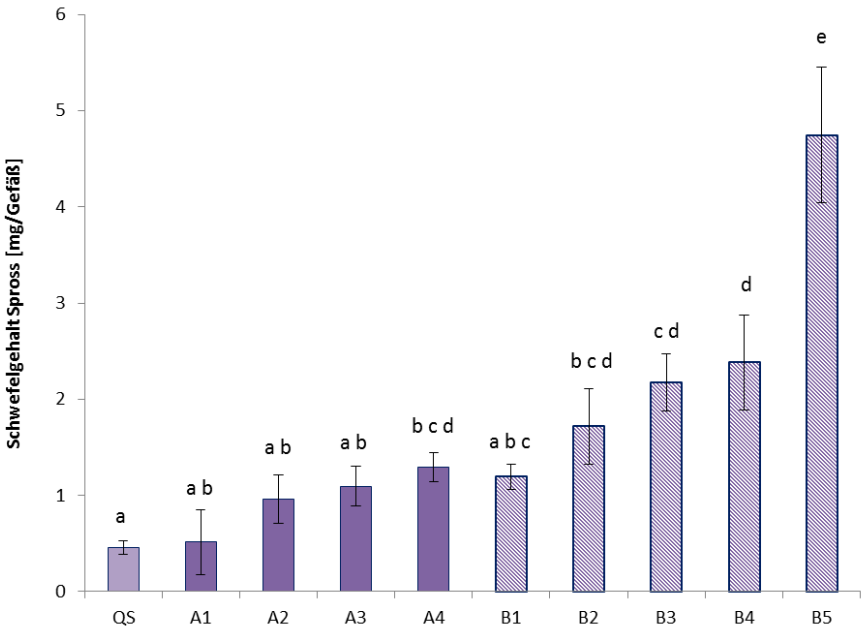

Abbildung 36:Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Der Schwefelgehalt der Versuchspflanze Rotkleegras steigt mit zunehmender Schwefelgabe an, was Abbildung 36 veranschaulicht. Dieser Trend ist sowohl in Gruppe A, als auch in Gruppe B zu erkennen. Bei einer Betrachtung der Gruppe A fällt auf, dass die Variante A4 im Vergleich zur Variante A1 einen signifikant höheren Schwefelgehalt erzielt. In Gruppe B gibt es signifikante Unterschiede zwischen der Variante B1 und B4. Bei der Variante B4 liegt der Schwefelgehalt bei 2,4 mg Gefäß$^{-1}$. Der signifikant höchste Schwefelgehalt liegt bei 4,7 mg Gefäß$^{-1}$ und wird von der Variante B5 erreicht.

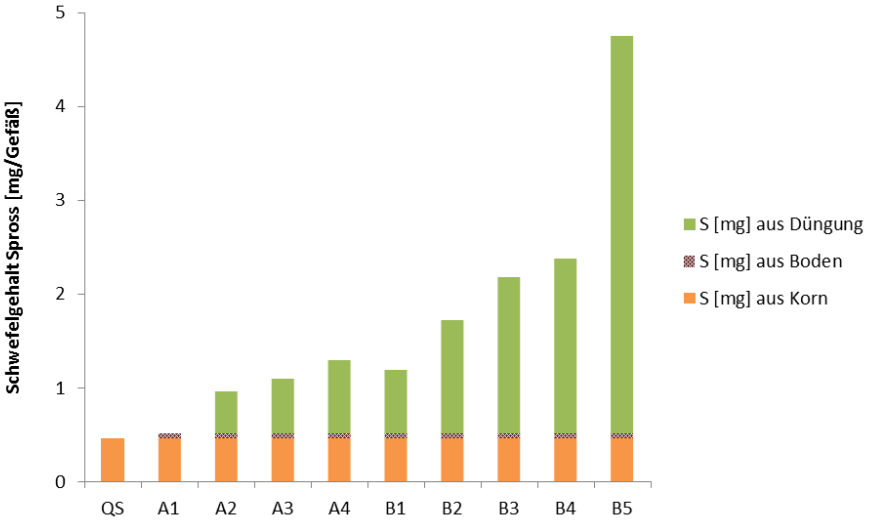

Abbildung 37: Ursprung des Schwefelgehalts im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren den Ursprung des Schwefels.

Die Unterteilung des Schwefelgehalts, basiert auf dem Ursprung des Schwefels und ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Varianten, die eine Schwefelgabe genossen haben, verzeichnen einen deutlichen Zuwachs des Schwefelgehaltes. Die Varianten B2, B3, B4 und B5 wurden sowohl mit NPK- Mikronährlösungen als auch mit Schwefeldünger versetzt. Bei diesen Varianten werden die höchsten Schwefelgehalte erzielt. Aus dem Korn selbst wurden 0,46 mg Schwefel geliefert, während die Schwefelversorgung aus dem Boden für Rotkleegras 0,056 mg betrug.

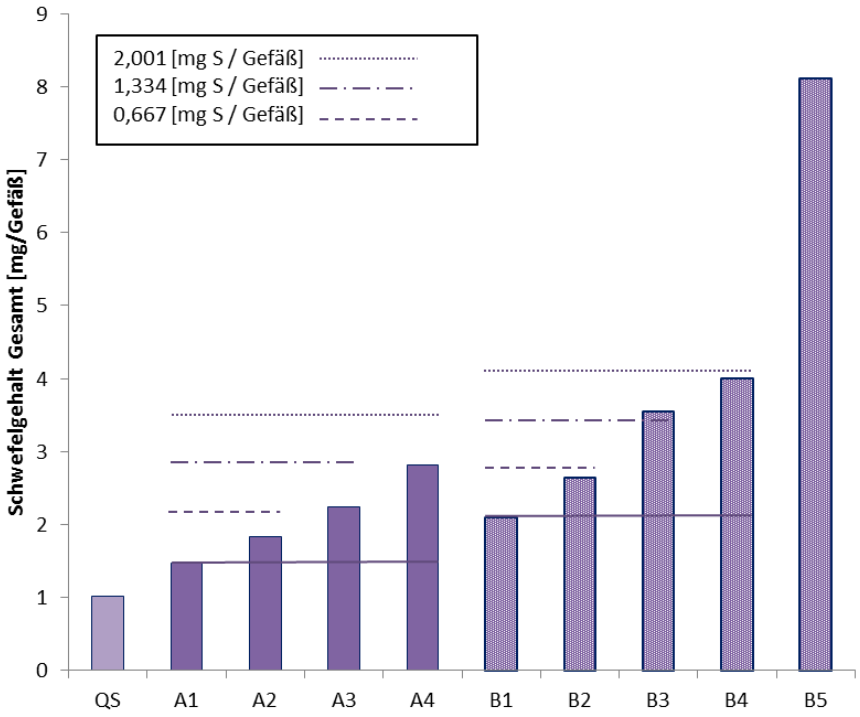

Abbildung 38: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Rotkleegras in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die verschiedenen Linien veranschaulichen die jeweilige Schwefelgabe in den Düngevarianten und deren Wiederfindung in der gesamten Pflanzenmasse.

Abbildung 38 zeigt den Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Rotkleegras. Dieser Wert setzt sich aus dem Schwefelgehalt der Sprossmasse und dem Schwefelgehalt der Wurzel zusammen. Die eingezeichneten Linien ermöglichen eine Nachvollziehbarkeit der Schwefelaufnahme bei unterschiedlicher Düngeintensität. Bei genauerer Betrachtung der Varianten der Gruppe A fällt auf, dass der gedüngte Schwefel nicht vollständig aufgenommen wurde. In den Varianten B2, B3 und B4 konnte der gegebene Schwefel fast vollständig nachgewiesen werden.

4.3.7 N/S-Verhältnis

Abbildung 39: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Rotkleegras in Abhängigkeit von den Düngevarianten.

Das N/S-Verhältnis ist am engsten bei der Variante A4, wie in Abbildung 39 ersichtlich. Diese Variante weist bei einer Schwefelgabe von 2 mg Gefäß$^{-1}$ und gleichzeitigem Verzicht auf eine Stickstoffdüngung ein Verhältnis von 8 auf. Das N/S-Verhältnis der QS Variante liegt bei 12,7. Die Varianten, die eine zusätzliche Stickstoffgabe erhielten, verzeichnen ein deutlich weiteres N/S-Verhältnis, wie beispielsweise in Variante B1 erkennbar. Dieses ist mit 36,9 am weitesten. Dem gegenüber stehen die mit Schwefel versetzten Varianten B2, B3, B4 und B5, die ein engeres N/S-Verhältnis aufweisen. Das engste N/S-Verhältnis der Gruppe B liegt bei 11 und wird von der Variante B5 erreicht.

4.3.8 Diskussion Rotkleegras

Bei der **optischen Auswertung** der fünf Versuchspflanzen waren die düngebedingten Unterschiede bei Rotkleegras am deutlichsten erkennbar. Bei den Varianten, die keine zusätzliche Stickstoffgabe erhalten hatten, konnten keine visuellen Unterschiede durch eine Schwefelgabe verzeichnet werden (vgl. Abb. 28). Die Varianten, die NPK- und Mikronährstoffe erhielten, zeigten hingegen deutliche Unterschiede auf. Die Variante B1 wies in der Gruppe B den geringsten Höhenwuchs, sowie eine geringere Farbsättigung auf. Ab einer Schwefelgabe von 0,667 mg Gefäß, wie in Variante B2 angewandt, konnte ein verbessertes Pflanzenwachstum beobachtet werden (vgl. Abb. 29; 30). Ein kontinuierlicher Anstieg der oberirdischen Pflanzenmasse erfolgte bis zur Variante B5.

Die gezielten Auswertungen der **Trockenmassebestimmung** und der **N/S-Analyse** verifizierten den vermuteten Zusammenhang zwischen Schwefelgabe und Pflanzenertrag. In den Varianten der Gruppe A ohne NPK- und Mikronährstoffdüngung, konnte Schwefel kein signifikant positiver Effekt nachgewiesen werden. Der positive Effekt von Schwefel war jedoch in den Varianten erkennbar, die zusätzlich mit NPK- und Mikronährstoffen gedüngt wurden (vgl. Abb. 31). Dies äußerte sich durch einen Anstieg des Trockenmasseertrages, der durch die Gabe von Schwefel bedingt war. Ein signifikant höherer Trockenmasseertrag wurde bei der Variante B3 ab einer Gabe von 1,334 mg S Gefäß$^{-1}$ erreicht. Diese Menge ist unter Feldbedingungen mit einer Gabe von 60 kg S ha^{-1} gleichzusetzen. Durch eine Steigerung der Schwefeldüngung auf 2 mg S pro Gefäß$^{-1}$ konnte kein weiterer signifikanter Zuwachs erzielt werden.

Mit Hilfe des Trockenmasseertrages und der optischen Auswertung wurde eine optimale Stickstoffkonzentration in der Sprossmasse abgeleitet. Diese liegt in einem Bereich von 2,5% bis 3%. Über den optimalen Versorgungsbereich der Schwefelkonzentrationen kann keine Empfehlung formuliert werden, da kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Begründet wird diese Aussage damit, dass die Konzentrationen der Varianten mit dem höchsten Trockenmassegehalt geringe Schwefelkonzentrationen von 0,12% bis 0,13% aufgewiesen haben (vgl. Abb. 33). Diese Konzentrationen können möglicherweise aufgrund von Verdünnungseffekten vermindert worden sein, da der Trockenmasseertrag bei diesen Varianten signifikant höher war (vgl. Abb. 31).

Bei einem Vergleich der Schwefelkonzentrationen, der mit NPK- und Mikronährstoff gedüngten Varianten und den Konzentrationen, die auf landwirtschaftlichen Flächen erreicht werden, fällt auf, dass diese in deutlich höheren Bereichen liegen. Diese weisen Schwefelkonzentrationen von 0,2% auf (FISCHINGER et al. 2011). Solche Ergebnisse konnten in diesem Versuch nur von den Varianten erreicht werden, die lediglich eine Schwefelgabe erhielten bzw. bei denen auf eine zusätzliche Stickstoffgabe verzichtet wurde (vgl. Abb. 34).

Die Ergebnisse des Schwefelgehaltes, mit Untergliederung in die verschiedenen Schwefelquellen Korn, Boden und Düngung, weisen Ähnlichkeiten zu der Versuchspflanze Rotklee auf (vgl. Abb. 37). Die Schwefelgehalte des Rotkleegemenges liegen mit ca. 1 mg Gefäß$^{-1}$ unter den Werten von Rotklee, wobei ein ähnlicher Verlauf erkennbar ist. Bei der Variante B1 wird der Schwefeldüngung einen Einfluss auf den Schwefelgehalt zugesprochen, obgleich keine zusätzliche Schwefelgabe stattgefunden hat. Ein Erklärungsansatz ist im Diskussionsteil Rotklee weiter erläutert (S. 33).

In den Varianten der Gruppe A kann die verfügbare Schwefelmenge nicht vollständig aufgenommen werden (vgl. Abb. 39). In allen drei Varianten A2, A3 und A4 bleibt der Gesamtschwefelgehalt unter den errechneten „Soll-Schwefelgehalten“. Im Gegensatz dazu wird in den Varianten der Gruppe B der verfügbare Schwefel fast vollständig ausgeschöpft und in die Pflanzen eingebaut. In den Varianten B2 und B4 kann fast die gesamte gegebene Schwefelmenge detektiert werden. Die Variante B3 übersteigt sogar die „Soll-Schwefelgehalte“, was möglicherweise durch Messungenauigkeiten hervorgerufen wurde.

Bei der Betrachtung der N/S-Verhältnisse des Rotkleegrasgemenges fällt auf, dass diese deutlich von den Literaturwerten abweichen. Die Variante B3, die einen signifikant höheren Trockenmasseertrag erzielte als die Variante B1, weist ein weites N/S-Verhältnis von 23 auf. Ein deutlich engeres Verhältnis wird in Kleegrasaufwüchsen auf freien Flächen erreicht. Die N/S-Verhältnisse liegen bei umgerechnet gleicher Schwefelgabe bei 11,2 (BÖHM, 2013).

4.4 Raps (*Brassica napus)*

4.4.1 Optische Auswertung

Die Versuchspflanze Raps konnte während der Versuchsdauer schnell oberirdische Pflanzenmasse ausbilden. Die Varianten, die weder mit NPK-Dünger noch Mikronährstoffen versetzt wurden, zeigten eine deutliche Wachstumsverzögerung auf. Drei Tage vor dem angesetzten Versuchsende wurde ein pathogener Schaderregerbefall bemerkt, der sich rasant ausbreitete. Dieser Befall ist deutlich in Abbildung 40 zu erkennen, wobei eine besonders betroffene Variante mit einem roten Kreis markiert ist.

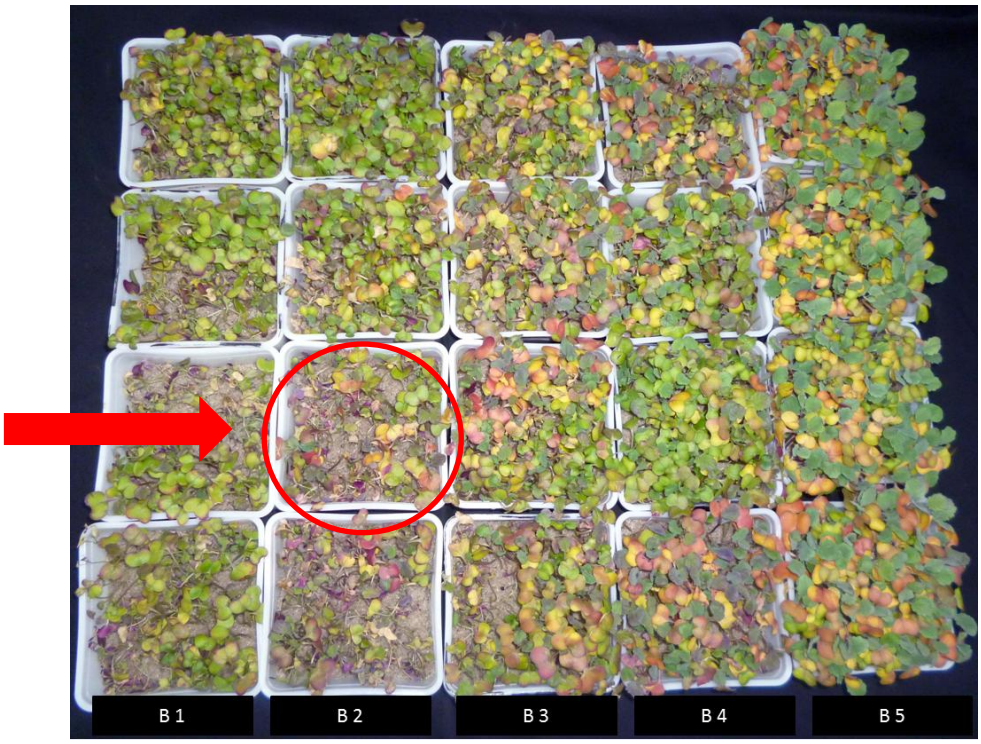

Abbildung 40: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Raps am 02.12.2013 (eigenen Aufnahme).

4.4.2 Trockenmasse

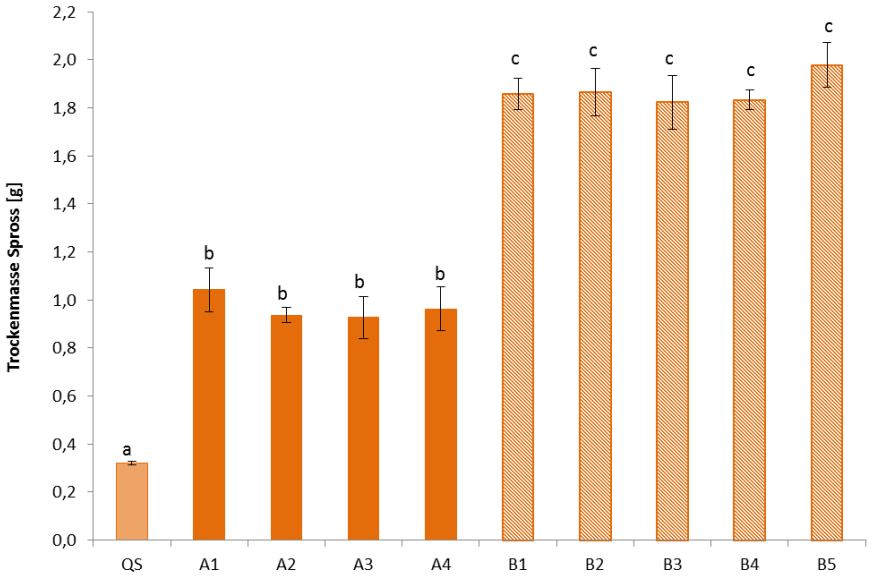

Abbildung 41: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Raps in g, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Die Abbildung 41 zeigt den Trockenmasseertrag der Versuchspflanze Raps. Die Varianten lassen sich hinsichtlich ihrer erzielten Trockenmasse in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe umfasst die QS Variante, die die geringste Trockenmasse ausbildete. Die Varianten der Gruppe A bilden die zweite Gruppe, in der keine signifikanten Unterschiede detektiert werden konnten. Variante A1 erreichte einen Trockenmasseertrag von 1 g und übersteigt damit die Erträge der anderen Varianten dieser Gruppe. Die Varianten der Gruppe B lassen sich der dritten Gruppe zuordnen. Diese Varianten haben eine zusätzliche NPK- und Mikronährstoffdüngung erhalten und verzeichnen signifikant höhere Erträge als die Varianten der Gruppe A. Innerhalb der Gruppe B existieren keine signifikanten Unterschiede, wobei die Variante B5 mit 2 g den höchsten Ertrag erzielte.

4.4.3 Stickstoffkonzentration

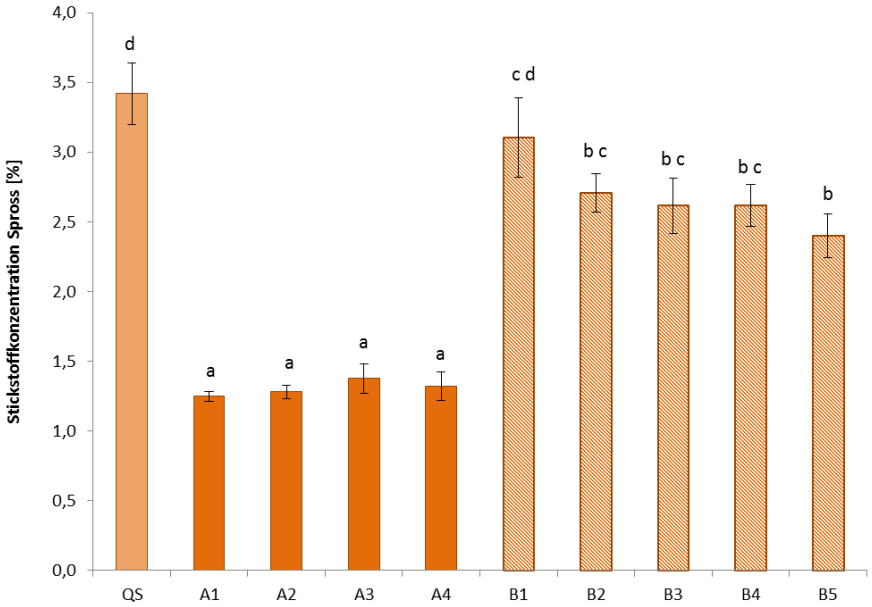

Abbildung 42: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Raps in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 42 sind die Stickstoffkonzentrationen der verschiedenen Düngestufen für die Versuchspflanze Raps dargestellt. In der QS Variante ist die Stickstoffkonzentration mit 3,4% am höchsten. Die Varianten der Gruppe A weisen die geringste Stickstoffkonzentration auf, die in einem Bereich von 1,2% bis 1,4% liegen. Die Varianten der Gruppe B, die eine NPK- und Mikronährstoffdüngung erhalten hatten, weisen signifikant höhere Konzentrationen im Vergleich zu den Varianten der Gruppe A auf. Innerhalb der Gruppe B können weitere signifikante Unterschiede detektiert werden, die die Varianten B1 und B5 betreffen. Hierbei ist die Konzentration der Variante B1 signifikant höher als die Konzentration in Variante B5.

4.4.4 Schwefelkonzentration

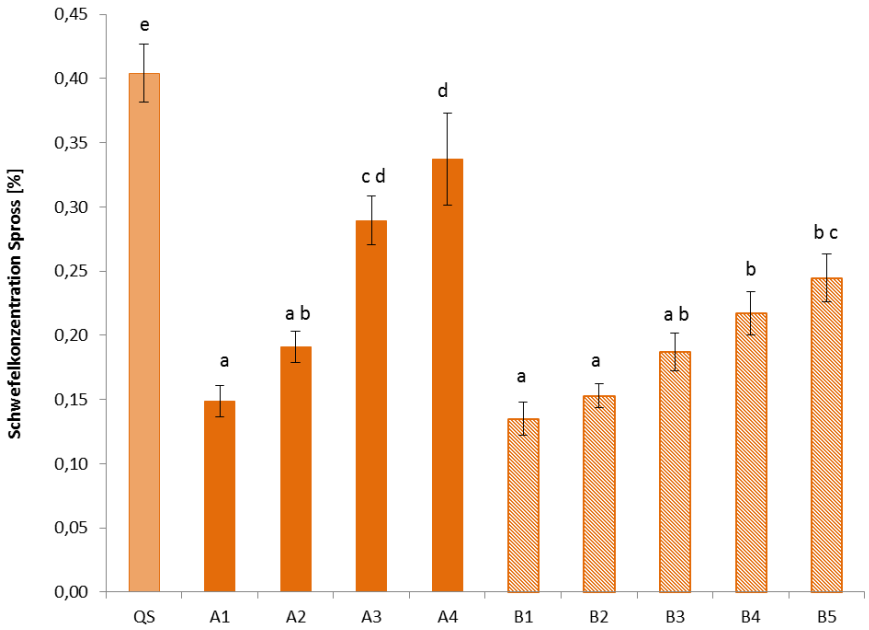

Abbildung 43: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Raps in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 43 zeigt die Schwefelkonzentration der Versuchspflanze Raps. Die Variante A4, die mit 2 mg S Gefäß$^{-1}$ gedüngt wurde, erreicht innerhalb der Gruppe A eine signifikant höhere Schwefelkonzentration, als die Varianten A1 und A2. Innerhalb der Gruppe B findet sich bei der Variante B1 mit 0,14% die geringste Schwefelkonzentration. Eine signifikante Steigerung der Schwefelkonzentration wird bei der Variante B4, die eine Schwefelgabe von 2 mg S Gefäß erhielt, erreicht. In der Gruppe A ist die Konzentration in der Variante A3 signifikant höher als die Varianten A1 und A2. Zudem ist sie signifikant höher, als die Varianten B1, B2 und B3. Die Konzentration der Variante A4 ist signifikant höher, als die Konzentration der Variante B5, die die höchste Schwefelgabe genossen hatte.

4.4.5 Stickstoffgehalt

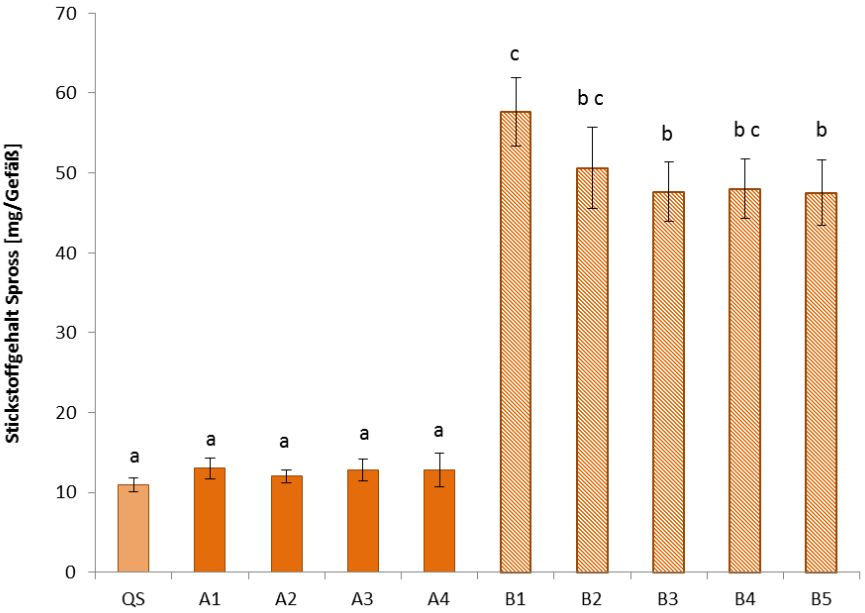

Abbildung 44: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Raps in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 44 ist der Stickstoffgehalt der 10 verschiedenen Düngestufen für die Versuchspflanze Raps dargestellt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass es innerhalb der Gruppe A keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Stickstoffgehaltes gibt. Die Variante B1 verzeichnet den höchsten Stickstoffgehalt mit 57,6 mg Gefäß$^{-1}$ und dieser ist signifikant höher, als die Gehalte der Varianten der Gruppe A, QS, B3 und B5. Keine Signifikanzen treten zwischen den Varianten B1, B2, B3 und B4 auf.

4.4.6 Schwefelgehalt

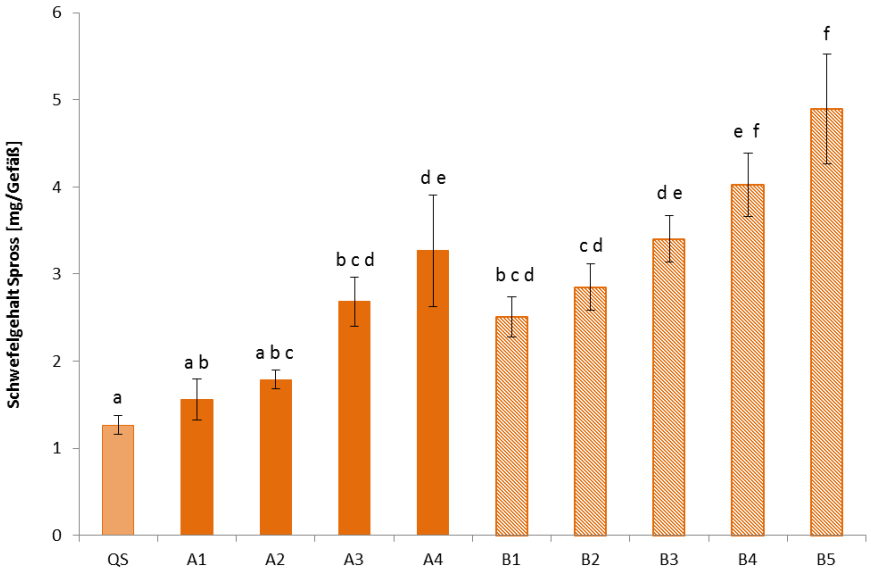

Abbildung 45: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Raps in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Der Schwefelgehalt der Versuchspflanze Raps ist in Abbildung 45 dargestellt. Die Varianten A4 und B4 wurden beide mit 2 mg S Gefäß$^{-1}$ gedüngt, wohingegen die gefundenen Schwefelgehalte um 0,6 mg Gefäß$^{-1}$ differieren. Die Schwefelgehalte der Variante A4 liegen bei 3,3 mg Gefäß$^{-1}$ und bei der Variante B4 bei 4 mg Gefäß$^{-1}$. Sie weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Den höchsten Schwefelgehalt erreicht die Variante B5 mit einer Schwefeldüngung von 8 mg S Gefäß$^{-1}$. Der Schwefelgehalt der Variante B5 ist signifikant höher, als die Schwefelgehalte der anderen Varianten, mit Ausnahme der Variante B4.

Abbildung 46: Ursprung des Schwefelgehalts im Spross der Versuchspflanze Raps in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren den Ursprung des Schwefels.

Abbildung 46 zeigt den Ursprung des Schwefels, der sich aufteilt in Schwefel aus dem Korn, Schwefel aus dem Boden und Schwefel aus der Düngung. Der Schwefelanteil, der durch die Schwefeldüngung erzielt wird, ist in grün dargestellt. Die Schwefelversorgung aus dem Korn beträgt 1,27 mg und aus dem Boden 0,29 mg. Diese sind für alle Varianten gleich hoch.

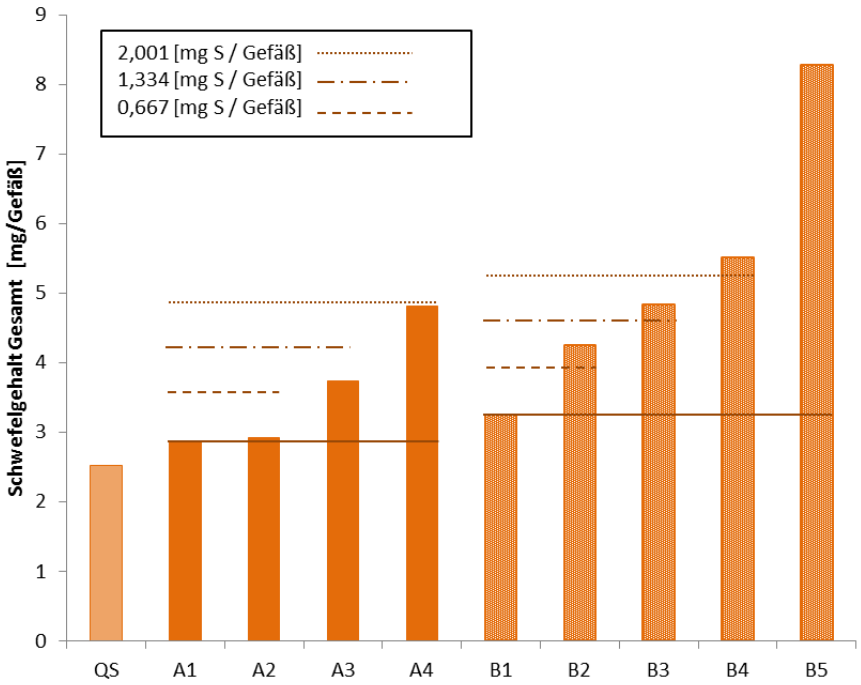

Abbildung 47: Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Raps in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die verschiedenen Linien veranschaulichen die jeweilige Schwefelgabe in den Düngevarianten und deren Wiederfindung in der gesamten Pflanzenmasse.

Abbildung 47 zeigt den Gesamtschwefelgehalt der Versuchspflanze Raps in mg Gefäß$^{-1}$. Die Linien symbolisieren die zusätzliche Schwefelgabe der unterschiedlichen Düngestufen. Bei der Variante A2 beträgt die zusätzliche Schwefelmenge 0,667 mg S Gefäß$^{-1}$. Erkennbar ist, dass die gegebene Schwefelmenge in dieser Variante nicht vollständig nachgewiesen werden konnte. Die Variante A3 nimmt circa die Hälfte der 1,334 mg S Gefäß$^{-1}$ auf. Eine fast vollständige Aufnahme der gegebenen Schwefelmenge kann bei der Variante A4 beobachtet werden. Die Schwefelgaben für die Varianten der Gruppe B konnten vollständig nachgewiesen werden. Der Schwefelgehalt übersteigt sogar bei allen drei Varianten (B2, B3 und B4) die Gabe.

4.4.7 N/S-Verhältnis

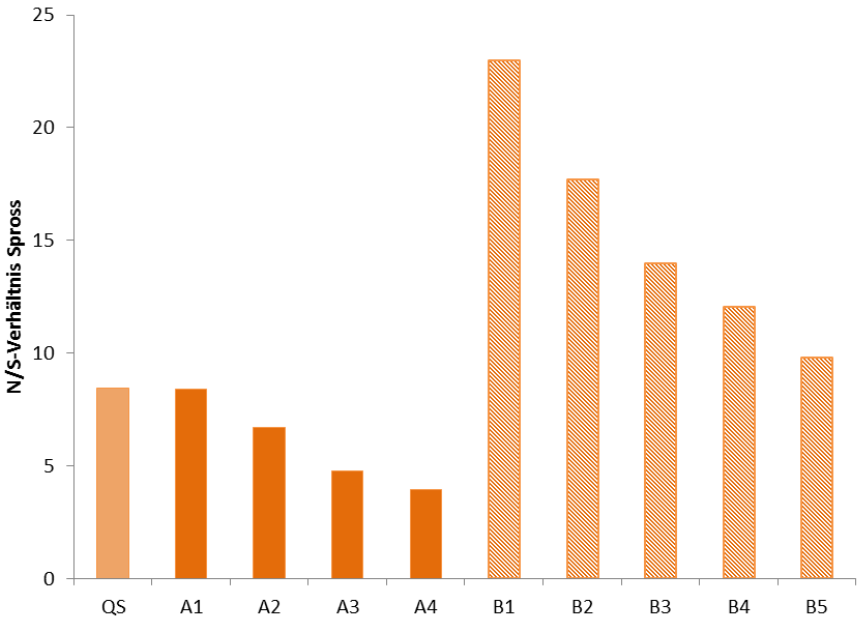

Abbildung 48: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Raps, in Abhängigkeit von den Düngevarianten.

Das N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Raps ist in Abbildung 48 dargestellt. Das engste N/S-Verhältnis liegt bei 4 und wird von der Variante A4 erreicht. Bei dieser Variante wurden 2 mg S Gefäß$^{-1}$ bei einem gleichzeitigen Verzicht auf eine zusätzliche Stickstoffgabe gegeben. Durch die Stickstoffgabe der Varianten der Gruppe B ist das N/S-Verhältnis deutlich weiter, als bei den Varianten der Gruppe A. Das weiteste N/S-Verhältnis liegt mit 23 bei der Variante B1 vor. Durch die Zugabe von 0,667 mg S Gefäß$^{-1}$, beträgt das Verhältnis in Variante B2 17,7. Das engste N/S-Verhältnis der Gruppe B liegt bei der Variante B5 vor und beträgt 9,8.

4.4.8 Diskussion Raps

Die **visuelle Auswertung** der Versuchspflanze Raps war aufgrund des pathogenen Schaderregerbefalls beeinträchtigt. Abbildung 40 zeigt deutlich, wie unterschiedlich stark die verschiedenen Varianten betroffen waren. Die Erkrankung führte stellenweise zum Eintrocknen des Pflanzenstängels und behinderte so die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Boden. Die Symptomatik des Schaderregers deutet darauf hin, dass ein Befall mit einem Pilz vorlag, der zu Wurzelhals- und Stängelfäule (Phoma lingam) führte (RAPOOL, 2014). Aufgrund des Befalls sind die Ergebnisse der Auswertungen für die Versuchspflanze Raps unter Vorbehalt zu betrachten. Da dieser frühzeitig erkannt und die Maßnahme einer vorgezogenen Ernte eingeleitet wurde, werden die Ergebnisse trotz des Befalls dargestellt.

Die **Auswertungen des Trockenmasseertrages** weisen der Schwefeldüngung keinen eindeutig positiven Effekt zu (vgl. Abb. 41). Die Varianten der Gruppe A zeigen mit zunehmender Schwefelgabe sogar eher einen Rückgang des Trockenmasseertrages auf. Des Weiteren lässt sich aus den Trockenmasseerträgen der Gruppe B kein ertragssteigernder Effekt ableiten. Die Erträge aller Varianten, unabhängig von der Düngestufe, liegen in Bereichen von 1,8 bis 2,0 g. Diese Ergebnisse können durch den pathogenen Befall beeinflusst worden sein, da vergleichbare Studien in der Vergangenheit bereits bestätigen konnten, dass die Schwefelversorgung bei Raps einen bedeutenden Einfluss auf den Ertrag und die Qualität hat (HANEKLAUS und BLOEM 2000, GUPTA et al. 1997, PEDERSEN et al. 1998, BERGMANN 1993). BOOTH et al. (1991) sprachen der Schwefeldüngung ab 32 kg S ha^{-1} einen signifikanten ertragssteigernden Effekt zu, was in diesem Versuch nicht bestätigt werden konnte.

Die gezielten Auswertungen der **N/S-Analyse** zeigen, dass die Stickstoffkonzentration durch die Schwefelgabe beeinflusst wurde. Dies äußerte sich durch eine abnehmende Tendenz der Konzentration bei steigender Schwefelgabe (vgl. Abb. 42). Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt in den Düngevarianten B1 und B5 der Gruppe B, bei der die Schwefelgabe zu einer signifikanten Minderung der Stickstoffkonzentration führte.

Die Ergebnisse der Schwefelkonzentrationsermittlung zeigten ebenfalls einen Effekt der Schwefelgabe (vgl. Abb. 43). Mit der Schwefeldüngung stieg die Schwefelkonzentration in der Pflanze kontinuierlich an. Dieser Anstieg ließ sich sowohl in den Düngevarianten der

Gruppe A, als in den Düngevarianten der Gruppe B beobachten. Bei einer Schwefelgabe von 2 mg S Gefäß$^{-1}$ wurden Konzentrationen für A4 von 0,34% und für B4 von 0,21% erreicht.

Nach Pissarek und Schnug (1982) werden optimale Schwefelgehalte in der Trockenmasse von über 0,45% beschrieben. Soll ein Ertragsniveau von 100% angestrebten werden, liegen die Konzentrationen bei 0,65%. Die Empfehlungen der VDLUFA (2000) beschreiben Konzentrationen von 0,55%, die einen optimalen Versorgungszustand widerspiegeln. Diese Konzentrationen konnten selbst bei der höchsten Schwefelgabe in diesem Gefäßversuch nicht erreicht werden. In Gruppe B nimmt der Stickstoffgehalt in der Pflanze mit zunehmender Schwefeldüngung signifikant ab. Schnug et al. (1993) weisen auf die Interaktion zwischen Schwefel und Stickstoff hin, die es erforderlich macht, dass beide Nährstoffe in einem ausgewogenen Gleichgewicht vorliegen. In diesem Versuch sinkt der Stickstoffgehalt mit der Schwefelgabe, währenddessen der Schwefelgehalt in der Pflanze signifikant ansteigt. In Abbildung 47 wird deutlich, dass die Schwefelgabe von den Rapspflanzen, die zusätzlich mit NPK- und Mikronährstoffen versorgt waren, voll ausgeschöpft wurde. In allen drei Varianten konnte sogar mehr Schwefel nachgewiesen werden, als tatsächlich gegeben wurde. Diese Überschreitungen können durch Messungenauigkeiten entstanden sein. Bei der Betrachtung der N/S-Verhältnisse fällt auf, dass mit steigender Schwefelgabe das Verhältnis enger wird (vgl. Abb. 48). Bei einer Nährstoffversorgung mit NPK, Mikronährstoffen und Schwefel schwanken die Ergebnisse zwischen 9,8 und 17,1.

Die schwefelinduzierte Resistenz (SIR) belegt, dass durch Schwefel die Pflanzengesundheit gefördert wird. Dies geschieht durch die Synthese von Metaboliten, die einem Befall mit pathogenen Schaderregern entgegenwirken (SALAC 2005). Dieser Effekt kann im Versuch zwar nicht eindeutig nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 40), aber dennoch konnte festgestellt werden, dass die Variante mit der höchsten Schwefelgabe (B5), den geringsten Schaderregerbefall verzeichnete.

4.5 Gelbsenf (*Sinapis alba*)

4.5.1 Optische Auswertung

Von den fünf Versuchsvarianten bildete Gelbsenf am deutlichsten oberirdische Sprossmasse aus, wie in Abbildung 49 erkennbar. Ein verstärktes Wachstum konnte bei den Varianten mit NPK- und Mikronährlösung beobachtet werden. Wie schon bei der Kruzifere Raps, konnte auch bei Gelbsenf ein Befall mit einem pathogenen Schaderreger festgestellt werden. Die Folgen des Befalls sind in Abbildung 49 erkennbar. Um eine weitere Ausbreitung vorzubeugen, wurden alle Varianten der Versuchspflanze Gelbsenf früher als geplant abgeerntet.

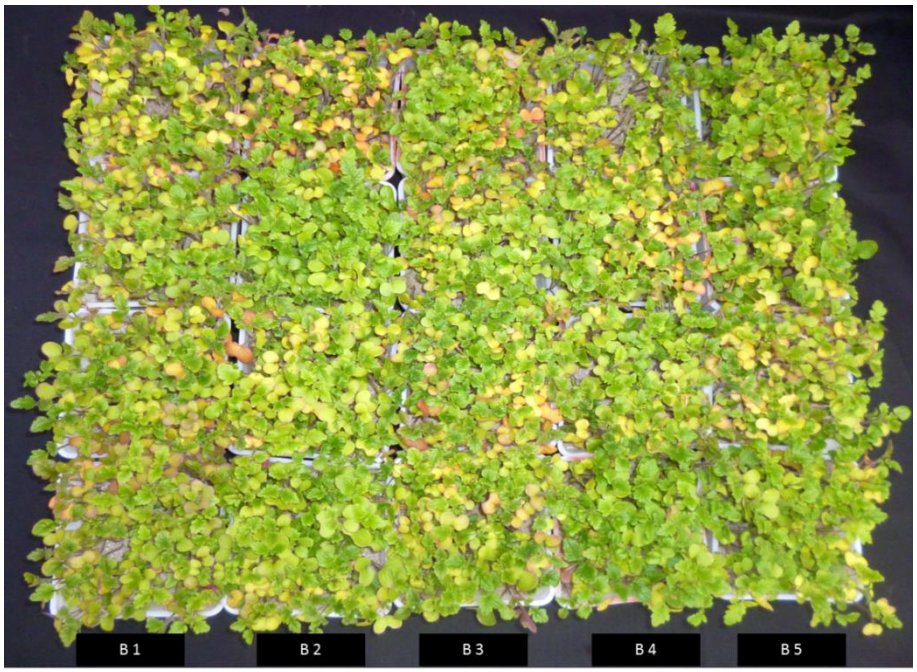

Abbildung 49: Die Varianten B1-B5 der Versuchspflanze Gelbsenf am 02.12.2013 (eigene Aufnahme).

4.5.2 Trockenmasse

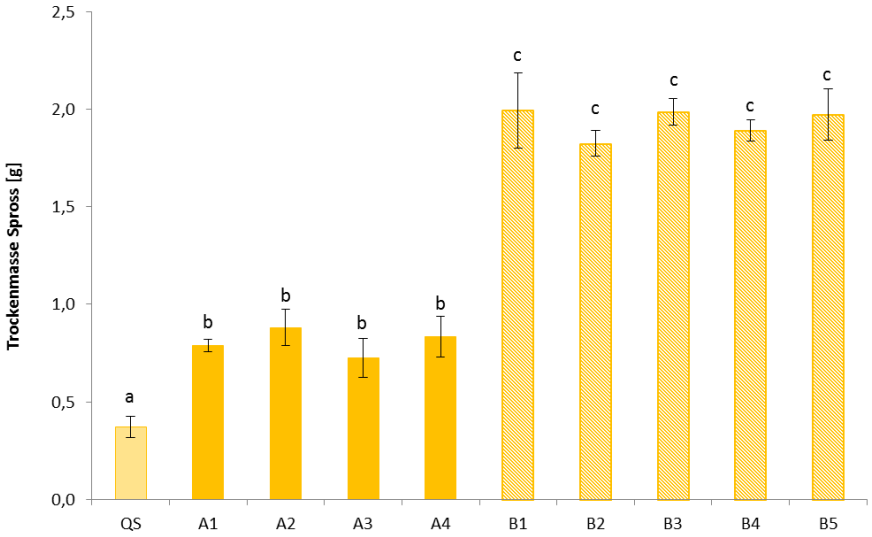

Abbildung 50: Trockenmasse Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in g, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 50 zeigt die Trockenmasse der Versuchspflanze Gelbsenf. Es treten 3 Signifikanzen innerhalb der 10 Düngevarianten auf. Zum einen sind die Trockenmasseerträge der Varianten A und B signifikant höher als die QS Varianten und zum anderen tritt ein signifikanter Zuwachs in der Gruppe B auf. Durch die Schwefelgabe konnte weder in Gruppe A noch in Gruppe B ein signifikanter Effekt nachgewiesen werden. Innerhalb der Gruppen A und B ist kein eindeutiger Trend zu erkennen.

4.5.3 Stickstoffkonzentration

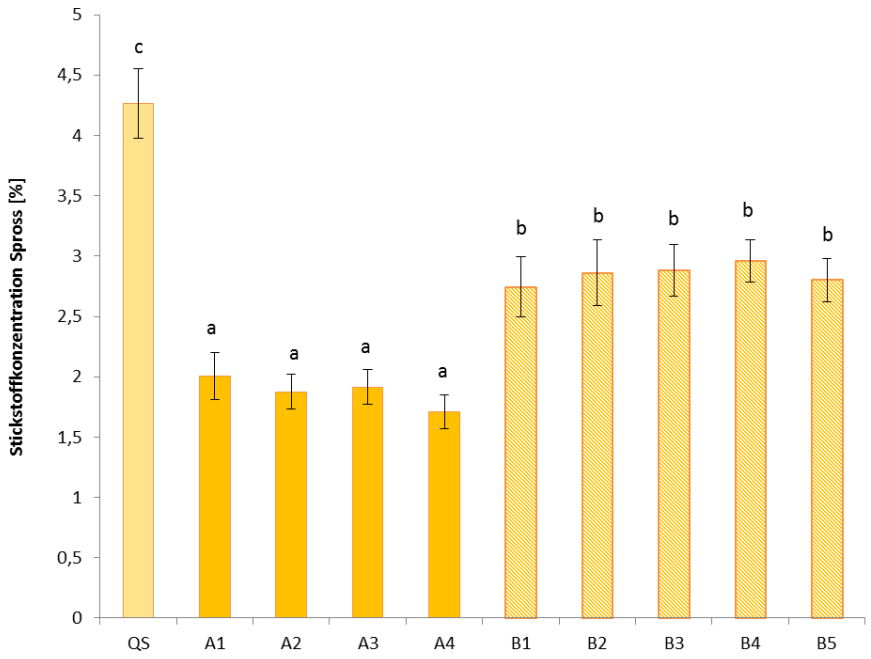

Abbildung 51: Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 51 ist die Stickstoffkonzentration im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf dargestellt. Die geringsten Konzentrationen finden sich in den Varianten der Gruppe A wieder. Die Schwefelgabe von der Variante A2 bis zur Variante A4 führte zu einer leichten Abnahme der Stickstoffkonzentration. Die Abnahme von A1 zu A4 liegt bei 0,3% und damit nicht im signifikanten Bereich. Die Schwefelgabe führt in der Gruppe B zu einem leichten Anstieg der Stickstoffkonzentration von B1 zu B4. Im weiteren Verlauf ist eine Abnahme der Stickstoffkonzentration festzustellen.

4.5.4 Schwefelkonzentration

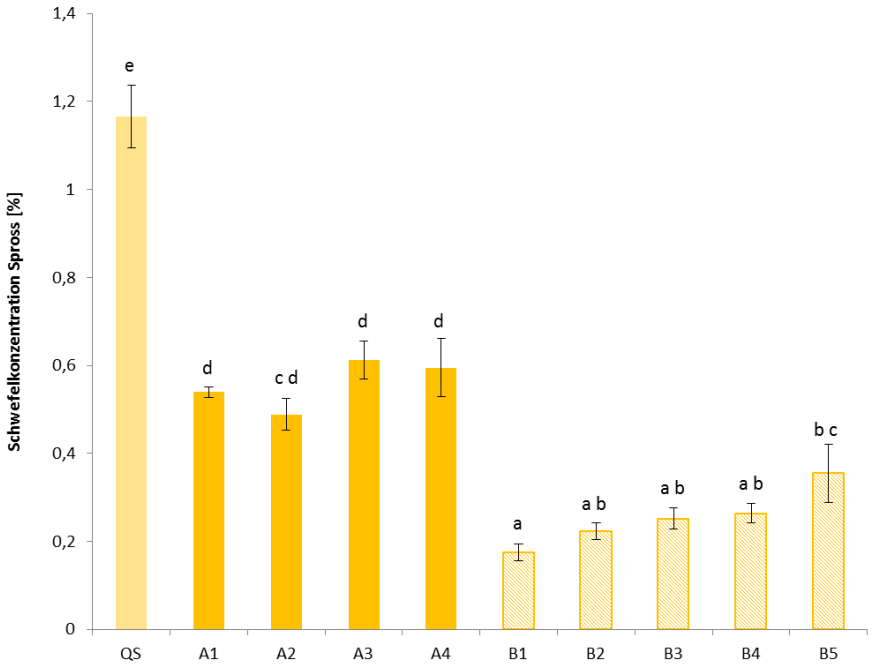

Abbildung 52: Schwefelkonzentration im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

Abbildung 52 zeigt die Schwefelkonzentration der Versuchspflanze Gelbsenf. Die höchste Konzentration erreicht die QS Variante, mit 1,16%. Diese ist signifikant höher, als die Konzentrationen der anderen Varianten. Die geringsten Schwefelkonzentrationen werden von den Varianten der Gruppe B erreicht. Am geringsten ist diese bei der Variante B1 mit 0,17%. Signifikant höher ist der Schwefelgehalt der Variante B5 mit 0,35%. Diese Variante wurde mit 8 mg Gefäß$^{-1}$ gedüngt.

4.5.5 Stickstoffgehalt

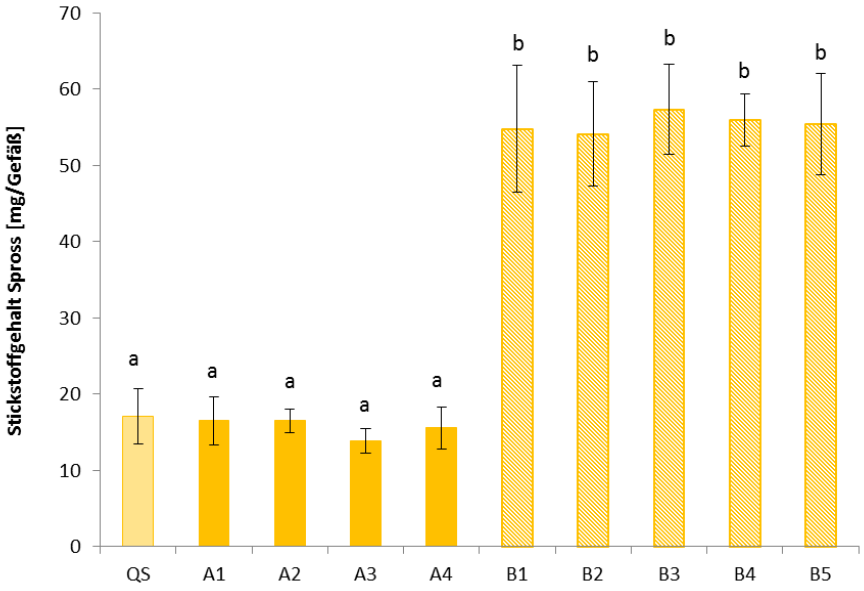

Abbildung 53: Stickstoffgehalt im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 53 ist der Stickstoffgehalt im Spross der verschiedenen Düngevarianten der Versuchspflanze Gelbsenf dargestellt. Auffällig ist, dass zwischen den Varianten der Gruppe A und der QS Variante keine signifikanten Unterschiede des Stickstoffgehaltes detektiert werden können. Signifikante Erhöhungen des Gehaltes verzeichnen erst die Varianten der Gruppe B. Innerhalb dieser Gruppe treten jedoch keine weiteren signifikanten Effekte auf.

4.5.6 Schwefelgehalt

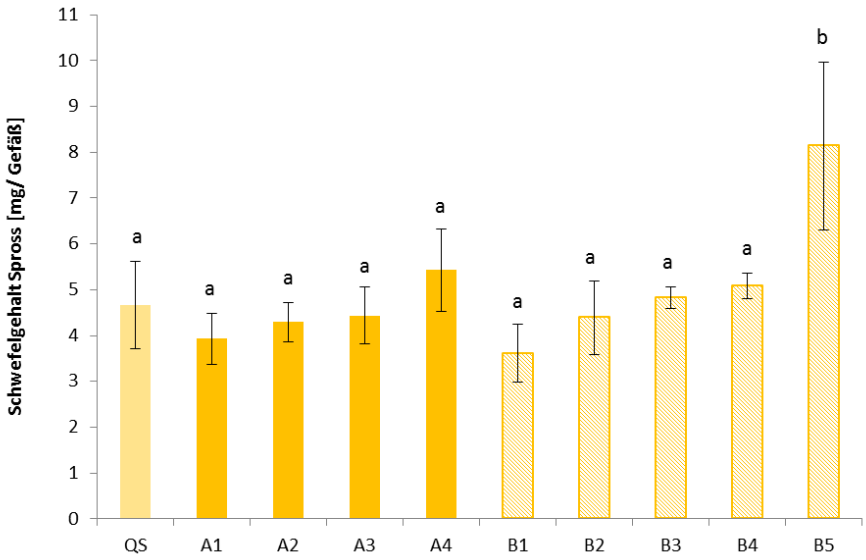

Abbildung 54: Schwefelgehalt im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in mg Gefäß$^{-1}$, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%). Die Fehlerbalken symbolisieren die Standardabweichung.

In Abbildung 54 ist der Schwefelgehalt der Versuchspflanze Gelbsenf dargestellt. Hier fällt auf, dass es zwischen den Varianten QS, A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3 und B4 keine signifikanten Unterschiede gibt. Einen signifikanten Anstieg des Schwefelgehalts verzeichnet die Variante B5, die eine Schwefelgabe von 8 mg Gefäß$^{-1}$ erhielt.

4.5.7 N/S-Verhältnis

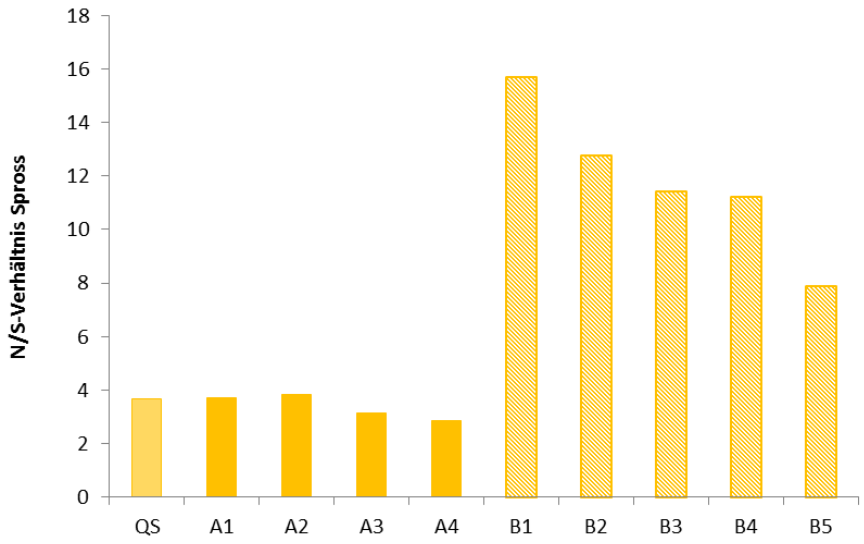

Abbildung 55: N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf in Abhängigkeit von den Düngevarianten.

In Abbildung 55 wird das N/S-Verhältnis im Spross der Versuchspflanze Gelbsenf aufgezeigt. Bei der Variante A4 liegt das Verhältnis bei 3 und ist damit am engsten. Ein 5,5-fach höheres Ergebnis konnte in der Variante B1 erzielt werden. Dieser Variante wurden ausschließlich NPK- und Mikronährstoffdünger zugesetzt. Die Varianten, denen Schwefel zugesetzt wurde, erreichten ein engeres N/S Verhältnis. Bei der Variante B5 sinkt dieses auf 7,9 ab.

4.5.8 Diskussion Gelbsenf

Da Gelbsenf, wie auch Raps, zu den Kreuzblütengewächsen zählt (Kruziferen), weist es einen ähnlich hohen Schwefelbedarf auf. Die Tatsache, dass Raps und Gelbsenf der gleichen Pflanzenfamilie angehören, erklärt den Befall beider Versuchspflanzen mit dem pathogenen Schaderreger. Aufgrund von ähnlichen Ergebnissen im Vergleich mit dem Vorversuch, wurden die Resultate der Versuchspflanze Gelbsenf trotzdem dargestellt. Bei einem detaillierten Vergleich der Ergebnisse fällt auf, dass es deutliche Übereinstimmungen der Schwefelkonzentrationen in den verschiedenen Düngevarianten gibt. Differierende Werte treten im Vergleich der Stickstoffgehalte, Schwefelgehalte, Schwefelkonzentrationen und N/S-Verhältnisse auf. Besonders auffällig ist, dass Schwefel keine Steigerung des Trockenmasseertrages in den verschiedenen Düngevarianten bewirkt. Dies widerspricht solchen Literaturquellen, die Schwefel speziell bei Kreuzblütlern einen positiven Effekt zuschreiben (BERGMANN 1993). Die Trockenmasse des Sprosses liegt im Bereich von 2 g. Dieses Ergebnis überschneidet sich mit dem des Vorversuchs. Anders verhält es sich mit den Ergebnissen des Vorversuchs, die Schwefel eine eindeutige ertragssteigernde Wirkung zusprachen (DIERICH 2013). Aus diesem Grund wird angenommen, dass der pathogene Schaderregerbefall die Ergebnisse dieses Versuchs so stark beeinträchtigt hat, dass keine Empfehlungen für die Düngegabe bei Gelbsenf formuliert werden können.

4.6 Gesamtdiskussion

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der fünf verschiedenen Versuchspflanzen fällt auf, dass sich diese unterschiedlich gut zur Ermittlung der Schwefelbedürftigkeit eignen. Die ursprüngliche Extraktionspflanze Roggen weist einen deutlich geringeren Schwefelbedarf auf als die anderen Pflanzenkulturen dieses Gefäßversuches. Im Freiland liegen die Düngeempfehlungen für Roggen bei 10 bis 20 kg S ha^{-1}. Es wurde verdeutlicht, dass die Schwefelaufnahme parallel zur Stickstoffaufnahme abläuft (EFFIZIENT DÜNGEN 2014). Die Trockenmasseerträge bei Roggen sind bei der Gabe von 1,334 mg S $Gefäß^{-1}$ am höchsten. Eine signifikante Verbesserung konnte jedoch nicht erzielt werden. Aufgrund der vorliegenden Auswertungen kann davon ausgegangen werden, dass eine geringe Schwefeldüngegabe im Fall Roggen ausreicht. Aufgrund der geringen Schwefelbedürftigkeit eignet sich Roggen nur begrenzt als Extraktionspflanze zur Untersuchung von Sulfat.

Eindeutige Effekte können hingegen bei der Betrachtung von Rotklee und Rotkleegras festgestellt werden. Eine deutliche Ertragssteigerung wurde bei Rotklee durch die Gabe von 1,334 und 2,001 mg S Gefäß$^{-1}$ erzielt. Dies entspricht der Gabe von 60 bzw. 90 kg S ha^{-1}. Eine unter Vorbehalt formulierte Düngeempfehlung für ökologische Betriebe würde die Variante mit der Gabe von 60 kg S ha^{-1} favorisieren. Werden zusätzlich ökonomische Aspekte in die Betrachtung miteinbezogen, wäre es bei den geringen Unterschieden der zwei Düngevarianten empfehlenswert, die Düngegabe mit dem geringeren finanziellen Aufwand anzuwenden. Diese Empfehlung deckt sich mit Düngeexperimenten im Feldversuch (URBATZKA et al. 2013). Die optimale Schwefelkonzentration der Pflanze Rotklee liegt bei Werten um 0,2%. Diese Werte überschneiden sich mit den Ergebnissen, die in Feldversuchen am Gladbacherhof ermittelt wurden (BECKER et al. 2014). Aus der Kombination von Gefäß- und Feldversuch kann schlussgefolgert werden, dass Leguminosen, die eine Schwefelkonzentration über 0,2% aufweisen, in einem guten Schwefelversorgungsbereich liegen. Ähnliche Empfehlungen können für Rotkleegras ausgesprochen werden.

Rotklee und Rotkleegrasgemenge eignen sich als Versuchspflanzen zur Detektion der Schwefelbedürftigkeit. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind für beide Pflanzenarten als weitgehend positiv zu bewerten. Vor allem unter dem Aspekt, dass sie im ökologischen Landbau von großer Bedeutung sind und Schwefel nachweislich zu einer Steigerung der Stickstoffaufnahme führt (PAULSEN 2005, SCHERER und LANGE 1995). Eine signifikante Steigerung der Stickstoffaufnahme konnte in diesem Gefäßversuch allerdings nicht beobachtet werden.

Nach Bloem und Haneklaus (2002) liegt die Düngeempfehlung für Raps bei 40 bis 80 kg S ha^{-1}. Diese Empfehlung kann aus den Ergebnissen des vorliegenden Gefäßversuchs nicht bestätigt werden. Aufgrund des pathogenen Schaderregerbefalls der Versuchspflanzen Gelbsenf und Raps können die ermittelten Ergebnisse vernachlässigt werden.

Alle fünf Versuchspflanzen weisen sehr weite N/S-Verhältnisse auf, die deutlich über den Werten der Forschungsliteratur liegen (BERGMANN 1993). In einem vergleichbaren Gefäßversuch von Kühn (1972) lagen die N/S-Verhältnisse der Düngegabe in einem wesentlich engeren Verhältnis. Bei der Quarzsandvariante nach Kühn betrug das N/S-Verhältnis 4,7:1. Die Variante, die Boden als Medium nutzte, wurde mit einem höheren Gehalt an Schwefel versetzt, wodurch das Verhältnis auf 3,57:1 fiel. Die N/S-Verhältnisse der

Düngegaben dieses Versuchs beliefen sich bei der Gabe von 50.1 mg N zu 0,667 mg S auf 75,1:1. Bei der Steigerung der Schwefelgabe verengte sich das Verhältnis auf 37,6:1. Das N/S-Verhältnis bei einer Düngemenge von 2,001 mg Schwefel lag bei 25:1. Das engste N/S-Verhältnis der Düngegabe lag bei 6,3:1 und wurde bei den Varianten mit einer Schwefelgabe von 8,004 mg S Gefäß$^{-1}$ erreicht. Aufgrund von Stickstoffmangelsymptomen im Vorversuch wurde die Stickstoffgabe in diesem Gefäßversuch deutlich gesteigert, was im Anschluss zu sehr weiten N/S-Verhältnissen führte. Aufgrund des Überangebotes mit Stickstoff sind die ermittelten N/S-Verhältnisse in diesem Versuch nicht aussagekräftig.

Weitere Abweichungen von den Literaturwerten zeigt der Vergleich der ermittelten Schwefel- und Stickstoffkonzentrationen. Im Beispiel von Raps werden bei einer optimalen Nährstoffversorgung Konzentrationen von ca. 0,2% in diesem Versuch erreicht. Forschungsliteraturwerte geben hingegen an, dass Schwefelmangelsymptome in Erscheinung treten, sobald die Schwefelkonzentration im Spross bei unter 0,3% liegt (LÜTKE-ENTRUP und OEHMICHEN 2000). Diese Richtwerte wurden von den fünf Versuchspflanzen Roggen, Rotklee, Rotkleegras, Raps und Gelbsenf in den meisten Fällen unterschritten. Die Keimpflanzen mit einer guten Nährstoffversorgung bildeten vermehrt Spross- und Wurzelmasse aus, was zu Verdünnungseffekten führte. Dies erklärt den großen Unterschied zwischen den ermittelten Werten und den Werten, die in der Forschungsliteratur angegeben werden.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Kulturpflanzen bezogen auf die aufgenommene Schwefelmenge aus dem Boden, fallen deutliche Unterschiede auf (vgl. Abb. 14; 25; 37; 46). Diese äußerten sich durch unterschiedlich hohe Schwefelgehalte, die in den Versuchspflanzen detektiert wurden. Die größten Schwefelmengen wurden von der Kulturpflanze Raps aus dem Boden aufgenommen. Diese Mengen lagen bei 0,29 mg S Gefäß$^{-1}$. Die Versuchspflanzen Rotklee und Roggen entzogen dem Boden beide 0,23 mg S Gefäß$^{-1}$. Der Versuchspflanze Rotkleegras konnte der geringste Schwefelentzug aus dem Boden nachgewiesen werden. Der Gehalt lag bei 0,056 mg S Gefäß$^{-1}$. Weitere Auffälligkeiten sind in den Abbildungen 14, 25, 37 und 46 erkennbar. Dort wird den Varianten, die ausschließlich mit NPK und Mikronährstoffdünger versetzt wurden, ein Effekt nachgewiesen, der auf eine vermeintliche Schwefeldüngung hindeutet. Es kann die Vermutung aufgestellt werden, dass durch ein stärkeres Pflanzen- und Wurzelwachstum mehr Sulfat aus der Bodensubstanz

gelöst werden kann. Diese Erkenntnis ist im ursprünglichen Versuch von Neubauer nicht betrachtet worden. Somit entstehen durch die Gabe von NPK- und Mikronährstoffen veränderte Bedingungen, die sich positiv auf die Sulfataufnahme aus dem Boden auswirken. Gerade N_2-fixierende Leguminosen und Raps sind in der Lage, durch Wurzelexsudate schwer lösliche Nährstoffe zu mobilisieren (SCHUBERT 2006). Dies geschieht hauptsächlich durch die Ansäuerung des Bodens mit Protonen. Zwar wird Sulfat bei geringen pH-Werten adsorbiert, aber aufgrund der kurzen Zeitspanne und den geringen Mengen an Boden, ist eine mögliche Adsorption zu vernachlässigen. Folglich können bei einer ausreichenden Versorgung mit wichtigen Nährstoffen größere Schwefelmengen aus dem Boden erschlossen werden. Dieser Effekt ist vor allem bei den Versuchspflanzen Raps, Rotklee und Rotkleegras zu beobachten, was mit Literaturangaben übereinstimmt (SCHUBERT 2006). Dies stellt einen Erklärungsansatz der zusätzlich aufgefundenen Schwefelmenge in den Varianten B1 dar. Demzufolge kann abgeleitet werden, dass die Varianten mit zusätzlicher NPK- und Mikronährlösung einen Vorteil in der Sulfataufnahme hatten und deshalb eindeutige Effekte erzielen konnten. Die Aufnahme bei den ungedüngten Varianten spiegelt hingegen nur einen geringen Effekt wieder und kann deshalb vernachlässigt werden.

5 Fazit

Die erste Hypothese, die in dieser Arbeit behandelt werden sollte war, ob die verschiedenen Kulturpflanzen sich in unterschiedlich guter Qualität eignen, um die Schwefelverfügbarkeit von Böden darzustellen. Bei den statistischen Auswertungen der Analysen von Roggen, Rotklee, Rotkleegras, Raps und Gelbsenf zeigten sich deutliche Unterschiede, die die erste Hypothese verifizierten. Diese äußerten sich zum einen durch den kulturpflanzenspezifischen Schwefelentzug aus dem Boden und zum anderen durch unterschiedlich hohe Trockenmasseertragssteigerungen, die durch Schwefel bedingt worden waren. Besonders gut zeigten Rotklee und Rotkleegras die Schwefelbedürftigkeit an. Roggen hingegen zeigte keine signifikanten Effekte, die auf eine Schwefelgabe zurückzuführen waren. Raps war von den fünf Kulturpflanzen in der Lage, die höchsten Schwefelgehalte aus dem Boden zu extrahieren. Zudem haben die Versuchspflanzen gezeigt, dass durch die Gabe von NPK- und Mikronährstoffen ein zusätzlicher Effekt auf die Schwefelausnutzung entsteht. Dadurch wird verdeutlicht, dass es sich bei dem Gefäßversuch um ein biologisches System handelt, welches auf Einflüsse, wie beispielsweise ein verändertes Nährstoffangebot, reagiert.

Die zweite Hypothese sagte aus, dass durch eine Steigerung des Schwefelangebots eine Wirkung auf Trockenmasse, Stickstoff- und Schwefelkonzentrationen im Gefäßversuch nach Neubauer eintritt. Diese Aussage kann mit den Ergebnissen dieses Versuchs bewiesen werden. Bei den Versuchspflanzen Rotkleegras tritt eine signifikante Ertragssteigerung ab einer Gabe von 1,334 mg S Gefäß$^{-1}$ ein. Rotklee verzeichnet einen signifikanten Zuwachs ab einer Gabe von 2,001 mg S Gefäß$^{-1}$. Weiter verstärkt wird diese Hypothese dadurch, dass die Schwefelkonzentrationen mit steigender Schwefelgabe ansteigen. Eine Auffälligkeit hierbei ist, dass die Varianten, die eine NPK- und Mikronährstoffdüngung erhielten, mehr Schwefel aufnehmen konnten. Dies zeigt sich vor allem bei der Betrachtung der Schwefelgehalte der Versuchspflanzen Roggen, Rotklee, Rotkleegras und Raps. Nach Neubauer werden in den 17 Tagen alle pflanzenverfügbaren Nährstoffe des Bodens von den Pflanzen aufgenommen. Folglich nutzten die Varianten ohne NPK- und Mikronährstoffdüngung alle, unter diesen Bedingungen verfügbaren, Nährstoffe des Bodens aus. Durch die Gabe von zusätzlichen Nährstoffen veränderte sich die Pflanzenaufnahme dahingehend, dass mehr Schwefel gelöst werden konnte. Aus den Ergebnissen der Pflanzenanalysen lässt sich ableiten, dass die

Steigerung des Schwefelangebots vor allem bei den NPK- und mikronährstoffgedüngten Varianten signifikante Wirkungen aufzeigt.

Die dritte Hypothese besagt, dass sich durch die Anwendung der Neubauer Methode Aussagen über Düngeempfehlungen ableiten lassen. Die Neubauer Methode eignet sich nicht um exakte Düngeempfehlungen zu formulieren. Dennoch eignet sie sich um Empfehlungen über die optimale Schwefelversorgung der Kulturpflanzen abzuleiten. Gerade bei den Versuchspflanzen Rotklee und Rotkleegras konnte das Optimum der Schwefelversorgung bei einer Gabe zwischen 1,334 und 2,001 mg Gefäß$^{-1}$ gefunden werden. Diese Ableitungen ergaben sich aus der statistischen Auswertung des Trockenmasseertrages, die zudem Ableitungen über die optimalen N/S-Konzentrationen unter diesen Bedingungen erlauben. Anhand der Auswertungen hat sich gezeigt, dass Rotklee ab einer Stickstoffkonzentration von 3,2% bis 3,7% im optimalen Versorgungsbereich liegt. Werden diese Konzentrationen nicht erreicht, kann darauf geschlossen werden, dass die Bedingungen für die Pflanze nicht optimal sind. Die Schwefelkonzentrationen im Spross der Versuchspflanze Rotklee sind optimal wenn Werte von 0,2% überschritten werden. Liegen geringere Konzentrationen vor, ist dies ein Hinweis auf einen Schwefelmangel.

Die Neubauer Methode ist eine gute Möglichkeit um die Schwefelbedürftigkeit von Kulturpflanzen darzustellen. Die gezielten Auswertungen dieses Versuchs sind als positiv zu bewerten und lieferten Einblicke in die Reaktion der Pflanzenarten auf steigende Schwefelgaben. Die Neubauer Methode ist im Vergleich zu anderen Methoden, wie beispielsweise die Bodenuntersuchung auf den S_{min}-Gehalt, als kritisch zu betrachten. Begründet liegt dies vor allem darin, dass die Neubauer Methode sich deutlich aufwändiger gestaltet. Dennoch bietet sie eine gute Möglichkeit um die gängigen, schnellen Methoden zu überprüfen und Empfehlungen aus Feldversuchen zu verifizieren.

.

6 Ausblick

Der vorliegende Gefäßversuch hat verdeutlicht, dass die Neubauer Methode sich eignet um Empfehlungen der optimalen Schwefelversorgungszustände bei Kulturpflanzen abzuleiten. Wobei festzustellen ist, dass sich die Durchführung einer solchen Methode als äußerst aufwendig gestaltet. Aussagen über den optimalen Schwefelgehalt von Böden konnten anhand dieses Gefäßversuchs nicht formuliert werden.

Die Wiederholbarkeit dieses Gefäßversuches ist nach den Vergleichen mit Ergebnissen des Vorversuchs gewährleistet. Aufgrund des pathogenen Befalls bei Gelbsenf differierten die Ergebnisse bei dieser Versuchspflanze deutlich. Zudem gab es Unterschiede bei der Analyse verschiedener Parameter, wie Stickstoffkonzentration und N/S-Verhältnisse. Dies liegt in einer veränderten Düngegabe begründet. Es konnte festgestellt werden, dass eine Überversorgung mit Stickstoff vorlag. Aus diesem Grund ist es für zukünftige Versuche empfehlenswert, die Stickstoffgabe deutlich zu reduzieren. Durch eine Reduktion der Stickstoffgabe können wiederum engere N/S-Verhältnisse erzielt werden, die sich gegebenenfalls mit den Literaturangaben decken.

Aufgrund des hohen Schwefelbedarfs der Kruziferen, wäre es sinnvoll, einen solchen Gefäßversuch für Gelbsenf und Raps erneut anzusetzen. Diese Ergebnisse könnten genutzt werden um den Effekt von Schwefel auf das Pflanzenwachstum dieser Kulturpflanzen genauer zu betrachten. Ein Verzicht auf die Gabe von NPK- und Mikronährlösungen erscheint nicht sinnvoll, da durch eine Gabe die Effekte der Schwefeldüngung verstärkt wurden. Die geringe Schwefelbedürftigkeit von Roggen lässt sich in diesem Versuch sehr gut belegen. In der kurzen Versuchsdauer von 17 Tagen ist die Aufnahme von Schwefel zwar gegeben, allerdings wirkt sich diese nicht signifikant auf die Trockenmassebildung aus und kann demnach vernachlässigt werden. Aus diesem Grund eignet sich Roggen nur bedingt als Extraktionspflanze für die Schwefelaufnahme aus dem Boden.

Ein Ansatzpunkt für die Ausweitung eines solchen Gefäßversuchs besteht darin, die Untersuchung der Schwefelverfügbarkeit auf verschiedene Böden anzuwenden. Vor allem leichte Böden weisen Schwefelmangel auf. In diesem Versuch hingegen handelte es sich um einen schluffreichen Boden, der allgemein als sehr nährstoffreich gilt. Eine Erweiterung auf sandige, humusarme Böden könnte diesbezüglich neue Einblicke in die Schwefelverfügbarkeit verschiedener Standorte liefern. Die Kombination derartiger

Untersuchungen und Feldversuchen könnten genutzt werden um Aussagen über die Schwefelverfügbarkeit verschiedener Standorte präziser zu gestalten. Zudem wäre es möglich die Ergebnisse etablierter Methoden, wie die Bodenuntersuchung, anhand solcher Gefäßversuche zu validieren. In jedem Fall besteht ein Forschungsbedarf in der Ermittlung der Schwefelverfügbarkeit von Böden, um auch für Kulturpflanzen, die im ökologischen Landbau wertvoll sind, Düngeempfehlungen formulieren zu können.

7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Gefäßversuchs zeigen deutlich, welche bedeutende Rolle Schwefel in der Pflanzenernährung spielt. Besonders die Versuchspflanzen Rotklee und Rotkleegras zeigten den positiven Effekt der Schwefelgabe auf.

Der Versuchsansatz orientierte sich an den Vorgaben von Hugo Neubauer und sollte die Anwendbarkeit dieser Methode auf den Nährstoff Schwefel prüfen. Die Versuchspflanzen dieses Gefäßversuchs wurden in 10 verschiedene Düngevarianten aufgeteilt. Eine Variante wurde ausschließlich auf Quarzsand angesetzt, um den Nährstoffgehalt des Kornes ermitteln zu können. Vier Varianten wurden mit 100 g Boden versetzt und in unterschiedliche Schwefeldüngestufen eingeteilt. Davon wurde eine Variante ohne jegliche Düngegabe d.h. ausschließlich auf dem Boden angesetzt. Diese diente der Ermittlung der Mineralstofflieferung aus dem Boden. Im Vergleich dazu wurden fünf Varianten mit NPK- und Mikronährstoffen versetzt und unterschiedlichen Schwefeldüngergaben ausgesetzt. Um eine Aussage über den Effekt der NPK- und Mikrodüngung formulieren zu können, wurde bei einer Variante auf die Schwefelgabe verzichtet. Die Genauigkeit der Messwerte wurde dadurch gewährleistet, dass pro Variante vier Wiederholungen angesetzt wurden. Somit umfasste dieser Keimpflanzenversuch insgesamt 200 Gefäße.

Mit Hilfe dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Neubauer Methode auf den Nährstoff Schwefel anwendbar ist. Es konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Stickstoff- und Schwefelgabe festgestellt werden, die es notwendig macht, den Kulturpflanzen beide Nährstoffe in einem ausgewogenen Verhältnis zur Verfügung zu stellen (Schnug et al. 1993). Darüber hinaus konnten Ergebnisse aus Feldversuchen verifiziert werden, die für Futterleguminosen eine optimale Schwefelkonzentration ab 0,2% beschreiben (BECKER et al. 2014). Die Notwendigkeit der weiteren Forschung in Bezug auf die Schwefelverfügbarkeit von Böden wurde zudem durch diesen Gefäßversuch aufgezeigt. Da auch in der Zukunft kein Anstieg von Schwefelimmissionen in landwirtschaftliche Ökosysteme zu erwarten ist, besteht ein Bedarf der zusätzlichen Schwefeldüngung. Düngeempfehlungen sollten hierbei Hilfestellungen geben, sodass Schwefel nicht als ertragslimitierender Faktor wirkt. Denn wie schon das Gesetz vom Minimum besagt, ist der Nährstoff limitierend, der der Pflanze nicht ausreichend zur Verfügung steht (SCHUBERT, 2006).

Referenzen

Bailey, L.D. (1976): Nutrient requirements of fababeans, 20th Annual Manitoba Soil Science Meeting, University of Manitoba, Winnipeg, pp. 140-143

Baldocchi, D.D. (1993): Deposition of gaseous sulfur compounds to vegetation. In: De Kok, L.J., Stulen, I., Renneberg, H., Brunold, C., Rauser, W.E. (Eds.), Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants. SPB Academic Publishing Company, The Hague, pp. 271-293

Balík, J., Kulhánek M., Cerný, J., Száková, J., Pavlíková J. (2009): Differences in soil sulfur fractions due to limitation of atmospheric deposition. Plant, Soil and Environment, 55: pp. 344-352

Becker, K., Riffel, A., Fischinger, S.A., Leithold, G. (2014): Benefit of sulfate fertilization in Alfal-fa- and clover grass mixtures in organic farming, In: Thuenen Report, Nr. 20, pp. 535-538.

Bergmann, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose, Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 3. Auflage

Bloem, E., Haneklaus, S. (2002): Warum und wie viel Schwefel düngen, In: Innovation 1/2002

Bloem, E., Haneklaus, S., Schnug, E. (2007): Schwefel-induzierte Resistenz (SIR)-Schwefeldüngung als nachhaltige Strategie zur Gesunderhaltung von Pflanzen, In: Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Journal of Consumer Protection and Food Safety, pp. 7-12

Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabe, Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg, 16. Auflage, pp. 421-423

Booth E.J., Walker, K.C., Schnug, E. (1991): Effect of site, foliar sulphur and nitrogen application on glucosinolate contend and yield of oilseed rape (*Brassica napus L.*), Proc. 8th Int. Rapeseed Congress, Saskatoon, Canada, pp.567-572

Böhm, H. (2013): Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf den Ertrag und die Nährstoffzusammensetzung eines Kleegrasbestandes, Ideal und Wirklichkeit-Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung, Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, pp. 216-219

Ceccotti, S., Messick, D. (1994): Plant nutrient suphur: A global review of crop requirements, supply, and environmental impact on nutrient balance, In: Norwegian Journal of Agricultural Sciences, Supplement No. 15, pp. 7-26

De Kok, L. J., Castro, A., Durenkamp, M., Stuiver C.E.E., Westerman, S., Yang, L., Stulen, I. (2002): Sulphur in plant physiology, Reprinted from the International Fertiliser Society, York, UK, Proceedings No. 500., pp. 55-80

Dierich, D. (2013): Untersuchung zur Schwefelverfügbarkeit von Böden mithilfe von Gefäßversuchen in Anlehnung an die Neubauermethode, univ.Bachelorthesis, Universität Gießen

DLG (2012):Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Schwefel- Düngung effizient gestalten, In: DLG-Merkblatt 373, 1.Auflage

Droux, M. (2004): Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey. In: Photosynthesis Research, 79, pp. 331-338

Eppendorfer, W.H., Bille, S.W. (1992): Development of S-deficiency of faba bean plants as reflected in total-S, SO_4^{2-} - S and aspartic acid concentrations at various stages of growth. Proc. 2nd ESA congress, Warwick, England pp. 242-243

Fischinger S.A., Becker, K., Leithold, G. (2011): Auswirkungen unterschiedlicher S Versorgungszustände auf den N Flächenertrag eines Luzerne-Kleegrasbestandes, Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis. Beitr. 11. Wissenschafts- Tagung Ökologischer Landbau Band 1, Berlin, pp. 183-184

Gupta A.K., Paulsen, H.M, Schnug, E. (1997): Sulphur nutrition and quality of oilseed rape. Fertilisation for sustainable plant production and soil fertility- 11th World Fertiliser Congressof CIEC, pp. 189-194

Haneklaus, S., Bloem, E. (2000): Sulphur in Agroecosystems. Fol. Univ.Agric.Stietin, 204 Agricultura 81: pp. 17-23

Köppen, D. (2004): Bodenfruchtbarkeit im Agrarökosystem, Teil 1, Verlag Dr. Kovač, Hamburg, pp.413-416

Kühn, H. (1972): Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung, Erster Band, 2. Hälfte, Springer Verlag Wien/New York, pp. 1153-1163

Leusteck, T., Saito, K. (1999): Sulphate transport and the assimilation in plants, Plant Physiol. 120, pp. 637-643

Link, A. (1997): Bodenuntersuchung (Smin) und Pflanzenanalyse zur Vorhersage des Schwefeldüngerbedarfs von Winterraps (*Brassica napus L.*), Verlag Grauer, Stuttgart

Link, A. (2002): Schwefeldüngung, In: Tagungsband zur 10. Thüringer Düngungstagung, Schriftenreihe Heft 11, pp.33

Lucheta, A., Lambais, M. (2012): Sulfur in Agriculture, In: R.Bras.Ci.Solo, 36: pp. 1369-1379

Lütke Entrup, N., Oehmichen, J. (2000): Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 1: Grundlagen, Verlag TH.Mann, Gelsenkirchen, pp. 455-465

Marscher, H. (2003): Mineral Nutrition of Higher Plants, Academic Press, London, Second Edition pp. 255-265

Martini, J.A., Mutters, R.G. (1984): Effect of liming and fertilization on sulfur availability, mobility, and uptake in cultivated soils in South Caroina. Soil Sci. 138, pp. 403-410

Neubauer, H. (1929): 16. Mitteilung über die Keimpflanzenmethode, In: Zeitschrift für Bodenernährung, Düngung, Bodenkunde, Volume 8, pp.219-239

Neubauer, H. (1939): Die Keimpflanzenmethode: ein physiologisch-chemisches Verfahren zur Bestimmung der Pflanzen zugänglichen Bodennährstoffe Kalium und Phosphor, Verlagsgesellschaft für Ackerbau, Berlin

Neubauer, H. (1946): Die Ausdehnung der Keimpflanzenmethode auf die Stickstoffbestimmung im Boden und in Komposterden In: Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, 37 (82.) Band, Heft 2, pp. 97-110

Paulsen, H.M. (2005): Sulphur in organic faming, In: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 283, pp. 105-111

Pendersen C.A., Knudsen L., Schnug, E. (1998): Sulphur fertilisation. In : Schnug E(ed) Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Acad.Publ., The Netherlands, pp. 115-134

Pissarek, H.P., Schnug, E. (1982): Kalium und Schwefel-Minimumfaktoren des schleswig-holsteinischen Rapsanbau, Kali-Briefe 16: pp.77-84

Rendig, V.V., Oputa, C., McComb, E.A (1976): Effects of sulphur deficiency on non-protein nitrogen, soluble sugars, and N/S ratios in young corn (Zea mays L.) plants. In: Plant and Soil 44, pp.423-437

Saalbach, E. (1970): Über die Bestimmung des Schwefelversorgungsgrades von Hafer, In: Pflanzenernährung und Bodenkunde. 127, pp. 92-100

Saalbach, E. (1973): The effect of sulphur, magnesium, and sodium on yield and quality of agricultural crops, Pontificiae Acad. Sci.Scripta Varia Nr. 38, pp. 541-589

Saalbach, E. (1984): Die Bedeutung atmosphärischer Schwefelverbindungen für landwirtschaftliche Kulturpflanzen. Angew.Bot. 58, pp. 147-156

Salac, I. (2005): Influence of the sulphur and nitrogen supply on S metabolites involved in Sul-phur Induced Resistance (SIR) of Brassica napus L., In: Landbauforschung Völkerrode Sonderheft 277, p. 31-65, pp. 115-121

Scherer, H.W. (2001): Sulphur in crop production- Invited Paper, In: European Journal of Agronomy 14, pp. 81-111

Scherer, H.W. Pacyne, S., Spoth, K.R., Schulz, M. (2008): Low levels of ferrodoxin, ATP and leghömoglobin contribute to limited N2 fixation of peas (Pisum sativum L.) and alfalfa (Medicago sativa L.) under S deficiency conditions. Biol Fert Soils 44: pp. 909-916

Scherer, H.W., Pacyna, S., Manthey, N.,Schulz. M. (2006): Sulphur supply to peas (Pisum sativum L.) influences symbiotic N2 fixation, In: Plant Soil Envirionment., 52, (2), pp. 72-77

Scherer, H.W., Welp, G., Förster S. (2012): Sulfur fractions in particle-size seperates as influenced by long-term application of mineral and organic fertilizers, In: Plant Soil Environ., 58, (5): pp. 242-248

Scherer, H.W., Lange, A. (1996): N2 fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization In: Biol Fertil Soils 1996, 23: pp. 449-453

Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, pp. 151-152

Schnug, E. (1992): Baking quality and sulphur content of wheat.I.influence of grain sulphur and protein concentrations on loaf volume. Sulphur in Agriculture 16: pp. 31-34. The Sulphur Institute, Washington, DC.

Schnug, E., Haneklaus, S. (1998): Diagnosis of sulfur nutrition. In Schnug, E. (Ed), Sulphur in Agroecosystems, Kluwer Academic Press, The Netherlands, pp. 1-38

Schnug, E., Haneklaus, S. Murphy, D. (1993): Impact of sulphur fertilisation on fertiliser nitrogen efficiency, In: Sulphur in Agriculture 17, pp. 8-12

Schoenau, J., Mahli, S., (2008): Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility. In: JEZ. J., ed. Sulfur: A missing link between soils, crops and nutrition. Madison, American Society of Agronomy, pp. 1-10

Schubert, S. (2006): Pflanzenernährung- Grundwissen Bachelor, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart 2006, pp. 139-146

Schubert, S. (2008): Biochemie, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, pp. 204-212

Urbatzka, P., Schneider, R., Offenberger, K., Becker, K., Riffel, A., Fischinger, S.A., Leithold, G. (2013): Schwefeldüngung im Ökolandbau, Schwefelmangel auch im Kleegras, In: Ökologie und Landbau 166, 02/2013, pp. 36-38

Zorn, W.,Marks, G., Heß, H.,Bergmann, W. (2013): Handbuch zur visuellen Diagnostik von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage

Online Referenzen

Effizient Düngen (2014): Düngeempfehlung Winterroggen, URL: http://www.effizientduengen.de/files/winterroggen.php, Abrufdatum: 01.10.2014

Eurochem (2014): Eurochem Agro, Schwefelschätzrahmen, URL: http://de.eurochemagro.com/service/schatzrahmen/schatzrahmen-ackerbau/, Abrufdatum: 08.10.2014

Fischinger, S.A., Becker, K. (2011): Schwefel- vom Überfluss zum ertragsbegrenzenden Faktor, Ökolandbau.de - Das Informationsportal, URL: http://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/allgemeinerpflanzenbau/duengung/schwefelduengung/, Abrufdatum: 08.10.2014

Mücke, M. (2011): Schwefel-Muss im Öko-Landbau dieser Nährstoff viel stärker beachtet werden, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, URL: http://www.oekolandbau.nrw.de/pdf/pflanzenbau/SchwefelMueckeNaumburg_2011.pdf, Abrufdatum: 28.09.2014

Rapool (2014): Rapool- Der Raps-, Wurzelhals- und Stängelfäule (Phoma lingam). URL: http://www.rapool.de/index.cfm/nav/168/article/416.html, Abrufdatum: 11.11.2014

UBA (2014): Umweltbundesamt, Schwefeldioxidemissionen, URL: http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwefeldioxid-emissionen Abrufdatum: 28.09.2014

VDLUFA (2000): Schwefelversorgung und Kulturpflanzen-Bedarfsprognose und Düngung- URL: http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/03-schwefel.pdf, Abrufdatum: 01.10.2014

Anhang

Tabelle 7: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Roggen in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%).

Variante	Trocken-masse [g]	Stickstoff-konzentration [%]	Schwefel-konzentration [%]	Stickstoff-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	Schwefel-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	N/S-Verhältnis
QS	1,4 a	1,5 ab	0,14 ab	21,7 a	2,1 a	10,5
A1	1,9 a	1,2 ab	0,11 ab	22,5 a	2,1 a	11,5
A2	1,9 a	1,2 ab	0,14 ab	22,1 a	2,7 a	8,1
A3	1,7 a	1,2 ab	0,12 ab	21,3 a	2,1 a	10,1
A4	2,1 a	1,1 a	0,10 a	23,6 ab	2,3 a	11,1
B1	2,6 ab	1,6 b	0,10 a	40,3 ab	2,7 a	15,1
B2	4,0 b	1,3 ab	0,10 a	50,9 b	4,0 a	12,8
B3	3,1 ab	1,4 ab	0,10 a	45,1 ab	3,0 a	14,9
B4	2,9 ab	1,2 ab	0,09 a	37,7 ab	2,6 a	13,5
B5	2,7 ab	1,6 b	0,16 b	42,9 ab	4,2 a	10,1

Tabelle 8: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Rotklee in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%).

Variante	Trocken-masse [g]	Stickstoff-konzentration [%]	Schwefel-konzentration [%]	Stickstoff-gehalt [mg Gefäß-1]	Schwefel-gehalt [mg Gefäß-1]	N/S-Verhältnis
QS	0,21 a	3,7 bcd	0,27 bcd	8,0 a	0,6 a	13,5
A1	0,45 ab	2,9 ab	0,22 abc	13,2 ab	1,0 a	13,5
A2	0,49 ab	3,0 ab	0,25 abcd	14,7 abc	1,2 ab	11,9
A3	0,46 ab	3,1 ab	0,30 cd	14,0 abc	1,4 ab	10,1
A4	0,68 b	2,3 a	0,35 de	14,8 abc	2,3 bc	6,7
B1	0,53 ab	4,8 d	0,16 a	25,6 abc	0,9 a	29,8
B2	0,65 b	4,3 cd	0,18 ab	27,7 bc	1,2 a	24,0
B3	0,81 b	3,7 bcd	0,16 a	29,3 bc	1,3 ab	23,1
B4	0,74 b	3,6 cd	0,16 a	26,5 bc	1,0 a	22,6
B5	0,79 b	3,4 abc	0,44 d	26,6 bc	3,5 c	7,7

Tabelle 9: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Rotkleegras in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%).

Variante	Trocken-masse [g]	Stickstoff-konzentration [%]	Schwefel-konzentration [%]	Stickstoff-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	Schwefel-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	N/S-Verhältnis
QS	0,21 a	3,7 bcd	0,27 bcd	5,3 a	0,6 a	13,6
A1	0,45 ab	2,9 ab	0,22 abc	10,2 abcd	1,0 ab	13,5
A2	0,49 ab	3,0 ab	0,25 abcd	7,5 ab	0,9 ab	11,9
A3	0,46 ab	3,1 ab	0,30 cd	8,8 abc	1,1 ab	10,1
A4	0,68 b	2,3 a	0,35 de	9,8 abcd	1,5 b	6,7
B1	0,53 ab	4,8 d	0,16 a	28,7 d	0,9 ab	29,8
B2	0,62 b	4,3 cd	0,18 ab	23,8 abcd	0,9 ab	24,0
B3	0,81 b	3,7 bcd	0,16 a	23,3 abcd	1,4 ab	23,1
B4	0,74 b	3,6 bc	0,16 a	25,4 bcd	1,6 b	22,6
B5	0,79 b	3,4 abc	0,44 e	27,3 cd	3,4 c	7,7

Tabelle 10: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Raps in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%).

Variante	Trocken-masse [g]	Stickstoff-konzentration [%]	Schwefel-konzentration [%]	Stickstoff-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	Schwefel-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	N/S-Verhältnis
QS	0,35 a	1,8 a	0,35 cd	6,4 a	1,3 a	5,2
A1	0,41 a	2,0 a	0,32 bcd	8,3 a	1,3 a	6,4
A2	0,33 a	2,1 ab	0,33 bcd	7,4 a	1,1 a	6,5
A3	0,45 a	1,8 a	0,23 ab	7,9 a	1,1 a	7,6
A4	0,46 a	1,8 a	0,31 bcd	9,5 a	1,6 a	5,9
B1	0,40 a	1,9 a	0,18 a	7,9 a	0,7 a	10,7
B2	0,58 ab	2,3 ab	0,23 ab	15,7 ab	1,4 a	10,1
B3	0,55 ab	2,5 ab	0,26 abc	13,8 a	1,4 a	9,6
B4	0,54 ab	2,4 ab	0,28 abc	13,0 a	1,5 a	8,8
B5	0,89 b	2,9 b	0,40 d	26,1 b	3,4 b	7,2

Tabelle 11: Trockenmasse, Stickstoffkonzentration, Schwefelkonzentration, Stickstoffgehalt, Schwefelgehalt und N/S-Verhältnis in der Wurzel der Versuchspflanze Gelbsenf in %, in Abhängigkeit von den Düngevarianten. Die Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten an (nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von α= 5%).

Variante	Trocken-masse [g]	Stickstoff-konzentration [%]	Schwefel-konzentration [%]	Stickstoff-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	Schwefel-gehalt [mg Gefäß$^{-1}$]	N/S-Verhältnis
A1	0,40 a	2,0 ab	0,41 a	16,5 a	3,93 a	5,0
A2	0,85 a	1,5 a	0,34 a	16,5 a	4,29 a	4,3
A3	0,45 a	2,1 ab	0,51 a	13,8 a	4,44 a	4,2
A4	0,61 a	1,7 ab	0,42 a	15,6 b	5,42 ab	4,1
B1	0,78 a	2,9 b	0,35 a	54,8 b	3,61 a	8,3
B2	0,58 a	2,7 ab	0,36 a	54,1 b	4,39 a	7,5
B3	0,85 a	2,7 ab	0,36 a	57,2 b	4,82 a	7,5
B4	0,77 a	2,8 b	0,37 a	55,9 b	5,09 a	7,6
B5	1,30 a	2,7 ab	0,49 a	55,4 b	8,14 ab	5,5

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Masterarbeit selbstständig durch den Verfasser und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde, die benutzen Quellen wörtlich oder inhaltlich als solche kenntlich gemacht wurden und diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner Prüfungskommission vorgelegt wurde. Eine Überprüfung mit einer Anti-Plagiatssoftware wird geduldet.

Gießen, den 20 .11.2014

Madeleine Joana Bosold

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Leithold bedanken für die Einwilligung über den Gefäßversuch meine Masterthesis verfassen zu dürfen. Des Weiteren dafür, dass es mir ermöglicht wurde den gesamten Versuch zu begleiten.

Meinen besonderen Dank geht an Alexandra Riffel und Konstantin Becker, die mich mit Ideen, Anregungen und wichtigen Tipps während des Schreibens tatkräftig unterstützt haben. Ich konnte mich fast zu jeder Tageszeit, vor allem bei Alexandra Riffel melden, was mir bei akuten Fragen unglaublich geholfen hat. Es war eine tolle, zeitintensive und angenehme Betreuung, die mir persönlich noch tiefere Einblicke in die Forschung gegeben hat. Zudem möchte ich mich bei Maria Nägele bedanken, die gerade bei den CNS- Analysen mir mit Erklärungen und Hilfestellungen zur Seite stand.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Professur für Organischen Landbau bedanken. Dazu zählen vor allem Alexandra Riffel und Theresa Dannehl, die mich als HiWi über eine Zeit von 3 Jahre beschäftigten. Es war eine Arbeit, die mir zu jeder Zeit Spaß bereitet hat und sich nicht wirklich wie Arbeit anfühlte….Obwohl es teilweise wirklich schweißtreibend war. Danke für die Einblicke in die Forschung und die Einblicke in ein sehr angenehmes Arbeitsklima. Ich werde die Zeit vermissen.

Mein Dank geht auch an die Korrekturleser dieser Arbeit. Vor allem meine Schwester Sarah Bosold und Martha Lubosz, die viel Zeit investiert haben um die 114 Seiten zu durchforsten. Zudem möchte ich mich bei Nils Dudenhöfer, Jonathan Lorbach, Louisa Pestel, Katharina Martin, Lisa Nakath und Katharina Michelsons bedanken, die mir bei kleineren und größeren Fragen während des Schreibens zur Seite standen.

Ein Dankeschön geht auch an Anna Schückler, die mir eine schnelle und unkomplizierte Einweisung in SPSS gegeben hat. Ohne SPSS hätte ich vermutlich deutlich länger zur Auswertung der Daten gebraucht.

Ich möchte mich auch bei allen Freunden bedanken, die die Zeit in Gießen für mich bereichert haben und mich jederzeit motiviert und unterstützt haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Mutter bedanken, die mich moralisch während der gesamten Studienzeit unterstützt hat. Ohne sie wäre es mir nicht möglich gewesen das Studium in dieser Form zu absolvieren.