

Schwefelversorgung im Bioackerbau Zwischenbericht 2024



Aline Dallo

10. Februar 2025

Versionsnummer I

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Problemstellung	4
2. Kurzbeschreibung Projekt	4
3. Material und Methoden.....	5
3.1 Standorte und Versuchsdesign.....	5
3.2 Probenahmen, Bonituren und Analysen.....	9
3.3 Statistik.....	13
4. Resultate und Diskussion	13
4.1 Bodenuntersuchungen.....	13
4.2 Bonituren und SPAD	16
4.3 Ernteerhebung	17
4.4 Pflanzenanalysen.....	21
4.5 Qualitätsparameter	23
5. Schlussfolgerungen	23
6. Danksagung	25
7. Literatur.....	25
8. Anhang.....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsstandorte 2024	5
Tabelle 2: Düngeverfahren und ausgebrachte Schwefelmenge.....	6
Tabelle 3: Mit Hof-/Recyclingdüngern ausgebrachte Schwefelmenge	6
Tabelle 4: Daten der Feldarbeiten, Probenahmen und Bonituren sowie BBCH Stadium des Getreides zu diesem Zeitpunkt	9
Tabelle 5: Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte der Versuchsstandorte zu Vegetationsbeginn (0-30 cm)	10
Tabelle 6: S _{min} und N _{min} der Versuchsstandorte zu Vegetationsbeginn (Schicht = 0-30 cm).....	14

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsdesign im Dinkel (links) und Lage am Standort Kölliken (rechts)	7
Abbildung 2: Versuchsdesign im Weizen (links) und Lage am Standort Lommiswil Weihermatt (rechts).....	7
Abbildung 3: Situation an den Versuchsstandorten zum Zeitpunkt der S-Düngung (BBCH 29).....	8
Abbildung 4: Pflanzenproben entlang einem Laufmeter Getreidereihe (links) und SPAD Messungen (rechts).....	11

Abbildung 5: Ernteerhebung mit Holzrahmen 50 x 50 cm (links) und in Baumwollsäcke abgepackte Garben (rechts).....	12
Abbildung 6: Lufttrocknung der Garben in Baumwollsäcken (links) und Drusch der Körner (rechts)	12
Abbildung 7: S_{min} -Gehalt im Boden an drei Standorten mit Weizen	15
Abbildung 8: Totaler S-Gehalt (S_{tot}) im Boden an drei Standorten mit Weizen	17
Abbildung 10: Situation an der Versuchsstandorten zum Blütezeitpunkt (links) und zur Ernte (rechts).....	19
Abbildung 11: Kornertrag, Strohertrag, Unkraut-Biomasse, Anzahl Ähren pro m^2 sowie 100 Fesen Gewicht im Dinkelversuch	19
Abbildung 12: Kornertrag, Strohertrag, Unkraut-Biomasse und Tausendkorngewicht im Weizen	20
Abbildung 13: S-Konzentration, S-Aufnahme (pro Einheit), N-Konzentration und N/S-Verhältnis von Ganzpflanze und Fahnenblatt (Blütezeitpunkt) sowie Korn und Stroh (Erntezeitpunkt).....	22
Abbildung 14: Qualitätsparameter im Weizen: Feuchtgluten, Hektolitergewicht, Proteingehalt und Sedimentationswert nach Zeleny.....	24

I. Ausgangslage und Problemstellung

Schwefel (S) ist ein unverzichtbarer Nährstoff für Ackerkulturen und übernimmt im pflanzlichen Stoffwechsel eine zentrale Funktion, insbesondere als Bestandteil essentieller Aminosäuren und bei der Chlorophyllbildung. Ein Schwefelmangel führt zu Störungen der Photosynthese und vermindert Ertrag und Erntequalität [1-4]. Auch ein ausgewogenes Verhältnis von Schwefel und Stickstoff ist für die Proteinbildung wichtig, da die Aufnahme der beiden Nährstoffe gekoppelt ist. Durch Schwefelmangel wird zudem die biologische Stickstoff-Fixierung (BNF) beeinträchtigt, was zu Mindererträgen und tieferen Proteinkonzentrationen bei Leguminosen führt [7].

Die Pflanze nimmt Schwefel in Form von gelöstem Sulfat (SO_4^{2-}) auf, das in der Bodenlösung, ähnlich wie Nitrat (NO_3^-), sehr mobil und stark auswaschungsgefährdet ist. Der grösste Anteil des Schwefels im Boden ist jedoch in der organischen Fraktion gebunden und nicht pflanzenverfügbar [4]. Historisch waren Böden durch hohe Einträge aus der Atmosphäre ausreichend mit Schwefel versorgt. Durch strengere Luftreinhaltemassnahmen reduzierte sich die Schwefeldeposition drastisch von 70 auf 7 bis 10 kg Schwefel pro ha [3, 5]. Entsprechend ist Schwefelmangel bei bedürftigen Kulturen heute häufiger geworden. Besonders gefährdet sind durchlässige, sandige, skelettreiche und flachgründige Standorte sowie Böden mit geringem Gehalt an organischer Substanz. Auch hohe Niederschläge im Winterhalbjahr, wie sie aufgrund der Klimaerwärmung häufiger zu erwarten sind, erhöhen durch Sulfat-Auswaschung das Risiko für Schwefelmangel [1, 6].

Über die Schwefelversorgung im Schweizer Bioackerbau ist bislang wenig bekannt, da Schwefel in den üblichen Bodenanalysen-Paketen nicht enthalten ist. Zudem bleibt Schwefelmangel oft unerkannt, da seine Symptome leicht mit Stickstoffmangel verwechselt werden können [6]. Aufgrund des geringen Anteils an pflanzenverfügbarem Sulfat in organischen Düngern ist die Schwefelausnutzung im Anwendungsjahr gering. Darüber hinaus erfolgt die Nachlieferung aus dem Boden im Frühjahr langsam, was für Kulturen mit frühem und/oder hohem Schwefelbedarf, wie Winterraps oder Wintergetreide, zu spät sein kann [3, 8]. Ein unerkannter Schwefelmangel kann neben Mindererträgen zu Einbussen bei der Backqualität von Weizen und beim Ölgehalt von Raps führen [1, 4].

2. Kurzbeschreibung Projekt

Dieses Projekt hat das Ziel, einen Überblick über die Schwefelversorgung im Schweizer Bioackerbau zu geben und praktische Erfahrungen in der Analyse und Düngung von Schwefel zu sammeln. Über einen Zeitraum von vier Jahren werden auf Praxisbetrieben Feldversuche mit Schwefeldüngern aus der Betriebsmittelliste durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt auf den Kulturen Körner- und Futterleguminosen, Winterraps sowie Wintergetreide. Zu Beginn der Versuche werden Bodenproben entnommen und auf Schwefel- und Stickstoffgehalte analysiert. Der Einfluss der Schwefeldüngung wird durch Blattanalysen und Ertragsbonituren geprüft. Zusätzlich werden im Wintergetreide einmal innerhalb der vier Jahre Qualitätsparameter wie Proteingehalt und

Backqualität untersucht. Bei Futterleguminosen wird zudem der Effekt der Schwefeldüngung auf die Folgekultur betrachtet.

Die Resultate und Erkenntnisse des Projektes werden den Produzent*innen auf verschiedenen Kanälen zugänglich gemacht, beispielsweise an Flurgängen, über die Webseite Bioaktuell.ch, als Beiträge in der Fachpresse oder als FiBL Merkblatt. Zudem werden grundlegende Informationen zu Bedeutung, Aufnahme und Wirkung von Schwefel für die Praxis aufbereitet und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dadurch sollen die Produzent*innen befähigt werden Schwefelmangel zu erkennen und entsprechend zu reagieren um eine Limitierung der Ertragsbildung oder biologischen Stickstoff-Fixierung zu vermeiden. Mit einfachen Massnahmen können so Ertrag und Produktqualität im Bioackerbau verbessert werden.

3. Material und Methoden

3.1 Standorte und Versuchsdesign

Im Projektjahr 2024 wurden Versuche mit Schwefeldünger an einem Standort mit Dinkel und an vier Standorten mit Winterweizen durchgeführt (Tabelle 1). Die Kulturen wurden von den Betrieben praxisüblich bewirtschaftet und mit Hof- und Recyclingdüngern gedüngt. Die Felddaten sind in Anhang 1 beigelegt. Die Schwefeldünger wurden zusätzlich ausgebracht. Die mit den Hofdüngern ausgebrachten S-Mengen sind Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 1: Versuchsstandorte 2024

Kultur	Nr.	Ort, Kanton
Dinkel	I	Kölliken, AG
Winterweizen	2.1	Diessbach bei Büren, BE
	2.2	
	3.1	Lommiswil, SO
	3.2	

Im Dinkel wurde Elementarer Schwefel (ES) mit einem Gehalt von 90 % Schwefel in zwei Düngestufen (ES-28 mit 28 kg S/ha, ES-50 mit 50 kg S/ha) eingesetzt (Tabelle 2). Der Elementare Schwefel wurde Anfang März mit einer Sämaschine in Streifen von 6 m Breite und 60 m Länge mit zwei Wiederholungen ausgebracht (Abbildung 1, Abbildung 3). Im Winterweizen wurde neben Elementarem Schwefel auch Calciumsulfat/Gips (CaSO_4) mit 15 % Schwefel, 20 % Calcium und 1.8 % Magnesium (in Form von Magnesiumcarbonat) verwendet. Der Grund für die Erweiterung mit dem Sulfatschwefel im Weizen war, dass es sehr praxisrelevant erschien, zwei Schwefeldünger mit unterschiedlich schneller Verfügbarkeit auf derselben Fläche zu vergleichen. Das Versuchsdesign im Weizen bestand aus 9 Plots à 36 m² (6 x 6 m). Die drei Verfahren (0, ES, SO_4) wurden dabei dreimal wiederholt und randomisiert in drei Blöcken angeordnet (Abbildung 2). Beide Schwefeldünger wurden in abgewogenen Mengen Mitte März von Hand gestreut, wobei mit dem Elementaren Schwefel 60 kg S/ha und mit dem Calciumsulfat 30 kg S/ha ausgebracht wurde (Tabelle 2). Die Weizen- und Dinkelpflanzen waren zum Zeitpunkt der Düngung im BBCH Stadium 29 «Ende der Bestockung» (Abbildung 3).

Tabelle 2: Düngeverfahren und ausgebrachte Schwefelmenge

Kultur	Verfahren	Schwefeldünger	Düngemenge (kg/ha)	Schwefel (kg S/ha)
Dinkel	0	Kontrolle	0	0
	ES-28	Elementarer Schwefel (90 % S)	31	28
	ES-50	Elementarer Schwefel (90 % S)	55	50
Winterweizen	0	Kontrolle	0	0
	SO_4	Calciumsulfat (15 % S)	200	30
	ES	Elementarer Schwefel (90 % S)	66.6	60

Tabelle 3: Mit Hof-/Recyclingdüngern ausgebrachte Schwefelmenge

Standort Nr.	1	2.1	2.2	3.1	3.2
Rindergülle (m ³ /ha)	17	19.18	25.45	80	80
Verdünnung der Gülle (Schätzung)	1:3	1:1	1:1	1:3	1:3
Recyclingdünger (m ³ /ha)		33.76	33.76		
Schwefelmenge (kg S/ha)	1.99	6.51	7.98	9.36	9.36

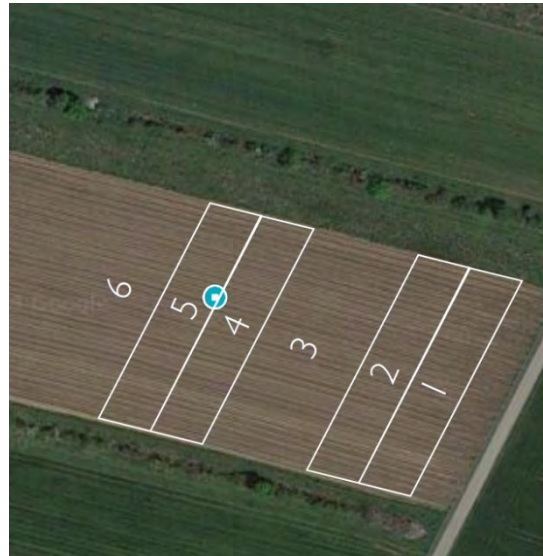
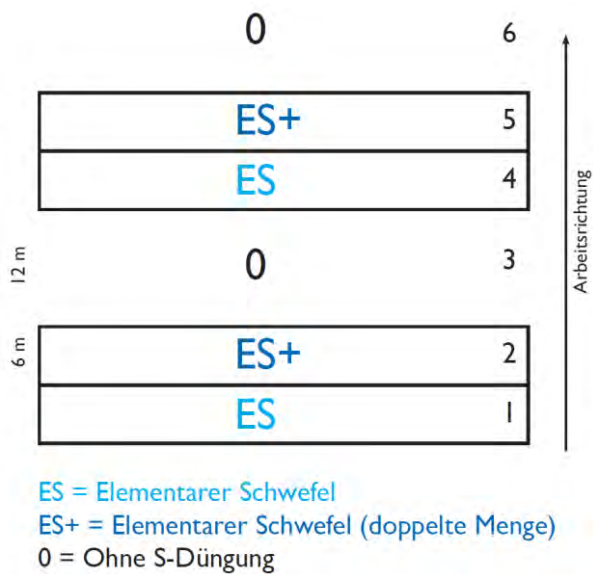


Abbildung 1: Versuchsdesign im Dinkel (links) und Lage am Standort Kölliken (rechts)

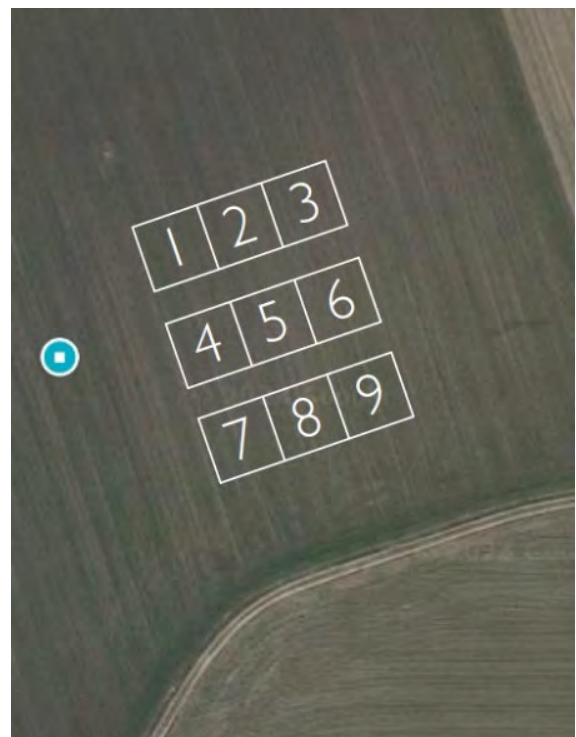
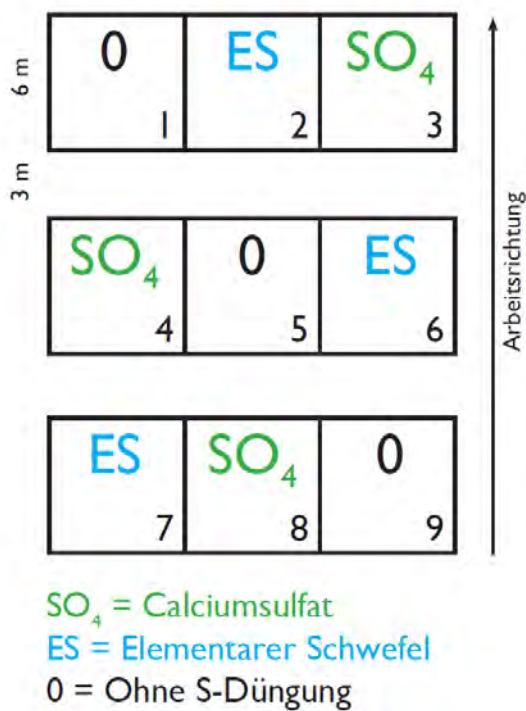


Abbildung 2: Versuchsdesign im Weizen (links) und Lage am Standort Lommiswil Weihermatt (rechts)

I



2.1



2.2



3.1



3.2



Abbildung 3: Situation an den Versuchsstandorten zum Zeitpunkt der S-Düngung (BBCH 29)

3.2 Probenahmen, Bonituren und Analysen

In Tabelle 4 sind alle durchgeführten Feldarbeiten, Probenahmen und Bonituren mit Datum und BBCH Stadium der Pflanzen aufgeführt.

Tabelle 4: Daten der Feldarbeiten, Probenahmen und Bonituren sowie BBCH Stadium des Getreides zu diesem Zeitpunkt

Beschreibung	Standort Nr.	Datum	BBCH
I. Bodenproben (Ausgangszustand)	I	23.02.2024	26-27
	2.2	07.02.2024	12-13
	2.1, 3.1, 3.2	07.02.2024	21-22
Schwefeldüngung	I	04.03.2024	29
	2.1, 2.2, 3.1, 3.2	20.03.2024	29
<i>Blütezeitpunkt:</i> Pflanzenproben (Fahnenblätter, Ganzpflanzen), 2. Bodenproben, Bodenbedeckung, Pflanzenhöhe und -gesundheit, SPAD	I	28.05.2024	61
	3.1, 3.2	04.06.2024	63-65
	2.1, 2.2	05.06.2024	63-65
<i>Erntezeitpunkt:</i> Pflanzenproben (Ganzpflanzen), Ernteerhebung (Getreide, Unkraut), Lagerbonitur	I	09.07.2024	92
	2.1, 2.2	15.07.2024	89
	3.1, 3.2	16.07.2024	87

Bodenproben

Bodenproben wurden zu Beginn der Vegetationsperiode (Ausgangszustand vor der Schwefeldüngung) und zum Zeitpunkt der Getreideblüte entnommen (Tabelle 4). Bei der Beprobung des Ausgangszustandes (1. Beprobung) wurden 20 Einstiche in einer Tiefe von 0-30 cm über die gesamte Parzelle verteilt entnommen und tiefgekühlt. Die Proben wurden vom Labor für Boden- und Umweltanalytik (LBU) auf Makronährstoffe (P, K, Mg), Humusgehalt (Titration), pH (H₂O) und Textur (Fühlprobe) untersucht (Tabelle 5). Zudem wurde N_{min} und S_{min} (CaCl₂ Extraktion gemäss Referenzmethoden von Agroscope) analysiert. Zum Zeitpunkt der Blüte (2. Beprobung) wurden an drei Standorten (2.1, 2.2, 3.1) erneut Bodenproben entnommen. Dazu wurden 8-10 Einstiche pro Plot aus den obersten 20 cm gesammelt und tiefgekühlt. Diese Proben wurden von der ETH Zürich (Geremia Pellegrini, A. Bera Efe) in Eschikon bei 40 °C getrocknet, gesiebt auf 2 mm und gemahlen. Anschliessend wurde S_{min} (CaCl₂ Extraktion) sowie der total S-Gehalt (ICP-MS/MS) gemessen.

Tabelle 5: Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte der Versuchsstandorte zu Vegetationsbeginn (0-30 cm)

		Standort Nr.				
		1	2.1	2.2	3.1	3.2
Ton	% G/G	16	21	16	21	16
Schluff	% G/G	21	31	21	31	31
Sand	% G/G	62.2	46.7	62.3	46.1	51.7
Bodenart	Fühlprobe	sandiger Lehm	Lehm	sandiger Lehm	Lehm	sandiger Lehm
pH-Wert	H ₂ O	6.5 schwach sauer	7.1 neutral	7.4 schwach alkalisch	6.2 schwach sauer	5.9 schwach sauer
Kalkvorprobe		-	-	-	-	-
Humus	%	2.2 schwach humos	2.43 schwach humos	1.81 humus-arm	3.57 schwach humos	2.77 schwach humos
Phosphor	CO ₂	mässig	angereichert	angereichert	angereichert	Vorrat
Kalium	CO ₂	genügend	Vorrat	Vorrat	genügend	mässig
Magnesium	CaCl ₂	genügend	genügend	genügend	genügend	Vorrat
Phosphor	EDTA	mässig	-	-	angereichert	Vorrat
Kalium	EDTA	genügend	genügend	genügend	genügend	mässig
Magnesium	EDTA	mässig	genügend	mässig	genügend	genügend

Pflanzenproben

Pflanzenproben wurden zur Blütezeit (Ende Mai / Anfang Juni) und zur Ernte (Mitte Juli) in allen Plots der fünf Standorte entnommen (Tabelle 4). Zur Blütezeit wurden sowohl Fahnenblätter als auch Ganzpflanzen gesammelt. Zur Ernte wurden erneut Ganzpflanzen gesammelt. Die Fahnenblätter wurden von 20 Pflanzen aus dem gesamten Plotbereich gesammelt. Für die Ganzpflanzen wurden alle Pflanzen entlang eines Meters einer Saatreihe bodennah abgeschnitten. Die Pflanzenproben wurden bei 60 °C im Trockenschrank getrocknet und die Fahnenblätter anschliessend komplett gemahlen. Die Ganzpflanzenproben wurden von der ETH Zürich in Eschikon mit der Schere zerkleinert, zur Homogenisierung gemischt und eine Teilprobe gemahlen.



Abbildung 4: Pflanzenproben entlang einem Laufmeter Getreidereihe (links) und SPAD Messungen (rechts)

Datenerhebungen zum Zeitpunkt der Blüte

Zum Zeitpunkt der Blüte wurden verschiedene Messungen und Bonituren durchgeführt (Tabelle 4). Mit einem SPAD 502 Plus Chlorophyll Meter (Konica Minolta) wurde der Chlorophyllgehalt von 15-20 Fahnenblätter pro Plot erfasst und gemittelt. Die Bodenbedeckung der Pflanzen wurde mit der App Canopeo (Bildanalyse) in 3 Messungen pro Plot erhoben und gemittelt. Ausserdem wurde die Pflanzenhöhe gemessen und die Pflanzengesundheit (Anteil gesundes Fahnenblatt, Blattflecken, Mehltau, Rost, Getreidehähnchen) bonitiert.

Ernteerhebung

Kurz vor der Ernte der gesamten Parzelle durch die Praxisbetriebe wurde eine Hand-ernte durchgeführt. Dazu wurden das Getreide mit steckbaren Holzrahmen (50 x 50 cm) und vier Pseudoreplikaten pro Plot abgesteckt (entspricht 1 m² Fläche) und die Halme innerhalb des Rahmens bodennah abgeschnitten. Die Garben wurden in Baumwollsäcken gesammelt und luftgetrocknet. Auch das Unkraut innerhalb der Steckrahmen wurde gesammelt, getrocknet und gewogen. Vor der Handernte wurde eine Lagerbonitur durchgeführt. Mit einem Standmähdrescher von Haldrup wurde das Korn vom Stroh getrennt. Die Körner wurden gewogen, eine Teilprobe getrocknet und der Ertrag auf 14,5 % Feuchte normiert. Beim Dinkel wurden die Fesen für die weitere Analyse verwendet. Das Tausendkorngewicht (TKG) wurde mit dem Körnerzählgerät Contador (Pfeuffer) erhoben.



Abbildung 5: Ernteerhebung mit Holzrahmen 50 x 50 cm (links) und in Baumwollsäcke abgepackte Garben (rechts)

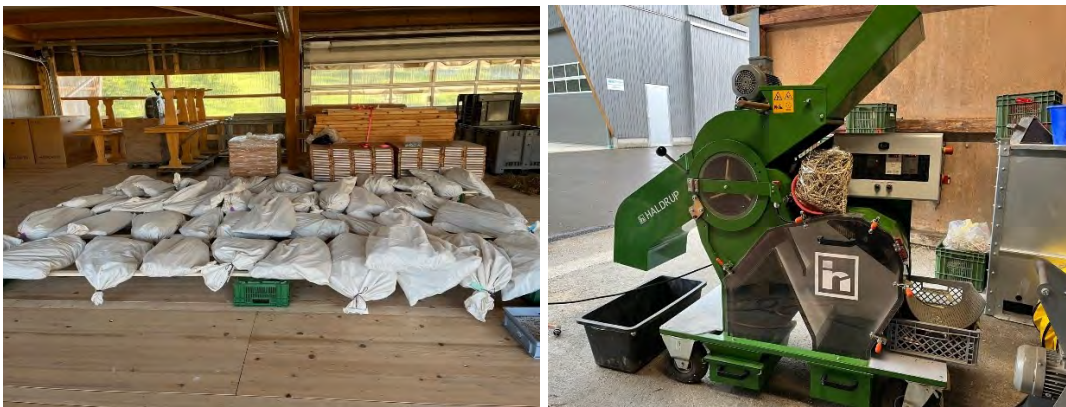


Abbildung 6: Lufttrocknung der Garben in Baumwollsäcken (links) und Drusch der Körner (rechts)

Analysen: N- und S-Gehalte sowie Qualitätsparameter

N-Gehalte der getrockneten Pflanzenproben (Fahnenblatt, Ganzpflanze, Stroh, Korn) wurden mit dem Elemental Analyser Vario Max Cube (Elementar) erhoben. Dank der Zusammenarbeit mit Dr. Matthias Wiggenhauser und Geremia Pellegrini von der ETH Zürich (Gruppe für Pflanzenernährung) konnten alle Pflanzenproben sowie die Bodenproben der 2. Beprobung in Eschikon aufbereitet (Mikrowellenaufschluss mit HNO_3)

und mit ICP-MS/MS die S-Gehalte gemessen werden. Informationen zu der Qualitätsanalyse dieser Messung sind in Anhang 2 beigelegt. Die S-Aufnahme der Pflanzen wurde berechnet, in dem der S-Gehalt (%) mit dem TS-Ertrag der Biomasse (g TS/20 Blätter für die Fahnenblätter, g TS/Laufmeter für die Ganzpflanze sowie g TS/m² für Korn und Stroh) multipliziert wurde. Die Weizenkörner wurden für die Analyse der Qualitätsparameter (Protein, Feuchtgluten, Sedimentaion, Hektolitergewicht) pro Verfahren und Standort gemischt und an das Labor der Fresh Food & Beverage Group Volketswil gesendet.

3.3 Statistik

Die statistische Analyse wurde mit RStudio (R Version 2024.04.2) durchgeführt. Für die Daten der Weizenversuche (4 Standorte, 3 Wiederholungen pro Standort) wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Düngeverfahren und Standort als fixe Faktoren verwendet. Da keine Interaktionseffekte zwischen den Düngeverfahren und den Standorten festgestellt wurden, konnte ein additives Modell (Düngeverfahren + Standort) ohne Interaktion für die ANOVA eingesetzt werden. Die Normalverteilung der Modellresiduen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft und die Homogenität der Varianzen mit dem Levene-Test. Einzelne Variablen erfüllten die Annahme der Normalverteilung der Modellresiduen im Shapiro-Wilk-Test nicht. Die signifikanten Resultate waren davon aber nicht betroffen, weswegen auf eine Transformation (z.B. dekadischem Logarithmus oder Quadratwurzel) verzichtet wurde. Für die Post-hoc-Analyse wurde der Tukey-HSD-Test verwendet, um Unterschiede zwischen den einzelnen Düngeverfahren zu identifizieren. Für die Analyse der Qualitätsparameter im Weizen wurde ein einfaktorielle ANOVA mit Düngeverfahren als Faktor verwendet. Für den Dinkelversuch (1 Standort, 2 Wiederholungen) wurde der Kruskal-Wallis-Test eingesetzt, da nicht genügend Wiederholungen für eine ANOVA gegeben waren.

4. Resultate und Diskussion

4.1 Bodenuntersuchungen

Der S_{min} -Wert bezeichnet den pflanzenverfügbaren Sulfatschwefel. Die höchsten S_{min} -Werte der Bodenuntersuchung in 0-30 cm zu Vegetationsbeginn wurden an den Standorten 2.1 und 2.2 in Diessbach gemessen (Tabelle 6). Dies passt zu den Niederschlägen im Winter (Oktober-März), die in Diessbach (Wetterstation Studen) mit 786 mm tiefer waren als in Lommiswil mit 925 mm (Station Riedholz) und in Kolliken mit 812 mm (Station Gränichen). Standort 1 in Kolliken (1) wies die mit Abstand tiefsten S_{min} -Werte auf. Interessanterweise korrelieren die S_{min} -Werte nicht mit den S_{tot} -Werten, welche die gesamte Schwefelkonzentration im Boden angeben (Tabelle 6). In der Literatur gibt es kein einheitliches Schema zur Einordnung der S_{min} -Gehalte was die Interpretation der Werte erschwert. Eine mögliche Einteilung [3] geht bei S_{min} -Konzentration von weniger als 3.5 mg/kg Boden, wie das Standort 1, 3.1 und 3.2 der Fall ist, von einer niedrigen Schwefelversorgung aus. Die S_{min} -Konzentration von 3.5 bis 6.7 mg/kg Boden entspricht

einer mittleren Schwefelversorgung. In diese Kategorie fallen Standort 2.1 und 2.2. Auf die Fläche hochgerechnet, spricht man bei einem $S_{\min}$ -Gehalt unter 30 kg/ha in der Schicht von 0-60 cm von einer niedrigen Schwefelversorgung [3]. In diesem Projekt wurde nur die obere Schicht beprobt, die Werte liegen aber an allen Standorten ausser 2.1 deutlich unter 15 kg/ha. Bei Winterweizen mit mittlerem bis hohem Ertragsniveau wird im konventionellen Anbau die S-Düngung zur ersten N-Gabe empfohlen, wenn die $S_{\min}$ -Werte in 0-30 cm Tiefe unter 30 kg/ha liegen [11].

Die $N_{\min}$ -Werte unterschieden sich weniger stark zwischen den Versuchsstandorten als die $S_{\min}$ -Werte und korrelierten auch nicht mit diesen (Tabelle 6). Von der Textur her, sind an Standorte 1 und 2.2 die leichteren Böden zu finden (sandiger Lehm mit 62 % Sand, Tabelle 5) und an Standorte 2.1 und 3.1 die schwereren (Lehm mit 46 % Sand), wobei diese Werte aufgrund der Methode Fühlprobe nur einer Schätzung entsprechen. Wichtig zur Beurteilung des S-Angebots des Bodens ist der Humusgehalt, da die organische Bodensubstanz die wichtigste natürliche S-Quelle darstellt. Den tiefsten Humusgehalt wies Standort 2.2 auf (1.8 %, humusarm) während die anderen vier Standorte als «schwach humos» eingeteilt wurden (Tabelle 5).

Tabelle 6: $S_{\min}$ und $N_{\min}$ der Versuchsstandorte zu Vegetationsbeginn (Schicht = 0-30 cm)

		Standort Nr.				
		1	2.1	2.2	3.1	3.2
$S_{\min}$	mg/kg TS	0.7	4.4	3.4	2.7	2.6
$S_{\min}$ pro Schicht	kg S/ha	2.5	16.5	12.9	10.3	9.6
S_{tot}	mg/kg TS	187	196	178	368	256
Nitrat	mg/kg TS	4.5	5.1	4.2	6.4	6.3
Ammonium	mg/kg TS	1.5	2.1	2	0.9	3.2
$N_{\min}$	mg/kg TS	6	7.1	6.2	7.3	9.5
$N_{\min}$ pro Schicht	kg N/ha	22.6	26.7	23.3	27.2	35.6

Bei der zweiten Bodenuntersuchung zum Blütezeitpunkt wurde an drei Standorten Bodenproben genommen und von der ETH sowohl $S_{\min}$ als auch S_{tot} analysiert. An zwei Standorten führten die beiden Düngeverfahren (ES und SO_4) zu einer Zunahme der $S_{\min}$ -Konzentration im Boden gegenüber der Kontrolle (Abbildung 7). An Standort 3.2 ist ein deutlicher Effekt der SO_4 -Düngung auf die $S_{\min}$ -Konzentration zu sehen, das Verfahren mit ES führte jedoch nur zu einer geringen Zunahme gegenüber der Kontrolle. Elementare Schwefel muss von Thiobakterien zuerst zu Sulfatschwefel oxidiert werden. Dieser Prozess ist temperaturabhängig. Gemäss Auskunft von Matthias Wüthrich (Pflanzenbauberater bei Landor) sind die Thiobakterien erst ab einer Bodentemperatur von 8-

12 °C aktiv und es kann bis zu 10 Wochen dauern bis eine Wirkung eintritt. Der zeitliche Abstand zwischen der Düngung und der 2. Bodenbeprobung betrug 11 Wochen. Die $S_{\min}$ -Werte deuten darauf hin, dass die Umwandlung des elementaren Schwefels am Standort 3.2 zum Zeitpunkt der Getreideblüte noch nicht sehr stark vorangeschritten war.

Die totale S-Konzentration im Boden (S_{tot}) wurde von den Schwefeldüngern wenig beeinflusst (Abbildung 8). Dies wurde so erwartet, da die ausgebrachte Düngermenge verglichen mit dem gesamten S-Vorrat im Boden nur einen kleinen Teil ausmacht. An Standort 2.1 war S_{tot} in den mit ES gedüngten Plots gegenüber der Kontrolle und dem Verfahren SO_4 etwas erhöht. Da im Verfahren ES die doppelte Menge Schwefel ausgebracht wurde wie im Verfahren SO_4 , ist es naheliegend, dass der S_{tot} -Wert hier am höchsten ist.

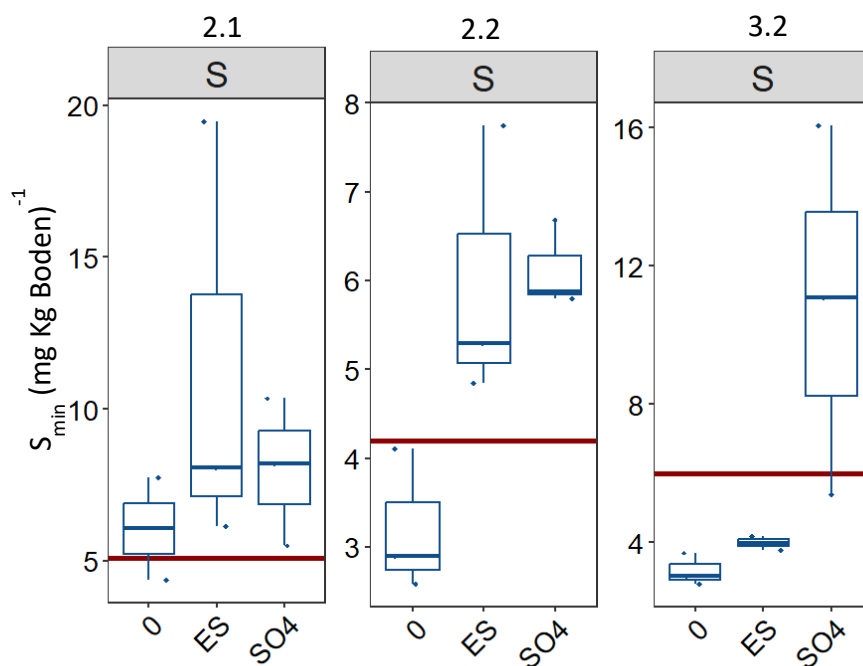


Abbildung 7: $S_{\min}$ -Gehalt im Boden an drei Standorten mit Weizen (Blütezeitpunkt). Extraktion mit CaCl_2 . Düngeverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO_4 = Calciumsulfat. Quelle: Geremia Pellegrini, A. Bera Efe, Matthias Wiggenhauser (2024) ETHZ, unveröffentlichte Präsentation

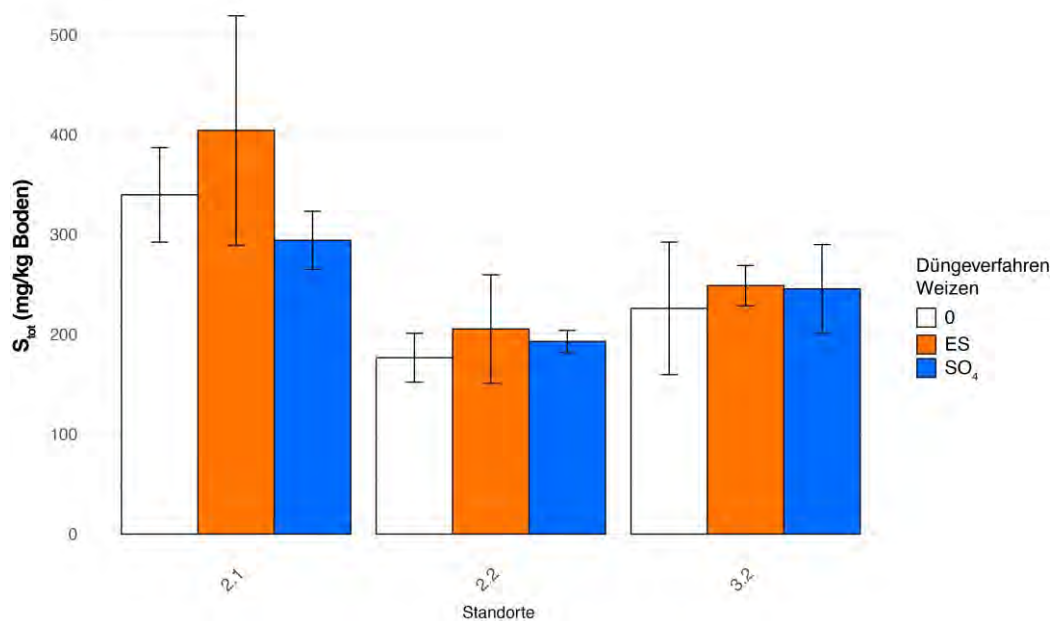


Abbildung 8: Totaler S-Gehalt (S_{tot}) im Boden an drei Standorten mit Weizen (Blütezeitpunkt). Mittelwerte und Standardabweichung ($n=3$) aufgeteilt nach Düngeverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO_4 = Calciumsulfat.

4.2 Bonituren und SPAD

Die S-Düngung hatte im Weizen einen signifikanten Effekt ($p=0.032$) auf die Bodenbedeckung zum Blütezeitpunkt (Abbildung 9). Im Verfahren mit ES wurde eine leicht erhöhte Bodenbedeckung gegenüber der Kontrolle ohne S-Dünger festgestellt. Es ist erstaunlich, dass ein Effekt des Elementarschwefels aber nicht des Calciumsulfats beobachtet werden konnte, da die S_{min} -Werte zum selben Zeitpunkt eine tendenziell größere Sulfat-Verfügbarkeit im SO_4 -Verfahren aufzeigen. Jedoch wurde im Verfahren mit ES die doppelte Menge Schwefel gedüngt.

Auf den SPAD-Index hatte die S-Düngung hingegen keinen Effekt, weder im Dinkel noch im Weizen. Die SPAD-Messung ist nicht eindeutig nährstoffspezifisch, basiert jedoch auf der Annahme, dass die Grünfärbung massgeblich vom N-Gehalt bestimmt wird und auch eine Unterversorgung mit Schwefel den Messwert beeinflusst.

Im Dinkel (Standort 1) wurde in den gedüngten Verfahren eine höhere Lager-Boniturnote gegeben, der Unterschied ist jedoch nicht signifikant (Abbildung 9). Vermutlich lässt sich dieses erhöhte Lagern in den Verfahren mit Schwefeldünger (zumindest teilweise) auf das Versuchsdesign zurückführen (Abbildung 2). Da die gedüngten Verfahren die Plots weniger breit angelegt wurden als in der 0-Kontrolle, wurde durch die Bonitur und Probenahme in den gedüngten Verfahren etwas mehr niedergetrampelt was vermutlich zu mehr Lagern geführt hat.

Bei den Bonituren der Pflanzenhöhe und der Pflanzengesundheit wurden keine Unterschiede zwischen den Düngeverfahren festgestellt. Die Daten wurden deshalb nicht in den Bericht integriert.

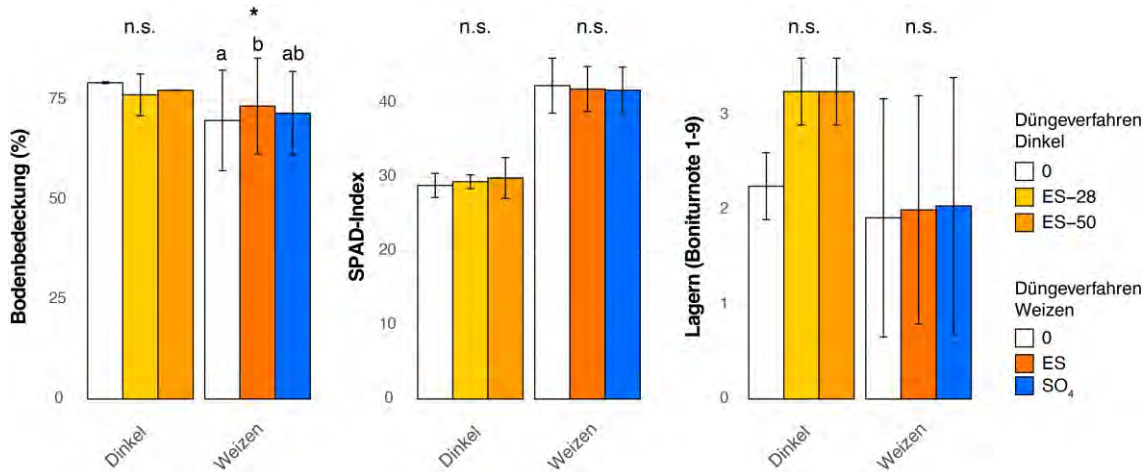


Abbildung 9: Bodenbedeckungsgrad und SPAD-Index (Blütezeitpunkt), Lager-Bonitur (Erntezeitpunkt). Mittelwerte und Standardabweichung aufgeteilt nach Düngeverfahren im Dinkel (n=2) und im Weizen (n=12). Düngeverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

4.3 Ernteerhebung

Die Versuchsstandorte mit Weizen waren zum Erntezeitpunkt in sehr unterschiedlichem Zustand (Abbildung 10). An Standort 2.1 waren die Pflanzen von Schwarzbeinigkeit befallen mit schwarzem Belag auf den Ähren und Pflanzen die sich leicht aus dem Boden ziehen liessen. Zudem war an diesem Standort viel Durchwuchs einer vorhergehenden Gründung sichtbar. An Standort 2.2 und 3.1 waren die Bestände sehr gesund und es war fast kein Unkraut vorhanden. Standort 3.2 war der einzige Standort mit einer Untersaat (siehe Felddaten in Anhang 1). Diese war aufgrund der feuchten Bedingungen im Frühjahr 24 sehr wüchsig und ist zum Erntezeitpunkt teilweise über den Weizen hinausgewachsen (Abbildung 10). Entsprechend war die Untersaat einerseits eine deutliche Konkurrenz für den Weizen, andererseits war das Mikroklima im Bestand sehr feucht und günstig für die Entwicklung von Pilzkrankheiten.

Zeitpunkt der Blüte (BBCH 63-65)

Zeitpunkt der Ernte (BBCH 87-92)

I



2.1



2.2



3.1



3.2



Abbildung 10: Situation an der Versuchsstandorten zum Blütezeitpunkt (links) und zur Ernte (rechts)

Im Versuch mit Dinkel hatte die Schwefeldüngung keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Kornertrag, den Strohertrag, die Anzahl Ähren pro m² oder das Gewicht von 100 Fesen und auch nicht auf die Unkraut-Biomasse (Abbildung 11). Es zeigt sich, dass der Versuch mit nur 2 Wiederholungen zu wenig statistische Power besitzt um Unterschiede statistisch signifikant zu belegen. In Abbildung 11 sind durchaus Trends erkennbar, beispielsweise gibt es mehr Unkrautbiomasse in den gedüngten Verfahren als in der 0-Kontrolle. Und die Anzahl Ähren ist im Verfahren ES-50 erhöht gegenüber der 0-Kontrolle, jedoch mit grosser Variation. Ganz klar zeigen die Ergebnisse, dass die Düngung mit elementarem Schwefel in beiden Konzentrationen, 28 und 50 kg S/ha, den Kornertrag des Dinkels nicht steigern konnte.

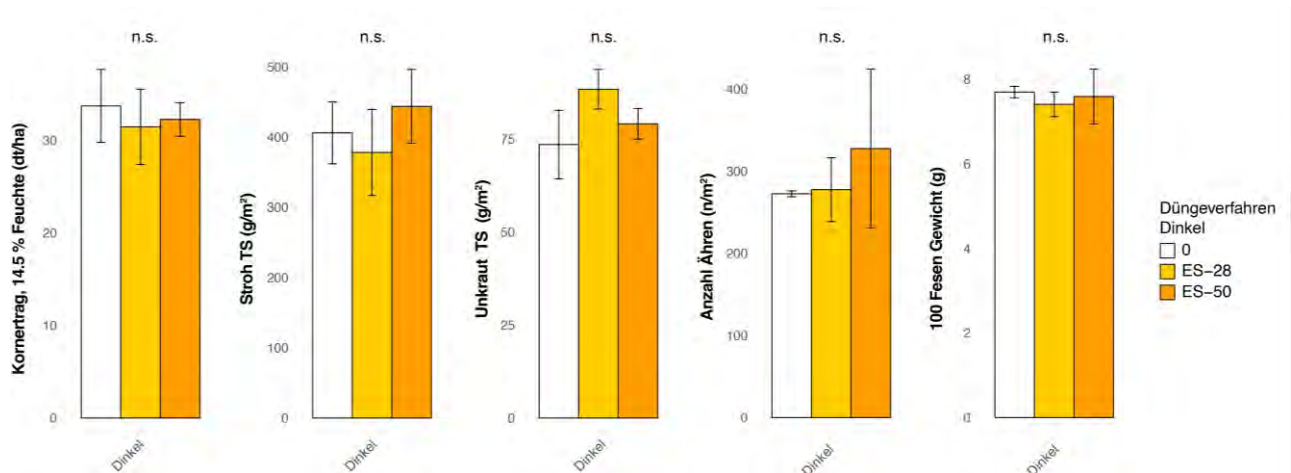
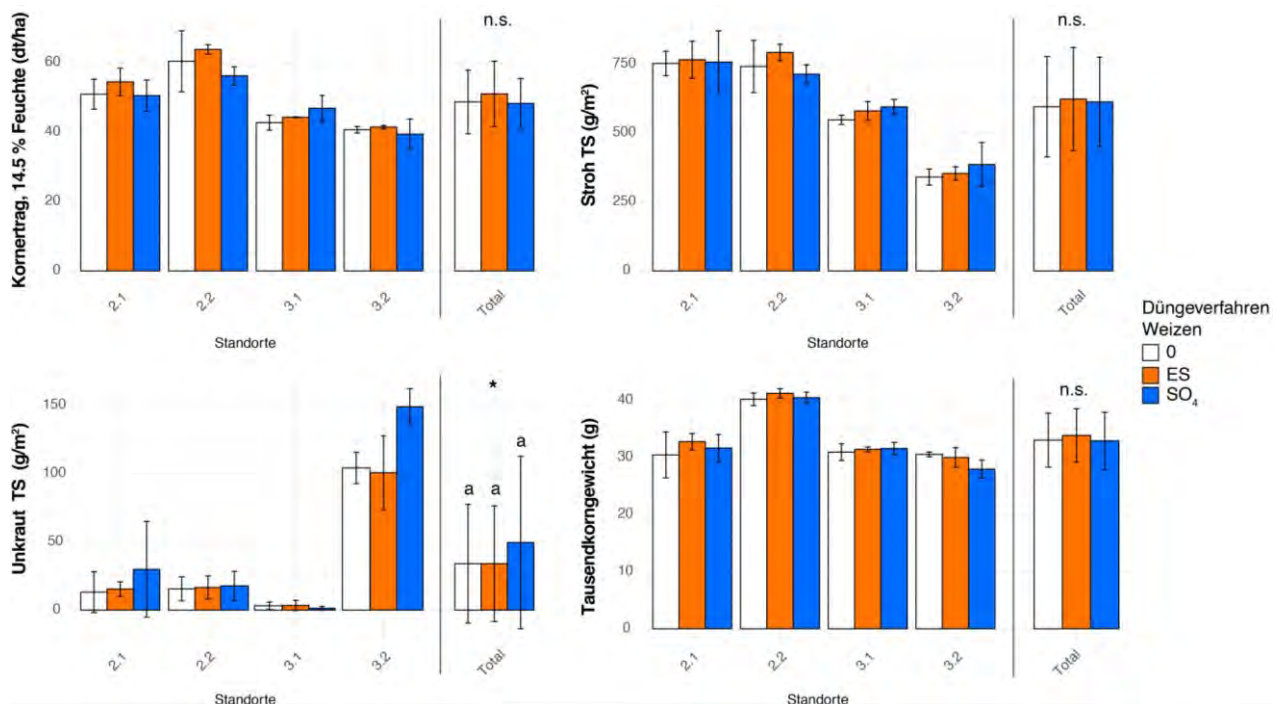


Abbildung 11: Kornertrag, Strohertrag, Unkraut-Biomasse, Anzahl Ähren pro m² sowie 100 Fesen Gewicht im Dinkelversuch. Mittelwerte und Standardabweichung (n=2) der Düngeverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES-28/ES-50 = Elementarer Schwefel mit 28 bzw. 50 kg S/ha

In den Weizenversuchen hatte die Schwefeldüngung mit ES und SO_4 keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Kornерtrag, den Strohertrag und das Tausendkornge-
 wicht (Abbildung 12). Es ist ein Trend zu einem leicht höheren Kornерtrag im Verfahren
 mit ES gegenüber der 0-Kontrolle und dem mit SO_4 gedüngten Verfahren zu erkennen.
 Derselbe Trend ist auch beim Strohertrag und dem Tausendkorngewicht minimal sicht-
 bar. Dass mit dem Elementarschwefel die doppelte Menge S ausgebracht wurde als mit
 den Calciumsulfat, könnte der Grund dafür sein, dass die Erträge in diesem Verfahren
 gegenüber dem SO_4 -Verfahren erhöht sind. Standort 3.1 ist der einzige Standort an dem
 der Kornерtrag im Sulfat-gedüngten Verfahren gegenüber der 0-Kontrolle tendenziell
 erhöht ist. Insgesamt liegen die Erträge der Handernter die in diesem Versuch gemacht
 wurden, deutlich über den Flächenerträgen der Betriebsleiter, da es bei der Handernte
 keinerlei Verluste gibt.

Überraschenderweise wurde ein knapp signifikanter Effekt der Düngeverfahren auf die
 Unkraut-Biomasse festgestellt ($p=0.048$, Abbildung 12). Mit dem post-hoc Test konnte
 der Unterschied zwischen den Düngeverfahren zwar nicht belegt werden, es ist aber ein
 klarer Trend zu mehr Unkraut im SO_4 -Verfahren zu erkennen. Dieser war insbesondere
 an Standort 2.1 und 3.2 ausgeprägt, also die Standorte an denen auch insgesamt ein hö-
 heres Unkrautaukommen beobachtet wurde. Wobei bei Standort 3.2 dies vielmehr die
 Biomasse der Untersaat ist die vom Sulfatdünger profitierte (und nicht die Unkraut-
 Biomasse).



**Abbildung 12: Kornерtrag, Strohertrag, Unkraut-Biomasse und Tausendkornge-
 wicht im Weizen an 4 Standorten (n=3) sowie insgesamt (Total, n=12). Mittelwerte
 und Standardabweichung. Mittelwerte und Standardabweichung der Düngeverfahren: 0 = kein
 Schwefeldüngung, ES = Elementarer Schwefel, SO_4 = Calciumsulfat.**

4.4 Pflanzenanalysen

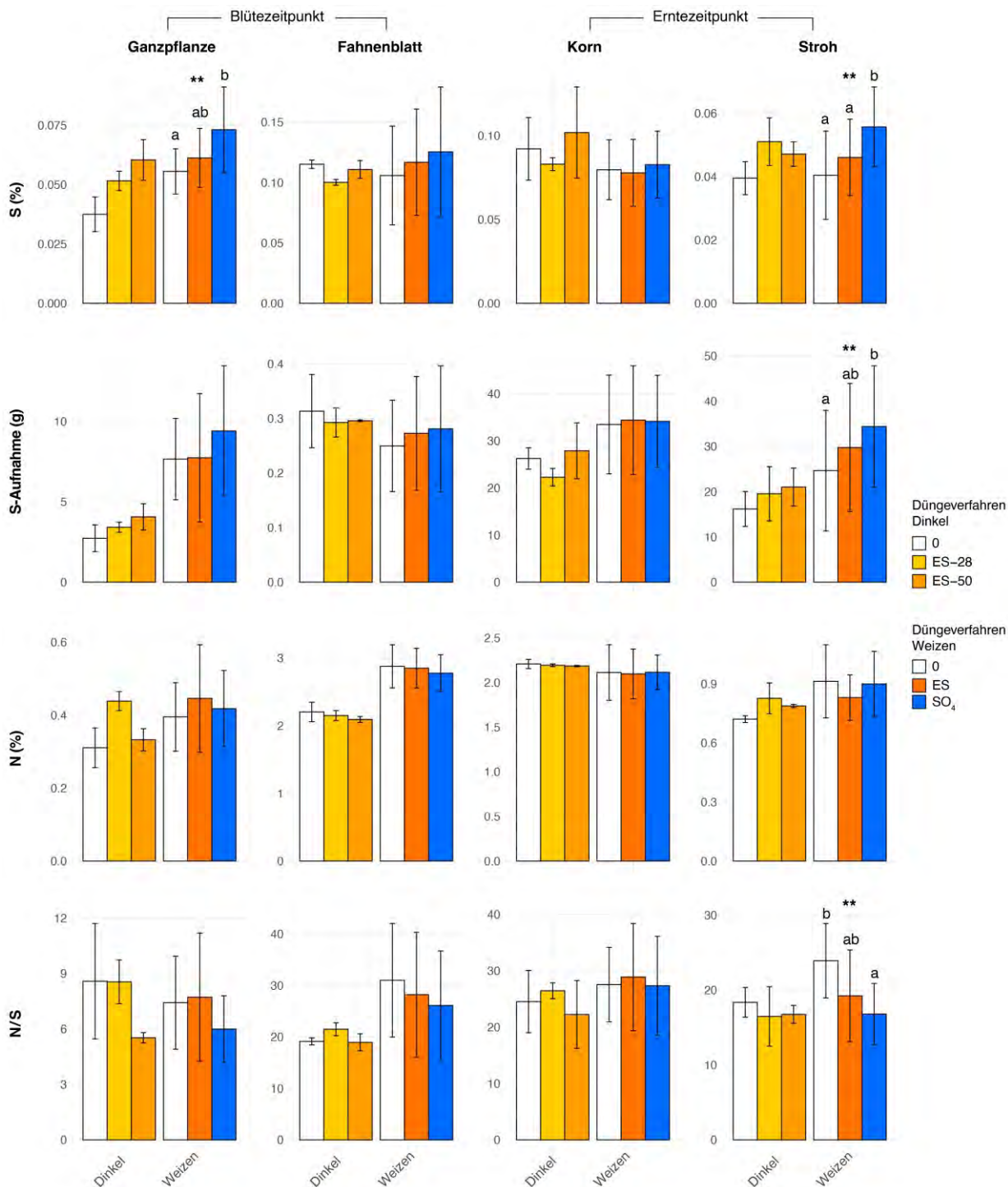


Abbildung 13: S-Konzentration, S-Aufnahme (pro Einheit), N-Konzentration und N/S-Verhältnis von Ganzpflanze und Fahnenblatt (Blütezeitpunkt) sowie Korn und Stroh (Erntezeitpunkt). Mittelwerte und Standardabweichung aufgeteilt nach Düngerverfahren im Dinkel (n=2) und im Weizen (n=12). Düngerverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat. Einheiten der S-Aufnahme: Fahnenblatt (g/20 Blätter), Ganzpflanze (g/Laufmeter), Korn und Stroh (g/m²).

Die Schwefeldüngung beeinflusste im Weizen die S-Konzentration in der Ganzpflanze zum Blütezeitpunkt ($p=0.005$) und im Stroh zur Ernte hochsignifikant ($p=0.0002$, Abbildung 13). Die S-Konzentration in der Ganzpflanze und im Stroh war im SO_4 -Verfahren gegenüber der 0-Kontrolle erhöht; im Stroh auch gegenüber dem ES-Verfahren. Die S-Konzentration im Fahnenblatt weist denselben Trend auf, jedoch weniger ausgeprägt. Die S-Aufnahme (g/m^2) war im Stroh ebenfalls hochsignifikant höher im SO_4 -Verfahren gegenüber der 0-Kontrolle ($p=0.005$). Auch in der Ganzpflanze ist ein Trend zu einer erhöhten S-Aufnahme (g/Laufmeter) im SO_4 -Verfahren sichtbar. Die S-Konzentration und -Aufnahme im Weizenkorn blieben von den Düngungsverfahren unbeeinflusst.

Die S-Konzentration für Winterweizen-Stroh wird in der Literatur mit 0.08 % TS angegebenen [10], lag in diesem Versuch aber deutlich darunter mit Werten zwischen 0.04 und 0.06 %. Die S-Konzentration in Weizenkörnern wird in der Schweizerischen Futtermitteldatenbank von Agroscope (www.feedbase.ch) mit 0.1367 % angegeben. Auch hier sind die vorliegenden Werte mit um 0.08 % deutlich tiefer. Für die S-Konzentration im Fahnenblatt gibt die GRUD in Modul 3 [1] eine Bandbreite von 0.15 bis 0.65 % an. In diesem Versuch lag sie bei durchschnittlich 0.12 %. Dass die S-Konzentration im vorliegenden Versuch so tief sind, könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Qualitätskontrolle der S-Messungen eine ungewöhnlich tiefe S-Wiederfindungsrate von 45 % in den Pflanzenstandards beobachtet wurde (Anhang 2). Das bedeutet, dass die S-Konzentration in den Pflanzenteilen möglicherweise höher ist als sie gemessen wurde. Der Vergleich zwischen den Düngungsverfahren wird davon aber nicht beeinflusst.

Auf die N-Konzentration hatten die Düngungsverfahren keinen Einfluss. Sie wirkten sich aber hochsignifikant auf das N/S-Verhältnis im Weizenstroh aus ($p=0.004$), wobei dieses im SO_4 -Verfahren tiefer war als in der 0-Kontrolle (Abbildung 13). Auch in der Ganzpflanze und im Fahnenblatt ist dieses Muster zu erkennen. Ein ausgewogenes N/S-Verhältnis ist für die Proteinbildung von entscheidender Bedeutung, da die Aufnahme von N und S gekoppelt ist [6]. Ein N/S-Verhältnis um 10 deutet auf eine optimale S-Ernährung hin, während ein N/S-Verhältnis über 15 bis 17 auf S-Mangel hinweist [14]. Im Versuch liegt das N/S-Verhältnis in der Ganzpflanze bei 7, im Fahnenblatt bei 28, im Korn bei 28 und im Stroh bei 20. Da die S-Wiederfindungsrate bei den Messungen vermutlich tief war, ist das N/S-Verhältnis hier höher als es tatsächlich war.

Im Dinkel hatte die Schwefeldüngung keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die S-Konzentration und -Aufnahme sowie die N-Konzentration und das N/S-Verhältnis (Abbildung 13). Es sind aber ähnliche Trends sichtbar wie im Weizen, so ist die S-Konzentration in den beiden ES-Verfahren in der Ganzpflanze und im Stroh gegenüber der 0-Kontrolle erhöht. Und das N/S-Verhältnis ist in der Ganzpflanze und im Stroh im ES-50 Verfahren tiefer als in der 0-Kontrolle.

4.5 Qualitätsparameter

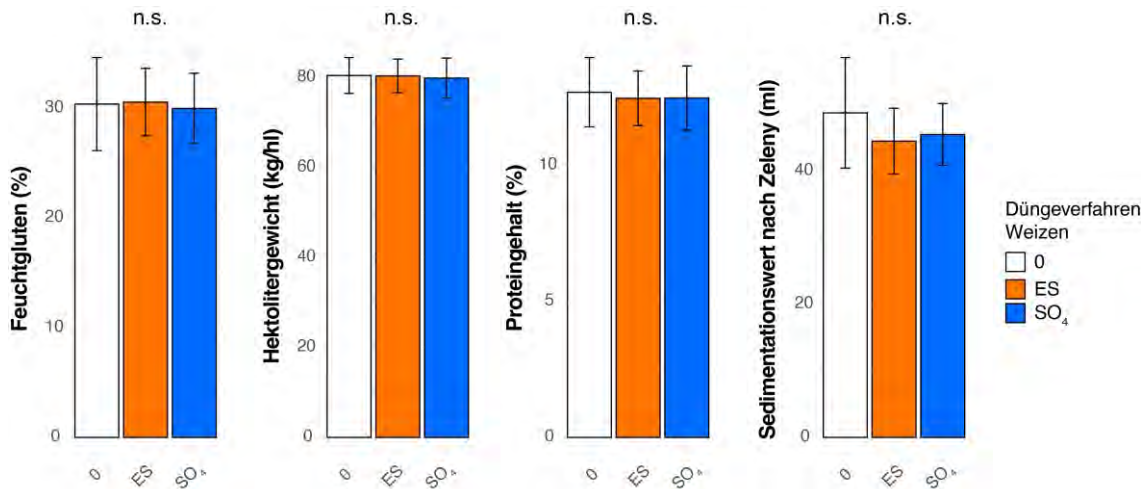


Abbildung 14: Qualitätsparameter im Weizen: Feuchtgluten, Hektolitergewicht, Proteingehalt und Sedimentationswert nach Zeleny. Mittelwerte und Standardabweichung der Düngungsverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

Die Schwefeldüngung hatte keinen Einfluss auf die untersuchten Qualitätsparameter (Feuchtgluten, Hektolitergewicht, Proteingehalt) im Weizen (Abbildung 14). Einzig der Sedimentationswert nach Zeleny war etwas tiefer in den Verfahren mit S-Düngung gegenüber der 0-Kontrolle, wenn auch nicht signifikant. Der Sedimentationswert ist eine Masszahl für die Quellfähigkeit des Eiweisses und hohe Werte deuten auf gute Eiweisqualität hin [12]. Da Schwefelmangel gemäss Literatur [4, 9] zu einer Verschlechterung der Backqualität des Weizens führen kann (auch bei nur latentem Mangel), deuten die Resultate darauf hin, dass in diesem Jahr an den untersuchten Standorten kein Schwefelmangel gegeben war.

5. Schlussfolgerungen

Die Schwefeldüngung führte im Weizen zu einer leicht höheren Bodenbedeckung zum Blütezeitpunkt, beeinflusste aber den SPAD-Wert, die Pflanzenhöhe und Pflanzengesundheit in beiden Kulturen nicht. Der Effekt der Schwefeldüngung auf den Ertrag war in beiden Kulturen und an allen Standorten gering. Eine leichte Ertragssteigerung konnte im Weizen im ES-Verfahren beobachtet werden. Im Dinkel konnte die Düngung mit ES in zwei Konzentrationen den Kornertrag nicht steigern. Überraschenderweise führte die Schwefeldüngung zu mehr Unkrautbiomasse, insbesondere im SO₄-Verfahren. Bei den Pflanzenanalysen erhöhte die Schwefeldüngung die S-Konzentration in der Ganzpflanze zum Blütezeitpunkt und im Stroh zum Erntezeitpunkt signifikant, hatte aber keinen Einfluss auf die S-Konzentration im Korn. Das niedrigere N/S-Verhältnis im SO₄-Verfahren deutet auf eine bessere Schwefelversorgung in diesem Verfahren hin. Auf die Backqualität des Weizens hatte die Schwefeldüngung keinen Einfluss.

Nach der GRUD hat Getreide einen mittleren S-Bedarf von 25–60 kg S/ha [1]. Die Herausforderung beim Getreide ist der frühe Vegetationsstart der Kultur während die S-Mineralisierung aus der organischen Substanz im Frühjahr noch später als bei N erfolgt [9]. Die im Mai einsetzende Nachlieferung aus dem Boden kann das Getreide nicht mehr so gut nutzen wie spätere Kulturen. Mit den Hof- und Recyclingdüngern die von den Betrieben an den Versuchsstandorten praxisüblich ausgebracht wurden (Tabelle 3), wurde nur eine kleine Menge des S-Bedarfs gedeckt. Zudem steht der in den organischen Düngern enthaltene Schwefel im Anwendungsjahr nur zu 5 bis 10 % zur Verfügung [3].

Schwefel wird vom Getreide regelmässig über die gesamte Wachstumsperiode aufgenommen und ist (anders als Stickstoff) in der Pflanze schwer beweglich [1]. Die Pflanze speichert Sulfat als Reserve in den Blättern und kann dieses nicht bzw. kaum wieder mobilisieren und zum Bedarfsort verlagern. Deshalb muss die Schwefelversorgung in den entscheidenden Wachstumsphasen zur Verfügung stehen [9]. Da die S_{min} -Konzentration zum Blütezeitpunkt in den gedüngten Verfahren erhöht war, ist davon auszugehen, dass die Schwefelversorgung während der anschliessenden Kornfüllung und -reife in diesen Verfahren ebenfalls verbessert war. Dass die Schwefeldüngung zu erhöhter S-Konzentration in der Ganzpflanze und im Stroh führte, die Konzentration im Korn aber nicht verändert wurde, könnte darauf hindeuten, dass das Korn bei der Füllung und Reifung ausreichend mit Schwefel versorgt war und keinen zusätzlichen Schwefel aufnehmen konnte, während der überschüssige Schwefel in der Ganzpflanze bzw. im Stroh verblieben ist.

Witterungstechnisch war das Jahr 2024 geprägt von überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen sowie starker Bewölkung im Frühjahr. Es ist anzunehmen, dass die S-Mineralisierung von der hohen Bodenfeuchte profitiert hat und auch die Oxidation des elementaren Schwefels begünstigt wurde. Dies wurde auch in einem Versuch mit Schwefeldüngung im Klee gras beobachtet [13].

Das Design des Dinkelversuches mit nur 2 Wiederholungen hat sich als nicht geeignet erwiesen. Für das kommende Projektjahr wird das im Weizen eingesetzte Versuchsdesign weitergeführt. Auch der Vergleich der beiden Schwefeldünger (ES und SO_4) mit ihrer unterschiedlichen Verfügbarkeit ist spannend und soll fortgesetzt werden.

Aus den vorliegenden Resultaten lässt sich keine allgemeine Empfehlung für die Schwefeldüngung im Wintergetreide ableiten. Da 2024 aber insgesamt ein schwieriges Jahr mit sehr tiefen Erträgen war, ist es möglich, dass sich in einem anderen Jahr mit höherem Ertragsniveau ein grösserer Effekt der Schwefeldüngung zeigen wird. Es bleibt abzuwarten wie sich das nächste Projektjahr entwickelt und welchen Einfluss die Schwefeldüngung z.B. bei einer eher trockeneren Witterung haben wird. Im kommenden Projektjahr wird der Versuch im Weizen, im Raps und in der Kunstwiese fortgesetzt.

6. Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt den Landwirten für die Bereitstellung der Versuchsflächen und die konstruktive Zusammenarbeit bei der Durchführung der Versuche. Ein grosser Dank geht auch an Geremia Pellegrini und Dr. Matthias Wiggenhauser von der ETH Zürich (Gruppe für Pflanzenernährung) für die Aufbereitung und Analyse der Pflanzenproben. Dank dieser Zusammenarbeit war es möglich die S-Gehalte vier verschiedener Pflanzenteile anzuschauen, was sonst das Projektbudget deutlich überschritten hätte. Danke auch an Hansueli Dierauer für die Zusammenarbeit und Unterstützung. Ein weiterer Dank geht an die LANDOR fenaco Genossenschaft welche die Schwefeldünger für das Projekt zur Verfügung gestellt haben. Und natürlich danken wir Bio Suisse für die finanzielle Unterstützung ohne die dieses Projekt nicht durchgeführt werden könnte.

7. Literatur

- [1] Richner, W. & Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- [2] Blume, H.P., et al. (2018). Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [3] Becker, K., et al. (ohne Datum) Schwefeldüngung zu Futter- und Körnerleguminosen. Empfehlungen für den ökologischen Landbau. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn.
- [4] Schubert, S. (2017). Pflanzenernährung, 3. Auflage. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- [5] Augustin, S. & Achermann, B. (2012). Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 163(9), S. 323–330.
- [6] Zorn, W., et al. (2016). Handbuch zur visuellen Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [7] Scherer, H. W. (2008). Impact of sulfur on N₂ fixation of legumes. In: Sulfur assimilation and abiotic stress in plants. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 43–54.
- [8] Koch, H. J., et al. (2000). Schwefelversorgung von Kulturpflanzen. Bedarfsprognose und Düngung. Standpunkt VDLUFA, Darmstadt.
- [9] Knittel, H., Albert, E., & Ebertseder, T. (2020) Praxishandbuch Dünger und Düngung. 1. Auflage, Erling Verlag, 368 Seiten
- [10] Boxberger, J., Mayer, J., Möller, K. & Pöllinger, A. (2020) Praxishandbuch Organische Düngung: effizient und nachhaltig. 1. Auflage, Erling Verlag, 576 Seiten
- [11] YARA GmbH & Co. (2010) Mit Smin-Wert noch effizienter düngen. Sonderausgabe 1/2010. Online: https://www.effizientduengen.de/wp-content/uploads/Sonderausgabe_Apr_10_web.pdf (abgerufen am 4.2.2025)
- [12] Watroba M., Strebel S., Levy Häner L. (2024) Winterweizen 2024: Sortenversuche unter Biobedingungen. Agroscope Transfer, 2024.
- [13] Stegmann, W. (2024) Auswirkung unterschiedlicher Schwefeldünger auf den Ertrag von Klee gras. Nutrinet. Online: <https://www.nutrinet.agrarpraxisforschung.de/praxisforschung/praxisversuche/regionetzwerk-niedersachsen/schwefelduenger-kleegrasertrag> (abgerufen am 6.2.2025)

[14] Olfs, H.W. und Wissemeier, A. (Hrsg.) (2019) Diagnose des Ernährungszustandes von Kulturpflanzen. 1. Auflage, Erling Verlag, 288 Seiten

8. Anhang

Anhang 1: Felddaten

Anhang 2: Qualitätskontrolle der S-Gehalts-Messungen mit ICP-MS/MS

Anhang I: Felddaten 2024

Parzelle	I	2.1	2.2	3.1	3.2
Ort	Köllikon AG	Diessbach b. Büren BE	Diessbach b. Büren BE	Lommiswil SO	Lommiswil SO
Höhe über Meer (m)	427	464	464	564	564
Niederschlag Aug 23-Juli 24 (mm)	1479	1315	1315	1577	1577
Wetterstation	Graenichen	Studen	Studen	Riedholz	Riedholz
Vorkultur	Soja	Soja	Körnermais	Soja / Lupinen	Kunstwiese
Hauptkultur	Dinkel	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen
Sorte	Flauder	Piz Nair	Prim	Pizza	Pizza
Bodenbearbeitung	4.10.23 Pflug 8.4.24 Walze	16.10.23 Grubber	29.10.23 Pflug	2x Grubber	2x Grubber
Saat	18.10.2023	18.10.23 450 Körner/m ²	30.10.23 450 Körner/m ²	Oktober	Oktober
Untersaat	8.4.24 Einsaat Green Carbon Fix	Keine	Keine	Keine	30.4.24 Einsaat Untersaat
Unkrautregulierung	30.3.24 Striegel	26.3.24 Striegel 12.4.24 Striegel	26.3.24 Striegel 12.4.24 Striegel	27.3.24 Striegel 12.4.24 Striegel	27.3.24 Striegel
Düngung	8.4.24 Rindergülle 1:3, 17 m ³ /ha	22.3.24 Recyclingdünger 33.76 m ³ /ha 13.4.24 Rindergülle, 19.18 m ³ /ha	22.3.24 Recyclingdünger 33.76 m ³ /ha 13.4.24 Rindergülle, 25.45 m ³ /ha	15.3.24 Rindergülle 1:3, 40 m ³ /ha 12.4.24 Rindergülle 1:3, 40 m ³ /ha	29.2.24 Rindergülle, 1:3, 40 m ³ /ha 12.4.24 Rindergülle, 1:3, 40 m ³ /ha

Ernte	18.7.2024	20.7.24	20.7.24	25.7.24	25.7.24
Ertrag (dt/ha)	28.6 (14.5 % Feuchte)	29.4 dt/ha (14.2 % Feuchte)	37.3 dt/ha (14.2 % Feuchte)	31.65	29.51

Anhang 2: Qualitätskontrolle der Schwefelmessungen mit ICP-MS/MS

External liquid std	Blanks	Analytical rep.	Procedural rep.	External solid std (WEPAL)
n = 10 Recovery (%) = 100 ± 3 Liquid std with known S concentration (rainwater)	n = 19 Average = 3.6 µg L⁻¹ = 0.1% of the S content in the samples with the lowest S content	n = 20 Std error (%) = 11 Max std. error (%) = 31	n = 17 Milling replicates Std error (%) < 15 Digestion replicates Std error (%) < 10	Soil n = 4 Plant n = 13 Soil Recovery (%) = 82 Plant Recovery (%) = 45 Std error (%) = 9

(Quelle: Geremia Pellegrini, ETHZ, 202)

