

Schwefelversorgung im Bioackerbau Zwischenbericht 2025



Aline Dallo, Serge Braun

13. Februar 2026

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.....	8
3.3 Statistik.....	13
4. Resultate und Diskussion	14
4.1 Bodenuntersuchungen.....	14
4.2 Winterweizen.....	15
4.2.1 Bonituren, SPAD und Ernteerhebungen.....	17
4.2.2 Pflanzenanalysen	19
4.2.3 Qualitätsparameter	21
4.3 Kunstwiese	22
4.3.1 Bonituren, SPAD und Ernteerhebungen.....	23
4.3.2 Pflanzenanalysen	28
4.4 Raps	30
5. Schlussfolgerungen	31
6. Danksagung	33
7. Literatur.....	33
8. Anhang.....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsstandorte 2025	5
Tabelle 2: Düngeverfahren und ausgebrachte Schwefelmenge.....	6
Tabelle 3: Mit Hof-, Recycling- und Handelsdüngern ausgebrachter Schwefel und Stickstoff	7
Tabelle 4: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und BBCH Winterweizen.....	8
Tabelle 5: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und Entwicklungsstadium Kunstwiesen.....	9
Tabelle 6: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und BBCH Raps	9
Tabelle 7: Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte Versuchsstandorte (0-30 cm).....	10
Tabelle 8: S_{min} und N_{min} der Versuchsstandorte 2025	15
Tabelle 9: SPAD-Index, N- und S-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Rapsblättern zum Blütezeitpunkt.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsdesign im Weizen und Raps (links) und Lage am Standort Lommiswil (rechts)	7
Abbildung 2: Versuchsdesign in Kunstwiese (links) und Lage am Standort Ellikon (rechts)	8
Abbildung 3: Bodenproben vor der Schwefeldüngung (links) und SPAD Messungen (rechts)	9
Abbildung 4: Ernteerhebung mit Holzrahmen 50 x 50 cm (links) und in Baumwollsäcke abgepackte Weizengarben (rechts)	11
Abbildung 5: Lufttrocknung Weizengarben in Baumwollsäcken (links) und Drusch der Körner (rechts)	12
Abbildung 6: Probenahme in der Kunstwiese mit Holzrahmen und elektrischer Schere	12
Abbildung 7: Winterweizen an den Standorten Diessbach (links) und Lommiswil (rechts) zum Zeitpunkt der Schwefelgabe, der Blüte und der Ernte	16
Abbildung 8: Bodenbedeckung, SPAD-Index, Lager-Bonitur, Unkraut-Biomasse, Kornertag und Strohertrag im Winterweizen an 2 Standorten (n=3) sowie insgesamt (Total, n=6).....	18
Abbildung 9: S- und N-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Winterweizen; Fahnenblatt, Ganzpflanze, Korn und Stroh.....	20
Abbildung 10: Qualitätsparameter im Weizen: Feuchtgluten, Hektolitergewicht, Proteingehalt und Sedimentationswert nach Zeleny.....	21
Abbildung 11: Kunstwiese an den Standorten Rheinau, Oberembrach und Ellikon zum Zeitpunkt der Schwefelgabe (links) und des ersten Schnittes (rechts).....	23
Abbildung 12: Mittlere Pflanzenhöhe, Anteil des Bestandes und SPAD-Index von Gras (rechts) und Klee (links) aus Kunstwiesen.	24
Abbildung 13: Mittlere Pflanzenhöhe, Anteil des Bestandes und SPAD-Index von Gras (rechts) und Klee (links) in Kunstwiesen beim ersten Schnitt.	25
Abbildung 14: Von Auge sichtbare Unterschiede in den Verfahren ohne Schwefeldüngung (0), mit Elementarem Schwefel (ES) und Sulfatschwefel (SO ₄) in der Kunstwiese am Standort Rheinau (zweiter Schnitt).....	26
Abbildung 15: TS-Ertrag von Kunstwiesen beim 1. und 2. Schnitt sowie die Summe beider Schnitte..	27
Abbildung 16: S- und N-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Kunstwiesen (oberirdische Biomasse von zwei Schnitten).....	29
Abbildung 17: Raps am Standort Frick zum Zeitpunkt der Schwefelgabe im Dezember und Februar (oben) sowie im Frühjahr mit physiologischer Knospenwelke (unten)30	

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) bei Leguminosen beeinträchtigt, was zu Mindererträgen und tieferen Proteinkonzentrationen 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 von 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. Weiter 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 2025 wurden Versuche mit Schwefeldüngung an zwei Standorten mit Winterweizen, an drei Standorten mit Kunstwiese und an einem Standort mit Raps 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 2025

Kultur	Bezeichnung	Ort, Kanton
Winterweizen	WW-D	Diessbach bei Büren, BE
	WW-L	Lommiswil, SO
Kunstwiese	KW-R	Rheinau, ZH
	KW-O	Oberembrach, ZH
	KW-E	Ellikon an der Thur ZH
Raps	RA-F	Frick, AG

In allen Kulturen wurden zwei Schwefeldünger mit unterschiedlich schneller Verfügbarkeit eingesetzt: Elementarer Schwefel (ES) mit einem Gehalt von 90 % Schwefel und Sulfatschwefel (Calciumsulfat/Gips, CaSO_4) mit 15 % Schwefel, 20 % Calcium und 1.8 % Magnesium (Tabelle 2). Beide Schwefeldünger sind auf der Betriebsmittelliste aufgeführt. Gips darf ohne Bedarfsnachweis eingesetzt werden, während Elementarer Schwefel gemäss Verordnung des WBF über die biologische Landwirtschaft (910.181) nur bei nachgewiesenem Bedarf eingesetzt werden darf. Das Versuchsdesign bestand aus 9 Plots à 36 m² (6 x 6 m). Die drei Verfahren (0, ES, SO_4) wurden dreimal wiederholt und in Blöcken angeordnet (Abbildung 1). In den Kunstwiesen wurden die drei Blöcke länglich hintereinander angeordnet (Abbildung 2). Die Schwefeldünger wurden in abgewogenen Mengen von Hand gestreut. Im Winterweizen und in den Kunstwiesen wurden die Schwefeldünger im Februar ausgebracht. Im Raps wurde der Elementare Schwefel, aufgrund der langsamen Verfügbarkeit und dem hohen S-Bedarf von Raps im Frühjahr, bereits im Dezember ausgebracht und der Sulfatschwefel im Februar. Der Winterweizen war zum Zeitpunkt der Düngung im 3-Blatt-Stadium (Diessbach) sowie beim Beginn der Bestockung (Lommiswil). Beim Raps war im Dezember das vierte Laubblatt entfaltet und im Februar der zweite bis dritte Seitenspross sichtbar (Tabelle 4 bis Tabelle 6).

Tabelle 2: Düngeverfahren und ausgebrachte Schwefelmenge

Kultur	Verfahren	Schwefeldünger	Düngemenge (kg/ha)	Schwefel (kg S/ha)
Winterweizen	0	Kontrolle	0	0
	SO_4	Calciumsulfat (15 % S)	200	30
	ES	Elementarer Schwefel (90 % S)	33	30
Kunstwiese	0	Kontrolle	0	0
	SO_4	Calciumsulfat (20 % S)	200	40
	ES	Elementarer Schwefel (90 % S)	44	40
Raps	0	Kontrolle	0	0
	SO_4	Calciumsulfat (15 % S)	280	42
	ES	Elementarer Schwefel (90 % S)	67	60

Tabelle 3: Mit Hof-, Recycling- und Handelsdüngern ausgebrachter Schwefel und Stickstoff

Schwefel aus:		WW-D	WW-L	KW-R	KW-O	KW-E	RA-F
- Gülle	kg S/ha	4.68	3.51		3.276	9.36	3.9
- Gärgülle	kg S/ha	12.6252			2.808		
- Mist	kg S/ha			9.6			20
- Handelsdünger	kg S/ha						35
Schwefel gesamt	kg S/ha	17.3	3.5	9.6	6.1	9.4	58.9

		WW-D	WW-L	KW-R	KW-O	KW-E	RA-F
Gesamtstickstoff N _{tot}	kg N/ha	158	30	35	52	80	192
Verfügbarer Stickstoff N _{verf}	kg N/ha	90	15	7	28	40	91

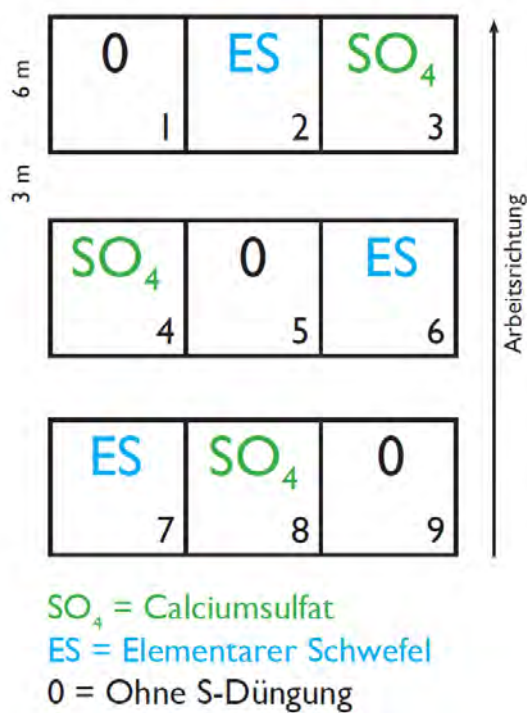


Abbildung 1: Versuchsdesign im Weizen und Raps (links) und Lage am Standort Lommiswil (rechts)



Abbildung 2: Versuchsdesign in Kunstwiese (links) und Lage am Standort Ellikon (rechts)

3.2 Probenahmen, Bonituren und Analysen

Die durchgeführten Feldarbeiten, Probenahmen und Bonituren mit Datum und Entwicklungsstadium der Pflanzen sind für Winterweizen in Tabelle 4, für Kunstwiese in Tabelle 5 und für Raps in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 4: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und BBCH Winterweizen

Beschreibung	Standort	Datum	BBCH
Bodenproben und Schwefeldüngung	WW-D	24.02.2025	13
	WW-L	24.02.2025	21
<i>Blütezeitpunkt:</i> Pflanzenproben (Fahnenblätter, Ganzpflanzen), Bodenbedeckung, Pflanzenhöhe und -gesundheit, SPAD	WW-D	03.06.2025	65
	WW-L	03.06.2025	61
<i>Erntezeitpunkt:</i> Ernteerhebung (Stroh, Korn, Unkraut), Ährengesundheit, Lagerbonitur	WW-D	09.07.2025	89
	WW-L	09.07.2025	89

Tabelle 5: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und Entwicklungsstadium Kunstwiesen

Beschreibung	Standort	Datum	Entwicklungsstadium Klee/ Leitgras
Bodenproben und Schwefeldüngung	KW-R	18.02.2025	
	KW-O	25.02.2025	
	KW-E	18.02.2025	
1. Schnitt, SPAD, Bodenbedeckung, Wuchshöhe Gras/Klee, Anteil Gras/Le-guminosen/Kräuter	KW-R	30.04.2025	Klee: 1, Leitgras 3
	KW-O	30.04.2025	Klee: 1, Leitgras 3
	KW-E	15.04.2025	Klee: 1, Leitgras 2
2. Schnitt, Wuchshöhe Gras/Klee	KW-R	23.06.2025	
	KW-O	06.06.2025	
	KW-E	06.06.2025	

Tabelle 6: Feldarbeit, Probenahmen, Bonituren und BBCH Raps

Beschreibung	Standort	Datum	BBCH
Bodenprobe und Düngung ES	RA-F	11.12.2024	14
Düngung SO ₄	RA-F	17.02.2025	22/23
<i>Blütezeitpunkt:</i> Blattprobe, SPAD	RA-F	14.04.2025	57



Abbildung 3: Bodenproben vor der Schwefeldüngung (links) und SPAD Messungen (rechts)

Bodenproben

Bodenproben wurden zu Beginn der Vegetationsperiode (Ausgangszustand vor der Schwefeldüngung) entnommen. Dazu 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 7). Zudem wurde N_{min} und S_{min} (CaCl₂ Extraktion gemäss Referenzmethoden von Agroscope) analysiert (Tabelle 8).

Tabelle 7: Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte Versuchsstandorte (0-30 cm)

		Standorte					
		WW-D	WW-L	KW-R	KW-O	KW-E	RA-F
Ton	% G/G	6	16	6	16	11	26
Schluff	% G/G	21	31	21	31	21	31
Sand	% G/G	73	53	73	53	68	43
Bodenart	Fühlprobe	lehmiger Sand	sandiger Lehm	lehmiger Sand	sandiger Lehm	stark lehmiger Sand	Lehm
pH-Wert	H ₂ O	6.9 neutral	7.47 schwach alkalisch	7.69 alkalisch	6.97 neutral	7.46 schwach alkalisch	7.58 schwach alkalisch
Kalkvorprobe		-	+	-	-	-	-
Humus	%	1.75 humus-arm	5.2 humos	3.18 schwach humos	3.36 schwach humos	2.73 schwach humos	3.85 schwach humos
Phosphor	CO ₂	genügend	Vorrat	angereichert	genügend	genügend	genügend
Kalium	CO ₂	mässig	mässig	genügend	mässig	genügend	Vorrat
Magnesium	CaCl ₂	genügend	mässig	mässig	angereichert	Vorrat	angereichert
Phosphor	EDTA	na	na	na	na	na	na
Kalium	EDTA	mässig	genügend	genügend	Vorrat	genügend	angereichert
Magnesium	EDTA	mässig	mässig	angereichert	angereichert	Vorrat	angereichert

Bonituren und Messungen im Feld

Mit einem SPAD 502 Plus Chlorophyll Meter (Konica Minolta) wurde der Chlorophyllgehalt ermittelt. Es wurden jeweils 15 Blätter pro Plot beprobt (Fahnenblatt bzw. oberstes voll entwickeltes Blatt) und die Werte gemittelt. Im Weizen wurde die Messung zum Blütezeitpunkt durchgeführt und im Raps kurz vor der Blüte. In den Kunstwiesen wurde zum Zeitpunkt des ersten Schnittes gemessen und Klee und Leitgras dabei separat erfasst.

Die Bodenbedeckung der Pflanzen wurde mit der App Canopeo (Bildanalyse) in drei Messungen pro Plot erhoben und gemittelt. Ausserdem wurde die Pflanzenhöhe gemessen. Im Winterweizen wurde zum Blütezeitpunkt eine Krankheitsbonitur (allgemeiner Fahnenblattzustand) und vor der Ernte eine Lagerbonitur nach dem Schema von Swiss granum durchgeführt. In der Kunstwiese wurde beim ersten Schnitt der Anteil Gräser, Leguminosen und Kräuter geschätzt sowie das Leitgras und die dominierende Leguminosenart bestimmt.



Abbildung 4: Ernteerhebung mit Holzrahmen 50 x 50 cm (links) und in Baumwollsäcke abgepackte Weizengarben (rechts)

Pflanzenproben und Ernteerhebungen

Im Winterweizen wurden zum Blütezeitpunkt Fahnenblätter von 15 Pflanzen aus dem gesamten Plotbereich gesammelt und Ganzpflanzen entlang eines Meters einer Saatreihe bodennah abgeschnitten. Kurz vor der Ernte der gesamten Parzelle durch die Praxisbetriebe wurde eine Handernte durchgeführt. Dazu wurden das Getreide mit

steckbaren Holzrahmen (50 x 50 cm) auf vier Teilflächen 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. Mit einem Standmähndrescher von Haldrup wurde das Korn vom Stroh getrennt. Die Körner wurden gewogen, eine Teilprobe getrocknet und der Ertrag auf 14.5 % Feuchte normiert.



Abbildung 5: Lufttrocknung Weizengarben in Baumwollsäcken (links) und Drusch der Körner (rechts)

In der Kunstwiese wurde die oberirdische Biomasse an zwei Schnittzeitpunkten erfasst. Dabei wurden ähnlich wie im Getreide mit steckbaren Holzrahmen (50 x 50 cm) zwei Teilflächen pro Plot abgesteckt (entspricht 0.5 m² Fläche) und die Biomasse auf 8 cm Schnitthöhe mit einer elektrischen Schere abgeschnitten und gewogen. Eine Teilmenge der geernteten Biomasse wurde zur Bestimmung der Trockensubstanz sowie für spätere Analysen mitgenommen.



Abbildung 6: Probenahme in der Kunstwiese mit Holzrahmen und elektrischer Schere

Im Raps wurden vor der Blüte von 20 Pflanzen pro Plot das oberste, vollständig ausgebildete Blatt gesammelt. Der Versuch musste aufgrund physiologischer Blütenwelke am

9. Mai umgebrochen werden. Eine Ernteerhebung konnte deshalb im Raps nicht durchgeführt werden.

Analysen: CNS, Qualitätsparameter Weizen, Futtermittelqualität Kunstwiese

Die Pflanzenproben vom Weizen (Fahnenblatt, Ganzpflanze, Stroh und Korn), von der Kunstwiese (oberirdische Biomasse vom 1. und 2. Schnitt) und vom Raps (Blätter) wurden bei 60 °C getrocknet und anschliessend fein gemahlen. 15-20 mg Pflanzenmaterial wurden in Zinnkapseln eingewogen und im Labor des Geographischen Instituts der Uni Bern mit einem Elemental Analyser CNS gemessen. Die Daten wurden anhand der Leerproben mit einer linearen Interpolation korrigiert. Einige S-Gehalte, insbesondere des Getreidestrohs, lagen unter dem Quantifikationslimit des Gerätes und konnten deshalb nicht für die Auswertung verwendet werden.

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.

Die Futtermittelqualität der Kunstwiesenproben (Rohprotein, Rohasche, ADF, ADL, NDF, Rohfett) wurde am FiBL mit dem NIRS bestimmt und der Aschegehalt mit dem prepASH. Zuvor wurden die Proben mit der Schneidemühle (SM100, Mahlgrad 1.0 mm) gemahlen. Aus den gemessenen Werten wurde anschliessend folgende Parameter berechnet: verdauliche organische Substanz, NEL, NEV, APDE und APDN.

3.3 Statistik

Die statistische Analyse wurde mit RStudio durchgeführt. Wo mehrere Standorte vorhanden waren, 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. Für die Analysen der Daten von nur einem Standort wurde der Faktor *Block* anstelle des Faktors *Standort* eingesetzt. Die Normalverteilung der Modellresiduen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft und die Homogenität der Varianzen mit dem Levene-Test. Einzelne Variablen erfüllten diese Bedingungen nicht. In diesem Fall wurde eine Transformation mit dekadischem Logarithmus oder Quadratwurzel verwendet. Variablen mit nicht signifikanten Resultaten wurden nicht transformiert. Für die Post-hoc-Analyse wurde der Sidak-Test verwendet, um Unterschiede zwischen den einzelnen Düngeverfahren zu identifizieren. Bei der Analyse der Kunstwiesen-Daten wurde zusätzlich der Faktor *Schnitt* ins Modell integriert (Anova über mehrere Standorte: *Düngeverfahren* + *Standort* + *Schnitt*, Anova von einem Standort: *Düngeverfahren* + *Schnitt*). Für die Analyse der Qualitätsparameter im Weizen wurde die Welch Anova mit dem Faktor *Düngeverfahren* eingesetzt, da aufgrund der kleinen Anzahl Wiederholungen pro Verfahren (n=2) die Varianzhomogenität auch nach der Transformation nicht gegeben war.

4. Resultate und Diskussion

4.1 Bodenuntersuchungen

Der $S_{\min}$ -Wert bezeichnet den pflanzenverfügbaren Sulfatschwefel. Die $S_{\min}$ -Gehalte in 0-30 cm zu Vegetationsbeginn bewegten sich zwischen 12.8 mg/kg am Standort Rheinau und 17.8 mg/kg am Standort Oberembrach (Tabelle 8). Am Standort Oberembrach wurde noch vor der Probenahme Gülle in die Kunstwiese ausgebracht, was den $S_{\min}$ -Gehalt beeinflussen kann. Vom tiefsten zum höchsten $S_{\min}$ -Wert geordnet, haben die Versuchsstandorte folgende Reihenfolge: Rheinau, Diessbach, Ellikon, Lommiswil, Frick, Oberembrach (Tabelle 8). Die Reihenfolge stimmt gut mit dem Tongehalt der Standorte überein. Rheinau und Diessbach sind mit 6 % Ton die leichtesten Standorte, gefolgt von Ellikon mit 11 % Ton. Lommiswil und Oberembrach sind mittelschwere Standorte mit 16 % Ton und Frick ist der schwerste Standort mit 26 % Ton (Tabelle 7). Da schwerere Böden ein besseres Wasserrückhaltevermögen haben, wird weniger Sulfatschwefel über den Winter ausgewaschen. Zudem haben tonreiche Böden typischerweise einen höheren Humusgehalt als sandige Böden, und dadurch eine höhere Nachlieferung von Sulfat aus der organischen Substanz.

Insgesamt waren die $S_{\min}$ -Gehalte deutlich höher als im ersten Versuchsjahr. Dort lagen sie, abgesehen von einem Standort mit 16.5 mg/kg, zwischen 2.5 und 12.9 mg/kg. Eine plausible Erklärung dieser Unterschiede ist die Menge der Winter-Niederschläge. Die kumulierten Winter-Niederschläge (Periode Oktober-März) betrugen zwischen 361 (Rheinau) und 567 mm (Diessbach) und waren damit deutlich geringer als im ersten Projektjahr mit 786 bis 925 mm. In der Folge war die Sulfat-Auswaschung im Winter 24/25 vermutlich geringer als im Winter und 23/24 und entsprechend die $S_{\min}$ -Werte im Frühjahr höher.

In der Literatur gibt es kein einheitliches Schema zur Einordnung der $S_{\min}$ -Gehalte, was die Interpretation der Werte erschwert. Eine Einteilung von Gehaltsklassen [3] geht bei $S_{\min}$ -Konzentration von mehr als 6.7 mg/kg Boden von einer hohen Schwefelversorgung aus, bei der für Futterleguminosen keine Schwefeldüngung empfohlen wird. Diesen Wert überschreiten alle Versuchsstandorte 2025. Auf die Fläche hochgerechnet, spricht man bei einem $S_{\min}$ -Gehalt von 30 bis 60 kg/ha in der Schicht von 0-60 cm von einer mittleren Schwefelversorgung [3]. Die diesjährigen Standorte lagen zwischen 48.1 und 66.7 kg/ha (Tabelle 8). Da in diesem Projekt nur die obere Schicht von 0-30 cm beprobt wurde, sind die Werte nicht direkt vergleichbar. Eine Hochrechnung auf die Schicht 0-60 cm ($2 * S_{\min}\text{-Wert } 0\text{-}30 \text{ cm} \approx S_{\min}\text{-Wert } 0\text{-}60 \text{ cm}$) ist unter der vereinfachten Annahme einer gleichmässigen $S_{\min}$ -Verteilung möglich und weist auf sehr hohe $S_{\min}$ -Gehalte im Versuchsjahr 2025 hin. Bei Winterweizen mit mittlerem bis hohem Ertragsniveau wird im konventionellen Anbau die Schwefeldüngung zur ersten N-Gabe empfohlen, wenn die $S_{\min}$ -Werte in 0-30 cm Tiefe unter 30 kg/ha liegen [11]. Dies war an keinem Standort der Fall. Sulfat in der Tiefe von 0-30 cm ist für die S-Versorgung des Winterweizens im Frühjahr besonders wichtig. Bei guter Wurzelentwicklung können die Pflanzen zirka ab Beginn des Schossens auch den Sulfat in 30-60 cm Tiefe nutzen [11].

Tabelle 8: $S_{\min}$ und $N_{\min}$ der Versuchsstandorte 2025

		Standort							
		WW-D	WW-D	WW-L	WW-L	KW-R	KW-O	KW-E	RA-F
Schicht	cm	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	0-30	0-30	0-30
$S_{\min}$	mg/kg TS	14.4		15.7		12.8	17.8	14.5	17.6
$S_{\min}$ pro Schicht	kg S/ha	54.2		58.8		48.1	66.7	54.5	66.2
Nitrat	mg/kg TS	3.1	1.8	12.3	10.8	1.5	5.5	3.3	8.1
Ammonium	mg/kg TS	1.3	0.6	1.2	0.0	1.3	0	0	0
$N_{\min}$	mg/kg TS	4.4	2.3	13.5	10.8	2.8	5.5	3.3	8.1
$N_{\min}$ pro Schicht	kg N/ha	13.1	7.3	40.5	33.6	10.4	20.6	12.3	30.3

Die $N_{\min}$ -Werte korrelierten insbesondere im niedrigen Gehaltsbereich gut mit den $S_{\min}$ -Werten. Der Standort Rheinau wies mit 10.4 kg/ha den tiefsten $N_{\min}$ -Wert in 0-30 cm auf, gefolgt von Ellikon und Diessbach. Lommiswil wies mit 40.5 kg/ha den höchsten Wert auf (Tabelle 8).

Wichtig zur Beurteilung des S-Angebots des Bodens ist auch der Humusgehalt, da die organische Bodensubstanz die wichtigste Quelle für die Nachlieferung von Sulfatschwefel im Boden ist. Den höchsten Humusgehalt wies der Standort Lommiswil auf (humos), die anderen Standorte sind schwach humos bis humusarm im Fall von Diessbach. Der Boden-pH war an den meisten Standorten im schwach alkalischen (Lommiswil, Ellikon, Frick) bis alkalischen Bereich (Rheinau). Diessbach und Oberembrach wiesen einen neutralen Boden-pH auf (Tabelle 7).

4.2 Winterweizen

Winterweizen hat einen S-Entzug von 23 kg/ha. Die empfohlene Düngemenge liegt bei 0 bis 20 kg S/ha und diese sollte zu Vegetationsbeginn bis zu 1-Knoten-Stadium ausgebracht werden [1, 8]. Mit Hofdüngern wurden am Standort Diessbach 17.3 kg S/ha und am Standort Lommiswil 3.5 kg S/ha ausgebracht. Die beiden Betriebe arbeiten unterschiedlich intensiv, was sich auch in der ausgebrachten Gesamtstickstoffmenge zeigt, die in Diessbach 158 kg N_{ges} /ha betrug und in Lommiswil 30 kg N_{ges} /ha. Zusätzlich zu den mit Hofdüngern ausgebrachten Schwefelmengen, kommen noch 5 bis 10 kg S/ha und Jahr über Luftdeposition dazu [5]. Im Fall von Diessbach würde die kumulierte S-Menge aus Hofdünger und Lufteintrag theoretisch ausreichen, um den Weizen zu ver-

sorgen. Es steht jedoch nur ein kleiner Teil von 5 bis 10 % des Schwefels aus den Hofdüngern den Pflanzen im Anwendungsjahr zur Verfügung. Zudem ist die Herausforderung beim Getreide der frühe Vegetationsstart, wenn die S-Mineralisierung aus der organischen Substanz noch gar nicht richtig in Gange ist [9].



Abbildung 7: Winterweizen an den Standorten Diessbach (links) und Lommiswil (rechts) zum Zeitpunkt der Schwefelgabe, der Blüte und der Ernte

4.2.1 Bonituren, SPAD und Ernteerhebungen

Die Winterweizen-Versuche waren zum Blüte- und zum Erntezeitpunkt in einem sehr guten Zustand (Abbildung 7). Die Bestände waren an beiden Standorten gesund und es war wenig Unkraut vorhanden. Am Standort Diessbach trat zum Erntezeitpunkt etwas Lager auf, am Standort Lommiswil konnte kein Lager beobachtet werden.

Die Schwefeldüngung mit elementarem Schwefel (ES) und Sulfatschwefel (SO_4) hatte zum Blütezeitpunkt keinen Einfluss auf die Bodenbedeckung und den SPAD-Index (Abbildung 8). Auch bei der Messung der Pflanzenhöhe und der Krankheitsbonitur (allgemeiner Fahrenblattzustand) konnte kein Einfluss der Schwefeldüngung festgestellt werden (Daten nicht gezeigt).

Im Vorjahr wurde eine leicht erhöhte Bodenbedeckung im Verfahren mit ES gegenüber der Kontrolle ohne S-Dünger festgestellt, wobei damals mit ES die doppelte Schwefelmenge eingesetzt wurde, was im Versuchsjahr 2025 dann angeglichen wurde.

Die Schwefeldüngung mit ES und SO_4 hatte keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Kornерtrag und den Strohertrag. Auch die Unkraut-Biomasse und das Auftreten von Lager zum Erntezeitpunkt wurde von der Schwefeldüngung nicht beeinflusst (Abbildung 8). Am Standort Diessbach ist eine Tendenz zu einem leicht höheren Kornерtrag in den Verfahren mit Schwefeldüngung (insbesondere ES) gegenüber der 0-Kontrolle sichtbar. Auch der Strohertrag war am Standort Diessbach tendenziell höher in den Verfahren mit Schwefeldüngung (insbesondere Sulfatschwefel) als in der Kontrolle ohne Schwefeldüngung. Beide Tendenzen konnten jedoch nicht statistisch belegt werden.

Wie schon im ersten Projektjahr liegen die Erträge der Handerntten deutlich über den Flächenerträgen der Betriebe (44 dt/ha in Diessbach und 30 dt/ha in Lommiswil). Ein Einfluss der Sulfat-Düngung auf die Unkraut-Biomasse konnte in diesem Jahr nicht bestätigt werden, u.a. vielleicht weil es sehr wenig Unkraut-Biomasse gab.

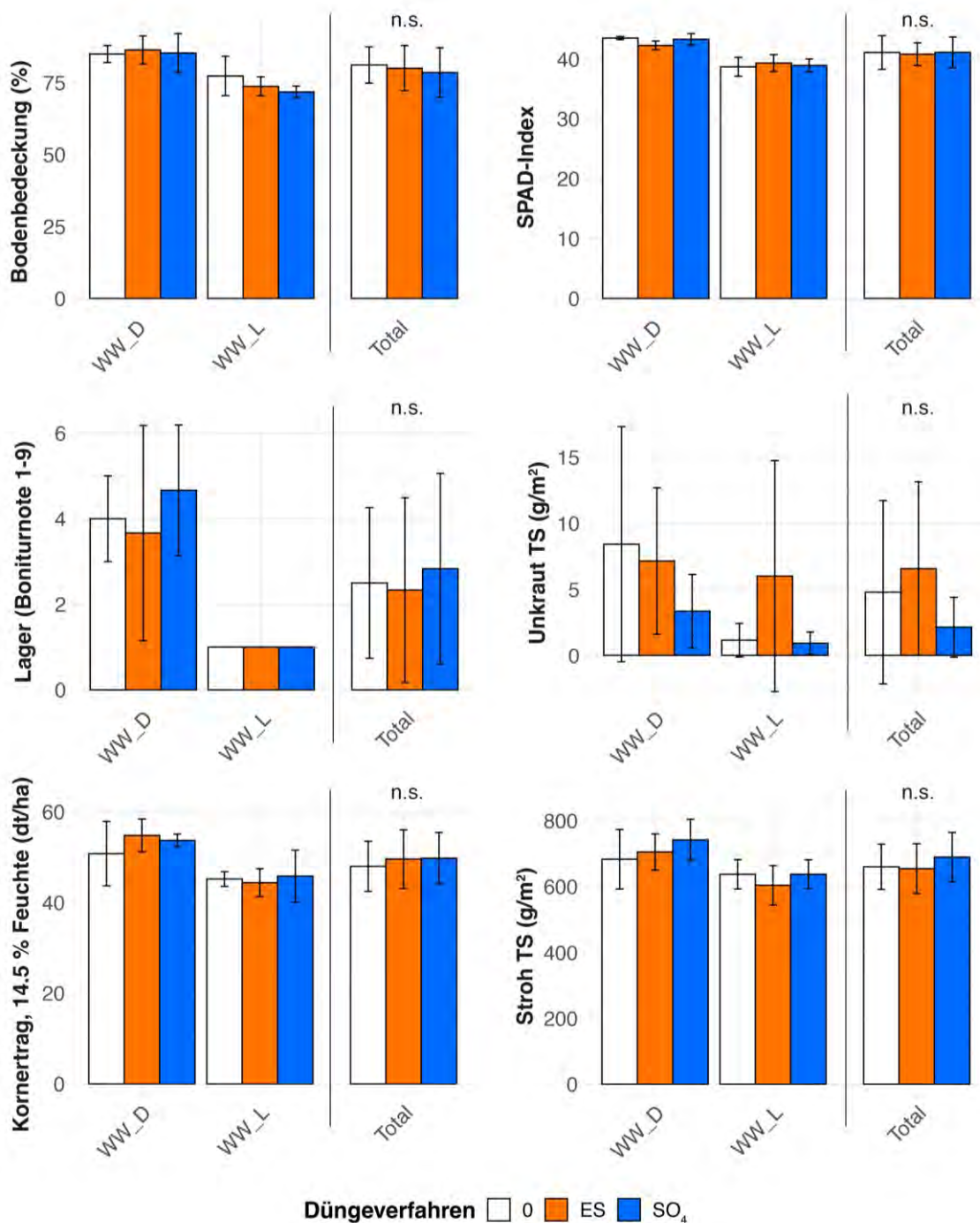


Abbildung 8: Bodenbedeckung, SPAD-Index, Lager-Bonitur, Unkraut-Biomasse, Kornertrag und Strohertrag im Winterweizen an 2 Standorten (n=3) sowie insgesamt (Total, n=6). Mittelwerte und Standardabweichung der Düngeverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

4.2.2 Pflanzenanalysen

Die Schwefeldüngung beeinflusste im Weizen zum Blütezeitpunkt die S-Konzentration im Fahnenblatt hochsignifikant ($p < 0.001$, Abbildung 9). Die S-Konzentration im Fahnenblatt war im Verfahren mit Sulfatschwefel deutlich erhöht gegenüber dem Verfahren mit ES und der 0-Kontrolle. In der Ganzpflanze war dieser Effekt auch sichtbar, wenn auch abgeschwächt ($p = 0.021$). Hier war die S-Konzentration im SO_4 -Verfahren höher als im ES-Verfahren, aber nicht höher als in der 0-Kontrolle.

Dass die S-Konzentration im Fahnenblatt im SO_4 -Verfahren erhöht war und im ES-Verfahren nicht, deutet darauf hin, dass die Umwandlung des Elementarschwefels zum Blütezeitpunkt noch nicht so weit fortgeschritten war. Elementarer Schwefel muss von Bodenbakterien in einem temperaturabhängigen Prozess zuerst zu Sulfatschwefel oxidiert werden. Möglicherweise ist die Gabe von elementarem Schwefel zu Vegetationsbeginn zu spät, weshalb die Weizenpflanze ihn nicht gut nutzen kann.

Die S-Konzentration im Korn zum Erntezeitpunkt wurde nur am Standort Lommiswil von den Düngeverfahren beeinflusst. Erstaunlicherweise wurde in der 0-Kontrolle eine signifikant höhere S-Konzentration (0.16 %) als im Verfahren mit ES (0.14 %) gemessen ($p = 0.024$). Das Verfahren mit SO_4 lag dazwischen (0.15 %). Ein Verdünnungseffekt durch höheren Ertrag ist unwahrscheinlich, weil der Kornertrag am Standort Lommiswil zwischen den Düngeverfahren sehr ähnlich war (Abbildung 8).

Die Daten zur S-Konzentration im Stroh konnten nicht statistisch ausgewertet werden, da sehr viele Messwerte bei der CNS-Messung unter dem Quantifikationslimit des Gerätes lagen. Die vorhandenen Daten lassen aber erahnen, dass die S-Konzentration im SO_4 -Verfahren, wie schon im Vorjahr, erhöht war (Abbildung 9).

Die gemessenen S-Konzentrationen stimmen gut mit den Werten aus der Literatur überein, die 0.15-0.65 % für Fahnenblätter [1], 0.1367 % für Weizenkörner (www.feedbase.ch) und 0.08 % TS für Weizenstroh [10] angibt. Dies zeigt, dass das CNS-Gerät besser geeignet ist für die Bestimmung der S-Konzentration in den Pflanzenproben als das ICP-MS/MS im ersten Projektjahr, welches eine sehr tiefe S-Wiederfindungsrate aufwies.

Die N-Konzentration der untersuchten Pflanzenteile (Fahnenblatt, Ganzpflanze, Korn, Stroh) wurde von der Schwefeldüngung nicht beeinflusst (Abbildung 9).

Die Schwefeldüngung wirkte sich hochsignifikant auf das N/S-Verhältnis im Fahnenblatt aus ($p < 0.001$), welches im SO_4 -Verfahren tiefer war als in den anderen beiden Verfahren (Abbildung 9). In der Ganzpflanze und im Stroh war ein ähnliches 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 im Fahnenblatt, in der Ganzpflanze und im Korn zwischen 11 und 13. Im SO_4 -Verfahren ist es im Fahnenblatt und in der Ganzpflanze tiefer und liegt bei 9.4, was auf eine bessere Schwefelversorgung schliessen lässt.

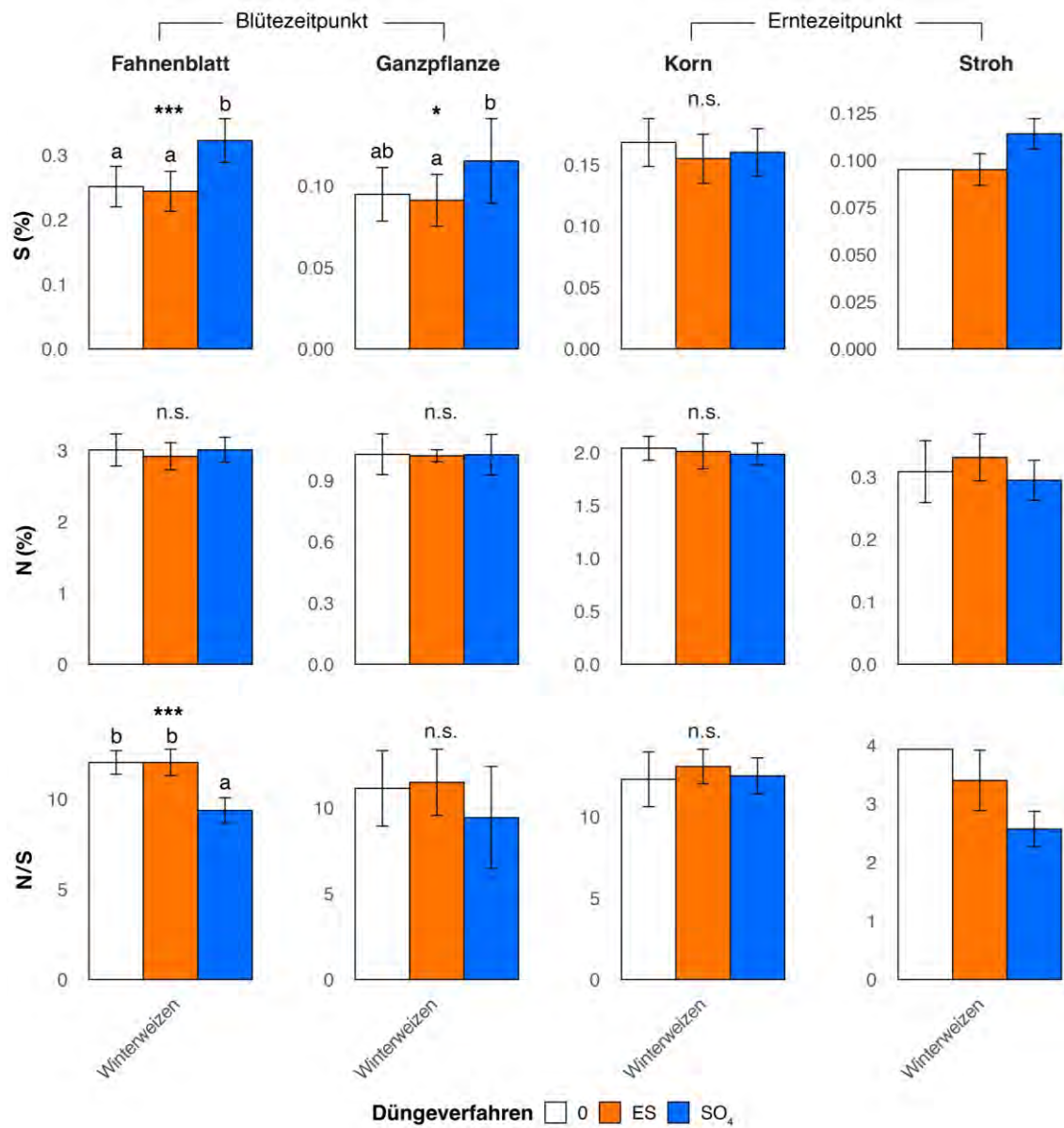


Abbildung 9: S- und N-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Winterweizen; Fahnenblatt, Ganzpflanze, Korn und Stroh. Mittelwerte und Standardabweichung aufgeteilt nach Düngeverfahren (n=6): 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat. Keine statistische Auswertung für Stroh-Parameter.

4.2.3 Qualitätsparameter

Die Schwefeldüngung im Weizen hatte keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Qualitätsparameter Hektolitergewicht, Proteingehalt und Sedimentationswert nach Zeleny (Abbildung 10). Es gab einen Trend zu tieferem Feuchtgluten-Gehalt im Verfahren mit Sulfatschwefel gegenüber der 0-Kontrolle ($p=0.07$). Der Feuchtgluten ist der Teil des Kornproteins, der nach dem Auswaschen der wasserlöslichen Fraktion zurückbleibt. Normale Mehle weisen Gehalte von 27-37 % auf, schwache Mehle weniger als 27 % [12]. Im SO_4 -Verfahren betrug der Feuchtgluten 25.9 % was einem schwachen Mehl entspricht. Im ES-Verfahren und in der 0-Kontrolle lag der Feuchtgluten-Wert im normalen Bereich über 27 %.

Auch im Proteingehalt und im Zeleny sind mit Schwefeldüngung tendenziell tiefere Werte als in der 0-Kontrolle zu beobachten, können aber nicht statistisch belegt werden. Schon im ersten Projektjahr gab es in den Verfahren mit Schwefeldüngung eine Tendenz zu tieferen Zeleny-Werten. Der Sedimentationswert nach Zeleny ist eine Masszahl für die Quellfähigkeit des Eiweisses; hohe Werte deuten auf eine gute Eiweissqualität hin [12].

Da für die Qualitätsanalyse Mischproben pro Standort und Düngeverfahren gebildet wurden, stehen lediglich zwei Wiederholungen zur Verfügung, was die statistische Absicherung der Ergebnisse deutlich limitiert. Insgesamt kann gesagt werden, dass die Schwefeldüngung keinen signifikanten Effekt auf die Weizenqualität hatte und in beiden Versuchsjahren eher eine Tendenz zur Verschlechterung der Backeigenschaften beobachtet wurde.

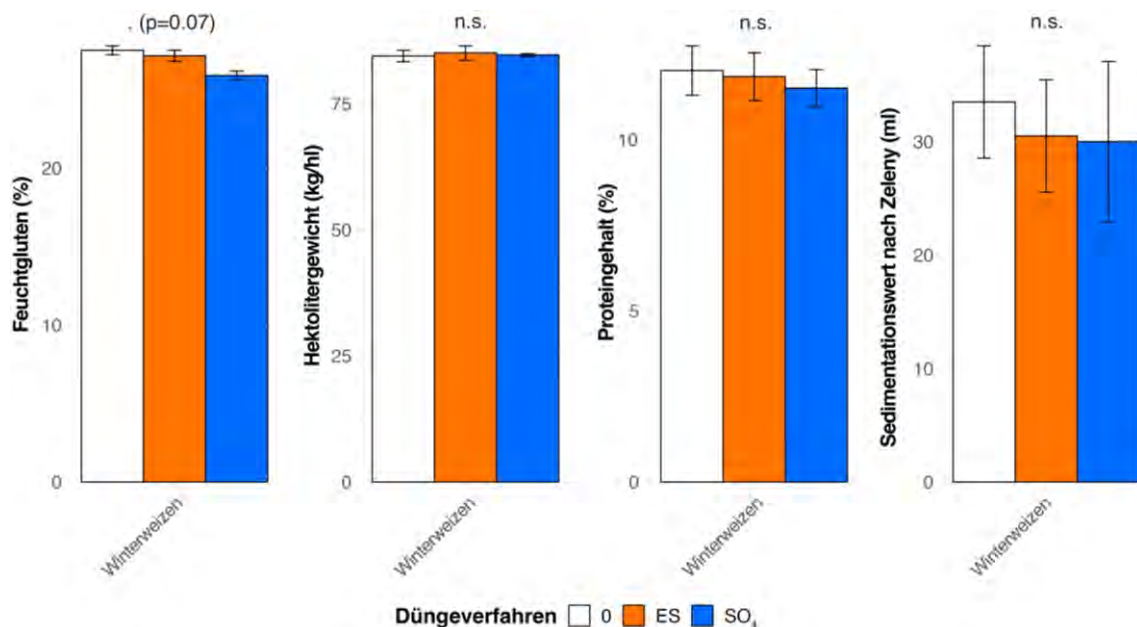


Abbildung 10: Qualitätsparameter im Weizen: Feuchtgluten, Hektolitergewicht, Proteingehalt und Sedimentationswert nach Zeleny. Mittelwerte und Standardabweichung der Düngeverfahren ($n=2$): 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO_4 = Calciumsulfat

4.3 Kunstwiese

Kunstwiese weist einen S-Entzug von 20 bis 25 kg S/ha auf. Die empfohlene Düngemenge liegt zwischen 0 und 40 kg S/ha [1, 8]. Mit Hofdüngern wurden am Standort Rheinau 9.6 kg S/ha, am Standort Oberembrach 6.1 kg S/ha und am Standort Ellikon 9.4 kg S/ha ausgebracht. An den Standorten Rheinau und Ellikon befanden sich die Kunstwiesen im ersten Hauptnutzungsjahr und am Standort Oberembrach im zweiten. Der Pflanzenbestand war an allen drei Standorten gemäss AGFF Merkblatt als «Leguminosenreich (L)» einzuordnen, mit mehr als 50 % Kleearten [15]. Details zu den verwendeten Kunstwiesen-Mischungen der drei Standorte sind in Anhang 2 aufgeführt. Zum Zeitpunkt des ersten Schnittes war das Leitgras an allen drei Standorten Englisch Raygras. Die dominierende Leguminose war Rotklee an den Standorten Rheinau und Oberembrach und Luzerne am Standort Ellikon.





Abbildung 11: Kunstwiese an den Standorten Rheinau, Oberembrach und Ellikon zum Zeitpunkt der Schwefelgabe (links) und des ersten Schnittes (rechts)

4.3.1 Bonituren, SPAD und Ernteerhebungen

Die Schwefeldüngung hatte einen signifikanten Effekt auf den SPAD-Index des Klees bzw. der dominierenden Leguminose im Bestand ($p=0.013$, Abbildung 12). Der SPAD-Index war im SO_4 -Verfahren höher als im ES-Verfahren und in der 0-Kontrolle. Am Standort Rheinau war dieser Effekt besonders deutlich ausgeprägt ($p=0.000$, Abbildung 13). Der SPAD-Index der Gräser wurde von den Düngeverfahren nicht beeinflusst. Der SPAD-Index ist ein relativer Wert, welcher den Chlorophyllgehalt der Blätter beschreibt und indirekt Auskunft über die Stickstoffversorgung der Pflanze gibt. Die SPAD-Messung ist nicht eindeutig nährstoffspezifisch, sondern basiert auf der Annahme, dass die Grünfärbung stark von der Stickstoffversorgung bestimmt wird. Möglicherweise kann auch eine Unterversorgung mit Schwefel den Messwert beeinflussen. Dass der SPAD-Index durch die Sulfat-Düngung im Klee zunimmt, aber im Gras unverändert bleibt, hängt vermutlich damit zusammen, dass Leguminosen für die Eiweissbildung einen grösseren S-Bedarf haben als Gräser [9]. Das Wachstum und die Stickstofffixierung von Leguminosen werden stark durch Schwefel beeinflusst [3].

Die Schwefeldüngung hatte keinen Einfluss auf die mittlere Pflanzenhöhe des Leitgrases und der dominierenden Leguminose zum Zeitpunkt des ersten Schnittes (Abbildung 12). Einzig am Standort Ellikon konnte ein Trend für höhere Gräser mit Schwefeldüngung beobachtet werden ($p=0.07$, Abbildung 13). Im prozentualen Anteil von Gräsern und Leguminosen im Bestand konnte ein Muster beobachtet werden, dass der Anteil Leguminosen durch Schwefeldüngung zunahm und der Anteil Gräser abnahm, und zwar in der Reihenfolge 0, ES, SO_4 (Abbildung 12). Dies konnte aber aufgrund der hohen Streuung nicht statistisch abgesichert werden.

Die Bodenbedeckung wurde von der Schwefeldüngung nicht beeinflusst (Daten nicht gezeigt).

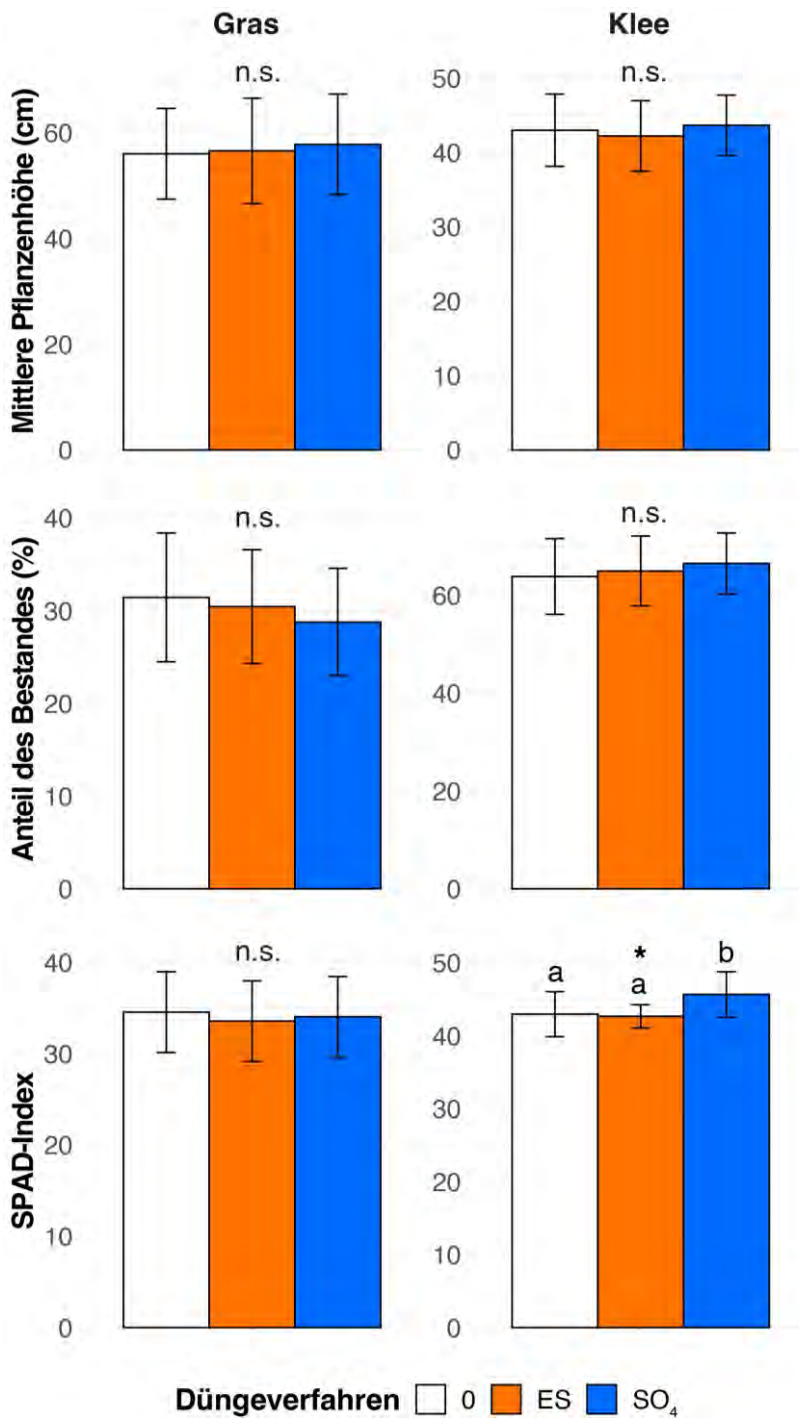


Abbildung 12: Mittlere Pflanzenhöhe, Anteil des Bestandes und SPAD-Index von Gras (rechts) und Klee (links) aus Kunstwiesen. Mittelwerte und Standardabweichung pro Düngerverfahren (n=9): 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

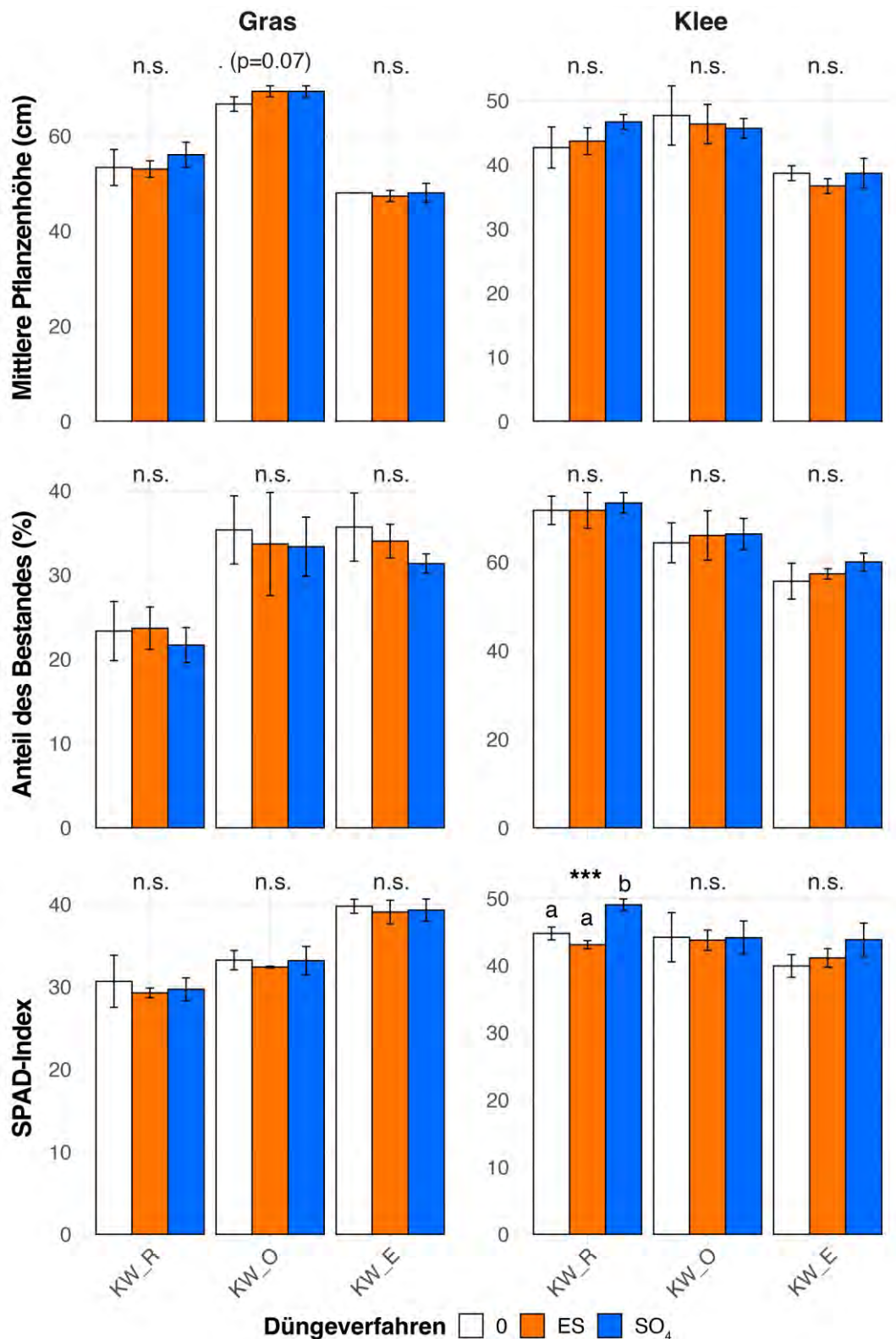


Abbildung 13: Mittlere Pflanzenhöhe, Anteil des Bestandes und SPAD-Index von Gras (rechts) und Klee (links) in Kunstwiesen beim ersten Schnitt. Mittelwerte und Standardabweichung von drei Standorten und pro Düngerverfahren (n=3): 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

Die Sulfat-Düngung hatte am Standort Rheinau einen deutlichen Einfluss auf den Biomasse-Ertrag der Kunstwiese (Abbildung 15). Dieser Effekt war beim zweiten Schnitt auch von Auge zu erkennen (Abbildung 14). Über beide Schnitte kumuliert wurden am Standort Rheinau im SO_4 -Verfahren (75.3 dt TS/ha) 25.8 dt TS/ha mehr geerntet als in der 0-Kontrolle (49.5 dt TS/ha). Statistisch liess sich dieser Effekt leider aufgrund der grossen Streuung nur als Trend ($p=0.06$) beim ersten Schnitt aufzeigen. Beim ersten Schnitt zeigte sich auch ein Trend zu höheren Biomasse-Erträgen mit Sulfat-Düngung über alle Standorte ($p=0.08$). An den Standorten Ellikon und Oberembrach konnte kein signifikanter Einfluss der Schwefeldüngung auf den Kunstwiesen-Ertrag festgestellt werden (Abbildung 15). Dennoch betrug der Unterschied im kumulierten Ertrag über alle Standorte gemittelt zwischen dem SO_4 -Verfahren (78.1 dt TS/ha) und der 0-Kontrolle (67.9 dt TS/ha) ganze 10 dt TS/ha.



Abbildung 14: Von Auge sichtbare Unterschiede in den Verfahren ohne Schwefeldüngung (0), mit Elementarem Schwefel (ES) und Sulfatschwefel (SO_4) in der Kunstwiese am Standort Rheinau (zweiter Schnitt)

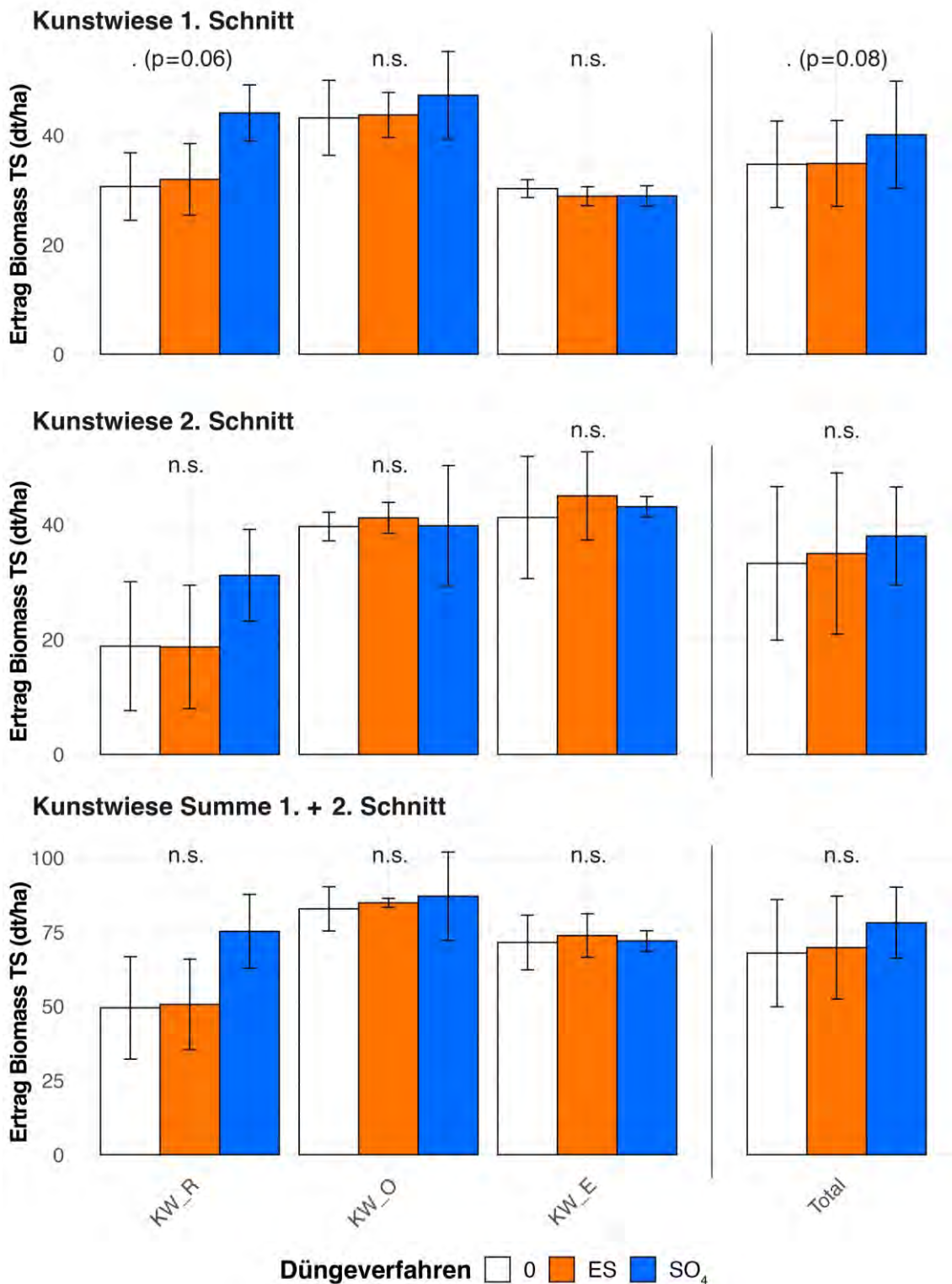


Abbildung 15: TS-Ertrag von Kunstwiesen beim 1. und 2. Schnitt sowie die Summe beider Schnitte. Mittelwerte und Standardabweichung pro Standort (n=3) und über alle Standorte (Total, n=9) sowie pro Düngerverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

4.3.2 Pflanzenanalysen

Die Schwefeldüngung hatte einen hoch signifikanten Einfluss auf die S-Konzentration in der Kunstwiesen-Biomasse. Die Proben aus dem SO_4 -Verfahren wiesen über alle Standorte und beide Schnitte hinweg eine deutlich höhere S-Konzentration auf, als die Proben aus dem ES-Verfahren und der 0-Kontrolle ($p=0.009$, Abbildung 16). Am Standort Oberembrach war dieser Effekt mit grosser Deutlichkeit sichtbar ($p=0.002$). Am Standort Ellikon ($p=0.035$) war die S-Konzentration im SO_4 -Verfahren interessanterweise vor allem gegenüber dem ES-Verfahren erhöht und weniger gegenüber der 0-Kontrolle; diese Unterschiede konnten aber durch den Post-hoc-Test nicht abgesichert werden. Ein ähnliches Muster zeigte sich auch am Standort Rheinau beim ersten Schnitt, wo die S-Konzentration im SO_4 -Verfahren (0.123 %) und in der 0-Kontrolle (0.121 %) höchst signifikant höher war als im ES-Verfahren (0.102 %, $p=0.000$).

Die N-Konzentration in der Kunstwiesen-Biomasse wurde von der Schwefeldüngung nicht beeinflusst. Am Standort Rheinau ist die N-Konzentration in den mit Schwefel gedüngten Verfahren etwas höher als in der 0-Kontrolle, dies konnte aber nicht statistisch abgesichert werden (Abbildung 16).

Das N/S-Verhältnis wurde von der Schwefeldüngung ebenfalls beeinflusst (Abbildung 16). Über alle Standorte und beide Schnitte hinweg wurde in den Proben aus dem ES-Verfahren (17.9) ein höheres N/S-Verhältnis gefunden als in denjenigen aus dem SO_4 -Verfahren (14.5, $p=0.039$). Dieses Muster zeigte sich an den Standorten Rheinau und Ellikon. Da ein N/S-Verhältnis über 15 auf Schwefelmangel hinweist [14], ist es überraschend, dass dieses Verhältnis im Verfahren mit Elementarem Schwefel gefunden wurde. Es ist ein Hinweis, dass der Elementare Schwefel den Kulturen nicht schnell genug zur Verfügung steht, wenn er zu Vegetationsbeginn ausgebracht wird. Am Standort Oberembrach war das N/S-Verhältnis –so wie es eher zu erwarten ist – in der 0-Kontrolle (15.8) gegenüber dem SO_4 -Verfahren (10.5) erhöht ($p=0.12$).

Die S-Konzentration in der Kunstwiesen-Biomasse ist auch für die Fütterung von Wiederkäuern relevant, deren Pansenmikroben zur Zelluloseverdauung und zu Aminosäuren-Aufbau Schwefel benötigen [16]. Ist die Schwefelversorgung der Kunstwiese nicht gewährleistet, führt dies zu geringeren Energiegehalten des Futters und beeinflusst die Stabilität im Verlauf der Silage-Lagerung [9]. Die S-Konzentration in der Kunstwiesen-Biomasse sollte nicht unter 0.2 % S liegen und das N/S-Verhältnis maximal bei 12:1 [9, 16]. Am Standort Rheinau lag die S-Konzentration in allen Verfahren unter 0.2 %, nahm aber in den Verfahren mit Schwefeldüngung vom ersten zum zweiten Schnitt zu. Die S-Konzentration erhöhte sich von 0.10 auf 0.17 % im ES-Verfahren und von 0.12 auf 0.19% im SO_4 -Verfahren, während sie in der 0-Kontrolle unverändert bei 0.12 % blieb. Das N/S-Verhältnis war überall höher als 12:1, ausser in den Sulfat-gedüngten Proben in Oberembrach und Ellikon.

Die Auswertung der Daten zur Futtermittelqualität der Kunstwiesen-Proben ist noch nicht abgeschlossen und wird zu einem späteren Zeitpunkt dem Bericht beigelegt. Es soll zudem noch die Meinung einer Fachperson für Futtermittelqualität vom FiBL und/oder vom Strickhof beigezogen werden.

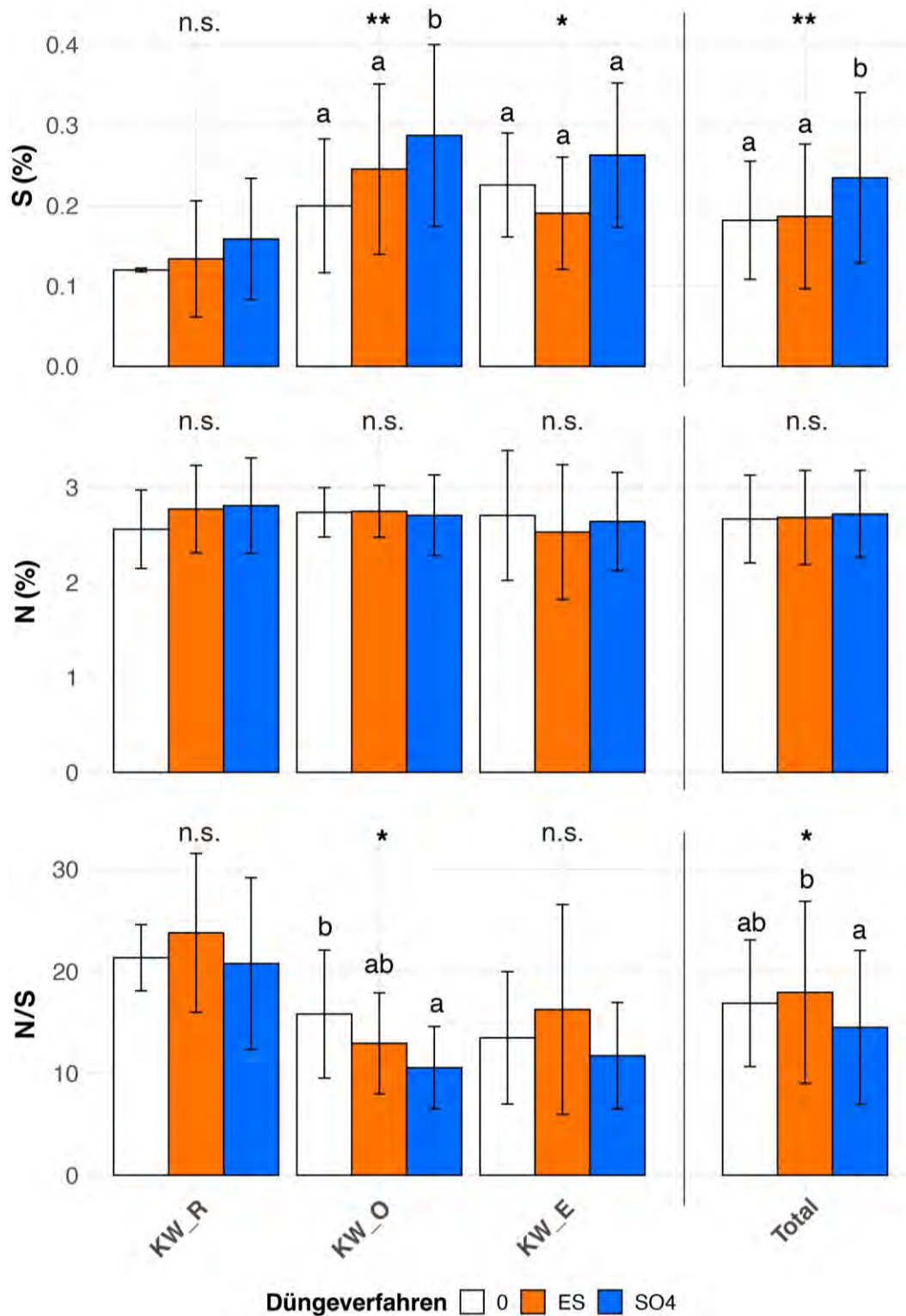


Abbildung 16: S- und N-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Kunstwiesen (oberirdische Biomasse von zwei Schnitten). Mittelwerte und Standardabweichung pro Standort (n=6) und über alle Standorte (Total, n=18) sowie pro Düngerverfahren: 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

4.4 Raps

Die Schwefeldüngung hatte im Raps keinen signifikanten Einfluss auf den SPAD-Index, die S- und N-Konzentration und das N/S-Verhältnis in den Blättern (Tabelle 9). Der SPAD-Index war in den Verfahren mit Schwefeldüngung minimal höher als in der 0-Kontrolle. Die N-Konzentration von 4 % ist eher tief und liegt an der unteren Grenze der GRUD-Normwerte von 4 bis 6.4 % während die S-Konzentration mit 1 % eher hoch ist und knapp über der oberen Grenze von 0.65 bis 0.9 % liegt [1, Modul 3]. Entsprechend war das N/S-Verhältnis mit 4 ziemlich tief, was auf eine gute Schwefelversorgung hinweist.

Im Raps trat im Frühling physiologische Blütenwelke auf. Die Blütenknospen öffneten sich nicht und verkümmerten (Abbildung 17). Der Versuch musste deshalb umgebrochen werden und es konnte keine Ernterhebung durchgeführt werden.



Abbildung 17: Raps am Standort Frick zum Zeitpunkt der Schwefelgabe im Dezember und Februar (oben) sowie im Frühjahr mit physiologischer Knospenwelke (unten)

Tabelle 9: SPAD-Index, N- und S-Konzentration sowie N/S-Verhältnis von Rapsblättern zum Blütezeitpunkt. Mittelwerte und Standardabweichung pro Düngerverfahren (n=3): 0 = kein Schwefeldünger, ES = Elementarer Schwefel, SO₄ = Calciumsulfat.

Verfahren	SPAD-Index	N (%)	S (%)	N/S
0	58.3 ± 3.7	3.98 ± 0.2	0.97 ± 0.2	4.15 ± 0.5
ES	60.3 ± 1.7	4.05 ± 0.5	1.04 ± 0.2	3.94 ± 0.5
SO₄	60.9 ± 0.3	3.88 ± 0.4	1.02 ± 0.4	4.12 ± 1.2
<i>Anova</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>

5. Schlussfolgerungen

Winterweizen

Im Versuchsjahr 2025 hatte die Schwefeldüngung im Winterweizen keinen signifikanten Einfluss auf den Korn- und Strohertrag. Auch die Bodenbedeckung, der SPAD-Index, die Pflanzengesundheit, das Auftreten von Lager und die Unkrautbiomasse wurden durch die Schwefeldüngung nicht signifikant beeinflusst. Zudem erfolgte keine Verbesserung der Qualitätsparameter, sondern eine geringfügige Verschlechterung, die aber statistisch nicht belegt werden konnte.

In den Pflanzenanalysen zeigte sich jedoch ein klarer Einfluss der Sulfatdüngung auf die Schwefelgehalte der Pflanzen. Zum Blütezeitpunkt des Weizens führt der Sulfatschwefel, insbesondere im Fahnenblatt, zu höheren S-Konzentrationen und zu einem deutlich tieferen N/S-Verhältnis, was auf eine verbesserte Schwefelversorgung hinweist. Der Elementare Schwefel zeigte zu diesem Zeitpunkt keinen vergleichbaren Effekt, was auf eine zu späte Applikation bzw. auf eine verzögerte Umwandlung in pflanzenverfügbaren Sulfatschwefel hinweist.

Diese Resultate bestätigten die Ergebnisse vom ersten Projektjahr. Die Schwefeldüngung im Winterweizen führt im Fall von Sulfat zwar zu höheren S-Konzentrationen in den Pflanzen, zeigt aber auf den untersuchten Standorten keine agronomischen Vorteile in Bezug auf den Ertrag oder die Qualität des Winterweizens. Die Hof-/Recyclingdüngergaben, die Nachlieferung aus der organischen Substanz und der S-Eintrag aus der Luft scheinen den Bedarf des Weizens zu decken. Zusätzlich haben im Versuchsjahr 2025 aufgrund reduzierter Winterniederschläge, hohe S_{min}-Gehalte zu Vegetationsbeginn die Versorgung der Pflanzen unterstützt.

Kunstwiese

Die Düngung mit Sulfatschwefel führte in den Kunstwiesen zu signifikant höheren SPAD-Indices bei den Leguminosen, nicht jedoch bei den Gräsern. Das zeigt, wie wichtig eine ausreichende Schwefelversorgung für Leguminosen und ihre Fähigkeit zur Stickstofffixierung ist. Elementarer Schwefel hatte keinen Effekt auf den SPAD-Index.

Die Sulfatdüngung erhöhte die S-Konzentrationen in der Biomasse signifikant und senkte das N/S-Verhältnis gegenüber der Kontrolle und dem ES-Verfahren. Dies lässt auf eine bessere Schwefelversorgung in den mit Sulfat gedüngten Flächen schliessen. Die Düngung mit Elementarem Schwefel führte teilweise sogar zu einem höheren N/S-Verhältnis in der Biomasse als in den ungedüngten Kontrollen, was darauf hindeutet, dass der Elementare Schwefel nicht rechtzeitig pflanzenverfügbar wurde und die Ausbringung zu Vegetationsbeginn zu spät ist.

Die Schwefeldüngung hatte keinen Einfluss auf die Bodenbedeckung und einen sehr geringen Einfluss auf die Pflanzenhöhe. Bei der botanischen Zusammensetzung wurde ein tendenziell höherer Anteil Leguminosen und geringerer Anteil Gras in den Flächen mit Schwefeldüngung beobachtet, was aber statistisch nicht belegt werden konnte.

In Bezug auf den Kunstwiesen-Ertrag war insbesondere am Standort Rheinau ein deutlicher Mehrertrag durch Sulfatschwefel zu beobachten, der über zwei Schnitte kumuliert rund 26 dt TS/ha gegenüber der Kontrolle betrug. Über alle Standorte gemittelt zeigte sich zwar ein Trend zu höheren Kunstwiesen-Erträgen mit Sulfatschwefel, dieser konnte aber aufgrund der grossen Streuung nicht statistisch abgesichert werden.

Das N/S-Verhältnis war am Standort Rheinau gegenüber den anderen Standorten erhöht und die S-Konzentration deutlich tiefer. Dies zeigt, zusammen mit der deutlichen Ertragsreaktion auf die Sulfatdüngung, dass dieser Standort für Schwefelmangel anfällig ist. Sulfatschwefel half an diesem Standort, die teilweise unter den futterbaulichen Richtwerten liegende S-Konzentration des Futters zu verbessern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass an einem für Schwefelmangel anfälligen Standort mit leguminosenreicher Kunstwiese eine Düngung mit Sulfatschwefel den Ertrag und die Futterqualität verbessern kann, während elementarer Schwefel – zu Vegetationsbeginn ausgebracht – dafür weniger geeignet ist.

Ausblick

Die von den Betrieben mit den Hof- und Recyclingdüngern ausgebrachten Schwefelmengen sind sehr unterschiedlich (Tabelle 3). Daher ist vorgesehen spätestens für den Schlussbericht des Projektes auszuwerten, inwiefern die von den Betrieben mit Hof- und Recyclingdüngern ausgebrachten Schwefelmengen einen Einfluss auf den Ertragseffekt der Schwefel-Handelsdünger haben.

Im kommenden Projektjahr werden Versuche mit Schwefeldüngung im Raps und in Körnerleguminosen durchgeführt. Weiter ist ein Versuch mit flüssigem Schwefeldünger (Sulfix) im Getreide geplant. Ausserdem soll am Standort Rheinau, die Auswirkung der S-Düngung und der Ertragssteigerung in der Kunstwiese auf die Folgekultur Winterweizen angeschaut werden.

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 an die Praktikant*innen und Zivis von FiBL und Strickhof die bei der Feldarbeit und Probenaufbereitung tatkräftig mitgeholfen haben. Herzlichen Dank an Adolphe Munyangabe für das geduldige Einwiegen in Zinnkapseln für die CNS Messungen. 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 und dem Kanton ZH 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 10.2.2026)
- [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
- [15] AGFF (Hrsg.) (2021) Merkblatt 3: Bewertung von Wiesenfutter. Nährstoffgehalt für die Milch- und Fleischproduktion.
- [16] Galler, J. (2009) Wirtschaftsdünger Anfall, Lagerung, Verwertung, Umwelt Praxisratgeber, LK Salzburg (Hrsg.)

8. Anhang

Anhang 1: Felddaten 2025

Anhang 2: Kunstwiesen Mischungen

Anhang I: Felddaten 2025

	WW-D	WW-L	KW-R	KW-O	KW-E	RA-F
Ort	Diessbach b. Büren BE	Lommiswil SO	Rheinau ZH	Oberembrach ZH	Ellikon an der Thur ZH	Frick AG
Höhe über Meer (m)	464	564	390	635	408	348
Niederschlag Aug 24-Juli 25 (mm)	1099	1112	927	1083	880	924
Wetterstation	Studen	Riedholz	Uhwiesen	Lindau	Uesslingen	Frick
Vorkultur	Soja	Kunstwiese	Dinkel	Kunstwiese	Dinkel	Kunstwiese (vor Umbruch beweidet)
Hauptkultur	Winterweizen	Winterweizen	Kunstwiese	Kunstwiese	Kunstwiese	Raps
Sorte	Prim	Piznair, Runal	Mischung 3290 Sativa	Mischung 440	Mischung OH 33 L Nitra	Collector
Bodenbearbeitung	2.11.24 Pflug 2.11.24 Federzähne- gge	14.10.24 Pflug	8.8.24 Grubber 16.8.24 Grubber 27.8.24 Walzen	9.3.25 Wiesenegge 24.3.25 Walzen	Flachgrubber	27.8.24 Pflug 28.8.24 Kreiselegge
Saat	11.11.24 500 Körner/m ²	20.10.24	27.8.24 35 kg/ha	Ende August 2023	–	28.8.24 70 Körner/m ² 50 cm Reihenabstand
Untersaat	–	Einsaat 30.4.25	–	–	–	–

Unkrautregulierung	21.3.25 Striegel 11.4.25 Striegel	8.3.25 Striegel	–	–	–	5.9.24 Hacken
Düngung	11.3.25 Gärgülle, 35 m ³ /ha (112 kg N, 80 kg P ₂ O ₅) 15.4.25 Rindergülle, 20 m ³ /ha (46 kg N, 35 kg P ₂ O ₅)	6.3.25 Rindergülle 1:3, 30 m ³ /ha	14.8.24 Rottemist, 12 m ³ /ha	22.2.25 Rindergülle (und etwas Schweinegülle), 35 m ³ /ha (25 kg N) 12.5.25 Rindergülle verdünnt und Presswasser, 30 m ³ /ha (20 kg N)	07.03.25 Milchviehgülle 2:1, 30m ³ /ha 03.05.25 Milchviehgülle 2:1, 30m ³ /ha	26.8.24 Tiefstrohmist Milchvieh, 20 t/ha 06.03.25 Azopower S, 700 kg/ha (11% N, 2% Mg, 5% S) 10.03.25 Milchviehgülle, 2:1, 25 m ³ /ha
Ernte	12.7.25	12.7.25		30.4.25 1. Schnitt	Säuberungsschnitte ab Ende Sep 24 Heu: 29.4. / 10.6. / 20.7.25 Eingrasen: ab 27.8. und ab 20.10.25	Umbruch am 9. Mai aufgrund physiologischer Blütenwelke
Ertrag (dt/ha)	44 dt/ha	30 dt/ha	–	–	–	–

Anhang 2: Kunstwiesen Mischungen

KW_R, Rheinau ZH	KW_O, Oberembrach ZH	KW_E, Ellikon an der Thur ZH
Mischung Bio 3290 Kräuter von Sativa	Mischung UFA 440 Bio	Mischung OH 33 L Nitra
Trockenheitstolerant Geeignet für Eingrasen, Silage, Weide Nicht geeignet für Dürrfutter	Geeignet für Eingrasen, Silage, Weide und Dürrfutter	Luzernemischung 3-jährig Vorgeimpft mit Knöllchenbakterien Nitra
Zusammensetzung (g/a) 26 g Mattenklees 2n 18 g Weissklee 53 g Bastardraigras 35 g Engl. Raigras früh 35 g Engl. Raigras spät 21 g Timothee 28 g Knautgras 35 g Luzerne geimpft 53 g Wiesenrispe 25 g Wiesenkümmel/Schaf- garbe/Möhre/Spitzwegerich 23 g Gelbklee/Hornklee	Zusammensetzung (g/a) 10 g Rotklee 2n 10 g Weissklee kleinblättrig 20 g Weissklee grossblättrig 50 g Rotschwingel 50 g Engl. Raigras früh 50 g Engl. Raigras spät 100 g Wiesenrispe 30 g Timothee	Zusammensetzung (g/a) 20 g Mattenklees 2n 100 g Luzerne 20 g Weissklee grossblättrig 10 g Weissklee kleinblättrig 35 g Englisches Raigras früh 35 g Englisches Raigras spät 80 g Wiesenschwingel 35 g Knautgras spät 15 g Timothee

